



البلاستيك

رحلة البوليمر من المصدر إلى المصير

تأليف
مثنى عبدالله ذيب

حقوق النشر

البلاستيك

رحلة البوليمر من المصدر إلى المصير

تأليف

مثني عبدالله ذيب الصوصة المرعي

الطبعة الأولى

1447هـ / 2026م

جميع الحقوق محفوظة © 2026

لا يجوز إعادة إنتاج هذا الكتاب أو تخزينه في نظام استرجاع أو نقله بأي شكل أو بأي وسيلة، سواء إلكترونية أو ميكانيكية أو بالتصوير أو التسجيل أو غير ذلك، دون إذن كتابي مسبق من المؤلف، باستثناء ما تسمح به أنظمة حقوق النشر.

تم تسجيل هذا المصنف لدى الهيئة السعودية للملكية الفكرية.
كما تم فهرسة هذا الكتاب في مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر.

رقم الإيداع: 17105/1447

ردمك: 6-4322-06-603-978

الناشر:

مثني عبدالله ذيب الصوصة المرعي

مكان النشر:

المملكة العربية السعودية

جميع الأسماء التجارية والعلامات المذكورة في هذا الكتاب هي ملك لأصحابها، وقد وردت لأغراض علمية وتعليمية فقط.

إخلاء مسؤولية:

تم إعداد هذا الكتاب اعتماداً على خبرة عملية ومراجع علمية في مجال البوليمرات والصناعات البلاستيكية. وعلى الرغم من بذل أقصى درجات الدقة، فإن المؤلف لا يتحمل أي مسؤولية عن أي أضرار مباشرة أو غير مباشرة قد تنتج عن استخدام المعلومات الواردة فيه، ويوصى بالتحقق من ملاءمة التطبيقات وفقاً للظروف الصناعية الخاصة بكل حالة.



الهيئة السعودية للملكية الفكرية
Saudi Authority for Intellectual Property

شهادة تسجيل مصنف

تشهد الهيئة السعودية للملكية الفكرية بأن المصنف المذكور بياناته أدناه قد تم تسجيله في الهيئة بتاريخ 10/10/1447 هـ الموافق 29/03/2026 م وفقا للنسخة المودعة لديها.

رقم التسجيل: 26-12-74355259

عنوان المصنف: البلاستيك .. رحلة البوليمر من المصدر الى المصير

نوع المصنف: المصنفات المكتوبة

أسماء أصحاب الحق

مثنى عبدالله ذيب الصوصه المرعي

أسماء المؤلفين

مثنى عبدالله ذيب الصوصه المرعي

هذه الوثيقة صادرة من النظام ولا تحتاج إلى توقيع
- الهيئة السعودية للملكية الفكرية -

لا تعد هذه الشهادة تصريحاً باستغلال المصنف أو تداوله أو عرضه أو نشره

إجازة المطبوعة

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

تم تسجيل هذه المادة لصالح المؤلف/المعد أدناه بعد التعهد بالالتزام بجميع الشروط و الاحكام الخاصة بمحتوى المادة

اسم المادة	البلاستيك,, رحلة البوليمر من المصدر الى المصير
نوع المادة	كتاب ورقي
المحقق	
المترجمون	
المعدون	
المؤلفون	• مثنى عبدالله ذيب
رقم الطبعة	1
اسم الناشر باللغة العربية	مثنى عبدالله ذيب الصوصة المرعي
اسم الناشر باللغة الإنجليزية	mothana abdallah dib sousa mare
رقم التسجيل	202604018543043
تاريخ التسجيل	2026-04-01



البلاستيك

رحلة البوليمر من المصدر الى المصير

المؤلف

مثنى عبدالله ذيب

الأهداء

إلى والديّ رحمهما الله،
جعلت هذا العمل صدقةً جاريةً عن رُوحكما الطاهرة،
تقديرًا لما غرستمه من قيمٍ امتد أثرها في كل ما أكتب وأعمل.
وإلى عائلتي، الذين كانوا سندًا لي في هذه الرحلة،
أهدي هذا العمل.

مقدمة المؤلف

لم تبدأ علاقتي بالبلاستيك من صفحات الكتب أو قاعات الدراسة، بل بدأت من أرض المصنع. هناك، بين صوت الآلات، وحرارة القوالب، وحركة المصهور الخارج من القالب، بدأت تتشكل الأسئلة الأولى: لماذا تتصرف هذه المادة بهذه الطريقة؟ ولماذا يستقر خط الإنتاج أحياناً ويضطرب أحياناً أخرى، رغم أن ظروف التشغيل تبدو متشابهة؟ وكيف يمكن لتغيير بسيط في المادة، أو في درجة الحرارة، أو في سرعة السحب، أن يغيّر سلوك العملية بالكامل؟

هذه الأسئلة، التي تنطلق غالباً من التجربة العملية، تقود في حقيقتها إلى عالم أعمق بكثير من مجرد تشغيل آلة أو إنتاج منتج. فهي تفتح الباب لفهم البنية الجزيئية للبوليمرات، وسلوك السلاسل الطويلة تحت تأثير الحرارة والقص، والطريقة التي تتحول بها هذه البنية المجهرية إلى خواص ميكانيكية وحرارية تظهر في المنتج النهائي.

ومع مرور الوقت، أصبح واضحاً أن هناك فجوة حقيقية بين عالمين؛ من جهة، كتب أكاديمية تتناول البوليمرات بلغة كيميائية متخصصة قد تبدو بعيدة عن واقع المصنع، ومن جهة أخرى واقع صناعي يعتمد بدرجة كبيرة على الخبرة والتجربة المباشرة، دون ارتباط واضح بالتفسير العلمي لما يحدث داخل المادة. ومن هذه الفجوة نشأت فكرة هذا الكتاب.

يحاول هذا الكتاب أن يردم هذه الفجوة، من خلال تقديم فهم علمي للبوليمرات من منظور صناعي واقعي. فالمقصود ليس عرض مادة أكاديمية مجردة، بل بناء تصور متكامل يمكّن القارئ من فهم العلاقة بين البنية الجزيئية للبوليمر، وسلوكه أثناء التصنيع، والخواص التي تظهر في المنتج النهائي.

ولهذا، يسير الكتاب في مسار متدرج يبدأ من مصادر البوليمرات واللقيم، مروراً بالمونومرات وعمليات البلمرة، ثم ينتقل إلى البنية المجهرية وسلوك المصهور أثناء الجريان، وصولاً إلى عمليات التصنيع المختلفة وما يرتبط بها من ظواهر صناعية ومشكلات تشغيلية. وفي كل مرحلة، يُحاول الربط بين ما يحدث داخل الجزيء وما يظهر على أرض المصنع، بوصفهما وجهين لحقيقة واحدة.

هذا الكتاب موجّه لكل من يسعى إلى فهم أعمق لصناعة البلاستيك؛ فهو يفيد الطالب الذي يريد رؤية التطبيق العملي لما يدرسه، كما يفيد المهندس والمشغل الذي يسعى إلى

تفسير الظواهر التي يواجهها يوميًا داخل خطوط الإنتاج، ويمكن أن يكون مرجعًا لكل من يعمل في مجالات تصنيع المواد البوليمرية أو التعامل معها في التطبيقات الصناعية المختلفة.

ومع التعمق في دراسة هذه المواد، يكتشف الإنسان أن عالم البوليمرات، على بساطة مظهره، يقوم على نظام بالغ الدقة. فالبوليمر، وهو في ظاهره سلسلة جزيئية لا تُرى بالعين المجردة، يحمل في بنيته منظومة متكاملة من الخصائص والسلوكيات التي تحدد كيفية استجابته للحرارة والضغط والقص، وكيف يتحول إلى مادة تؤدي وظائف متعددة في حياتنا اليومية.

ومع كل تقدم في الفهم العلمي، يتبين أن ما نكتشفه في المادة ليس خلقًا جديدًا للخواص، بل كشفًا تدريجيًا لما أودعه الله سبحانه وتعالى في الكون من قوانين ونظم. فالخواص الفيزيائية والكيميائية موجودة في بنية المادة منذ البداية، وما يفعله الإنسان عبر البحث والتجربة ليس إلا سعيًا لفهم هذه القوانين وتسخيرها.

ومن هنا، يدرك الباحث أن ما يقدمه هذا الكتاب، على امتداده، ليس إلا جزءًا يسيرًا من علم واسع لا يزال الإنسان يكتشفه مرحلة بعد مرحلة. وقد عبر القرآن الكريم عن هذا المعنى بقوله تعالى:

"سنريهم آياتنا في الآفاق وفي أنفسهم حتى يتبين لهم أنه الحق"
صدق الله العظيم.

فكل اكتشاف علمي، وكل فهم جديد لقوانين الطبيعة، هو في جوهره كشف لشيء من هذه الآيات التي أودعها الخالق في الكون، والتي يتعلم الإنسان منها بقدر ما يُفتح له من العلم والفهم.

وإذا كان لهذا الكتاب من قيمة، فهي أنه محاولة لتقريب فهم هذه الصناعة، وربط المعرفة العلمية بالواقع الصناعي. وأمل أن يساعد القارئ على النظر إلى البوليمرات لا بوصفها مواد تُستخدم في المنتجات اليومية فحسب، بل كنظام علمي وصناعي متكامل يجمع بين الكيمياء والفيزياء والهندسة والخبرة العملية.

يمثل هذا الكتاب محاولة لتجميع هذا الفهم في صورة متكاملة، إلا أن رحلة المعرفة في عالم البوليمرات تظل مستمرة، تتوسع مع كل تجربة صناعية جديدة، وكل مادة يتم تطويرها، وكل فهم أعمق يتكشف للإنسان في هذا المجال المتجدد.

منهج التعامل مع هذا الكتاب

هذا الكتاب لا يُقدّم بوصفه مادة تُقرأ قراءة خطّية تقليدية، بل بوصفه مرجعًا تحليليًا يُستخدم لفهم سلوك البوليمر داخل المنظومة الصناعية، وربط ما يحدث على المستوى الجزيئي بما يظهر فعليًا في المنتج النهائي.

تقوم بنية الكتاب على مسار متكامل يبدأ من المصدر والقيم، ويمر بالمونومرات والبلورة، ثم ينتقل إلى البنية الجزيئية وما يرتبط بها من خواص حرارية وريولوجية، قبل أن يصل إلى التركيب والإضافات، ثم إلى عمليات التشكيل المختلفة، وانتهاءً بالاختبارات وتحليل المشكلات وإعادة التدوير. هذا التسلسل لا يُقصد به فرض قراءة متتابعة بقدر ما يُراد به بناء إطار ذهني متكامل يمكن الرجوع إلى أجزائه عند الحاجة.

لفهم هذا الكتاب بالشكل الصحيح، يجب التعامل معه على ثلاثة مستويات مترابطة:

المستوى الأول: فهم المادة

ويشمل البنية الجزيئية، درجة التبلور، الوزن الجزيئي وتوزيعه، وسلوك المصهور. هذا المستوى هو الأساس الذي تُبنى عليه جميع التفسيرات اللاحقة، إذ لا يمكن تحليل أي ظاهرة تشغيلية دون فهم أصلها البنيوي.

المستوى الثاني: فهم السلوك أثناء التصنيع

حيث تُقرأ عمليات مثل البثق، والحقن، والنفخ، والقولبة الدورانية، بوصفها ترجمة مباشرة لسلوك المصهور تحت تأثير الجريان، والقص، والتبريد، وتثبيت الأبعاد. في هذا السياق، لا تُفهم الماكينة كعنصر مستقل، بل كبيئة تتحكم في تاريخ المادة الحراري والانسيابي.

المستوى الثالث: فهم الاختبارات واتخاذ القرار

لا تُعرض الاختبارات في هذا الكتاب كقيم رقمية منفصلة، بل كأدوات لفهم المادة واتخاذ القرار الصناعي. فاختبارات مثل مؤشر تدفق المصهور (MFI)، والتحليل الحراري (DSC)، والتحليل الطيفي (FTIR)، والاختبارات الميكانيكية، لا تُستخدم لتوصيف المادة فقط، بل لربط نتائجها بسلوك التشغيل، واستقرار العملية، وجودة المنتج النهائي.

في الفصول التطبيقية وحالات الدراسة، ينبغي قراءة كل حالة بوصفها نتيجة لسلسلة مترابطة من الأسباب، تبدأ من التركيب أو البنية، وتمر بظروف التشغيل، وتظهر في صورة عيب أو سلوك غير مرغوب. ومن هنا، يُنصح دائمًا بالرجوع إلى فصول الخواص والاختبارات لفهم الجذر الحقيقي للمشكلة، بدل الاكتفاء بوصفها الظاهري.

يمكن استخدام هذا الكتاب بطريقتين أساسيتين:
قراءة تأسيسية تهدف إلى بناء فهم شامل للمنظومة،
وقراءة مرجعية تُستخدم أثناء العمل الصناعي لتحليل مشكلة، أو اتخاذ قرار، أو تقييم
مادة أو عملية.

وبهذا المعنى، فإن هذا الكتاب لا يهدف إلى تقديم معلومات معزولة، بل إلى بناء طريقة
تفكير صناعية، تربط بين العلم والتطبيق، وتُعيد تفسير ما يحدث داخل المصنع على
أساس علمي قابل للفهم والتحليل.

المؤلف

الفهرس

الجزء الأول

الباب الأول : مدخل إلى عالم البوليمرات وأهميتها الصناعية

1.1 الفصل الأول البوليمرات البلاستيكية (ثيرموبلاستيك وثيرموست)

أهم البوليمرات التجارية أو السلعية (Commodity Polymers)

أهم البوليمرات الهندسية (Engineering Polymers)

1.2 الفصل الثاني المصادر الطبيعية واللقيم والتحويل الأولي

النفط الخام

الغاز

الفحم

مفهوم اللقيم (Feedstock)

1.3 الفصل الثالث : المونومرات والبلمرة

1.3.1 المونومرات: اللبنة الأولى للبوليمر

1.3.2 أنواع البلمرة من حيث المبدأ الكيميائي

بلمرة الإضافة

بلمرة التكثيف

1.3.3 مفهوم الوزن الجزيئي وما يحدث على المستوى الجزيئي

1.3.4 التفرع الجزيئي والتاكتيسية

العلاقة بين التفرع والتاكتيسية والتبلور

أهمية هذه المفاهيم في الصناعة

1.3.5 البنية المجهرية للبوليمرات وأثرهما على خواص البلاستيك

البوليمرات المتبلورة وغير المتبلورة

مفهوم درجة التبلور

تأثير التبلور على الشفافية

تأثير التبلور على الانكماش

تأثير التبلور على الخواص الميكانيكية

تأثير ظروف التصنيع

أهمية فهم البنية المجهرية في الصناعة

1.4 الفصل الرابع الخصائص العامة للمواد البلاستيكية

العزل الكهربائي

العزل الحراري

الكثافة المنخفضة وخفة الوزن

المقاومة الكيميائية

السلوك الحراري العام

المرونة وقابلية التشكل

الخصائص كنتاج للبنية وليس كمصفات مستقلة

1.5 الفصل الخامس ريولوجيا مصهور البوليمرات وسلوك الجريان

اللزوجة في مصهور البوليمرات

معدل القص وتأثيره على اللزوجة

قوة المصهور

تأثير درجة الحرارة

أثر ريولوجيا المصهور على عمليات التصنيع

1.6 الفصل السادس العلاقة بين الخصائص والبنية والتصنيع

البنية الجزيئية للبوليمر

التصنيع وتأثيره على البنية

الخواص النهائية للمنتج

أمثلة صناعية

أهمية هذا المفهوم في تحليل المشكلات الصناعي

الباب الثاني : الموالي في صناعة البلاستيك

- 2.1 كربونات الكالسيوم CaCo_3
- 2.2 التالك
- 2.3 الميكا (Mica)
- 2.4 الويلاستونيت (Wollastonite)
- 2.5 كبريتات الباريوم (Barium Sulfate)
- 2.6 السيليكا كمالى وظيفي عالي الحساسية (Silica)
- 2.7 الحلول الاقتصادية البديلة للموالى ودور الإضافات

الباب الثالث الإضافات (Additives Systems)

- 3.1 مقدمة إضافات اللون والمظهر Color & Optical
- 3.2 اللون وأنظمة التلوين في صناعة البلاستيك

الأصباغ Pigments

الألوان الذائبة Dyes

استرباتش اللون (Color Masterbatch)

الهجرة Migration النزف Bleeding والفرق بينهما

- 3.3 إضافات دعم اللون وجودة المظهر Color Performance

Dispersants & Wetting

مساعداات التشيت والبلل

Agents

Polymer Waxes – PE PP Functional

الشمعيات البوليمرية

Internal & External

المزئقات الداخلية والخارجية

Lubricants

Non-Fluorinated Processing

مساعداات تشغيل غير فلورية

Aids

Fluorinated Processing	مساعداً التشغيل الفلورية
	Aids
Rheology	معدلات الريولوجيا
	Modifiers
Melt Strength	معدلات قوة المصهور
	Modifiers
Stabilizers & Protection	3.4 إضافات الثبات والحماية من التدهور
Process Stabilizers &	مثبتات المعالجة ومضادات الأكسدة أثناء التصنيع
	Antioxidants
UV Stabilizers & Light	مثبتات الأشعة فوق البنفسجية ومقاومة الضوء
	Stabilizers
Heat Stabilizers / Thermal Stabilizers	مثبتات الحرارة ومنع التدهور الحراري
Surface & Functional Control	3.5 إضافات السطح والتحكم الوظيفي
Block	مضافات الانزلاق
	Additives
Anti-block Additives	مضافات منع الالتصاق
Antistatic Additives	المضافات المضادة للكهرباء الساكنة
Corona Treatment & Surface	المعالجة السطحية الفيزيائية
	Activation
Odor Control & Deodorizing	3.6 التحكم في الرطوبة والمواد المتطايرة
	3.6.1 التحكم الرائحة في البلاستيك
Odor Absorbers (Physical Adsorbents)	إضافات امتصاص الرائحة
Reactive Deodorizing Additives	مزيلات الرائحة التفاعلية
Odor Prevention Systems	أنظمة منع تولد الرائحة
Masking Agents	العطور الصناعية
Migration & Odor Control Systems	3.6.2 التحكم في الهجرة والرائحة
	أولاً الأساس العلمي المشترك بين الهجرة والرائحة

ثانياً أنواع الهجرة وأنواع الرائحة

ثالثاً العوامل التي تزيد الهجرة والرائحة معاً

Migration + Odor

رابعاً أنظمة التحكم المدمجة

3.6.3 الإضافات البصرية Optical & Visual Control Additives

عوامل التعتيم والتحكم في العكورة Opacifying & Controlled Haze Systems

محسّنات البياض والتوهج البصري Optical Brighteners (OBAs)

إضافات تقليل العيوب البصرية الدقيقة Anti-Gel & Defect Masking Additives

إضافات التحكم في اللعان والمظهر السطحي Gloss & Matte Control Additives

3.7 فصل التحكم في الرطوبة والمواد المتطايرة Moisture & Desiccant Systems

تفكيك الالتباس الصناعي لماذا لا يحل Vacuum Venting مشكلة الرطوبة؟

التركيبية الكيميائية لأنظمة التحكم في الرطوبة

آلية العمل داخل المصهور من منظور كيميائي

حدود الاستخدام ولماذا تفشل أحياناً

الباب الرابع : إضافات معالجة العيوب والاضطرابات Melt Defect & Instability

4.1 المقصود باضطرابات المصهور ؟

إضافات منع الجِل Anti-Gel Additives

إضافات منع العيون السمكية Anti-Fish-Eye Additives

إضافات إزالة الغازات Degassing Aids

أنظمة التفريغ والفاكيوم Vacuum Venting Additives / System

4.2 البوليمرات الوظيفية وأنظمة التوافق البنيوي Functional & Compatibilization

تعريف البوليمرات الوظيفية المتوافقة

التركيبية الكيميائية لأنظمة التوافق

آلية العمل البنيوي

ماذا تعالج هذه الأنظمة فعليًا؟

Flame Retardant & Fire Protection

4.3 إضافات مقاومة الاشتعال والحماية من اللهب

أولاً: الأنظمة غير العضوية

ثانيًا: الأنظمة الفوسفورية

ثالثًا : الأنظمة النيتروجينية والمركبة

Antimicrobial & Antifungal

4. 4 الإضافات المضادة للميكروبات والفطريات

ما المقصود بالنشاط الميكروبي في البلاستيك؟

التصنيف الكيميائي للإضافات المضادة للميكروبات

الأنظمة العضوية والغير عضوية

الأنظمة السطحية مقابل الحجمية

Impact Modifiers / Anti-Shock

4.5 إضافات مقاومة الصدم وامتصاص الطاقة

ما المقصود بسلوك الصدم في البوليمرات؟

التصنيف المنهجي لإضافات مقاومة الصدم

Elastomeric Impact

أولاً: معدلات الصدم المطاطية

Modifiers

Core-Shell

ثانيًا: معدلات الصدم الهيكلية

Systems

Compatibilized Impact

ثالثًا: أنظمة التوافق الصدمي

Systems

Anti-Fog

4.6 إضافات منع التكاثف والضبابية السطحية

ما المقصود بظاهرة الضباب

التركيبية الكيميائية

آلية العمل السطحية

التداخل مع نظام الإضافات مباشرة

Anti-Foam & Defoaming

4.7 إضافات منع الرغوة والتحكم في الفقاعات

ما المقصود بالرغوة في الأنظمة البوليمرية؟

Anti-Foam	التركيبية الكيميائية لإضافات
Silicone-Based Defoamers	أنظمة سيليكونية
Non-Silicone Defoamers	أنظمة غير سيليكونية
Anti-Additives	الجدول الختامي الجامع لإضافات

الجزء الثاني

5. الباب الخامس فلسفة الاختبار في البوليمرات : من توصيف المادة إلى اعتماد الأداء

The philosophy of testing in polymers: from material characterization to performance evaluation

مقدمة المختبر و فلسفة ومنهجية الاختبار في صناعة البلاستيك

5.1 الفصل الأول مقدمة طرق اختبار البوليمرات وتفسير نتائجها

أولاً: فحوصات مرحلة الاستخراج والمعالجة الأولية

ثانياً فحوصات اللقيم البتروكيميائي

ثالثاً فحوصات المونومر قبل البلمرة (Monomer Quality Control)

رابعا فحوصات أثناء البلمرة (التحكم في العملية)

خامساً فحوصات الحبيبات او البوليمر (اعتماد المنتج التجاري)

5.2 الفصل الثاني الاختبارات

5.2.1 اختبارات توصيف المادة قبل التصنيع النهائي Material Characterization

الاختبارات وتفسير نتائجها

5.2.2 اختبار الفحص البصري للبوليمر Visual Inspection of Raw Polymer

إجراءات الفحص البصري

حدود الفحص البصري والربط بما بعده

5.2.3 اختبار السيولة (MFI / MFR)

مبدأ القياس وتفسير النتائج

تفسير نتائج اختبار السيول

حدود الاختبار وأخطاء شائعة

5.2.4 اختبار الكثافة (Density)

التبلور

Crystallinity

الكثافة

Material Density

الكثافة الظاهرية

Bulk Density

القرار الناتج عن اختبار نقطة الانصهار

5.3 الفصل الثالث الاختبارات الحرارية وتقييم السلوك

الاختبارات الحرارية وتقييم السلوك

Differential Scanning Calorimetry (DSC)

5.3.1 اختبار التحليل الحراري التفاضلي

الانتقالات الحرارية التي يكشف عنها DSC

درجة الانتقال الزجاجي (Tg)

Tm Range

الانصهار ونطاقه الحراري

Crystallization

التبلور أثناء التبريد

(DSC) والتحليل الحراري الوزني (TGA)

التحليل الحراري التفاضلي

Vicat Softening Temperature (VST)

5.3.2 اختبار المقارنة المنهجية

Heat Deflection Temperature (HDT)

5.3.3 اختبار التشوه الحراري

Thermal Stability Test

5.4 الفصل الرابع اختبار الثبات الحراري

مفهوم الثبات الحراري في البوليمرات

موقع اختبار الثبات الحراري ضمن منظومة الاختبارات

الفرق بين الثبات الحراري وبداية التحلل الحراري

Thermal Aging Test

5.4.1 اختبار الشيخوخة الحرارية

مفهوم الشيخوخة الحرارية في البوليمرات

Long-Term Thermal Stability

5.4.2 اختبار الاستقرار الحراري طويل الأمد

المفهوم العام للاستقرار الحراري طويل الأمد

الاختبارات الحرارية وتقييم السلوك الحراري للبوليمرات .

الجزء الثالث

الباب السادس اختبارات السلوك

6.1 الفصل الأول اختبارات السلوك والأداء الميكانيكي للمنتج

Tensile Test

6.1.1 اختبار الشد

فلسفة اختبار الشد

القيم المستخرجة من اختبار الشد

ربط اختبار الشد بما قبله وبعده

القرار الناتج عن اختبار الشد

Impact Test

6.1.2 اختبار الصدم

فلسفة اختبار الصدم

Charpy Impact Test

اختبار شاربي

Izod Impact Test

اختبار إيزود

Notched Impact

اختبار الصدم المشقوق

Unnotched Impact

اختبار الصدم غير المشقوق

Compression Test

6.1.3 اختبار الضغط

فلسفة اختبار الضغط في البلاستيك

ربط اختبار الضغط بالاختبارات السابقة واللاحقة

القرار الناتج عن اختبار الضغط

6.2 الفصل الثاني اختبارات السلوك الزمني والبُعدي للمنتج البلاستيكي

Shrinkage Tests

6.2.1 اختبارات الانكماش

فلسفة اختبار الإنكماش وأهميته في البلاستيك

أنواع الإنكماش

منهجية اختبار الانكماش

Dimensional Stability

6.2.2 اختبارات الاستقرار البُعدي

فلسفة اختبار الاستقرار البُعدي في البلاستيك

العلاقة بين الانكماش والاستقرار البُعدي

العوامل المؤثرة في الاستقرار البُعدي

القرار الناتج عن اختبار الاستقرار البُعدي

Creep Test

6.2.3 اختبار الزحف

مفهوم الزحف في البوليمرات

فلسفة اختبار الزحف

مراحل الزحف

العوامل المؤثرة في الزحف

Fatigue Test

6.2.4 اختبار التعب

مفهوم التعب في البوليمرات

فلسفة اختبار التعب

العوامل المؤثرة في مقاومة التعب

ربط اختبار التعب بالزحف والاختبارات السابقة

Stress Relaxation Test

6.2.5 اختبار الاسترخاء

مفهوم الاسترخاء في البوليمرات

فلسفة اختبار الاسترخاء

العوامل المؤثرة في الاسترخاء

القرار الناتج عن اختبار الاسترخاء

ربط اختبار الإسترخاء والاختبارات السابقة

(Testing & Evaluation) الباب السابع اختبارات الإضافات

7.1 الفصل الأول اختبارات المواد الخام للموالى- من المصدر إلى المنتج النهائي

الاختبار (1) توزيع الحجم الحبيبي للمالئات	Particle Size Distribution – PSD
الاختبار (2) الرطوبة والمواد المتطايرة في المالئات	Moisture & Volatile Content
الاختبار (3) التركيب الكيميائي والنقاء للمالئات	Chemical Composition & Purity
الاختبار (4) اللون والبياض والانحراف اللوني للمالئات	Color, Whiteness & Difference
الاختبار (5) الشوائب الخشنة والجسيمات الغريبة في المالئات	Oversize Particles & Foreign
الاختبار (6) المعالجة السطحية للمالئات	Surface Treatment / Coating & Consistency
الاختبار (7) الكثافة والوزن النوعي للمالى	Density / Specific Gravity
الكثافة الحقيقية للمعدن	True Density
الكثافة الظاهرية للمسحوق	Bulk Density
الوزن النوعي	Specific Gravity
الاختبار (8) اختبار الرماد لتثبيت نسبة المالى الفعلية	Ash Content – Filler Verification
الاختبار (9) اختبار التشنت داخل البوليمر	Dispersion Test
الاختبار (10) مؤشر تدفق الذوبان للمركب بعد إضافة المالى	MFI/MFR
الاختبار (11) الغازات والانبعاثات والرائحة أثناء المركب	
الاختبار (12) اختبار الفلتره وانسداد الشبك	Filtration / Screen Pack Clogging Behavior

7.2 الفصل الثاني اختبارات المنتج النهائي بعد استخدام موالى

اختبارات الشد والاستطالة ومقاومة الكسر	Tensile Properties
مقاومة التمزق للأفلام	Tear Resistance
مقاومة الثقب والصدم حسب نوع المنتج	Impact / Dart Drop / Puncture
العكورة والشفافية واللمعان عند الحاجة	Haze / Clarity / Gloss

Dimensional Stability

ثبات الأبعاد والانكماش أو التمدد في بعض التطبيقات

7.3 الفصل الثالث اختبار قابلية التشغيل ونافاذة المعالجة Processing & Run-ability

فكرة الاختبار

نتائج هذا الاختبار

القرار النهائي

الباب الثامن اختبارات الأصباغ خطوة بخطوة

8.1 اختبارات مصنع إنتاج الأصباغ والألوان الذاتية Pigment/Dye Manufacturer

Identity & Composition

اختبارات الهوية والتركيب

Color Performance

اختبارات الأداء اللوني

Particle & Dispersion

الحجم الحبيبي والتكتل والتشتت

Stability & Durability

اختبارات الثبات

8.2 اختبار مقاومة المواد الكيميائية

Immersion test

اختبار الغمر

Wipe / Rub Spot

اختبار المسح/التلامس السطحي

Test

Migration Testing

8.3 اختبار الهجرة

الهدف من الإختبار

أنواع الهجرة

Food Simulants

اختبارات التطبيقات الغذائية

Pharma Suitability

اختبارات التطبيقات الدوائية

8.4 اختبارات المصنع التحويلي للأصباغ

Incoming QC

اختبارات الاستلام

In-Process Monitoring

اختبارات أثناء التشغيل

Final Product Tests

اختبارات المنتج النهائي

Customer / Regulatory Approval

اختبارات الاعتماد الخاصة

الباب التاسع اختبارات مساعدات التشغيل

9.1 الفصل الأول اختبارات مساعدات التشغيل الفلورية

9.1.1 اختبارات مصنع إنتاج الإضافة Additive Manufacturer

اختبار الهوية والتركيب

اختبار الرطوبة والامتطير

9.1.2 اختبارات مصنع الماسترباتش Masterbatch Plant

اختبار الاستلام

اختبار التشتت داخل الحامل

اختبار الفلتر وارتفاع الضغط

اختبار الثبات الحراري أثناء تصنيع الماسترباتش

9.1.3 اختبارات المصنع التحويلي Converter / End Product

اختبار تشغيل تجريبي (Trial Run)

اختبار العيوب السطحية

اختبار تراكبات القالب

اختبار COF والطباعة واللحام حسب المنتج

9.1.4 قرار الاعتماد النهائي

9.2 الفصل الثاني اختبارات مصنع إنتاج الإضافة (Additive Manufacturer)

أولاً: اختبارات مصنع إنتاج الإضافة (Additive Manufacturer)

ثانياً: اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

ثالثاً: اختبارات المصنع التحويلي (Converter / Production)

رابعاً: اختبارات اعتماد خاصة

9.2.1 اختبارات مصنع إنتاج المزلق (Additive Manufacturer)

اختبار الهوية والتركيب

اختبار نقطة الانصهار/الخواص الحرارية (حسب النوع)

9.2.2 اختبارات مصنع الماسترباتش

اختبار الاستلام

اختبار التشنت داخل الحامل

اختبار الفترة وارتفاع الضغط

9.2.3 اختبارات المصنع التحويلي (Converter Tests)

اختبار ضغط الذوبان وعزم المحرك

اختبار سطح المنتج وظهور الانفصال (Blooming / Surface Slip)

اختبار معامل الاحتكاك COF للأفلام.

9.3 الفصل الثالث اختبارات الشمعيات ومكان كل اختبار

9.3.1 اختبارات مصنع إنتاج الشمع (Wax Manufacturer)

اختبار الهوية والتركيب

اختبار نقطة الانصهار والخواص الحرارية

اختبار اللزوجة/السلوك الشمعي

9.3.2 اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

اختبار الاستلام

اختبار التشنت داخل الماسترباتش

اختبار الفترة وارتفاع الضغط

اختبار ثبات الماسترباتش أثناء التشغيل

9.3.3 اختبارات المصنع التحويلي (Converter / End Product)

اختبار COF ومعامل الانزلاق (لأفلام)

اختبار اللحام والطباعة

اختبار السطح والانفصال (Blooming)

اختبار الخواص الميكانيكية

9.3.4 اختبارات اعتماد خاصة

قرار الاعتماد النهائي للشمعيات

9.4 الفصل الرابع اختبارات مساعدات التشييت ومكان كل اختبار

9.4.1 اختبارات مصنع إنتاج مساعد التشييت (Additive Manufacturer)

اختبار الهوية والتركيب

اختبار الخواص الحرارية

9.4.2 اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

اختبار التشييت (Dispersion Test)

اختبار الفترة وارتفاع الضغط

اختبار العيوب البصرية (Specks / Streaks)

اختبار ثبات المنتج بين الدفعات

9.4.3 اختبارات المصنع التحويلي (Converter / End Product)

اختبار المنتج النهائي (Surface Quality)

اختبار الشفافية والعكورة (للأفلام)

اختبار COF والطباعة واللحام

9.4.4 اختبارات اعتماد خاصة

القرار النهائي لاعتماد مساعد التشييت

9.5 الفصل الخامس اختبارات مضادات الأكسدة ومكان كل اختبار

9.5.1 اختبارات مصنع إنتاج مضاد الأكسدة (Additive Manufacturer)

اختبار الهوية والتركيب والنقاء

اختبار الخواص الحرارية والثبات

9.5.2 اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

اختبار الهوية والتركيب

اختبار الثبات الحراري أثناء التصنيع

اختبار اللون والرائحة لعينة قياسية

9.5.3 اختبارات المصنع التحويلي (Converter / End Product Factory)

اختبار تغير اللون أثناء التشغيل (Color Stability During Processing)

اختبار مؤشر الأكسدة (OIT – Oxidation Induction Time)

اختبار الرائحة والمواد المتطايرة (Odor / VOC)

اختبار الخواص الميكانيكية بعد المعالجة

اختبار ثبات اللحام في الأفلام (Seal Stability)

في المنتجات الغذائية/الدوائية

9.5.4 قرار الاعتماد النهائي لمثبتات المعالجة

9.6 الفصل السادس اختبارات إزالة الروائح ومكان كل اختبار

9.6.1 اختبارات مصنع إنتاج الإضافة (Additive Manufacturer)

اختبار الهوية والتركيب

اختبار قدرة الامتصاص/الفعالية المبدئية

9.6.2 اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

اختبار الهوية والتركيب

اختبار التشتت داخل الحامل

اختبار الرائحة لعينة قياسية

9.6.3 اختبارات المصنع التحويلي (Converter / Recycling Plant)

اختبار الرائحة الحسي (Sensory Odor Test)

اختبار الرائحة بعد التخزين (Aging Odor Test)

اختبار الرائحة عند التسخين (Hot Odor Test)

اختبار المتطايرات VOC

اختبار تأثير الإضافة على اللون والشفافية والخواص

9.6.4 اختبارات اعتماد خاصة

9.7 الفصل السابع قرار الاعتماد النهائي لإضافات إزالة الرطوبة

9.7.1 اختبارات مصنع إنتاج الإضافة (Additive Manufacturer)

اختبار الهوية والتركيب

اختبار قدرة الامتصاص/الفعالية المبدئية

9.7.2 اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

اختبار التشتت داخل الحامل

اختبار الفلتر وارتفاع الضغط

9.7.3 اختبارات المصنع التحويلي (Converter / Recycling Plant)

اختبار الرطوبة قبل التشغيل (Moisture Content)

اختبار الفقاعات والسطح أثناء الإنتاج

اختبار ثبات الضغط والعزم

اختبار الخواص الميكانيكية عند الحاجة

اختبار المنتج بعد التخزين

9.7.4 اختبارات اعتماد خاصة

9.8 الفصل الثامن اختبارات اعتماد خاصة

9.8.1 اختبارات مصنع إنتاج محسن الصدم (Additive Manufacturer Tests)

اختبار الهوية والتركيب

اختبار الخواص الحرارية (Melting/Softening Range)

مؤشر التدفق/اللزوجة

9.8.2 اختبارات مصنع المركب أو الماسترباتش (Compounding / Masterbatch)

اختبار الاستلام (Incoming QC)

اختبار التجانس/التوزيع (Dispersion / Morphology Check)

اختبار الثبات أثناء التشغيل (Melt Pressure / Torque)

اختبار الخواص الأساسية للكومباوند (MFI / Density)

9.8.3 اختبارات المصنع التحويلي (Converter Tests)

اختبار الصدم القياسي (Impact Test)

اختبار الشد والاستطالة (Tensile & Elongation)

اختبار الصلابة/المرونة (Flexural Modulus / Stiffness)

اختبار الأداء عند الحرارة المنخفضة (Low-Temp Impact)

اختبار اللحام/الشقوق (للأفلام أو اللحامات)

9.8.4 اختبارات اعتماد المنتج النهائي (Application / Regulatory)

اختبار الهوية والتركيب

مؤشر التدفق (MFI)

اختبار الاستلام (Incoming QC)

اختبار التجانس البنيوي (Morphology / Dispersion)

اختبار ثبات التشغيل (Melt Pressure / Torque)

اختبار مؤشر التدفق للخلطة (MFI)

اختبار الشد والاستطالة (Tensile & Elongation)

اختبار الصدم (Impact)

اختبار الانحناء/الصلابة (Flexural)

اختبار اللحام أو مناطق الضعف (للأفلام)

اختبار ثبات الخواص بين الدفعات

الباب العاشر الشكل التجاري للبوليمر وأنظمة التغذية

10.1 الحبيبات الشكل القياسي للصناعة الحرارية

10.2 المساحيق متى تكون الخيار الصحيح ؟

10.3 أنظمة التخزين الصناعية للبوليمرات

الصوامع (Silos)

التخزين داخل المستودعات (Indoor Storage)

محطات التخزين الوسيطة (Day Bins / Machine Hoppers)

التدفق القمعي (Funnel Flow)

10.4 التخزين والمناولة الصناعية للبوليمرات

أشكال توريد البوليمرات وعلاقتها بالمناولة

أنظمة التخزين الصناعية

التخزين داخل المستودعات

تخزين الخلطات الجاهزة للتشغيل

الباب الحادي عشر التحكم في الرطوبة وسلوك المصهور في البوليمرات الحرارية

in thermoplastic polymers melt behavior AND moisture

11.1 الرطوبة داخل العملية

كيف تظهر الرطوبة داخل العملية؟

المواد الحساسة للرطوبة والمواد غير الحساسة

مصدر الرطوبة الحقيقي

متى يكون التجفيف ضرورياً؟

هندسة التجفيف

أنواع المجففات

أخطاء تشغيلية شائعة

11.2 أنظمة التغذية والقياس

أنظمة التغذية الرئيسية

مشاكل تشغيلية مرتبطة بالتغذية

نقطة تشغيلية حاسمة

11.3 منطقة التغذية داخل البرغي

بداية الرحلة: سقوط البوليمر من القادوس

منطقة الانضغاط والانصهار

تهينة المصهور قبل التشكيل

زمن الإقامة وتاريخه الحراري

متى نستخدم هذه المنظومة؟

آلية تكون المصهور داخل البرغي Melt Film Formation

توازن الانصهار (Melting Balance)

منطقة القياس (Metering Zone)

تهينة المصهور قبل التشكيل

زمن الإقامة وتاريخه الحراري

متى نستخدم هذه المنظومة ؟

الخلاصة

الباب الثاني عشر التطبيقات الصناعية للبوليمرات

12.1 البثق للمنتجات الصلبة Extrusion

الفرق الجوهرى بين البثق للمنتجات الصلبة وباقي عمليات التشكيل

المسار العام لخط البثق

نقطة تثبيت الأبعاد

التوازن الحاكم للعملية

دور وحدة السحب

التبريد كأداة تثبيت هندسي

المعايرة (Calibration)

نافذة التشغيل

خصوصية خطوط المونوفيلامنت

الخلاصة

12.2 بثق الأنابيب (Pipe Extrusion)

مكونات منظومة تشكيل الأنبوب

الـ Pipe Die (Annular Die)

المعايرة

دور الـ Vacuum

سماعة الجدار

التمركز (Concentrically)

حدة السحب (Haul-off)

نافذة التشغيل في بثق الأنابيب

نقطة تثبيت الأبعاد في بثق الأنابيب

الخلاصة

12.3 تصميم Pipe Die

Pipe Die

Spiral / Spider

توزيع الجريان

التمركز Centering

12.4 مشاكل التشغيل والتحليل

البيضاوية في بثق الأنابيب

Ovality

Lack of Straightness and Sagging

الترهل و عدم الاستقامة

Surface Roughness & Melt Instability

خشونة سطح الأنبوب وعدم استقرار المصهور

الفرق بين البيضاوية وتفاوت السماكة

Wall Thickness

تفاوت سماكة الجدار

Variation

تراكم المواد على الـ Die

Residual Stresses & Shrinkage

الإجهادات الداخلية والانكماش في الأنابيب الميثوقة

(Residual stresses)

إجهادات متبقية

خطوط الالتحام في الـ Spider Die

الباب الثالث عشر العمليات المتقدمة للأنابيب متعددة الطبقات

13.1 الأنابيب متعددة الطبقات Multilayer Extrusion

مبدأ التشكيل

نوعا توزيع الطبقات

لتوازن الريولوجي بين الطبقات

شروط استقرار الطبقات

(Inter-layer adhesion)

المؤشرات التشغيلية لمشاكل الطبقات

تأثير السحب والمعايرة

لإجهادات الداخلية في الأنابيب متعددة الطبقات

التحدي الحراري

الخلاصة

13.2 بثق الألواح البلاستيكية (Sheet Extrusion)

من توزيع المصهور إلى تثبيت البنية

الفرق الجوهرى بين المنتج المستمر الهندسي (Pipe / Profile) والمنتج المسطح

العيوب الصناعية وفلسفة تفسيرها

13.3 فلسفة تشكيل الشيت

الفرق بين عمليات بثق الأنابيب و عمليات بثق الشيت

العوامل المؤثرة السماكة النهائية للشيت

13.4 منظومة الـ Chill Roll

التوازن بين الجودة والإنتاجية

العيوب الصناعية في بثق الشيت

13.5 القولبة بالحقن

دورة الحقن كمنظومة طاقة

العيوب الصناعية فيالقولبة بالحقن

13.6 القولبة بالحقن متعدد الطبقات

العيوب الصناعية في القولبة بالحقن متعدد الطبقات

13.7التشكيل بالنفخ

فلسفة تشكيل بالنفخ

العيوب الصناعية في التشكيل بالنفخ

13.8 التشكيل الدوراني

المراحل الحرارية لتكوين الجدار

العيوب الصناعية في التشكيل الدوراني

13.9 التشكيل متعدد الطبقات في الالقولبة الدورانية (Rotational Molding)

13.10 صناعة الفيلم

فلسفة وأهمية ودور صناعة الفيلم

المجال الفيزيائي لتشكيل الفيلم

الفيلم كتطبيقات... والبنية المطلوبة لكل تطبيق

قراءة عيوب الفيلم كبنية جزيئية

اختيار الصنف في صناعة الفيلم

13.11 المونوفلامنت كأعلى درجات التوجه الجزيئي

13.12 الشبك كنقطة التقاء ثلاث تقنيات

13.13 الماسترباتش (Master batch) والمركب (Compound) والإضافات (Additives)

13.14 دور الإضافات صناعة الفيلم

وظيفة محددة داخل البوليمر

الإضافة كأداة قرار صناعي

الباب الرابع عشر إعادة التدوير Recycling

14.1 مفهوم إعادة التدوير

14.2 إعادة التدوير كسيادة صناعية على المادة والطاقة

14.3 عناصر منظومة إعادة تدوير متكاملة

الطاقة

سعر المخلفات نفسه

التشريع،

شكل المنتج في السوق

16.4 المشاكل التشغيلية في إعادة التدوير

16.5 مفهوم إعادة التدوير التفاعلية

14.6 دور و مسؤولية المجتمع الصناعي

13.7 خلاصة الفصل

خاتمة الكتاب

مقدمة الملاحه

ملحق الكتاب

الملحق الأول تحليل الظواهر الصناعية وتفسيرها.....

دراسة 10 حالات واقعية ومع كل حالة يتم دراسة :

تحليل أولي للبيانات

اختبارات المنتج النهائي (الميكانيكية والفيزيائية)

التحليل البنيوي

تفسير سلوك الفشل

السيناريوهات المحتملة

السبب المرجح

حدود الاستنتاج

التوصيات

الخلاصة

الملحق الثاني

من سلوك المنتج إلى سلوك السلسلة الجزيئية: قراءة البنية، الاختبارات، وخريطة القرار الصناعي

مقارنة طرق التشكيل المختلفة،

مقارنة حساسية كل عملية لعوامل التشغيل

الملحق الثالث قاموس المصطلحات الصناعية للبلاستيك

قاموس المصطلحات الصناعية

مصطلحات أساسيات البوليمر

الخواص الحرارية والبنوية

تصنيف البوليمرات

الريولوجيا وسلوك المصهور

التاريخ الحراري

مفاهيم تشغيلية

مصطلحات البثق

مصطلحات الحقن

مصطلحات الفيلم

مصطلحات النفخ

مصطلحات الروتيشن

مصطلحات التحضير التركيبي (Compounding)

مصطلحات إعادة التدوير

الملحق الرابع رموز تعريف البوليمرات على المنتجات البلاستيكية

Plastic Resin Identification Codes

Resin Identification Code (RIC)

أي رمز تعريف الراتنج البلاستيكي.

في مرحلة ما بعد الاستهلاك.

الشكل العام لرمز التعريف

التحتية لجمع وفرز النفايات، وجود مصانع إعادة تدوير مناسبة، ومدى تلوث المنتج بعد الاستخدام.

أهمية النظام في الصناعة

التصنيف القياسي للبوليمرات

لإعادة التدوير، بل يعني فقط أنها لا تنتمي إلى الفئات الست القياسية للنظام.

حدود نظام الرموز

طرق التعرف الصناعي على البوليمرات

دور الرموز في منظومة الاقتصاد الدائري

المفاهيم الخاطئة الشائعة

الخلاصة

خاتمة الملحق

المراجع العلمية

,

الباب الأول : أساسيات البوليمرات والصناعة البتروكيميائية

البوليمر من المصدر إلى المصير

1.1 الفصل الأول البلاستيك – البوليمرات البلاستيكية (ثيرموبلاستيك وثيرموست)

البلاستيك أو ما يُعرف باللغة العربية باللدائن، مادة صناعية تمتاز بخصائص تجعلها سهلة التشكيل وقابلة للاستخدام في أشكال وتطبيقات متعددة، وتتكون في أساسها من سلاسل جزيئية طويلة تُسمى البوليمرات. وقد شكّل ظهور هذه المواد نقطة تحوّل حقيقية في التاريخ الصناعي الحديث، إذ جاء مرتبطاً بشكل مباشر بتطور الصناعات الكيميائية والبتروكيماوية واستغلال الموارد الطبيعية.

منذ الثورة الصناعية مرّت البشرية بمحطات تقنية وصناعية مفصلية؛ بدءاً من عصر الفحم الحجري، إلى عصر النفط الذي عُرف لاحقاً بالذهب الأسود، وصولاً إلى مرحلة الصناعات البتروكيماوية، والتي قد يصح تسميتها بالكنز الصناعي، إذ أفرزت مواد جديدة غيرت طريقة التصنيع وأسلوب الحياة معاً. وفي هذا السياق تحديداً، برزت صناعة البلاستيك كإحدى أكثر الصناعات تأثيراً وانتشاراً، لما تتمتع به اللدائن من تنوع في الخواص، وسهولة في المعالجة، وقدرة كبيرة على تلبية متطلبات استخدامات مختلفة.

يكاد البلاستيك اليوم أن يكون حاضراً في كل جانب من جوانب حياتنا الحديثة؛ من التطبيقات المتقدمة مثل تكنولوجيا الفضاء والطب والصناعات الهندسية، إلى المنتجات اليومية البسيطة. هذا الانتشار الواسع جعل منه مادة أساسية في البنية الصناعية والاقتصادية للعالم، وفرض في الوقت نفسه تحديات علمية وصناعية وبيئية لا يمكن تجاهلها.

وعلى الرغم من ذلك، لا يزال فهم البلاستيك لدى كثيرين إما محصوراً في إطار نظري أكاديمي، أو منحصرًا في تطبيق عملي منفصل عن خلفيته العلمية. كما أن عدداً كبيراً من الكتب التي تناولت هذا المجال قدّمت المادة إما بلغة كيميائية معقدة، أو بأسلوب تقني جاف، مما جعل القارئ غير المتخصص حائراً، وأبعد الممارس الصناعي عن الأسس العلمية التي تفسّر كثيراً مما يراه يومياً داخل المصنع.

من هنا جاءت فكرة هذا الكتاب، الذي يهدف إلى تقديم فهم متكامل لصناعة البلاستيك، من خلال الربط بين المبادئ الكيميائية والفيزيائية للبوليمرات وبين التطبيق الصناعي العملي. ويتناول الكتاب رحلة البوليمر ابتداءً من باطن الأرض، حيث مصادره الأولية من النفط والغاز الطبيعي وأحياناً الفحم مروراً بمراحل الاستخراج والمعالجة والبلورة والتصنيع، وانتهاءً بمرحلة إعادة التدوير، بأسلوب علمي واضح وتطبيقي واقعي، يجمع بين الفهم الأكاديمي والخبرة الصناعية.

عند الحديث عن البلاستيك بوصفه مادة قائمة على البوليمرات، من المهم التمييز بين فئتين رئيسيتين تتحكما في سلوك المادة أثناء التسخين والتشكيل، كما تحددان بشكل مباشر إمكانية إعادة تدويرها لاحقاً، وهما

الثيرموبلاستيك (Thermoplastics) والثيرموسيت (Thermosets)

فالثيرموبلاستيك: هي مواد بوليمرية يمكن تسخينها لتليينها أو صهرها ثم إعادة تشكيلها عدة مرات دون حدوث تغير كيميائي جذري في بنيتها، ولهذا السبب تُعد الفئة الأكثر انتشاراً في المنتجات اليومية وفي خطوط الإنتاج التي تعتمد على الحقن والنفخ والبتق، وتشمل أمثلة شائعة مثل البولي إيثيلين (PE) والبولي بروبيلين (PP) والبولي ستايرين (PS) وPVC.

الثيرموسيت: فهي مواد بوليمرية تبدأ عادةً في صورة راتنجيات أو مركبات قابلة للتشكيل، ثم تتحول أثناء المعالجة إلى بنية شبكية متصالبة (Crosslinked Structure) تجعلها أكثر ثباتاً وصلابة، لكنها في المقابل تصبح غير قابلة للانصهار أو إعادة التشكيل الحراري بعد اكتمال تصلبها، إذ إن التسخين اللاحق لا يؤدي إلى ذوبانها بل قد يسبب تدهوراً أو تفحماً. ومن أمثلتها الإيبوكسي (Epoxy) والفينوليك

(Phenolic/Bakelite) والميلامين (Melamine) وبعض أنواع البوليستر غير المشبع. وسيتم الاكتفاء بهذا التصنيف هنا كمدخل لفهم السلوك الحراري العام للبلاستيك، على أن يتم التوسع في الفروق التقنية بين الفئتين من منظور إعادة التدوير، وإمكانات المعالجة، والقيود الصناعية والبيئية ضمن فصل إعادة التدوير لاحقاً، حيث تظهر أهمية هذا التقسيم بشكل عملي في تحديد مصير المادة بعد انتهاء دورة استخدامها.

التركيبية: تعتمد صناعة البلاستيك على مجموعة واسعة من البوليمرات، تختلف فيما بينها من حيث التركيب الجزيئي، وطبيعة الروابط الكيميائية، وتعقيد البنية، وهو ما ينعكس مباشرة على خصائصها النهائية وتطبيقاتها الصناعية. وتُشتق هذه البوليمرات في الأساس من مونومرات عضوية بسيطة، يتم ربطها معاً من خلال عمليات البلمرة لتكوين سلاسل جزيئية طويلة. ويمكن تقسيم البوليمرات البلاستيكية من حيث التركيب إلى فئتين رئيسيتين: بوليمرات ذات تركيب بسيط تُعرف بالبوليمرات السليعية، وبوليمرات ذات تركيب أكثر تعقيداً تُعرف بالبوليمرات الهندسية.

1.1.1 أهم البوليمرات التجارية أو السلعية (Commodity Polymers):

تشمل هذه الفئة البوليمرات التي تعتمد في تركيبها على سلاسل هيدروكربونية بسيطة نسبياً، وتُنتج بكميات كبيرة، وتُستخدم في تطبيقات واسعة الانتشار.

البولي ايثيلين (Polyethylene-PE) :

- يُشتق من مونومر الإيثيلين (C_2H_4)، ويتميز بتركيب جزيئي بسيط قائم على سلاسل كربونية طويلة مشبعة. ويؤدي اختلاف درجة التفرّع وطول السلسلة إلى ظهور أنواعه المختلفة، مثل منخفض وعالي الكثافة، دون تغيير في المبدأ التركيبي الأساسي.

البولي بروبيلين (Polypropylene-PP) :

- يُنتج من مونومر البروبيلين (C_3H_6)، ويختلف عن البولي إيثيلين بوجود مجموعة ميثيل جانبية على السلسلة الرئيسية، وهو ما يمنحه ترتيبًا جزيئيًا مختلفًا وقدرة أعلى على التبلور.

البولي ستايرين (Polystyrene-PS) :

- يعتمد في تركيبه على مونومر الستايرين، ويتميز بوجود حلقة عطرية (بنزينية) مرتبطة بالسلسلة الرئيسية، ما يؤثر على صلابة المادة وسلوكها الحراري.

بولي فينيل كلورايد (PolyvinylChloride-PVC) :

- يتكوّن من مونومر كلوريد الفينيل، ويتميز بوجود ذرة الكلور ضمن تركيبه، وهو ما يمنحه خصائص مختلفة مقارنة بالبوليمرات الهيدروكربونية البحتة، ويجعله أكثر حساسية للإضافات.

1.1.2 أهم البوليمرات الهندسية (Engineering Polymers) :

البولي كربونيت (Polycarbonate-PC) :

- تتميز هذه البوليمرات بتركيب جزيئي أكثر تعقيدًا، يشمل حلقات عطرية، أو مجموعات وظيفية، أو روابط كيميائية أقوى، ما يجعلها مناسبة لتطبيقات هندسية تتطلب أداءً أعلى.

البولي كربونيت (Polycarbonate-PC) :

- يعتمد تركيبه على وحدات تحتوي على مجموعات كربونات وحلقات عطرية، ما ينتج عنه بوليمر ذو بنية صلبة نسبيًا وسلوك مميز ناتج عن هذا التركيب المعقد.

بولي ميثيل ميثاكريلات (PMMA) :

- يتميز بتركيب جزيئي منتظم نسبيًا مع مجموعات جانبية تؤثر على ترتيب السلاسل وقدرتها على تمرير الضوء، وهو ما يفسر طبيعته البصرية المميزة.

بولي أميد (Polyamide–Nylon)

- يحتوي في تركيبه على روابط أميدية (-CONH-) ، وهي روابط قوية نسبياً تؤثر على الترابط بين

السلاسل الجزيئية وتمنح المادة سلوكاً مختلفاً عن البوليمرات الهيدروكربونية.

البولي اوكسي ميثيلين (POM)

- يعتمد على وحدات متكررة تحتوي على ذرات أكسجين ضمن السلسلة الرئيسية، ما ينتج عنه تركيب منتظم

وكثيف نسبياً.

أكريلونتريل بوتادين ستايرين (ABS)

- بوليمر مركب يعتمد على أكثر من مونومر، ويظهر كيف يمكن دمج تراكيب مختلفة للحصول على مادة

ذات سلوك متوازن ناتج عن هذا التنوع البنيوي.

2. 1 الفصل الثاني المصادر والقيم والتحويل الأولي :

- المصادر الطبيعية والقيم في صناعة البلاستيك :

ترتبط صناعة البلاستيك ارتباطاً مباشراً باستغلال الموارد الطبيعية الكربونية، إلا أن هذه الموارد لا تُستخدم بصورتها الخام في إنتاج البوليمرات، بل تمر بسلسلة من العمليات الصناعية التي تهدف إلى فصلها، وتنقيتها، وتحويلها إلى مركبات كيميائية محددة يمكن التحكم في سلوكها لاحقاً. وفهم هذه السلسلة يُعد أمراً أساسياً لفهم صناعة البلاستيك ككل، إذ إن خصائص البوليمر النهائي لا تتحدد فقط بعملية البلمرة، بل تبدأ منذ اختيار المصدر الطبيعي نفسه.

- المصادر الطبيعية الرئيسية :

يمكن تقسيم المصادر الطبيعية التي تعتمد عليها صناعة البلاستيك إلى ثلاثة مصادر رئيسية: النفط الخام، والغاز الطبيعي، والفحم. ويختلف الاعتماد على كل من هذه المصادر من منطقة إلى أخرى تبعاً لتوفرها الجغرافي، وتكلفتها الاقتصادية، والبنية التحتية الصناعية القائمة.

- النفط الخام :

يمثل الغاز الطبيعي مصدرًا رئيسًا آخر لصناعة البلاستيك، خصوصًا في المناطق الغنية به. ويتكوّن الغاز الطبيعي في الأساس من الميثان، إلا أن أهميته البتروكيميائية لا تكمن في الميثان نفسه، بل في ما يحتويه من سوائل الغاز الطبيعي (NGLs)

- الغاز:

ويُعد الإيثان (Ethane) اللقيم الرئيس في المجمعات البتروكيميائية المعتمدة على الغاز الطبيعي، حيث يُستخدم على نطاق واسع لإنتاج الإيثيلين عبر التكسير البخاري. كما يمكن استخدام البروبان والبيوتان كقيمات ثانوية في مسارات صناعية محددة لإنتاج أوليفينات أخرى. ويمتاز اللقيم الغازي بانخفاض تكلفته التشغيلية نسبيًا وبكفاءة تحويل أعلى، إلا أن تنوع المنتجات الناتجة عنه يكون عادة أقل مقارنة بالمسارات المعتمدة على النفط.

- الفحم :

قبل الانتشار الواسع للنفط والغاز، لعب الفحم دورًا مهمًا كمصدر للمواد الكيميائية. ولا يُستخدم الفحم كقيم مباشر في صناعة البلاستيك، بل يُحوّل أولاً من خلال عمليات صناعية معقدة إلى ما يُعرف بـ غاز التخليق (Syngas)، وهو خليط أساسه أول أكسيد الكربون والهيدروجين. يمكن استخدام غاز التخليق لإنتاج مركبات وسيطة مثل الميثانول، والتي تُحوّل لاحقًا إلى أوليفينات تدخل في صناعة البوليمرات. غير أن هذه المسارات تتطلب استثمارات رأسمالية عالية، وتستهلك كميات كبيرة من الطاقة، كما ترتبط بانبعاثات كربونية مرتفعة، مما جعل استخدامها محدودًا ومحصورًا في مناطق معينة تتوفر فيها موارد الفحم بشكل كبير.

- مفهوم اللقيم (Feedstock)

يُستخدم مصطلح اللقيم للإشارة إلى المادة التي أصبحت جاهزة للدخول في العمليات الكيميائية بعد فصلها ومعالجتها من المصدر الطبيعي. ويُعد فهم هذا المفهوم أساسيًا، إذ إن اختيار اللقيم يحدد المسار الصناعي بالكامل، بدءًا من نوع المونومرات الممكن إنتاجها، وصولًا إلى أنواع البوليمرات النهائية.

مفهوم التحويل الأولي للقيم :

قبل استخدام اللقيم في عمليات البلمرة، يجب تحويله إلى مركبات أبسط وأكثر تفاعلية. وتتمثل وظيفة التحويل الأولي في تفكيك الجزيئات الهيدروكربونية الأكبر إلى جزيئات أصغر ذات بنية مناسبة لتكوين البوليمرات لاحقًا.

نواتج التحويل والانتقال إلى البلمرة

ينتج عن التحويل الأولي عدد من المركبات الأساسية، من أبرزها الإيثيلين والبروبلين. وعند هذه المرحلة فقط، تصبح المواد جاهزة للدخول في العمليات الكيميائية التي تؤدي إلى تكوين البوليمرات.

اختلاف المجمعات البتروكيميائية ومسارات الإنتاج :

تختلف المجمعات البتروكيميائية حول العالم اختلافاً كبيراً في تصميمها ومساراتها الإنتاجية، ويعود ذلك في الأساس إلى طبيعة اللقيم المتاحة وتكلفته والبيئة الاقتصادية المحيطة.

اللقيم والانبعاثات الكربونية :

تلعب طبيعة اللقيم دوراً مباشراً في مستوى الانبعاثات الكربونية المرتبطة بإنتاج المونومرات، حيث تُعد المسارات المعتمدة على الغاز الطبيعي أقل انبعاثاً مقارنة بالمسارات المعتمدة على الفحم، بينما يقع النفط في موقع متوسط بينهما.

إنتاج اللقيم أم شراؤه؟

لا تُنتج جميع المنشآت الصناعية اللقيم الذي تحتاجه داخلياً، إذ يعتمد القرار بين إنتاج اللقيم أو شراؤه على اعتبارات اقتصادية وتشغيلية واستثمارية متعددة.

- مقارنة بين مصادر اللقيم الرئيسية :

يؤدي اختلاف المصدر الطبيعي واللقيم المستخدم إلى فروق جوهرية في المسار الصناعي والنتائج النهائية، ويمكن تلخيص أبرز هذه الفروق كما يلي:

النافثا (من النفط الخام) :

النفط الخام هو خليط معقد من مركبات هيدروكربونية تختلف في أطوال سلسلها وتركيبها الكيميائي. وعند استخراجها من باطن الأرض، لا يكون صالحاً للاستخدام الصناعي المباشر، بل يُنقل إلى المصافي حيث يخضع لعمليات تكرير تهدف أساساً إلى فصل هذا الخليط إلى مقاطع مختلفة اعتماداً على درجات غليانها.

تُعد هذه المرحلة مرحلة فصل فيزيائي وليست مرحلة تحويل كيميائي، إلا أنها ذات أهمية محورية، إذ تحدد أي المقاطع يمكن توجيهها لاحقاً إلى الصناعات البتروكيميائية. ومن بين هذه المقاطع، تُعد النافثا (Naphtha) أهم لقيم يُستخدم في صناعة البلاستيك، لما تحتويه من مركبات هيدروكربونية خفيفة نسبياً وقابلة للتحويل، من خلال عمليات التكسير البخاري، إلى مونومرات أساسية مثل الإيثيلين والبروبلين ومركبات أخرى.

ويمتاز الاعتماد على النافثا بتنوع المخرجات البتروكيميائية، إلا أنه يرتبط في الغالب بتكاليف تشغيلية أعلى مقارنة باللقيم الغازي.

الإيثان (من الغاز الطبيعي) :

يتميز بانخفاض التكلفة وكفاءة التحويل وقلة الانبعاثات نسيئاً، إلا أن تنوع المخرجات يكون محدوداً في الغالب، مع تركيز رئيس على الإيثيلين.

غاز التخليق (من الفحم) :

يتيح إنتاج البوليمرات عبر مسارات غير تقليدية، لكنه يتطلب استثمارات كبيرة ويستهلك طاقة عالية، مما يقلل من جاذبيته اقتصادياً وبيئياً في معظم الحالات.

ومن ثم، فإن اختيار اللقيم لا يُعد قراراً تقنياً فحسب، بل هو قرار استراتيجي يؤثر في بنية الصناعة، وتكلفة المنتج، وأثره البيئي، ويشكل الأساس الذي تُبنى عليه جميع المراحل اللاحقة، من البلمرة وحتى المنتج النهائي.

1.3 الفصل الثالث : المونومرات والبلمرة

بعد الحصول على المركبات البسيطة الناتجة عن عمليات التحويل الأولى للقيم، تبدأ المرحلة الأكثر حساسية في صناعة البلاستيك، وهي المرحلة التي تتحول فيها المواد الكيميائية البسيطة إلى مواد صناعية ذات سلوك محدد وقابل للتوظيف. هذه المرحلة هي مرحلة المونومرات والبلمرة، وهي المرحلة التي تُحدّد، إلى حدّ كبير، طبيعة البوليمر الناتج وإمكاناته اللاحقة في التصنيع والتطبيق.

فالْبلاستيك في جوهره ليس مادة واحدة بل نتيجة لسلسلة قرارات كيميائية وصناعية تبدأ من اختيار المونومر، وتُمرّ بمسار البلمرة

- 1.3.1 المونومرات البنية الأولى للبوليمر :

المونومر هو جزيء عضوي صغير نسبياً، يتميّز بقدرته على الارتباط مع جزيئات مماثلة له لتكوين سلاسل أطول. وتنبع هذه القدرة من وجود روابط كيميائية غير مشبعة أو مجموعات وظيفية فعالة تسمح بحدوث تفاعل كيميائي منظم.

من الناحية الصناعية، لا يُنظر إلى المونومر باعتباره مركبًا كيميائيًا فقط، بل باعتباره نقطة انطلاق لسلوك البوليمر بالكامل. فاختيار المونومر لا يحدد فقط نوع البوليمر، بل يحدد:

✓ نوع مسار البلمرة الممكن

✓ درجة تعقيد العملية

✓ طبيعة الخواص الناتجة

✓ سهولة إعادة التدوير لاحقًا

ومن الأمثلة الشائعة على المونومرات المستخدمة صناعيًا:

✓ الإيثيلين

✓ البروبيلين

✓ الستايرين

✓ كلوريد الفينيل

وكل منها يقود إلى عائلة مختلفة من البوليمرات ذات خصائص متباينة جذريًا.

- العلاقة بين اللقيم والمونومر :

من المهم إدراك أن اللقيم ليس هو المونومر، بل هو المادة التي يُشتق منها المونومر. فاللقيم، سواء كان نافثًا أو إيثان أو غاز تخليق، يخضع لعمليات تحويل صناعي تؤدي إلى إنتاج مونومرات محددة وهذه العلاقة تفسّر سبب اختلاف البنية الصناعية للمجمعات البتروكيميائية إذ إن:

- المجمع المعتمد على الإيثان يُنتج أساسًا الإيثيلين .

- المجمع المعتمد على النافثا يُنتج مجموعة أوسع من المونومرات .

- المسارات المعتمدة على الفحم تمر بمرحل وسيطة أطول وبالتالي ، فإن تنوع المونومرات المتاحة ليس

قرارًا كيميائيًا بحثًا، بل نتيجة مباشرة لاختيار اللقيم والبنية الصناعية المرتبطة به.

- مفهوم البلمرة ودورها في صناعة البلاستيك :

البلمرة هي العملية الكيميائية التي يتم فيها ربط عدد كبير من جزيئات المونومر معًا لتكوين سلاسل جزيئية طويلة تُعرف بالبوليمرات. وتمثل هذه العملية القلب الحقيقي لصناعة البلاستيك، إذ تنتقل فيها المادة من

مركب صغير محدود الخصائص إلى مادة ذات سلوك فيزيائي وميكانيكي يمكن التحكم فيه. ولا تقتصر أهمية البلمرة على تكوين السلسلة الجزيئية، بل تكمن في كيفية تكوّنها:

- طول السلسلة
- درجة التفرع
- انتظام الوحدات المتكررة
- توزيع الأوزان الجزيئية وجميع هذه العناصر تتحدد أثناء البلمرة، وليس بعدها.

1.3.2 أنواع البلمرة من حيث المبدأ الكيميائي :

- بلمرة الإضافة :

في بلمرة الإضافة، ترتبط جزيئات المونومر ببعضها مباشرة دون فقدان نواتج جانبية. ويُعد هذا النوع من البلمرة الأكثر شيوعاً في صناعة البلاستيك، ويُستخدم لإنتاج بوليمرات مثل البولي إيثيلين والبولي بروبيلين والبولي ستايرين.

يمتاز هذا المسار بـ: - بساطة التفاعل - سرعة التكوين - سهولة التحكم الصناعي

كما أنه يؤدي غالباً إلى بوليمرات ذات سلاسل هيدروكربونية واضحة البنية، وهو ما ينعكس على سلوكها الحراري والميكانيكي.

- بلمرة التكثيف :

أما بلمرة التكثيف، فتتضمن تفاعل المونومرات مع فقدان جزيئات صغيرة مثل الماء أو الكحول أثناء التفاعل. ويُستخدم هذا المسار لإنتاج بوليمرات تحتوي على مجموعات وظيفية داخل السلسلة، مثل البولي إسترات والبولي أميدات. وعلى الرغم من أن هذا المسار أكثر تعقيداً وأبطأ نسبياً، إلا أنه يسمح بإنتاج بوليمرات ذات:

روابط أقوى ومقاومة حرارية أعلى و سلوك ميكانيكي مختلف وهذا يفسّر استخدامه في البوليمرات الهندسية والتطبيقات المتقدمة.

- ما يحدث على المستوى الجزيئي أثناء البلمرة :

أثناء البلمرة لا يتحدد فقط نوع البوليمر بل تتشكل بنيته الداخلية في هذه المرحلة:

- يتحدد طول السلسلة الجزيئية
- تظهر التفرعات أو الخطية
- يتحدد مدى انتظام ترتيب الوحدات المتكررة
- وهذه التفاصيل الجزيئية هي التي تفسّر لاحقاً:
- قابلية البوليمر للتبلور أو بقاءه غير متبلور
- سيولة المصهور
- استجابة المادة للحرارة
- سلوكها تحت الإجهاد

ولهذا فإن فهم ما يحدث على المستوى الجزيئي أثناء البلمرة يُعد مفتاحاً لفهم سلوك البلاستيك لاحقاً.

- التحكم في البلمرة وتأثيره على البوليمر الناتج :

تُدار عمليات البلمرة صناعياً من خلال التحكم في مجموعة من العوامل، من أهمها:

- درجة الحرارة
- الضغط
- نوع المحفّز
- زمن التفاعل

ولا يُستخدم هذا التحكم بهدف إتمام التفاعل فقط، بل بهدف تشكيل البوليمر وفق متطلبات محددة. فتغيّر بسيط في شروط البلمرة قد يؤدي إلى اختلاف كبير في سيولة المادة أو وزنها الجزيئي أو قابليتها للمعالجة. وهنا تتقاطع اعتبارات البلمرة الكيميائية مع متطلبات التصنيع اللاحقة، إذ لا تُصمّم شروط البلمرة بمعزل عن السلوك المتوقع للمادة في مراحل المعالجة والتشكيل .

- البلمرة كنقطة فاصلة في سلسلة صناعة البلاستيك :

تمثّل البلمرة المرحلة التي تنتقل فيها المادة من كونها مركباً كيميائياً إلى كونها مادة صناعية. فما قبل البلمرة هو عالم الكيمياء، وما بعدها هو عالم الصناعة. ومع ذلك فإن نتائج البلمرة لا تكون نهائية من حيث الاستخدام بل تمثّل الأساس الذي تُبنى عليه مراحل لاحقة مثل:

- التركيب
- إضافة المواد المساعدة
- التشكيل
- الاختبارات
- انعكاس البلمرة على سلوك البوليمر :

تتعرض تفاصيل البلمرة مباشرة على سلوك البوليمر في جميع مراحلها اللاحقة. فهي التي تحدد:

- حركة السلاسل الجزيئية
- درجة الاستقرار الحراري
- السلوك الانسيابي للمصهور
- الاستجابة للإضافات
- القابلية لإعادة التدوير

وبذلك، فإن البلمرة ليست مجرد خطوة وسطى، بل مرحلة تأسيسية تحدد المسار الكامل للمادة البلاستيكية منذ ولادتها وحتى نهاية دورة حياتها. وبعد اكتمال البلمرة والحصول على البوليمر في صورته الأساسية، تبدأ مرحلة جديدة لا تقل أهمية، وهي مرحلة التركيب والإضافات، حيث تتحول المادة من بوليمر عام إلى مادة مصممة تلبي متطلبات تطبيق محدد.

1.3.3 مفهوم الوزن الجزيئي وما يحدث على المستوى الجزيئي :

يهدف هذا الفصل إلى شرح العلاقة بين البنية الجزيئية للبوليمر وسلوكه أثناء الانصهار والتصنيع، مع التركيز على مفهوم الوزن الجزيئي وتوزيعه، وكيف ينعكس ذلك على سيولة المصهور كما تقاس عملياً بواسطة مؤشر تدفق المصهور (MFI). فهم هذه العلاقة يعد من أهم المفاتيح لتفسير اختلاف أداء درجات البوليمرات في العمليات الصناعية مثل البثق والحقن والنفخ وصناعة الأفلام.

عند التعامل مع البوليمرات في الصناعة، يظهر مصطلح شائع جداً في مواصفات المواد وهو مؤشر تدفق المصهور أو ما يعرف اختصاراً بـ MFI أو MFR. كثيراً ما يستخدم هذا الرقم كمرجع سريع لتقدير سيولة المادة أثناء التشغيل، إلا أن هذا المؤشر ليس خاصية أساسية للبوليمر بحد ذاته، بل هو انعكاس غير مباشر لخاصية أعمق وهي الوزن الجزيئي للسلاسل البوليمرية وتوزيعها.

فكلما تغير طول السلاسل الجزيئية داخل البوليمر، تغيرت لزوجة المصهور وسهولة جريانه، وبالتالي يتغير الرقم المقاس في اختبار MFI. لذلك فإن فهم العلاقة بين الوزن الجزيئي وسيولة المصهور يمثل خطوة أساسية لفهم سلوك البوليمرات أثناء التصنيع.

- **الوزن الجزيئي في البوليمرات :** الوزن الجزيئي هو الكتلة الجزيئية لسلسلة البوليمر. بخلاف الجزيئات الصغيرة التي تمتلك وزنًا جزيئيًا محددًا وثابتًا، فإن البوليمرات تتكون من عدد كبير من السلاسل ذات أطوال مختلفة. لذلك فإن أي عينة من البوليمر لا تحتوي على جزيء واحد متماثل بل تحتوي على مجموعة واسعة من السلاسل ذات الأوزان المختلفة.
- لهذا السبب يتم التعبير عن الوزن الجزيئي للبوليمرات باستخدام متوسطات إحصائية، وأهم هذه المتوسطات: **متوسط الوزن الجزيئي العددي (Mn) :** وهو متوسط يعتمد على عدد الجزيئات الموجودة في العينة، ويعطي تصورًا عامًا لطول السلسلة الجزيئية.
- **متوسط الوزن الجزيئي الوزني (Mw) :** وهو متوسط يعطي وزنًا أكبر للجزيئات الأكبر حجمًا، ولذلك يكون عادة أعلى من Mn.
- **توزيع الوزن الجزيئي (MWD) :**
- نظرًا لوجود سلاسل بأطوال مختلفة داخل البوليمر، فإننا نتحدث عن توزيع للأوزان الجزيئية وليس عن رقم واحد فقط ويعبر عن اتساع هذا التوزيع غالبًا بنسبة Mw إلى Mn.

- كلما كان توزيع الوزن الجزيئي أوسع، كانت المادة تحتوي على مزيج من السلاسل القصيرة والطويلة، وهو أمر يؤثر بشكل كبير على خصائص المصهور أثناء التشغيل.
- **تأثير طول السلسلة الجزيئية :** طول السلسلة الجزيئية هو أحد أهم العوامل التي تحدد سلوك البوليمر أثناء الانصهار.
- **السلاسل القصيرة** نسبياً تنزلق بسهولة فوق بعضها البعض عند الانصهار، مما يؤدي إلى مصهور منخفض اللزوجة وسهل الجريان.
- **السلاسل الطويلة** فتتشابك مع بعضها بشكل أكبر، مكونة شبكة من التداخلات الجزيئية التي تعيق حركة الجزيئات، مما يؤدي إلى زيادة لزوجة المصهور وصعوبة جريانه.
- هذا السبب يمكن القول بشكل مبسط إن :
- **زيادة الوزن الجزيئي** تؤدي غالباً إلى زيادة لزوجة المصهور
- **انخفاض الوزن الجزيئي** يؤدي عادة إلى انخفاض اللزوجة وزيادة سيولة المصهور لكن يجب الانتباه إلى أن هذه العلاقة ليست خطية تماماً، كما أنها تتأثر بعوامل أخرى مثل التفرع الجزيئي وتوزيع الوزن الجزيئي ودرجة الحرارة.
- **مفهوم سيولة المصهور :** عندما يتم تسخين البوليمر فوق درجة انصهاره أو فوق درجة التحول الزجاجي في حالة البوليمرات غير المتبلورة، تتحول المادة إلى حالة لزجة يمكنها الجريان تحت تأثير الضغط أو القص.
- في هذه الحالة يسمى البوليمر بالمصهور البوليمري. سلوك هذا المصهور أثناء الجريان يعتمد بشكل رئيسي على :
- طول السلاسل الجزيئية
- درجة تشابكها
- درجة الحرارة
- معدل القص أثناء التشغيل
- كلما كانت لزوجة المصهور منخفضة، كان الجريان أسهل. أما إذا كانت اللزوجة مرتفعة فإن المصهور يقاوم الحركة ويحتاج إلى طاقة أكبر للدفع عبر القالب أو القناة.
- **اختبار مؤشر تدفق المصهور (MFI) :** مؤشر تدفق المصهور هو اختبار مخبري بسيط يستخدم على نطاق واسع في صناعة البلاستيك لتقدير سيولة البوليمر في الحالة المنصهرة.

- في هذا الاختبار يتم وضع كمية من البوليمر داخل أسطوانة معدنية مسخنة إلى درجة حرارة محددة، ثم يتم دفع المصهور عبر فتحة صغيرة بواسطة وزن ثابت. يتم قياس كمية المادة التي تتدفق خلال زمن معين، وغالبًا ما يعبر عن النتيجة بوحدة غرام لكل عشر دقائق. كلما كانت المادة تتدفق بسهولة أكبر خلال الفتحة، كانت القيمة المقاسة لمؤشر تدفق المصهور أعلى. أما إذا كان الجريان بطيئًا، فإن قيمة MFI تكون منخفضة.
- **العلاقة بين الوزن الجزيئي و (MFI) :** بصورة عامة يمكن القول إن هناك علاقة عكسية بين الوزن الجزيئي للبوليمر وقيمة مؤشر تدفق المصهور.
- عندما يكون الوزن الجزيئي مرتفعًا تكون السلاسل طويلة ومتشابكة، مما يؤدي إلى زيادة لزوجة المصهور وبالتالي انخفاض قيمة MFI.
- وعندما يكون الوزن الجزيئي منخفضًا تكون السلاسل أقصر وأسهل في الحركة، مما يؤدي إلى مصهور أكثر سيولة وقيمة أعلى لمؤشر تدفق المصهور.
- لكن من المهم التأكيد على أن MFI لا يقيس الوزن الجزيئي مباشرة، بل يقيس سلوك الجريان تحت ظروف محددة. لذلك يمكن أن تتشابه قيم MFI بين مواد مختلفة بينما يختلف سلوكها الفعلي أثناء التشغيل.
- **دور توزيع الوزن الجزيئي :**
- لا يعتمد سلوك المصهور على متوسط الوزن الجزيئي فقط، بل يتأثر أيضًا بتوزيع الأوزان الجزيئية داخل المادة.
- المواد التي تمتلك توزيعًا واسعًا تحتوي على مزيج من السلاسل الطويلة والقصيرة. السلاسل الطويلة تمنح المصهور قوة وتماسكًا أفضل، بينما تساعد السلاسل الأقصر على تسهيل الجريان.
- هذا المزيج قد يعطي توازنًا جيدًا بين قابلية التشغيل والخواص الميكانيكية.
- أما المواد ذات التوزيع الضيق فقد تظهر سلوكًا مختلفًا أثناء التشغيل، حيث قد تكون أكثر حساسية للتغيرات في ظروف المعالجة.
- **قوة المصهور (Melt Strength) :**
- إحدى النتائج المهمة لارتفاع الوزن الجزيئي هي زيادة ما يسمى بقوة المصهور. تشير هذه الخاصية إلى قدرة المصهور على مقاومة التمدد أو الانقطاع أثناء الجريان.
- تكون هذه الخاصية مهمة جدًا في عمليات مثل:
 - البثق لصناعة الأفلام
 - النفخ
 - التشكيل الحراري
 - إنتاج الأنابيب

المواد ذات الوزن الجزيئي المرتفع غالبًا ما تمتلك قوة مصهور أعلى، مما يساعد على الحفاظ على شكل المصهور أثناء التمدد أو النفخ. في المقابل قد تكون المواد منخفضة الوزن الجزيئي أكثر سيولة لكنها أقل قدرة على تحمل التمدد.

- العلاقة بين MFI والتطبيقات الصناعية :

بسبب العلاقة العامة بين الوزن الجزيئي وسيولة المصهور، يتم اختيار درجات البوليمر المختلفة حسب قيمة MFI المناسبة للعملية الصناعية.

الدرجات ذات MFI المرتفع غالبًا ما تكون أكثر سيولة، ولذلك تستخدم في عمليات تتطلب تدفقًا سريعًا داخل القوالب مثل الحقن.

أما الدرجات ذات MFI المنخفض فهي عادة أكثر لزوجة وتمتلك قوة مصهور أعلى، ولذلك تفضل في عمليات مثل البثق وصناعة الأفلام والأنابيب.

لكن هذه القاعدة تبقى عامة، إذ قد تؤثر عوامل أخرى مثل التفرع الجزيئي ونوع الإضافة والظروف التشغيلية على الأداء الفعلي للمادة.

- حدود استخدام مؤشر MFI :

على الرغم من انتشار اختبار MFI في الصناعة، إلا أن الاعتماد عليه وحده لتقييم سلوك البوليمر قد يكون مضللاً في بعض الحالات.

ذلك لأن الاختبار يتم تحت ظروف محددة من الحرارة والوزن والقص، بينما تتعرض المادة في العمليات الصناعية لظروف مختلفة تماماً من حيث معدل القص ودرجة الحرارة والتشوه.

لذلك قد تظهر مواد لها نفس قيمة MFI ولكنها تتصرف بشكل مختلف أثناء التشغيل بسبب اختلاف توزيع الوزن الجزيئي أو التفرع أو الإضافات. لهذا السبب يستخدم مؤشر تدفق المصهور غالباً كمؤشر أولي سريع، بينما قد يتم اللجوء إلى اختبارات ريولوجية أكثر تقدماً عند الحاجة إلى تحليل أدق لسلوك المصهور.

- خلاصة الفصل :

الوزن الجزيئي للبوليمرات هو أحد أهم العوامل التي تتحكم في سلوك المادة أثناء الانصهار والتصنيع. فطول السلاسل الجزيئية وتساكبها يؤثران بشكل مباشر على لزوجة المصهور وقدرته على الجريان.

يقاس هذا السلوك عملياً في كثير من الأحيان باستخدام مؤشر تدفق المصهور MFI، الذي يعطي تقديراً تقريبياً لسيولة المادة تحت ظروف محددة. إلا أن هذا المؤشر لا يمثل خاصية أساسية للمادة بقدر ما يعكس تأثير الوزن الجزيئي وتوزيعه.

فهم العلاقة بين الوزن الجزيئي وسيولة المصهور يساعد المهندس أو المشغل على تفسير اختلاف أداء درجات البوليمر المختلفة، واختيار المادة الأنسب للعملية الصناعية المطلوبة، كما يساعد على تحليل كثير من المشكلات التشغيلية التي قد تظهر أثناء التصنيع.

1.3.4 التفرع الجزيئي والتاكتيسية :

- التفرع الجزيئي والتاكتيسية وأثرهما على بنية البوليمرات وخواصها :

يهدف هذا الفصل إلى توضيح كيف تؤثر طريقة ترتيب السلاسل الجزيئية داخل البوليمر، سواء من حيث وجود التفرعات على السلسلة أو من حيث الترتيب الفراغي للوحدات المتكررة، على الخواص الفيزيائية

والميكانيكية وسلوك المادة أثناء التصنيع. فهم هذه المفاهيم يساعد على تفسير الاختلافات بين درجات البوليمرات المختلفة حتى عندما تكون مكونة من نفس المونومر الأساسي.

عند دراسة البوليمرات غالبًا ما يتم التركيز على طول السلسلة الجزيئية أو الوزن الجزيئي، لكن هذا العامل وحده لا يفسر جميع الاختلافات بين المواد. فإضافة إلى طول السلسلة، تلعب طريقة ترتيب الوحدات الجزيئية على السلسلة وشكل السلسلة نفسها دورًا مهمًا في تحديد خواص البوليمر.

هناك عاملان مهمان في هذا السياق. الأول هو التفرع الجزيئي، أي وجود سلاسل جانبية مرتبطة بالسلسلة الرئيسية للبوليمر. والثاني هو الترتيب الفراغي للوحدات المتكررة على السلسلة، وهو ما يعرف بالتأكتيسية. هذان العاملان يؤثران بشكل مباشر على قدرة السلاسل الجزيئية على التراص والانتظام، وبالتالي يؤثران على التبلور والخواص الميكانيكية وسلوك المصهور أثناء التصنيع.

- التفرع الجزيئي في البوليمرات :

التفرع الجزيئي يعني وجود سلاسل جانبية مرتبطة بالسلسلة الرئيسية للبوليمر. بدلاً من أن تكون السلسلة الجزيئية مستقيمة نسبياً، قد تحتوي على تفرعات تخرج منها في نقاط مختلفة.

يمكن أن يكون التفرع قصيراً، حيث تكون السلاسل الجانبية صغيرة نسبياً، أو قد يكون طويلاً بحيث يشكل سلاسل فرعية أطول مرتبطة بالسلسلة الرئيسية.

- التفرع القصير :

في التفرع القصير تكون السلاسل الجانبية صغيرة مقارنة بالسلسلة الرئيسية. هذا النوع من التفرع يمكن أن يؤثر على قدرة السلاسل على التراص بالقرب من بعضها، مما يقلل غالباً من درجة التبلور.

في بعض البوليمرات مثل بعض أنواع البولي إيثيلين قد يؤدي وجود تفرعات قصيرة إلى انخفاض الكثافة وإلى تغير في الخواص الميكانيكية والحرارية.

- التفرع الطويل :

التفرع الطويل يحدث عندما تكون السلسلة الجانبية نفسها طويلة نسبياً. هذا النوع من التفرع يمكن أن يزيد من تشابك السلاسل الجزيئية في المصهور، مما يؤثر على سلوك الجريان وقوة المصهور.

في بعض التطبيقات الصناعية قد تكون هذه الخاصية مفيدة لأنها تمنح المصهور قدرة أكبر على الحفاظ على شكله أثناء التمدد أو النفخ.

- تأثير التفرع على التبلور :

- القدرة على التبلور تعتمد بشكل كبير على قدرة السلاسل الجزيئية على التراص والانتظام في بنية بلورية. السلاسل المستقيمة نسبياً تستطيع أن تصطف بجانب بعضها بسهولة أكبر، مما يسمح بتكوين مناطق بلورية.

عندما تكون السلسلة الجزيئية مليئة بالتفرعات، يصبح من الصعب على السلاسل أن تصطف بطريقة منتظمة، مما يؤدي إلى انخفاض درجة التبلور.

لهذا السبب غالباً ما تكون البوليمرات ذات التفرع القليل أكثر قدرة على التبلور، بينما تميل البوليمرات ذات التفرع الأكبر إلى أن تكون أقل تبلوراً وأكثر مرونة.

- أثر التفرع على الخواص الفيزيائية :

يؤثر التفرع الجزيئي على عدة خواص مهمة للبوليمرات. فالسلاسل الأقل تفرعاً يمكن أن تتراص بشكل أفضل، مما يؤدي عادة إلى زيادة الكثافة والصلابة ومقاومة الحرارة.

أما زيادة التفرع فقد تؤدي إلى انخفاض الكثافة وزيادة المرونة في بعض الحالات، كما قد تؤثر على سلوك المصهور أثناء التصنيع.

في العمليات الصناعية قد يظهر أثر التفرع في اختلاف سلوك الجريان وقوة المصهور بين درجات البوليمر المختلفة حتى عندما تكون القيم الأساسية مثل MFI متقاربة.

- التاكتيسية في البوليمرات :

إضافة إلى التفرع، هناك عامل آخر يتعلق بطريقة ترتيب المجموعات الجانبية المرتبطة بالسلسلة الجزيئية. هذا الترتيب يسمى التاكتيسية.

في بعض البوليمرات، مثل البولي بروبيلين، ترتبط مجموعات جانبية بالسلسلة الرئيسية. طريقة ترتيب هذه المجموعات في الفراغ تؤثر بشكل كبير على قدرة السلاسل على التراص والتبلور.

- أنواع التاكتيسية :

يمكن تصنيف التاكتيسية إلى ثلاثة أنماط رئيسية.

- النوع الأول هو الترتيب المنتظم حيث تكون جميع المجموعات الجانبية على نفس الجانب من السلسلة الجزيئية. هذا الترتيب يسمح للسلاسل بأن تتراص بشكل جيد ويؤدي غالباً إلى بوليمر قادر على التبلور بدرجة أكبر.

- **النوع الثاني :** هو الترتيب المتناوب حيث تتناوب المجموعات الجانبية على جانبي السلسلة بشكل منتظم. هذا النمط قد يسمح أيضاً بدرجة معينة من التبلور.

- **النوع الثالث** هو الترتيب العشوائي حيث تتوزع المجموعات الجانبية بشكل غير منتظم على جانبي السلسلة. هذا النوع غالباً ما يؤدي إلى بنية أقل انتظاماً ويقلل من قدرة البوليمر على التبلور.

- **تأثير التاكطيسية على الخواص :**

الترتيب الفراغي للوحدات المتكررة يؤثر على قدرة السلاسل على التراص وعلى تكوين البنية البلورية. البوليمرات ذات الترتيب المنتظم تكون غالباً أكثر تبلوراً وتمتلك صلابة ومقاومة حرارية أعلى. أما البوليمرات ذات الترتيب العشوائي فقد تكون أقل تبلوراً وأكثر ليونة أو شفافية في بعض الحالات. هذا الاختلاف يظهر بوضوح في بعض البوليمرات حيث يؤدي اختلاف التاكطيسية إلى اختلاف كبير في الخواص رغم أن التركيب الكيميائي الأساسي للمونومر يبقى نفسه.

- **العلاقة بين التفرع والتاكطيسية والتبلور :**

كل من التفرع الجزيئي والترتيب الفراغي للوحدات المتكررة يؤثران على قدرة السلاسل على التراص وتكوين البنية البلورية كلما كانت السلسلة أكثر انتظاماً وأقل تفرعاً زادت فرص تكوّن مناطق بلورية.

أما عندما تكون السلسلة مليئة بالتفرعات أو يكون ترتيب المجموعات الجانبية عشوائياً، يصبح من الصعب على السلاسل أن تنتظم في بنية بلورية واضحة.

لذلك فإن فهم هذه العوامل يساعد على تفسير اختلاف درجة التبلور بين البوليمرات المختلفة، وبالتالي اختلاف الخواص الفيزيائية والحرارية.

- **أهمية هذه المفاهيم في الصناعة :**

فهم التفرع الجزيئي والتاكطيسية يساعد على تفسير كثير من الاختلافات بين درجات البوليمر المختلفة. فحتى عندما تكون المادة الأساسية واحدة، قد يؤدي اختلاف طريقة ترتيب السلاسل الجزيئية أو وجود التفرعات إلى تغيرات كبيرة في الخواص.

كما أن هذه المفاهيم تساعد على فهم سلوك المصهور أثناء التصنيع وعلى تفسير بعض الفروق بين المواد المستخدمة في عمليات مختلفة مثل البثق أو الحقن أو النفخ.

- خلاصة الفصل :

لا تعتمد خواص البوليمرات على نوع المونومر أو الوزن الجزيئي فقط، بل تتأثر أيضًا بشكل السلسلة الجزيئية وطريقة ترتيب الوحدات المتكررة على طول السلسلة. التفرع الجزيئي يغير شكل السلسلة وقدرتها على التراص، بينما يحدد الترتيب الفراغي للمجموعات الجانبية مدى انتظام السلاسل وإمكانية تكوّن البنية البلورية.

فهم هذه العوامل يساعد على تفسير كثير من الاختلافات بين درجات البوليمرات المختلفة، كما يساعد على الربط بين البنية الجزيئية والخواص النهائية للمواد البلاستيكية في التطبيقات الصناعية.

1.3.5 الفصل الخامس البنية المجهرية للبوليمرات :

يهدف هذا الفصل إلى شرح كيفية ترتيب السلاسل الجزيئية داخل البوليمر بعد تكوّنها، وكيف يؤثر هذا الترتيب على الخواص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للمواد البلاستيكية. فبعد فهم تكوين السلسلة الجزيئية وطولها (الوزن الجزيئي)، يصبح من الضروري فهم الطريقة التي تنتظم بها هذه السلاسل في الحالة الصلبة، وهو ما يفسر كثيرًا من السلوكيات الصناعية للبلاستيك مثل الشفافية والانكماش والصلابة ومقاومة الحرارة.

عند النظر إلى البوليمر على المستوى الجزيئي، نجد أنه يتكون من سلاسل طويلة من الذرات المرتبطة ببعضها. لكن هذه السلاسل لا تبقى دائمًا مرتبة بطريقة واحدة داخل المادة. ففي بعض الحالات تنتظم السلاسل في مناطق مرتبة ومنظمة تشبه البلورات، بينما تبقى في مناطق أخرى ملتفة وعشوائية.

لهذا السبب توصف كثير من البوليمرات بأنها تحتوي على بنية مختلطة تتكون من مناطق متبلورة ومناطق غير متبلورة. هذا الترتيب الداخلي للسلاسل الجزيئية يسمى البنية المجهرية للبوليمر، وهو أحد العوامل الأساسية التي تحدد خواص المادة النهائية.

- البوليمرات المتبلورة وغير المتبلورة :
- يمكن تقسيم البوليمرات بشكل عام من حيث ترتيب السلاسل الجزيئية إلى نوعين رئيسيين.

النوع الأول هو البوليمرات غير المتبلورة في هذا النوع تكون السلاسل الجزيئية مرتبة بطريقة عشوائية وغير منتظمة، بحيث تشبه إلى حد كبير ترتيب خيوط ملتفة ومتشابكة دون نمط بلوري واضح. هذا الترتيب العشوائي يؤدي غالبًا إلى مواد أكثر شفافية وأقل انكماشًا عند التبريد.

من أمثلة البوليمرات غير المتبلورة:

- البولي ستايرين
- البولي كربونات
- بولي ميثيل ميثاكريلات

النوع الثاني هو البوليمرات شبه المتبلورة :

في هذا النوع تكون أجزاء من السلاسل الجزيئية قادرة على الانتظام في مناطق بلورية صغيرة، بينما تبقى بقية السلاسل في حالة غير متبلورة. لذلك توصف هذه المواد بأنها شبه متبلورة وليست متبلورة بالكامل.

من أمثلة البوليمرات شبه المتبلورة:

- البولي إيثيلين
- البولي بروبيلين
- البولي أميد
- البولي إيثيلين

وجود هذه المناطق البلورية يعطي المادة خصائص مختلفة مثل زيادة الصلابة وارتفاع درجة الانصهار.

- مفهوم درجة التبلور:

درجة التبلور تعبر عن النسبة التقريبية للمناطق البلورية داخل البوليمر مقارنة بالمناطق غير المتبلورة. فالمادة التي تحتوي على نسبة أكبر من المناطق المرتبة تمتلك درجة تبلور أعلى.

ارتفاع درجة التبلور يؤدي عادة إلى زيادة الكثافة والصلابة ومقاومة الحرارة، كما يزيد من مقاومة بعض المذيبات. في المقابل قد يؤدي ارتفاع التبلور إلى انخفاض الشفافية وزيادة الانكماش أثناء التبريد.

أما البوليمرات ذات التبلور المنخفض فتكون غالباً أكثر مرونة وأكثر شفافية ولكنها قد تمتلك مقاومة حرارية أقل.

- تكوّن البلورات أثناء التبريد :

عندما يبرد البوليمر المنصهر، تبدأ السلاسل الجزيئية في فقدان حركتها تدريجياً. إذا كانت البنية الجزيئية تسمح بذلك، فإن بعض السلاسل قد تصطف بجانب بعضها في ترتيب منتظم مكونة مناطق بلورية صغيرة.

تتجمع هذه المناطق غالباً في بنى كروية مجهرية تعرف بالسفيروليت. هذه البنى تتكون من صفائح بلورية دقيقة تنمو من مركز واحد وتنتشر في اتجاهات مختلفة داخل المادة.

شكل هذه البنى وحجمها يعتمد على عوامل عديدة مثل سرعة التبريد ونوع البوليمر ووجود الإضافات أو المواد المائلة.

- درجات الحرارة المميزة للبوليمرات :

التمييز بين البوليمرات المتبلورة وغير المتبلورة يظهر أيضًا في سلوكها الحراري.

البوليمرات غير المتبلورة لا تمتلك نقطة انصهار واضحة، بل تمر بدرجة انتقال تسمى درجة التحول الزجاجي. عند هذه الدرجة تتحول المادة من حالة صلبة هشة إلى حالة أكثر ليونة ومرونة.

أما البوليمرات شبه المتبلورة فلهيها عادة درجتان حراريتان مميزتان. الأولى هي درجة التحول الزجاجي المرتبطة بالمناطق غير المتبلورة، والثانية هي درجة الانصهار المرتبطة بالمناطق البلورية.

درجة الانصهار تمثل النقطة التي تبدأ عندها المناطق البلورية في التفكك والتحول إلى مصهور.

- تأثير التبلور على الشفافية :

الشفافية في المواد البلاستيكية ترتبط بشكل كبير بالبنية المجهرية. في البوليمرات غير المتبلورة يكون ترتيب السلاسل عشوائيًا ومتجانسًا نسبيًا، مما يسمح بمرور الضوء عبر المادة دون تشتت كبير، ولذلك تكون هذه المواد غالبًا شفافة.

أما في البوليمرات شبه المتبلورة فإن وجود مناطق بلورية ذات ترتيب مختلف يؤدي إلى تشتت الضوء داخل المادة، مما يعطيها مظهرًا معتمًا أو ضبابيًا في كثير من الحالات.

- تأثير التبلور على الانكماش :

عند تبريد البوليمرات شبه المتبلورة من الحالة المنصهرة، تقتارب السلاسل الجزيئية أثناء تكوّن المناطق البلورية، مما يؤدي إلى انخفاض الحجم وزيادة الكثافة. هذا الانخفاض في الحجم يظهر في العمليات الصناعية على شكل انكماش أكبر مقارنة بالبوليمرات غير المتبلورة.

لهذا السبب تحتاج المواد شبه المتبلورة غالبًا إلى عناية أكبر في تصميم القوالب وضبط ظروف التبريد لتقليل العيوب الناتجة عن الانكماش.

- تأثير التبلور على الخواص الميكانيكية :

زيادة درجة التبلور تؤدي عادة إلى زيادة الصلابة ومقاومة التشوه، لأن المناطق البلورية تعمل كعناصر تقوية داخل البنية البوليمرية. في المقابل قد يؤدي ارتفاع التبلور إلى تقليل المرونة في بعض الحالات.

المناطق غير المتبلورة تلعب دورًا مهمًا في إعطاء المادة قدرًا من المرونة والقدرة على امتصاص الصدمات. لذلك فإن التوازن بين المناطق البلورية وغير البلورية يحدد الخواص الميكانيكية النهائية للمادة.

- تأثير ظروف التصنيع :

لا يعتمد التبلور فقط على نوع البوليمر، بل يتأثر أيضًا بظروف المعالجة الصناعية مثل سرعة التبريد ودرجة الحرارة والشد أثناء التصنيع.

التبريد البطيء يسمح للسلاسل الجزيئية بوقت أطول للانتظام، مما يؤدي غالبًا إلى درجة تبلور أعلى. أما التبريد السريع فقد يحد من قدرة السلاسل على التنظيم، مما يؤدي إلى بنية أقل تبلورًا.

كما أن عمليات مثل السحب أو التمديد أثناء التصنيع قد تؤدي إلى توجيه السلاسل الجزيئية في اتجاه معين، مما يغير الخواص الميكانيكية والبصرية للمنتج النهائي.

- أهمية فهم البنية المجهرية في الصناعة :

فهم التبلور والبنية المجهرية يساعد المهندس أو المشغل على تفسير كثير من الظواهر التي تظهر أثناء الإنتاج. فعلى سبيل المثال يمكن ربط اختلاف الشفافية أو الصلابة أو الانكماش بدرجة التبلور أو بطريقة تبريد المنتج. كما أن اختيار ظروف التشغيل المناسبة يمكن أن يساعد على التحكم في البنية الداخلية للمادة وبالتالي تحسين الخواص المطلوبة في المنتج النهائي.

- خلاصة الفصل :

البنية المجهرية للبوليمرات، وبخاصة درجة التبلور، تمثل عاملاً أساسياً في تحديد خواص البلاستيك. فترتيب السلاسل الجزيئية داخل المادة يؤثر على الشفافية والانكماش والصلابة والسلوك الحراري.

البوليمرات غير المتبلورة تمتاز غالباً بالشفافية والانكماش المنخفض، بينما تمتلك البوليمرات شبه المتبلورة صلابة أعلى ومقاومة حرارية أكبر. كما تلعب ظروف المعالجة الصناعية دوراً مهماً في تحديد مقدار التبلور داخل المادة.

فهم هذه العلاقة بين البنية المجهرية والخواص يساعد على تفسير اختلاف أداء المواد البلاستيكية في التطبيقات الصناعية المختلفة، ويشكل خطوة مهمة في الربط بين البنية الجزيئية للبوليمر وسلوكه أثناء التصنيع والاستخدام.

1.4 الفصل الرابع الخصائص العامة للمواد البلاستيكية :

بعد فهم التركيب الجزيئي للبوليمرات ومراحل تكوينها من خلال البلمرة، يصبح من الممكن تفسير الخصائص العامة التي تميز المواد البلاستيكية عن غيرها من المواد التقليدية مثل المعادن والسيراميك. فهذه الخصائص ليست صفات عشوائية، بل هي نتيجة مباشرة لطبيعة السلاسل البوليمرية، ونوع الروابط الكيميائية، وطريقة انتظام الجزيئات داخل المادة.

- العزل الكهربائي :

تعد معظم المواد البلاستيكية عوازل كهربائية جيدة، ويعود ذلك إلى طبيعة تركيبها الجزيئي. فالسلاسل البوليمرية تتكون أساساً من روابط تساهمية قوية، ولا تحتوي على إلكترونات حرة قادرة على الحركة كما هو الحال في المعادن. هذا الغياب لحوامل الشحنة المتحركة يجعل انتقال التيار الكهربائي عبر البلاستيك محدوداً جداً، وهو ما يفسر استخدامه الواسع كمادة عازلة في العديد من التطبيقات.

- العزل الحراري :

تتميز المواد البلاستيكية بقدرتها على إعاقة انتقال الحرارة مقارنة بالمواد المعدنية. ويعود ذلك إلى انخفاض قدرتها على نقل الطاقة الحرارية عبر السلاسل الجزيئية، إضافة إلى طبيعة ترتيب هذه السلاسل التي تعيق انتقال الاهتزازات الحرارية. كما أن وجود فراغات مجهرية بين السلاسل في بعض البوليمرات يزيد من هذه الخاصية، مما يجعل البلاستيك مادة مناسبة للعزل الحراري.

- الكثافة المنخفضة وخفة الوزن :

من الخصائص الأساسية للبلاستيك انخفاض كثافته مقارنة بالمعادن، ويعود ذلك إلى التركيب القائم على ذرات خفيفة نسبياً مثل الكربون والهيدروجين، وإلى طبيعة التعبئة الجزيئية داخل المادة. فالسلاسل البوليمرية لا تكون معبأة بإحكام تام كما في الشبكات البلورية للمعادن، مما يؤدي إلى وزن نوعي أقل دون التضحية بالوظيفة الأساسية للمادة.

- المقاومة الكيميائية :

تُظهر العديد من المواد البلاستيكية مقاومة جيدة للمواد الكيميائية المختلفة، ويعود ذلك إلى استقرار الروابط التساهمية داخل السلاسل البوليمرية، وصعوبة تفاعلها مع كثير من الأوساط الكيميائية. وتعتمد درجة هذه

المقاومة على طبيعة البوليمر نفسه، وعلى نوع المجموعات الوظيفية الموجودة في تركيبه، إلا أن المبدأ العام يبقى مرتبطاً بالبنية الجزيئية للمادة.

- السلوك الحراري العام :

تتأثر استجابة البلاستيك للحرارة بطبيعة السلاسل البوليمرية وحركتها. فعند ارتفاع درجة الحرارة، تزداد حركة السلاسل الجزيئية، مما يؤدي إلى تغير في صلابة المادة وسلوكها الميكانيكي. ويختلف هذا السلوك من بوليمر لآخر تبعاً لطول السلسلة ودرجة انتظامها، وهو ما يفسر التباين الكبير في استجابة المواد البلاستيكية للحرارة.

- المرونة وقابلية التشكل :

تتميز المواد البلاستيكية بدرجات متفاوتة من المرونة وقابلية التشكل، ويعود ذلك إلى قدرة السلاسل البوليمرية على الانزلاق والحركة النسبية فيما بينها تحت تأثير الإجهاد. هذه الخاصية ترتبط مباشرة بالبنية الجزيئية وطبيعة الروابط بين السلاسل، وهي ما يمنح البلاستيك إمكانية التشكيل والمعالجة بطرق متعددة دون الحاجة إلى درجات حرارة عالية جداً

- الخصائص كنتاج للبنية وليس كصفات مستقلة :

من المهم التأكيد على أن الخصائص العامة للبلاستيك لا يمكن النظر إليها كصفات منفصلة عن تركيبه أو طريقة تكوينه. فجميع هذه الخصائص هي انعكاس مباشر لما حدث على المستوى الجزيئي خلال مراحل التحويل والبلورة. ومن هذا المنطلق، فإن فهم الخصائص العامة يُعد خطوة انتقالية ضرورية قبل الانتقال إلى دراسة كيفية تعديل هذه الخصائص باستخدام الإضافات المختلفة، وهو ما سيتم تناوله في الفصل التالي.

- 1.5 الفصل الخامس ريولوجيا مصهور البوليمرات وسلوك الجريان :

يهدف هذا الفصل إلى شرح سلوك البوليمرات في الحالة المنصهرة أثناء العمليات الصناعية، مع التركيز على كيفية جريان المصهور تحت تأثير الحرارة والضغط والقص. فهم ريولوجيا المصهور يعد خطوة أساسية لفهم أداء البوليمرات في عمليات التصنيع المختلفة مثل البثق والحقن والنفخ وصناعة الأفلام، كما يساعد على تفسير كثير من المشكلات التي قد تظهر أثناء التشغيل.

عندما يتم تسخين البوليمر إلى درجة حرارة مناسبة، يتحول من مادة صلبة إلى مصهور لزج قادر على الجريان تحت تأثير الضغط أو القص. هذا الجريان لا يشبه جريان السوائل البسيطة مثل الماء أو الزيت، بل يتميز بسلوك أكثر تعقيداً نتيجة لطبيعة السلاسل الجزيئية الطويلة وتشابكها.

العلم الذي يدرس سلوك المواد أثناء الجريان والتشوه يسمى الريولوجيا. وفي حالة البوليمرات المنصهرة يركز هذا العلم على فهم العلاقة بين البنية الجزيئية للمادة ولزوجة المصهور وسلوكه أثناء المرور عبر القنوات والقوالب في الآلات الصناعية.

فهم هذا السلوك يسمح للمهندس أو المشغل بتفسير سبب نجاح مادة معينة في عملية صناعية محددة، بينما قد تفشل مادة أخرى رغم تشابهها الظاهري في بعض الخصائص.

- اللزوجة في مصهور البوليمرات :

اللزوجة هي مقياس مقاومة السائل للجريان. كلما كانت اللزوجة مرتفعة احتاج المصهور إلى قوة أكبر للتحرك، أما إذا كانت منخفضة فإن الجريان يصبح أسهل.

في البوليمرات ترتبط اللزوجة بشكل مباشر بطول السلاسل الجزيئية وتشابكها. السلاسل الطويلة والمتشابكة تقاوم الحركة بشكل أكبر، مما يؤدي إلى مصهور أكثر لزوجة. أما السلاسل الأقصر فتتحرك بسهولة أكبر، مما يؤدي إلى مصهور أكثر سيولة.

لكن اللزوجة في البوليمرات لا تبقى ثابتة عند تغير ظروف الجريان، بل تتغير مع تغير سرعة القص ودرجة الحرارة، وهو ما يجعل سلوك المصهور أكثر تعقيداً من السوائل العادية.

- معدل القص وتأثيره على اللزوجة :

عندما يمر المصهور عبر قناة ضيقة أو قالب، تتعرض الطبقات القريبة من الجدار لاحتكاك أكبر مقارنة بالطبقات الموجودة في مركز الجريان. هذا يؤدي إلى اختلاف سرعة الجريان بين الطبقات المختلفة، وهو ما يسمى بمعدل القص.

في كثير من البوليمرات يؤدي ارتفاع معدل القص إلى انخفاض اللزوجة الظاهرية للمصهور. هذا السلوك يعرف بظاهرة ترقق القص، حيث تصبح المادة أكثر سيولة عندما تتعرض لقوى قص أعلى.

يحدث ذلك لأن السلاسل الجزيئية التي تكون ملتفة ومتشابكة في الحالة الساكنة تبدأ في الاصطاف جزئيًا في اتجاه الجريان عند تعرضها للقص، مما يقلل من مقاومتها للحركة.

هذه الظاهرة تعد من الخصائص المهمة للبوليمرات، لأنها تسمح للمادة بأن تكون لزجة نسبيًا في الحالة الساكنة، لكنها تصبح أكثر سيولة عند مرورها داخل القالب أثناء التصنيع.

- قوة المصهور :

إضافة إلى اللزوجة، تمتلك البوليمرات خاصية أخرى مهمة تعرف بقوة المصهور. تشير هذه الخاصية إلى قدرة المصهور على مقاومة التمدد أو الانقطاع أثناء الجريان.

المواد ذات قوة المصهور العالية تستطيع الحفاظ على شكلها عند خروجها من القالب أو عند تعرضها للتمدّد، وهو أمر مهم في عمليات مثل نفخ الأفلام أو البثق. أما المواد ذات قوة المصهور المنخفضة فقد تتمدد بسهولة لكنها قد تكون أكثر عرضة للتمزق أو عدم الاستقرار أثناء التشغيل.

ترتبط قوة المصهور غالبًا بالوزن الجزيئي وتوزيع السلاسل الجزيئية داخل المادة. المواد ذات السلاسل الأطول أو التفرعات الجزيئية المناسبة قد تظهر قوة مصهور أعلى.

- المرونة في مصهور البوليمرات :

على الرغم من أن البوليمرات المنصهرة تتصرف كسوائل لزجة، إلا أنها تمتلك أيضًا قدرًا من السلوك المرن. هذا يعني أن المصهور قد يخزن جزءًا من الطاقة أثناء التشوه ويستعيد جزءًا منها عند إزالة القوة.

هذه الخاصية ناتجة عن الطبيعة المطاطية للسلاسل الجزيئية الطويلة. عندما تتمدد السلاسل أثناء الجريان فإنها تميل إلى العودة إلى وضعها الأصلي عندما يقل الضغط.

هذا السلوك المرن قد يظهر في بعض الظواهر الصناعية مثل انتفاخ المصهور عند خروجه من القالب أو ميل المصهور للعودة جزئيًا إلى شكله السابق.

- تأثير درجة الحرارة :

درجة الحرارة تلعب دورًا مهمًا في سلوك المصهور. عند ارتفاع درجة الحرارة تزداد حركة السلاسل الجزيئية وتقل قوى التماسك بينها، مما يؤدي إلى انخفاض اللزوجة وزيادة سيولة المصهور. أما عند انخفاض درجة الحرارة فتقل حركة السلاسل وتزداد مقاومة الجريان. لذلك فإن التحكم في درجة حرارة التشغيل يعد من العوامل الأساسية لضبط سلوك المصهور أثناء التصنيع. في العمليات الصناعية يتم اختيار درجات حرارة محددة تسمح للمادة بالوصول إلى سيولة مناسبة دون أن يؤدي ذلك إلى تحللها أو تدهور خواصها.

- أثر ريولوجيا المصهور على عمليات التصنيع :

تؤثر ريولوجيا المصهور بشكل مباشر على أداء البوليمرات في عمليات التصنيع المختلفة.

- **في عملية الحقن** يحتاج المصهور إلى سيولة كافية لملء القالب بسرعة قبل أن يبرد. لذلك تستخدم في كثير من الأحيان درجات ذات سيولة أعلى نسبيًا.

- **في عمليات البثق وصناعة الأفلام** قد يكون من المهم وجود قوة مصهور كافية للحفاظ على استقرار الجريان وشكل المنتج أثناء التمدد.

- **في عمليات النفخ** تلعب اللزوجة وقوة المصهور دورًا مهمًا في قدرة المصهور على التمدد دون أن يتمزق.

لذلك فإن اختيار درجة البوليمر المناسبة لأي عملية صناعية يعتمد إلى حد كبير على سلوك المصهور تحت ظروف الجريان المختلفة.

- حدود المؤشرات البسيطة مثل MFI :

كما ذكر في الفصل السابق، يستخدم مؤشر تدفق المصهور كمؤشر تقريبي لسيولة المادة. لكنه لا يصف بشكل كامل سلوك المصهور تحت جميع ظروف الجريان.

اختبار MFI يتم تحت ظروف محددة من الحرارة والقص، بينما تتعرض المواد في العمليات الصناعية إلى نطاق واسع من معدلات القص. لذلك قد تظهر مواد لها نفس قيمة MFI ولكنها تتصرف بشكل مختلف أثناء التشغيل. لهذا السبب قد يتم في بعض الحالات استخدام اختبارات ريولوجية أكثر تقدمًا لدراسة سلوك المصهور عند معدلات قص مختلفة.

- أهمية فهم الريولوجيا في تحليل المشكلات الصناعية :

كثير من المشكلات التي تظهر أثناء التصنيع يمكن تفسيرها من خلال فهم سلوك الجريان في المصهور.

- عدم استقرار الجريان في القالب
- تمزق المصهور أثناء البثق
- تغيير سماكة المنتج
- ظهور خطوط على السطح
- صعوبة ملء القالب في الحقن

كل هذه الظواهر قد تكون مرتبطة بتغيرات في اللزوجة أو في سلوك المصهور تحت القص. وفهم هذه العلاقات يساعد على تحديد ما إذا كانت المشكلة مرتبطة بدرجة المادة نفسها أو بظروف التشغيل أو بتصميم القالب أو الماكينة.

- خلاصة الفصل :

ريولوجيا المصهور تمثل الحلقة التي تربط بين البنية الجزيئية للبوليمر وسلوكه أثناء التصنيع. فطول السلاسل الجزيئية وتوزيعها والتفاعلات بينها تؤثر على لزوجة المصهور وقدرته على الجريان تحت تأثير القص والضغط.

يمتاز مصهور البوليمرات بسلوك معقد يجمع بين اللزوجة والمرونة، كما تتغير لزوجته مع معدل القص ودرجة الحرارة. هذه الخصائص تجعل فهم الريولوجيا أمرًا ضروريًا لتحليل أداء البوليمرات في العمليات الصناعية المختلفة.

إدراك العلاقة بين البنية الجزيئية وسلوك الجريان يساعد على اختيار المادة المناسبة لكل عملية تصنيع، كما يساعد على تفسير كثير من الظواهر والمشكلات التي قد تظهر أثناء التشغيل.

- 1.6 الفصل السادس العلاقة بين الخصائص والبنية والتصنيع :

يهدف هذا الفصل إلى توضيح العلاقة الأساسية التي تربط بين بنية البوليمر على المستوى الجزيئي، وسلوكه أثناء عمليات التصنيع، والخواص النهائية للمنتج البلاستيكي. فهم هذه العلاقة يساعد القارئ على إدراك أن أداء المادة البلاستيكية لا يعتمد على تركيبها الكيميائي فقط، بل يتأثر أيضاً بطريقة معالجتها الصناعية والظروف التي تتعرض لها أثناء التصنيع. عند دراسة البوليمرات من منظور صناعي قد يبدو للوهلة الأولى أن الخواص النهائية للمنتج تعتمد أساساً على نوع البوليمر المستخدم. إلا أن التجربة العملية في المصانع تظهر أن المادة نفسها قد تعطي نتائج مختلفة تماماً عند تغيير ظروف التشغيل أو طريقة التصنيع.

هذا الاختلاف لا يعود فقط إلى الاختلاف في نوع المادة، بل إلى العلاقة المعقدة بين ثلاثة عناصر رئيسية تشكل معاً أساس فهم سلوك البوليمرات في الصناعة. هذه العناصر هي البنية الجزيئية للبوليمر، وطريقة المعالجة أو التصنيع، والخواص النهائية للمنتج.

غالباً ما يتم التعبير عن هذه العلاقة بالمبدأ المعروف في هندسة البوليمرات:

- البنية
- التصنيع
- الخواص

فالبنية الجزيئية تحدد سلوك المصهور أثناء المعالجة، وطريقة المعالجة تؤثر على ترتيب السلاسل الجزيئية داخل المنتج، وهذا الترتيب النهائي يحدد الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمادة.

- 1.6.1 البنية الجزيئية للبوليمر :

تشير البنية الجزيئية إلى الطريقة التي تتكون بها السلاسل البوليمرية وترتيب الوحدات المتكررة داخلها. تشمل هذه البنية عدة عناصر مهمة مثل طول السلسلة الجزيئية، ووجود التفرعات، وطريقة ترتيب المجموعات الجانبية، إضافة إلى قدرة السلاسل على التبلور.

هذه العوامل تؤثر على عدة خصائص أساسية للمادة مثل اللزوجة في الحالة المنصهرة، ودرجة التبلور، وقوة المصهور، والخواص الحرارية والميكانيكية.

على سبيل المثال، قد يؤدي ارتفاع الوزن الجزيئي إلى زيادة لزوجة المصهور وقوة المصهور، بينما قد يؤدي التفرع الجزيئي إلى تغيير قدرة السلاسل على التراص والتبلور.

هذه الخصائص الجزيئية لا تظهر فقط على المستوى النظري، بل تؤثر مباشرة على سلوك المادة أثناء العمليات الصناعية.

- 1.6.2 التصنيع وتأثيره على البنية :

عمليات التصنيع مثل البثق والحقن والنفخ تتطلب تسخين البوليمر إلى الحالة المنصهرة ثم دفعه عبر قنوات أو قوالب لتشكيل المنتج المطلوب. أثناء هذه العمليات تتعرض السلاسل الجزيئية لدرجات مختلفة من الحرارة والضغط والقص. هذه الظروف قد تؤدي إلى توجيه السلاسل الجزيئية في اتجاهات معينة، أو إلى تغيير درجة التبلور أثناء التبريد، أو إلى إعادة ترتيب بعض أجزاء البنية الجزيئية.

سرعة التبريد على سبيل المثال قد تؤثر على حجم البلورات المتكونة داخل البوليمر. التبريد البطيء يسمح للسلاسل بالانتظام بشكل أفضل، بينما قد يؤدي التبريد السريع إلى تقليل درجة التبلور.

كما أن التمدد أو السحب أثناء التصنيع قد يؤدي إلى توجيه السلاسل الجزيئية في اتجاه معين، وهو ما قد يغير الخواص الميكانيكية للمنتج في اتجاهات مختلفة.

- 1.6.3 الخواص النهائية للمنتج :

الخواص النهائية للمنتج البلاستيكي لا تعتمد فقط على نوع البوليمر المستخدم، بل على البنية المجهرية التي تتشكل داخل المادة بعد انتهاء عملية التصنيع.

هذه البنية المجهرية تتأثر بعوامل عديدة مثل درجة التبلور، وحجم البلورات، وتوجيه السلاسل الجزيئية، ووجود الإضافات أو المواد المألثة.

كل هذه العوامل قد تؤثر على خواص مثل الصلابة والمرونة ومقاومة الصدمات والشفافية والانكماش ومقاومة الحرارة.

لهذا السبب قد تختلف خواص المنتجات المصنوعة من نفس البوليمر إذا تم تصنيعها بطرق مختلفة أو تحت ظروف تشغيل مختلفة.

- تفاعل العناصر الثلاثة :

ال علاقة بين البنية والتصنيع والخواص ليست علاقة خطية بسيطة، بل هي نظام متكامل تتفاعل فيه هذه العناصر مع بعضها.

البنية الجزيئية تحدد كيفية استجابة المادة لظروف التصنيع. في المقابل تؤثر ظروف التصنيع على البنية المجهرية التي تتشكل داخل المادة. هذه البنية النهائية هي التي تحدد الخواص الفعلية للمنتج.

على سبيل المثال قد تمتلك درجتان من البوليمر نفس التركيب الكيميائي الأساسي، لكن اختلاف الوزن الجزيئي أو التفرع قد يؤدي إلى اختلاف في سلوك المصهور أثناء التشغيل. هذا الاختلاف قد ينعكس لاحقاً على شكل المنتج أو خواصه الميكانيكية.

- أمثلة صناعية على هذه العلاقة :

يمكن ملاحظة العلاقة بين البنية والتصنيع والخواص في العديد من التطبيقات الصناعية.

- في صناعة الأفلام البلاستيكية تلعب قوة المصهور والتوجيه الجزيئي دوراً مهماً في تحديد قوة الفيلم ومقاومته للتمزق.

- في عمليات الحقن قد تؤثر سرعة التبريد وتوزيع الحرارة داخل القالب على درجة التبلور والانكماش في المنتج النهائي.

- في عمليات البثق قد يؤدي اختلاف لزوجة المصهور أو توزيع الوزن الجزيئي إلى تغيرات في استقرار الجريان أو جودة السطح.

هذه الأمثلة توضح أن فهم سلوك البوليمر أثناء المعالجة ضروري لفهم الخواص النهائية للمنتج.

- أهمية هذا المفهوم في تحليل المشكلات الصناعية :

كثير من المشكلات التي تظهر في المنتجات البلاستيكية لا يمكن تفسيرها بالنظر إلى تركيب المادة فقط. فقد يكون سبب المشكلة مرتبطاً بطريقة التصنيع أو بظروف التشغيل.

عند فهم العلاقة بين البنية والتصنيع والخواص يصبح من الممكن تحليل المشكلة بطريقة أكثر منهجية. فقد يكون الحل في تغيير درجة البوليمر، أو في تعديل ظروف التشغيل، أو في تغيير تصميم القالب أو سرعة التبريد.

هذا الفهم يساعد المهندس أو المشغل على التعامل مع المشكلات الصناعية بطريقة علمية بدلاً من الاعتماد على التجربة والخطأ فقط.

- خلاصة الفصل :

تعتمد الخواص النهائية للمواد البلاستيكية على تفاعل ثلاثة عناصر رئيسية هي البنية الجزيئية للبوليمر وطريقة التصنيع والبنية المجهرية التي تتشكل داخل المادة أثناء المعالجة.

البنية الجزيئية تحدد سلوك المصهور أثناء الجريان، بينما تؤثر ظروف التصنيع على ترتيب السلاسل الجزيئية أثناء التبريد والتصلب. هذا الترتيب النهائي هو الذي يحدد الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمنتج.

فهم هذه العلاقة بين البنية والتصنيع والخواص يمثل أحد المفاتيح الأساسية لفهم سلوك البوليمرات في التطبيقات الصناعية، ويساعد على تفسير كثير من الظواهر والمشكلات التي قد تظهر أثناء الإنتاج أو الاستخدام.

الباب الثاني : الموائى فى صناعة البلاستيك

لا يمكن فهم صناعة البلاستيك الحديثة، ولا تفسير سلوك المنتجات النهائية أو قرارات التكلفة والتشغيل داخل المصانع، من دون إدراك الدور الرئيسي الذي تلعبه الإضافات. فالبوليمر في صورته النقية نادراً ما يُستخدم كما هو، إذ تُضاف إليه مواد متعددة بهدف تحقيق متطلبات وظيفية، أو مظهرية، أو اقتصادية، أو تشغيلية، أو تشريعية، تبعاً للتطبيق النهائي وظروف الاستخدام.

ورغم هذا الدور الجوهري، تُعد الإضافات من أكثر عناصر صناعة البلاستيك عرضة لإساءة الفهم، حيث يجري التعامل معها غالباً على أنها مواد ثانوية أو وسائل تخفيض تكلفة فقط، دون إدراك كامل لتأثيرها العميق على سلوك المصهور، واستقرار العملية الإنتاجية، وعمر الماكينات، وأداء المنتج النهائي على المدى القصير والطويل.

ويجدر التنبيه منذ البداية إلى أن الإضافة لا يمكن تصنيفها على أنها مادة خام مستقلة، كما لا يمكن التعامل معها بوصفها منتجاً نهائياً قائماً بذاته، بل هي في جوهرها منتج وسيط يقع بين هاتين المرحلتين. فهي تُصنَّع وتُجهَّز في مصانع متخصصة، لكن الإضافة لا تؤدي وظيفتها الحقيقية إلا عند دمجها داخل البوليمر ضمن منتج نهائي في المصانع التحويلية. وبناء على هذا الدور الوسيط فإن الإضافة لا تخضع لمنظومة اختبار واحدة ولا تكتفى بسلسلة واحدة من الفحوصات بل تمر بثلاث مراحل اعتماد مترابطة. تبدأ المرحلة الأولى في مصنع الإضافة نفسه حيث يتم ضبط التركيب والحجم والتجانس والرطوبة والثبات ثم تصنيف الإضافة حسب الاستخدامات الممكنة ويشمل ذلك عند الحاجة اختبارات تطبيق مرجعية على منتج نهائي مصغر للتحقق من سلوك الإضافة داخل بوليمر معياري. ثم تنتقل المرحلة الثانية إلى مصنع الماسترباتش حيث يتم فحص الاستلام وإعادة تقييم خصائص المادة وتحويلها إلى منتج وسيط ثابت الجرعة مع إجراء اختبارات تشغيل وتشنت وتجارب على منتجات نهائية مصغرة مناسبة للتطبيق المستهدف مثل الفيلم أو الحقن بحسب تصنيف الاستخدام. أما المرحلة الثالثة فتكون في المصنع التحويلي حيث يتم استلام الماسترباتش أو الإضافة وإجراء اختبارات أولية للتأكد من مطابقة الدفعة ثم اختبارها ضمن ظروف تشغيل حقيقية وإنتاج المنتج النهائي الفعلي وقياس خواصه وإصدار قرار الاعتماد النهائي للتطبيق المطلوب.

ومن الأخطاء الشائعة في هذا السياق استخدام الإضافات مباشرة في الإنتاج دون إخضاعها لأي اختبارات مسبقة داخل المختبر. فالإضافة، مهما بدا توصيفها بسيطاً أو مألوفاً، لا يمكن التعامل معها بوصفها مادة مضمونة السلوك قبل فهم طبيعتها وتركيبها وتأثيرها الفعلي على البوليمر وعلى العملية التصنيعية ككل. ويُعد

اعتماد الإضافات دون اختبارها داخل المختبر خطأً صناعيًا جوهريًا، إذ يجب أن تمر أي إضافة بثلاث مراحل أساسية قبل اعتمادها في الإنتاج الاعتيادي.

وعلى النقيض من ذلك، فإن الأسلوب العشوائي الشائع القائم على شراء الإضافات ثم استخدامها مباشرة في الإنتاج وانتظار رأي العميل بعد طرح المنتج في السوق لا يُعد منهجًا صناعيًا سليمًا، بل يمثل إهدارًا للوقت والمال، ويؤدي إلى نتائج غير مستقرة، كما يؤثر سلبًا على ثقافة العاملين ومتخذي القرار الصناعي، حيث يتحول الخطأ إلى ممارسة متكررة بدل أن يكون حالة استثنائية.

وتشمل الإضافات المستخدمة في صناعة البلاستيك طيفًا واسعًا من المواد، لا يقتصر على نوع واحد أو وظيفة واحدة، بل يمتد ليعطي مجالات متعددة قد يكون بعضها معلوماً للقارئ، بينما يبقى بعضها الآخر غير معلوم رغم تأثيره الكبير. ولهذا، لا يصح التعامل مع الإضافات بوصفها فئة متجانسة، بل كمنظومة أدوات صناعية لكل منها وظيفة محددة، وحدود استخدام، وتأثيرات جانبية يجب فهمها قبل اعتمادها.

ويمكن تصنيف الإضافات، بصورة عامة، إلى فئات رئيسية تشمل: إضافات اللون والمظهر، ومواد الملء، والمثبتات الحرارية ومضادات الأكسدة، ومثبتات الضوء والطقس، وإضافات التشغيل والمعالجة، وإضافات تحسين الأداء الميكانيكي، ومثبتات اللهب والدخان، إضافة إلى فئات أخرى خاصة بالتغليف، والكهرباء، والرغوة، والبيئة، والتطبيقات المتخصصة.

وسيتناول الإضافات في هذا الكتاب وفق منهج تدريجي، يبدأ بتقديم هذه الخريطة العامة، ثم ينتقل إلى التفصيل حسب درجة الشيع والأثر الصناعي. ونظرًا لكون الموائى هي الأكثر استخدامًا، واحد أكثر الإضافات الشائعة عرضة لسوء الفهم، والأكثر تأثيرًا على التكلفة والآلات والمنتج النهائي، فقد خُصص لها الفصل الأول التفصيلي في هذا الجزء، على أن تُستكمل بقية فئات الإضافات في فصول لاحقة ضمن نفس الإطار المنهجي.

وبهذا الأسلوب، لا تُقدّم الإضافات بوصفها قائمة مواد أو توصيفات نظرية، بل كأدوات قرار صناعي يجب اختبارها وفهمها وربطها بقدرات المختبر ومتطلبات التصنيع وجودة المنتج النهائي

- 2.1 كربونات الكالسيوم $CaCO_3$

- تُعد كربونات الكالسيوم من أكثر الموائى استخدامًا في صناعة البلاستيك على مستوى العالم، ليس فقط بسبب وفرتها وانخفاض تكلفتها مقارنة بغيرها من المواد المألوفة، بل لما تمتلكه من قابلية واسعة للتحكم في خصائصها الفيزيائية من حيث الحجم الحبيبي، وتوزيع الأحجام، والمعالجة السطحية، وما يترتب على ذلك من

تأثير مباشر في سلوك المصهور، وخصائص المنتج النهائي، واستقرار العملية الإنتاجية. ورغم هذا الانتشار الواسع، فإن كربونات الكالسيوم تُعد في الوقت نفسه من أكثر المواد التي أُسيئ فهمها ويساء استخدامها في المصانع، نتيجة اختزالها في مفهوم واحد هو ملئ الحجم وتخفيض التكلفة، دون إدراك أن اختيار نوعها وطريقة استخدامها يعد قراراً صناعياً متكامل الأبعاد، لا يقل أهمية عن اختيار البوليمر نفسه.

- التركيب الكيميائي والبنية البلورية

- كربونات الكالسيوم مركب غير عضوي صيغته الكيميائية CaCO_3 ، ويتكون من أيون الكالسيوم المرتبط بأيون الكربونات. وتوجد في الطبيعة بعدة أشكال بلورية، إلا أن الشكل السائد صناعياً في تطبيقات البلاستيك هو الكالسيت، نظراً لاستقراره النسبي، وسهولة معالجته، وتوفره بكميات كبيرة. ولا ينعكس الاختلاف البلوري في التطبيقات البلاستيكية فقط على الخصائص النظرية للمادة، بل يظهر أثره العملي في قابلية الطحن، وشكل الجسيمات الناتجة، والتفاعل مع البوليمر أثناء المعالجة.

- مصادر الاستخراج وجودة الخام

- تُستخرج كربونات الكالسيوم الطبيعية من مصادر جيولوجية مختلفة مثل الحجر الجيري والرخام والطباشير. ويعد الخام المستخرج هو الأساس الحقيقي لجودة المالى النهائي، إذ إن درجة النقاء، ونسبة الشوائب المعدنية، ولون الخام، وتركيبه البلوري، جميعها عوامل تحدد إلى حد كبير صلاحية المادة للاستخدام في البلاستيك. ولا يمكن تعويض خام منخفض الجودة بعمليات طحن متقدمة فقط، لأن الشوائب، وخصوصاً السيليكا وأكاسيد المعادن، تنعكس مباشرة على التآكل، واللون، واستقرار التشغيل، حتى وإن بدا المسحوق ناعماً ظاهرياً.

- الطحن والتحكم في الحجم الحبيبي:

- تمر كربونات الكالسيوم بعد الاستخراج بمراحل تكسير وطحن متعددة، تبدأ بالتكسير الأولي لتقليل الحجم، ثم الطحن الدقيق للوصول إلى درجات ميكرونية مختلفة. وفي هذه المرحلة، لا يكون الميكرون رقمًا منفردًا كما يتداول، بل توصيفاً ناقصاً إذا لم يُربط بتوزيع الأحجام الحبيبية الكامل.

- يعبر عن توزيع الحجم الحبيبي عادة بقيم d_{10} و d_{50} و d_{90} ، وهي قيم مستخلصة من منحنى توزيع الأحجام. وتمثل قيمة d_{50} الحجم الوسيط، أي أن نصف الجسيمات أصغر منه ونصفها أكبر، في حين تعبر d_{90} عن الحد الأعلى الذي تقع تحته 90% من الجسيمات. وتكمن الأهمية الصناعية الحقيقية لهذه القيم في أن المشكلات التشغيلية والبصرية لا تنتج غالباً عن الحجم الوسطي، بل عن الذيل الخشن للتوزيع، أي الجسيمات الأكبر حجماً التي تمثل نسبة صغيرة عددياً لكنها ذات أثر كبير عملياً.

- فكربونات كالسيوم بقيمة d50 منخفضة قد تبدو مناسبة نظرياً، لكنها إذا امتلكت d90 مرتفع أو بقايا ملحوظة على الغربال، فإنها قد تسبب خشونة سطحية، وارتفاع العكورة، وسد الفلاتر، وعدم استقرار التشغيل، خصوصاً في تطبيقات الأفلام الرقيقة. ولهذا، فإن قراءة نشرة البيانات (Datasheet) لكربونات الكالسيوم قراءة صحيحة تقتضي النظر إلى التوزيع الكامل، لا الاكتفاء برقم واحد يسوق على أنه الميكرون

- المعالجة السطحية ودورها في التوافق مع البوليمر :

- كربونات الكالسيوم مادة محبة للماء بطبيعتها، في حين أن معظم البوليمرات المستخدمة في صناعة البلاستيك محبة للزيت. ويؤدي هذا التباين إلى ضعف التشتت داخل المصفوفة البوليمرية إذا استخدمت المادة دون معالجة سطحية مناسبة.
- ولهذا تخضع كربونات الكالسيوم في معظم تطبيقات البلاستيك لمعالجة سطحية، ويتم ذلك غالباً باستخدام أحماض دهنية مثل حمض الستيريك، بهدف تحسين التوافق، وتقليل التكتل، وتحسين التوزيع داخل المصهور.
- ولا تكمن أهمية المعالجة السطحية في وجودها فقط، بل في نوع مادة المعالجة ونسبتها وثباتها. فالمعالجة الناقصة تؤدي إلى ضعف التشتت وارتفاع امتصاص الرطوبة، في حين أن المعالجة الزائدة قد تسبب آثاراً جانبية مثل ضعف اللحام، أو تغير السلوك الحراري، أو انزلاق غير مرغوب أثناء التشغيل.

- قراءة نشرة البيانات (Datasheet) كربونات الكالسيوم :

- تتجاوز قراءة نشرة البيانات (Datasheet) كربونات الكالسيوم حدود التأكد من الميكرون أو النقاء، لتشمل تحليلاً متكاملاً لعدة عناصر مترابطة. فالحجم الحبيبي وتوزيعه يحددان السلوك الميكانيكي والبصري، في حين تؤثر المساحة السطحية ونوع المعالجة السطحية على لزوجة المصهور وقابلية التشتت. كما تلعب الرطوبة والبياض والكثافة الظاهرية دوراً مباشراً في استقرار التغذية داخل الماكينة، وفي ثبات اللون والمظهر النهائي للمنتج.
- ولهذا، فإن أي قرار صناعي يعتمد على كربونات الكالسيوم يجب أن يبنى على قراءة نشرة البيانات قراءة تفسيرية، لا وصفية، تربط الأرقام بسلوك فعلي متوقع داخل خط الإنتاج.

- تركيب كربونات الكالسيوم على البوليمر في صورة ماستر باتش :

- في معظم تطبيقات البولي إيثيلين والبولي بروبيلين، لا تضاف كربونات الكالسيوم مباشرة على شكل مسحوق في معظم التطبيقات البلاستيكية، بل تُركَّب على البوليمر في صورة ماستر باتش. ويعود ذلك إلى أن الماستر باتش يوفر تحكماً أفضل في الجرعات، ويضمن تشتتاً أعلى، ويقلل من التكتل والغبار، ويؤدي إلى ثبات أعلى في الجودة بين الدفعات.

- ويتكوّن ماستر باتش كربونات الكالسيوم من المالى نفسه، وبوليمر حامل متوافق مع التطبيق، إضافة إلى مواد مساعدة على التثنت والتشغيل. ويُعد اختيار البوليمر الحامل ونسبة التحميل قرارًا تشغيليًا حساسًا، إذ إن الزيادة المفرطة في نسبة المالى داخل الماستر باتش قد تؤدي إلى صعوبة التثنت، في حين أن انخفاضها قد يقلل الجدوى الاقتصادية دون تحسين فعلي في الأداء.
- وتفشل بعض إضافات الماستر باتش المحمله على كربونات الكالسيوم في السوق رغم تشابه نسب التحميل المعلنة، بسبب ضعف التثنت، أو سوء اختيار البوليمر الحامل، أو عدم ملائمة البرغي المستخدم في عملية تصنيع الحبيبات، وهو ما يؤكد أن نجاح الماستر باتش لا يُعاس بالتركيب النظري فقط، بل بجودة التنفيذ.
- **الحالات التي تُستخدم فيها كربونات الكالسيوم مباشرة دون تركيب :**
- رغم شيوع استخدام الماستر باتش، توجد تطبيقات تُستخدم فيها كربونات الكالسيوم مباشرة دون تركيب، كما في أنظمة PVC ، حيث تُضاف ضمن خلطات جافة تحتوي على البوليمر والمثبتات ومواد التشحيم. وفي هذه الأنظمة، يكون التحكم في حجم الجسيم والتوزيع والمعالجة السطحية أكثر حساسية، نظرًا لاعتماد العملية على الخلط المباشر دون وسيط بوليمري، ويصبح أي خلل في جودة المالى ظاهرًا بشكل أسرع على المنتج والعملية.
- **تأثير كربونات الكالسيوم على خصائص المنتج النهائي :**
- تؤثر كربونات الكالسيوم على الخواص الميكانيكية والبصرية للمنتج بشكل متداخل. فهي تميل إلى زيادة الصلابة وتحسين الاستقرار البعدي، وهو ما يعد مرغوبًا في كثير من التطبيقات، إلا أنها في المقابل تؤدي غالبًا إلى انخفاض الاستطالة ومقاومة الصدم إذا لم يحسن اختيار حجم الجسيم أو طريقة المعالجة.
- أما من الناحية البصرية، فإن كربونات الكالسيوم تقلل الشفافية نتيجة تشتت الضوء، وتزيد العكورة كلما ازداد حجم الجسيم أو سوء التوزيع. وقد تحسّن الإحساس بالبياض أو العتامة في بعض المنتجات، لكنها لا تُعد بديلًا حقيقيًا للمواد المصممة خصيصًا للتلوين الأبيض، كما أن تأثيرها على اللعان غالبًا ما يكون سلبيًا بسبب زيادة خشونة الميكروسكوبية للسطح .

- تأثير كربونات الكالسيوم على الماكينات واستقرار العملية :
- لا يقتصر تأثير كربونات الكالسيوم على المنتج النهائي، بل يمتد إلى الماكينات نفسها. فهي ترفع لزوجة المصهور وتزيد الضغط داخل ال Die، ما قد يؤدي إلى ارتفاع استهلاك الطاقة أو انخفاض الإنتاجية. كما تؤثر جودة التوزيع الحبيبي على عمر الفلاتر، حيث تؤدي الجسيمات الكبيرة أو التكتلات إلى انسداد أسرع وعدم استقرار التشغيل.
- وتُعد الشوائب المعدنية، لا كربونات الكالسيوم نفسها، العامل الأساسي في التآكل المبكر لل Screws& Die's ، وهو ما يجعل نقاء الخام عاملاً حاسماً في اختيار المورد المناسب، خصوصاً في خطوط الإنتاج المستمرة.
- نسب الإضافة وحدود الأمان الصناعي :
- لا توجد نسبة إضافة واحدة مناسبة لجميع التطبيقات، إذ تعتمد النسبة المثلى على نوع البوليمر، وطبيعة المنتج، ومتطلبات الأداء. فقد تكون نسب منخفضة كافية لتحقيق تحسين في الصلابة أو خفض في التكلفة دون تأثير كبير على الخواص، في حين أن نسباً أعلى قد تؤدي إلى تدهور الأداء الميكانيكي أو البصري إذا لم يُعاد ضبط التصميم والتركيبية بالكامل. ولهذا، فإن تحديد نسبة الإضافة يجب أن يتم ضمن المختبر أو المصنع المصغّر، ووفق منهج تجريبي مدروس، لا عبر التجربة المباشرة في الإنتاج وانتظار رد فعل السوق.
- كربونات الكالسيوم كقرار صناعي متكامل :
- إن استخدام كربونات الكالسيوم ليس قراراً بسيطاً يتعلق بتخفيض التكلفة فقط، بل هو قرار يؤثر في جودة المنتج، واستقرار التشغيل، وعمر المعدات، وثقافة اتخاذ القرار داخل المصنع. والفرق بين استخدام ناجح وآخر فاشل لا يكمن في السعر، بل في فهم طبيعة المادة، وقراءة بياناتها قراءة صحيحة، واختبارها ضمن منظومة المختبر قبل اعتمادها في الإنتاج الاعتيادي.
- وبهذا المعنى، فإن كربونات الكالسيوم لا تمثل مجرد مالى ضمن قائمة الإضافات، بل تشكل نموذجاً عملياً لفهم فلسفة التعامل مع الإضافات الصناعية كلها، من حيث الاختيار، والاختبار، والتطبيق.

- جدول (1) تفسير توزيع الحجم الحبيبي (d-values) وتأثيره الصناعي :

البند	ماذا يعني	التأثير العملي في المصنع	متى يصبح خطرًا
d10	أصغر 10% من الجسيمات	مؤشر النعومة القصوى	d10 منخفض جدًا = زيادة لزوجة وتكتل
d50	الحجم الوسيط	يعطي فكرة عامة فقط	الاعتماد عليه وحده مضلل
d90	أكبر 10% من الجسيمات	مصدر أغلب المشاكل	d90 مرتفع = فلاتر، خشونة، ضعف شفافية
PSD ضيق	أحجام متقاربة	تشغيل مستقر، سطح أنعم	نادر في المواد الرخيصة
PSD واسع	تفاوت كبير	تذبذب جودة وتشغيل	خطر في الأفلام الرقيقة

- في كثير من التطبيقات، يكون d90 أهم من d50 ، لأن الجسيمات الأكبر هي التي تتحكم في سلوك السطح والفلاتر، لا المتوسط الحسابي.

- جدول (2) كيف تقرأ نشرة البيانات Datasheet CaCO₃ من منظور مصنع بلاستيك :

خاصية في نشرة البيانات	ماذا يظن المبتدئ	ماذا تعني فعليًا	القرار الصحيح
2 μm CaCO ₃	كل الجسيمات 2 μm	d50 فقط	اسأل عن d90 و PSD
Coated	مادة ممتازة	نوع ونسبة المعالجة غير معروفة	اطلب نوع coating ونسبته
CaCO ₃ % = 98%	نقاء كافٍ	لا يوضح نوع الشوائب	اسأل عن SiO ₂ و Fe ₂ O ₃

جفف أو غير المورد	مؤثر في التشغيل	رقم صغير	Moisture 0.2%
افحص haze فعلياً	لا يعني شفافية	أبيض جيد	Whiteness عالي
مهمة للاستقرار	تؤثر على التغذية	معلومة ثانوية	Bulk density

- جدول (3) مقارنة CaCO_3 معالج وغير معالج :

البند	معالج سطحياً	غير معالج
التشتت في البوليمر	جيد	ضعيف
امتصاص الرطوبة	أقل	أعلى
لزوجة المصهور	أقل	أعلى
استقرار التشغيل	أفضل	ضعيف
اللاحام في الأفلام	قد يتأثر إذا زادت المعالجة	أفضل أحياناً
الاستخدام المفضل	PE / PP أفلام	PVC خلط جاف

- جدول (4) متى تستخدم CaCO_3 كـ Masterbatch ومتى كبودرة مباشرة :

الحالة	إضافة مباشرة (Powder)	Masterbatch
أفلام PE/PP	غير مفضل	الخيار الأفضل
حقن PE/PP	غير مفضل	مفضل
PVC	شائع	أقل شيوعاً
تحكم الجرعة	صعب	ممتاز

Masterbatch	إضافة مباشرة (Powder)	الحالة
منخفض	مرتفع	الغبار والسلامة
عالي	متذبذب	ثبات الجودة

- جدول (5) تأثير CaCO_3 على الخواص الميكانيكية والبصرية :

ملاحظات مهمة	التأثير العام	الخاصية
مفيد للاستقرار	تزداد	الصلابة
حسب الميكرن والتشتت	تنخفض	الاستطالة
يتدهور مع d90 مرتفع	غالبًا ينخفض	الصدم
يعتمد على الاتجاه	متغير	التمزق (Film)
CaCO_3 يشتت الضوء	تنخفض	الشفافية
ليس بديل TiO_2	قد يتحسن	البياض
بسبب خشونة السطح	ينخفض	اللمعان

- جدول (6) تأثير CaCO_3 على الماكينات والعملية :

العنصر	سبب التأثير	التأثير
Screw	شوائب معدنية	تآكل تدريجي
Die	لزوجة المصهور	ضغط أعلى
Filters	جسيمات كبيرة / تكتل	انسداد أسرع
استهلاك الطاقة	مقاومة تدفق أعلى	يزداد
استقرار الفقاعة	توزيع غير متجانس	قد يتدهور

- جدول (7) نسب الإضافة الإرشادية وحدودها :

التطبيق	نطاق شائع	ملاحظات
أفلام رقيقة	5-15%	فوق ذلك خطر على الشفافية
أكياس ثقيلة	10-30%	حسب المتطلبات
حقن	10-40%	الصدمة يتدهور
PVC أنابيب	10-60%	شائع جدًا
منتجات شفافة	$\leq 5\%$	أو لا يوصى باستعماله

- جدول (8) أخطاء صناعية شائعة وتأثيرها المباشر :

الخطأ	النتيجة
اختيار الأرخص فقط	مشاكل تشغيل وهالك

الخطأ	النتيجة
تجاهل d90	انسداد فلاتر وخشونة
تغيير مورد دون اختبار	تذبذب جودة
زيادة النسبة دون تعديل التصميم	فشل ميكانيكي
عدم اختبار في المختبر	تجربة على السوق

- هذه الجداول لا تهدف إلى إعطاء وصفات جاهزة، بل إلى تحويل بيانات المورد إلى أدوات تحليل تساعد متخذ القرار الصناعي على الربط بين الرقم المكتوب في نشرة البيانات وما يحدث فعلياً داخل خط الإنتاج.
- وتجدر الإشارة الى ان الدولوميت (Dolomite) بوصفه من المائات المعدنية التي تُستخدم في صناعة البلاستيك و بوصفه خياراً اقتصادياً ضمن عائلة كربونات الكالسيوم، ويُعرّف علمياً بأنه كربونات الكالسيوم والمغنيسيوم. ويقترّب الدولوميت في فكرته العامة من كربونات الكالسيوم من حيث كونه مادة مألوفة تحقق زيادة في الحجم وخفضاً في التكلفة، إلا أن سلوكه الصناعي يختلف تبعاً لدرجة نقاوته ومصدره وتوزيع حجمه الحبيبي ويظهر استخدام الدولوميت بشكل أوضح في تطبيقات ال PVC، وخاصة في أنابيب الصرف الصحي وبعض المنتجات غير الشفافة التي لا يكون فيها المظهر البصري عاملاً حاسماً، حيث يسهم في خفض التكلفة وتحقيق ملء حجمي مناسب ضمن حدود قبول السوق لهذا النوع من المنتجات. وفي هذه التطبيقات، لا يُطلب من المالى توفير شفافية أو مظهر أبيض ناصع، بل يُركز على الاستقرار العام والتكلفة.
- ومع ذلك، ينبغي التعامل مع الدولوميت على أنه مالى حساس للجودة أكثر مما يتوقعه البعض، إذ ان وجود شوائب معدنية أو تذبذب في النقاء أو ارتفاع في الجسيمات الخشنة قد يؤدي إلى آثار غير مرغوبة مثل تغير اللون، أو زيادة التآكل، أو ضعف بعض الخواص الميكانيكية مقارنة بدرجات كربونات الكالسيوم عالية الجودة. لذلك فإن إدخاله في التركيبات ينبغي أن يسبقه اختبار استلام واضح، وأن يُستخدم ضمن تطبيقات مناسبة لطبيعته، لا بوصفه بديلاً مطلقاً لكربونات الكالسيوم في جميع المنتجات. ولكن يجري عليه من الإجراءات والاختبارات ما يجري على كربونات الكالسيوم.

- 2.2 التالك

- يعد التالك من الموائى المعدنية التي تحتل موقعا خاصا في صناعة البلاستيك، ليس بوصفه مادة لملء الحجم فقط، بل بوصفه عنصرا يؤثر بشكل مباشر في تصميم المنتج وسلوكه الميكانيكي والبُعدي والبصري. ورغم شيوع استخدامه، فإن التالك يساء فهمه صناعيا في كثير من الحالات كما هو الحال في معظم مواد الملئ، حيث يتعامل معه كبديل مباشر لكربونات الكالسيوم، دون إدراك أن الاختلاف بين المادتين اختلاف وظيفي وبنوي قبل أن يكون اختلافاً في السعر أو الكثافة.

- التركيب الكيميائي والبنية الفيزيائية :

- التالك معدن سيليكات مائية، صيغته الكيميائية التقريبية $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ، ويتميز ببنية بلورية صفائحية تتكون من طبقات مترابطة بروابط ضعيفة نسبياً. هذه البنية الصفائحية تمنح التالك خاصية الانزلاق الداخلي، وتجعله يتصرف داخل البوليمر بطريقة مختلفة جذرياً عن الموائى ذات الجسيمات الكروية. ويعد شكل الجسيم العامل الحاسم في سلوك التالك، إذ إن احتفاظ الجسيم ببنية الصفائحية ينعكس مباشرة على زيادة الصلابة، وتقليل الانكماش، وتحسين الاستقرار البعدي. أما فقدان هذه البنية نتيجة الطحن المفرط، فيؤدي إلى تراجع واضح في القيمة الوظيفية للتالك، حتى وإن بدا ناعماً ظاهرياً.

- مصادر الاستخراج ونقاء الخام :

- يُستخرج التالك من رواسب طبيعية تختلف اختلافاً كبيراً في نقائها وتركيبها المعدني. وتُعد الشوائب المعدنية، وخصوصاً الشوائب القاسية، من أخطر العوامل المرتبطة باستخدام التالك في البلاستيك، لما تسببه من تأثير سلبي على الخواص الميكانيكية وعلى عمر الماكينات. ولهذا، فإن التالك المستخدم في التطبيقات البلاستيكية لا يُختار بناءً على النعومة أو اللون فقط، بل بناءً على مستوى النقاء، وثبات التركيب، وملاءمته للتطبيق المستهدف.

- الطحن وتوزيع الحجم والشكل الحبيبي :

- لا يمكن توصيف التالك برقم ميكروني واحد. ورغم استخدام قيم مثل d50 و d90 لتمثيل توزيع الحجم الحبيبي، إلا أن هذه القيم لا تعكس وحدها السلوك الحقيقي للتالك داخل البوليمر. العامل الأهم هنا هو نسبة الطول إلى السمك (Aspect Ratio)، التي تعبّر عن مدى احتفاظ الجسيم بشكله الصفائحي بعد الطحن. فالتالك ذو Aspect Ratio مرتفع يعطي تأثيراً أوضح في زيادة الصلابة وتقليل الانكماش، بينما التالك الذي يفقد هذا الشكل يتحول تدريجياً إلى مالى محدود التأثير، أقرب في سلوكه إلى الموائى التقليدية.

- الحاجة إلى المعالجة السطحية :

- على العكس من كربونات الكالسيوم، لا يعد التالك مادة تتطلب معالجة سطحية إلزامية للاستخدام في البلاستيك. ويرجع ذلك إلى طبيعته السطحية الأقل قطبية، وقابليته الأفضل للتوافق مع البوليمرات غير القطبية مثل البولي إيثيلين والبولي بروبيلين.
- ومع ذلك، قد تستخدم درجات معالجة من التالك في تطبيقات خاصة لتحسين التشتت أو ضبط الأداء عند نسب تحميل مرتفعة، إلا أن هذه المعالجة تُعد خياراً وظيفياً لا ضرورة أساسية، ولا تهدف إلى معالجة مشكلة توافق جوهريّة كما هو الحال مع كربونات الكالسيوم.

- تركيب التالك على البوليمر :

- يستخدم التالك غالباً ضمن عمليات التركيب (Compounding)، سواء أضيف مباشرة أثناء الخلط أو في صورة حبيبات (ماستر باتش) عند الحاجة إلى دقة جرعات وثبات أعلى في الجودة.
- ويشجع استخدامه في أنظمة البولي بروبيلين، خصوصاً في تطبيقات الحقن، حيث يستفاد من قدرته على رفع الصلابة، وتقليل الانكماش، وتحسين الاستقرار البعدي.
- غير أن هذه الفوائد تأتي على حساب بعض الخواص الأخرى، مثل مقاومة الصدم والاستطالة، وهو ما يستدعي إعادة ضبط تصميم القطعة أو التركيبة الكلية عند رفع نسبة التالك.

- التأثير البصري للتالك:

- من الناحية البصرية، يعد التالك غير مناسب للتطبيقات التي تتطلب شفافية، إلا أن طريقة تأثيره تختلف عن الموائى الأخرى. فالتالك لا يفسد الشفافية عبر إحداث عكورة ضبابية عالية، بل يؤثر أساساً من خلال تقليل النفاذية الضوئية وزيادة العتامة نتيجة بنيته الصفائحية واصطفاف جسيماته داخل البوليمر.
- ويكمن الخلط الصناعي الشائع في عدم التمييز بين الشفافية والعكورة والعتامة، حيث قد يبدو المنتج المحتوي على تالك غير شفاف لكنه متجانس بصرياً، في حين يبدو منتج آخر أكثر ضبابية رغم نفاذ الضوء عبره.
- ولهذا، فإن تقييم التأثير البصري للتالك يجب أن يتم بناء على الخاصية المطلوب التحكم بها، لا على الانطباع البصري العام فقط.

- لون حبيبات ماستر باتش التالك :

- يلاحظ في كثير من أصناف حبيبات (الماستر باتش) المبنية على التالك و المركبة على البولي إيثيلين او البولي بروبيلين أن لون الحبيبات يميل إلى درجات خضراء أو بنفسجية أو رمادية، رغم أن هذا اللون لا يظهر بوضوح في المنتج النهائي بعد التخفيف. ويظهر كذلك الميل اللوني في مسحوق التالك أحياناً.
- ولا يُعد هذا اللون ناتجاً عن وجود صبغة، بل هو نتيجة لتأثير بصري مركب ناتج عن تركيز التالك داخل الحبيبة، وسماكتها العالية، واختلاف مسار الضوء داخلها مقارنة بالمنتج النهائي الرقيق والممدود.

- وعليه، فإن لون حبيبات ماسترباتش التالك لا يُعد مؤشرًا مباشرًا على لون المنتج النهائي، ولا يجب استخدامه معيارًا للحكم على جودة المالى ما لم ينعكس هذا اللون بعد الاستخدام الفعلي.
- **التالك في سياق السوق والقرار الصناعي :**
- يُستخدم التالك في كثير من الأحيان بدافع تحسين الخواص الميكانيكية أو الاستقرار البُعدي، لا لتخفيض التكلفة فقط. إلا أن بعض المصانع تقع في خطأ استخدامه ضمن محاولات البحث عن حلول بصرية أو اقتصادية غير مناسبة لطبيعته، ما يؤدي إلى نتائج غير مستقرة أو فشل وظيفي.
- ولهذا، فإن اختيار التالك يجب أن يكون قرارًا هندسيًا مرتبطًا بتصميم المنتج ومتطلبات أدائه، لا قرارًا تكتيكيًا قصير المدى لخفض التكلفة أو تحسين مظهر لحظي.
- **الجدول التفسيرية – التالك**

التأثير	الخاصية
تزداد	الصلابة
ينخفض	الانكماش
يتحسن	الاستقرار البُعدي
تنخفض	الاستطالة
تنخفض	مقاومة الصدم

جدول (2): التأثير البصري للتالك :

التأثير	الخاصية البصرية
تتخفض	النفاذية الضوئية
منخفضة نسبيًا	العكورة
مرتفعة	العتامة
مطفي / معتم	المظهر
غير مناسب	الملاءمة للتطبيقات الشفافة

جدول (3): متى يُستخدم التالك ومتى يُتجنب :

التطبيق	التقييم
حقن PP	مناسب جدًا
قطع هندسية	مناسب
أفلام	غير مناسب
منتجات شفافة	غير مناسب
تطبيقات تتطلب ثبات أبعاد	مناسب جدًا

- جدول (4): أخطاء شائعة في استخدام التالك :

الخطأ	النتيجة
اعتباره بديلاً مباشراً لـ CaCO_3	فشل وظيفي
تجاهل شكل الجسيم	ضعف الأداء
اختيار نعومة مفرطة	فقدان القيمة الوظيفية
رفع النسبة دون تعديل التصميم	تشقق وكسر

الخلاصة العملية أن التالك ليس مادة ملئ عامة ويعتبر من المواد التي تؤدي دورا في الحلول البصرية ، بل مادة ذات وظيفة تصميمية واضحة تؤثر في الصلابة والاستقرار البُعدي والمظهر. ويمكن النجاح في استخدامه في فهم بنيته الصفائية وحدود تأثيره، لا في البحث عن حلول سريعة لتحقيق توازن ظاهري بين السعر والمظهر.

- الموائى المتخصصة ذات التأثير البنيوي والبصري غير التقليدي :

- بعد استعراض الموائى ذات الاستخدام العام، يصبح من الضروري التوقف عند فئة من الموائى التي لا تُختار بناءً على معيار واحد مثل التكلفة أو النعومة، بل تُستخدم لتحقيق وظيفة هندسية أو سلوكية محددة داخل المنتج البلاستيكي .
- هذه الموائى لا تُعد حلولاً عامة، ولا بدائل مباشرة، بل أدوات تصميم صناعي تُستخدم بوعي كامل بآثارها الجانبية وحدودها الوظيفية.
- وتُعد الميكا من أبرز هذه الموائى إذ تجمع بين تأثير بنيوي واضح وتأثير بصري خاص، ما يجعلها مادة دقيقة الاستخدام، عالية القيمة في موضعها الصحيح، ومُضِلَّة إذا استُخدمت خارج سياقها.

- 2.3 الميكا (Mica)

الميكا ليست مائلاً تقليدياً يُستخدم لملء الحجم أو خفض التكلفة، بل مادة ذات دور بنيوي طويل الأمد، تُستخدم للتحكم في استقرار المنتج البلاستيكي من الناحية الميكانيكية والحرارية، وأحياناً الكهربائية.ولهذا، فإن إدراج الميكا في تركيبة بوليمرية يجب أن يكون قراراً هندسياً واعياً، لا خياراً اقتصادياً أو بصرياً سريعاً.

- التركيب الكيميائي والبنية الفيزيائية :

الميكات عائلة من المعادن السيليكاتية، تتميز جميعها ببنية بلورية صفائحية عالية الانتظام. وتتكون هذه البنية من طبقات رقيقة جداً ذات مساحة سطحية كبيرة ونسبة طول إلى سمك مرتفعة، ما يمنح الميكات قدرتها المميزة على مقاومة التشوه، وتقليل التمدد، وتحسين الاستقرار البُعدي. ويُعد هذا الشكل الصفائحي العامل الأساسي الذي يحدد سلوك الميكات داخل البوليمر، ويجعل تأثيرها مختلفاً جذرياً عن الموالي الكروية أو شبه الكروية.

ألوان الميكات في الطبيعة وأثرها الصناعي تتوفر الميكات في الطبيعة بألوان متعددة، تشمل:

- عديمة اللون أو شبه شفافة

- فضية أو رمادية

- بيضاء

- بنية أو ذهبية

- خضراء

- سوداء

- ويرتبط هذا التنوع اللوني بالتركيب المعدني ونوع الشوائب المصاحبة لكل نوع من أنواع الميكات. إلا أن هذا التعدد الطبيعي لا يعني بالضرورة قابلية جميع هذه الألوان للاستخدام الصناعي في البلاستيك.

- في التطبيقات البلاستيكية، تُستخدم عادة الميكات الفاتحة عالية النقاء، ويتم اختيارها بناءً على :

- النقاء

- ثبات التركيب

- انتظام البنية الصفائحية لا على أساس اللون الخام وحده.

- الميكات والشفافية :

من الناحية البصرية، لا تُعد الميكات خياراً مناسباً للتطبيقات التي تتطلب شفافية أو شبه شفافية. فالبنية الصفائحية للميكات تؤدي إلى:

- تقليل النفاذية الضوئية بشكل حاد

- زيادة العتامة

- إحداث تشتت واتجاهية في الضوء

حتى الدرجات الفاتحة أو شبه الشفافة من الميكا تؤدي إلى فقدان واضح للشفافية عند نسب منخفضة نسبياً، ما يجعل استخدامها في المنتجات الشفافة غير عملي وغير مستقر بصرياً. وعليه فإن أي محاولة لاستخدام الميكا لتحقيق شفافية تُعد سوء فهم لطبيعتها الفيزيائية.

هل يمكن استخدام الميكا ذات الألوان الطبيعية أو غير الشفافة كميزة لونية في التطبيقات البلاستيكية؟
نعم، لكن بشروط.

يمكن استخدام بعض أنواع الميكا ذات الألوان الطبيعية أو اللعان المعدني كميزة بصرية مقصودة في تطبيقات محددة، وليس بوصفها مألئاً عاماً ويكون ذلك عندما:

- يكون المنتج غير شفاف أصلاً ويُراد الحصول على تأثير لؤلؤي أو لمعة معدنية أو مظهر زخرفي خاص

- وتُستخدم الميكا بنسب مدروسة في تطبيقات لا تتطلب تجانساً بصرياً صارماً

في هذه الحالات، لا تُستخدم الميكا لتحقيق لون متجانس كما هو الحال مع الأصباغ، بل لتحقيق تأثير بصري خاص ناتج عن انعكاس الضوء على الصفائح.

أما استخدام الميكا الملونة أو الداكنة: لتحقيق لون ثابت أو لتعويض الصبغات أو في منتجات يُطلب منها تجانس لوني دقيق فهو استخدام غير صحيح، ويؤدي غالباً إلى نتائج غير مستقرة أو مرفوضة تسويقياً.

- الحاجة إلى المعالجة السطحية :

لا تتطلب الميكا معالجة سطحية إلزامية كما هو الحال مع كربونات الكالسيوم، إلا أن بعض التطبيقات الخاصة قد تستفيد من معالجات سطحية تهدف إلى:

- تحسين التشتت
- تعزيز الالتصاق البيئي
- أو ضبط بعض الخواص الوظيفية

- وتُعد هذه المعالجة خيارًا تقنيًا دقيقًا، لا خطوة افتراضية.

الميكات كقرار صناعي عندما يكون الهدف:

- استقرارًا بُعديًا طويل الأمد
- مقاومة حرارية
- خصائص كهربائية محددة
- أو مظهرًا مطفيًا أو زخرفيًا خاصًا غير شفاف

ولا تُستخدم:

- لتحقيق شفافية
- أو لتخفيض التكلفة
- أو كبديل مباشر للمالئات أخرى

- الجداول التفسيرية – الميكات

جدول (1): ملخص الهوية الوظيفية للميكات :

البند	التوصيف
نوع المائ	بنوي وظيفي
شكل الجسم	صفائحي عالي النسبة
الشفافية	غير مناسبة
الاستخدام الاقتصادي	غير مناسب
الاستخدام الزخرفي	محدود ومقصود

جدول (2): تأثير اللون والبنية على المظهر :

العامل	التأثير
لون الميكا الطبيعي	لا يُعتمد عليه صناعيًا
البنية الصفائحية	تزيد العتامة
النسب المرتفعة	تفقد التجانس
الاستخدام الزخرفي	ممكن بشروط

- **الخلاصة ان الميكا** مالى متخصص يُستخدم للتحكم البنيوي والوظيفي في المنتجات البلاستيكية، وليس أداة لتحقيق شفافية أو لون متجانس. ورغم توفرها في الطبيعة بألوان متعددة، فإن استخدامها الصناعي يظل محكومًا بالنقاء والبنية لا باللون، ولا يُستفاد من خصائصها البصرية إلا في تطبيقات زخرفية محدودة ذات متطلبات واضحة. ويعتمد الاستخدام الصحيح للميكا على تحديد التطبيقات التي تضيف فيها قيمة وظيفية فعلية، واستبعادها من التطبيقات التي تتطلب شفافية أو تجانسًا لونيًا أو مرونة عالية.

- **2.4 الويلاستونيت (Wollastonite) :**

يُعد الويلاستونيت من الموائى المعدنية المتخصصة التي تُستخدم بوصفها أداة تعزيز بنيوي موجّه داخل البوليمرات، لا بوصفها مائلاً اقتصاديًا أو بصريًا. ويكمن تميّزه الأساسي في الشكل الإبري (Acicular) لجسيماته، والذي يمنحه سلوكًا مختلفًا عن الموائى الصفائحية مثل الميكا، سواء من حيث نقل الأحمال أو التأثير على الاستقرار البُعدي والميكانيكي.

ويُساء استخدام الويلاستونيت عندما يُقارن مباشرة بالميكا من حيث الهدف، رغم أن كليهما يُعد مائلاً بنيويًا، إلا أن آلية التأثير مختلفة، وبالتالي فإن مجال الاستخدام الصحيح لكل منهما مختلف أيضًا.

- التركيب الكيميائي والبنية الفيزيائية :

الويلاستونيت معدن سيليكات كالسيوم طبيعي، صيغته الكيميائية CaSiO_3 : ويمتاز ببنية بلورية إبرية، حيث تكون الجسيمات:

- طويلة نسبياً - رفيعة - ذات نسبة طول إلى قطر مرتفعة

هذا الشكل الإبري يجعل الويلاستونيت يعمل كدعامة دقيقة داخل المصفوفة البوليمرية، تنقل الإجهاد وتحسن توزيع الأحمال، وهو ما ينعكس مباشرة على الصلابة وقوة الشد ومقاومة التشوه.

- مصادر الاستخراج ونقاء الخام :

يُستخرج الويلاستونيت من رواسب طبيعية محدودة نسبياً مقارنة بالموالي العامة، ويُعد النقاء عاملاً حاسماً في تحديد صلاحيته للتطبيقات البلاستيكية.

وجود شوائب معدنية أو أطوار سيليسية غير مرغوبة قد:

- يؤثر على الخواص الميكانيكية
- يزيد من تآكل معدات المعالجة
- يحد من الاستقرار التشغيلي

ولهذا، فإن الويلاستونيت المستخدم في البلاستيك يكون غالباً:

- مُنتقى عالي النقاء
- ومصنفاً حسب طول الإبرة
- ومخصصاً لتطبيقات هندسية

- الطحن وتوزيع الحجم والشكل الإبري :

كما هو الحال مع الموالي البنيوية، لا يمكن توصيف الويلاستونيت برقم ميكروني واحد فالعامل الحاسم هنا هو:

- طول الإبرة
- ونسبة الطول إلى القطر (Aspect Ratio)
- الطحن المفرط قد:
- يكسر الإبر
- يحوّل الجسيمات إلى أشكال قصيرة أو شبه كروية
- ويؤدي إلى فقدان الجزء الأكبر من القيمة البنيوية

ولهذا فإن اختيار درجة الويلاستونيت يعتمد على الاحتفاظ بالشكل الإبري بقدر ما يعتمد على النعومة.

- الحاجة إلى المعالجة السطحية :

الويلاستونيت أكثر قطبية من الميكا، وأقرب في هذا الجانب إلى كربونات الكالسيوم، ما يجعل المعالجة السطحية خيارًا شائعًا في كثير من التطبيقات.

وتُستخدم المعالجة السطحية بهدف:

- تحسين التوافق مع البوليمر
- تعزيز الالتصاق البيئي
- تحسين نقل الإجهاد
- تقليل التكتل أثناء الخلط

وعلى عكس الميكا، فإن المعالجة السطحية للويلاستونيت غالبًا ما تكون ذات أثر مباشر وواضح على الأداء الميكانيكي.

تركيب الويلاستونيت على البوليمر يُستخدم الويلاستونيت عادة في:

- البولي بروبيلين
 - بعض أنظمة البولي إيثيلين
 - المركبات البلاستيكية شبه الهندسية
- ويُضاف غالبًا عبر:

- عمليات التركيب المباشر
 - ماستر باتش عند الحاجة إلى دقة توزيع أعلى
- ولا يُستخدم الويلاستونيت في الأفلام أو المنتجات الرقيقة، نظرًا لتأثيره القوي على الصلابة والاستطالة.

- التأثير الميكانيكي والبُعدي/يؤدي إدخال الويلاستونيت إلى:

- زيادة واضحة في الصلابة
- تحسين قوة الشد
- تقليل التشوه تحت الحمل
- تحسين الاستقرار البُعدي

وفي المقابل:

- تنخفض الاستطالة
- وقد تتأثر مقاومة الصدم سلبًا إذا لم يُضبط التصميم
- الويلاستونيت ينقل الأحمال
- الميكا تُقيّد الحركة

- التأثير البصري :

- من الناحية البصرية، لا يُعد الويلاستونيت خيارًا للتطبيقات الشفافة. فجسيماته الإبرية تؤدي إلى:
- تشتت الضوء
- تقليل النفاذية
- زيادة العتامة
- إلا أن تأثيره البصري غالبًا:
- أقل صفائية
- أقل لمعانًا من الميكا، ما يجعله بصريًا أكثر حيادية في المنتجات غير الشفافة.

- مقارنة بين الويلاستونيت والميكا :**- جدول (3) آلية التأثير البنيوي :**

الميكا	الويلاستونيت	البند
صفائحي	إبري	شكل الجسيم
تقييد الحركة	نقل الأحمال	آلية التعزيز
مرتفع	مرتفع	التأثير الاتجاهي
تزداد	تزداد بوضوح	الصلابة
مرتفع	مرتفع	الاستقرار البُعدي
تنخفض	تنخفض	الاستطالة

- جدول (4) التشغيل والمعالجة :

البند	الويلاستونيت	الميك
الحاجة للمعالجة السطحية	شائعة	اختيارية
حساسية للطحن	عالية	عالية
تأثيره على المعدات	قد يكون أعلى	محدود

- جدول (5) الاستخدام الصحيح :

التطبيق	الويلاستونيت	الميك
تطبيقات كهربائية	محدود	مناسب
تطبيقات حرارية	مناسب	مناسب
تعزيز ميكانيكي	مرتفع	متوسط
بديل للألياف	مناسب جزئياً	غير مناسب
تطبيقات زخرفية	نادر	ممكن بشروط

- الويلاستونيت كقرار صناعي يُستخدم الويلاستونيت عندما يكون الهدف:

- تعزيز ميكانيكي فعلي
- تحسين نقل الأحمال
- تقليل التشوه
- رفع الأداء البنيوي دون اللجوء إلى ألياف تقليدية

ولا يُستخدم:

- لتحقيق شفافية
- أو كحل اقتصادي عام
- أو في المنتجات الرقيقة أو المرنة

- الجداول التفسيرية – الويلاستونيت

- جدول (6) الهوية الوظيفية :

البند	التوصيف
نوع المالى	بنيوي إبري
الهدف الأساسي	تعزيز ميكانيكي
الشفافية	غير مناسبة
المعالجة السطحية	شائعة
البدائل	ألياف قصيرة

فصل القول ان الويلاستونيت مالى بنيوي متخصص يعمل عبر نقل الأحمال داخل المصفوفة البوليمرية، ويُستخدم لتحقيق تعزيز ميكانيكي فعلي في التطبيقات الهندسية. ويختلف جوهرياً عن الميكا في آلية التأثير، رغم تقاطعه معها في بعض النتائج النهائية. ويعتمد نجاح استخدامه على اختيار الدرجة المناسبة، والحفاظ على الشكل الإبري، وضبط المعالجة السطحية والتصميم الهندسي للمنتج.

2.5 كبريتات الباريوم (Barium Sulfate)

تُعد كبريتات الباريوم كمالئ كثافي وبصري محايد في صناعة البلاستيك و من الموالئ المعدنية المتخصصة التي لا تستخدم لتحقيق تعزيز ميكانيكي، ولا لتخفيض التكلفة، بل لتحقيق ضبط كثافي وبصري دقيق داخل المنتج البلاستيكي. ويكمن تميزها الأساسي في كثافتها العالية وثباتها الكيميائي، ما يجعلها مالنا وظيفيا يستخدم عندما تكون الكتلة، أو العتامة المتجانسة، أو ثبات اللون عوامل حاكمة في التصميم الصناعي.

ويساء استخدام كبريتات الباريوم عندما تقارن مباشرة بكربونات الكالسيوم من منظور اقتصادي، أو بالتاليك من منظور ميكانيكي، في حين أن مجال عملها مختلف جذريا عنهما.

- التركيب الكيميائي والبنية الفيزيائية :

كبريتات الباريوم مركب غير عضوي، صيغته الكيميائية : $BaSO_4$

ويمتاز بثبات كيميائي وحراري عال، وعدم ذوبانه في الماء، وخمول تفاعلي داخل معظم الأنظمة البوليمرية. وتكون جسيماته عادة:

- غير صفائية
 - وغير إبرية
 - وشبه كروية أو غير منتظمة
- وهذا يعني أن تأثيره داخل البوليمر غير بنيوي، ولا يهدف إلى نقل الأحمال أو تقييد الحركة، بل إلى إضافة كتلة وتعديل الخصائص البصرية بشكل متزن.

- مصادر الإنتاج والنقاء :

تتوفر كبريتات الباريوم من التالي:

- مصادر طبيعية (Baryte)
- صناعي مرسب عالي النقاء

وفي تطبيقات البلاستيك، تفضل عادة الدرجات:

- عالية النقاء
 - ذات توزيع حبيبي متجانس
 - منخفضة الشوائب اللونية
- لأن أي شوائب معدنية قد:
- تؤثر على البياض
 - أو تسبب تغيرا لونيا غير مرغوب في المنتجات الفاتحة

- الطحن وتوزيع الحجم الحبيبي :

كما هو الحال مع الموائى الأخرى، لا يمكن توصيف كبريتات الباريوم برقم ميكروني واحد. ويستخدم توصيف d50 و d90 لتحديد توزيع الحجم، إلا أن طبيعة جسيماتها تجعلها أقل حساسية للشكل مقارنة بالموائى الصفائحية أو الإبرية.

التركيز هنا يكون على:

- نعومة مناسبة
- توزيع متجانس
- تقليل التكتل

وبتم التركيز على هذه العناصر الثلاثة لضمان أداء بصري وكثافي مستقر.

الحاجة إلى المعالجة السطحية بخلاف كربونات الكالسيوم، لا تعد المعالجة السطحية لكبريتات الباريوم شرطاً أساسياً في جميع التطبيقات، نظراً لخمولها الكيميائي النسبي. ومع ذلك، قد تستخدم معالجات سطحية في بعض الحالات بهدف:

- تحسين التشئت
 - تقليل الفصل
 - تحسين التوافق مع البوليمر عند نسب تحميل مرتفعة
- وتبقى هذه المعالجة اختيارية وظيفياً، وليست إلزامية.

- تركيب كبريتات الباريوم على البوليمر لذا تستخدم كبريتات الباريوم غالباً في:

- البولي بروبيلين
 - البولي إيثيلين
 - بعض الأنظمة البوليمرية الخاصة
- ويتم إدخالها عبر:

- التركيب المباشر
 - أو ماستر باتش عند الحاجة إلى دقة جرعات وثبات جودة
- ولا تستخدم عادة في الأفلام الرقيقة، بل في المنتجات المصبوبة أو المبتوقة ذات السماكات المتوسطة إلى العالية.

- التأثير الميكانيكي لكبريتات الباريوم :

- لا تعد كبريتات الباريوم مالئاً معزراً

- لا تؤدي إلى زيادات ملحوظة في الصلابة أو قوة الشد
 - وقد تؤدي عند نسب مرتفعة إلى:
 - انخفاض الاسطالة
 - تأثير محدود على الصدم
- ولهذا فإن استخدامها لا يكون بدافع تحسين الخواص الميكانيكية، بل لتحقيق أهداف أخرى
- التأثير البصري والتأثير على الكثافة وهنا تكمن القيمة الحقيقية لكبريتات الباريوم :
- تعطي عتامة متجانسة
 - دون العكورة اللبنة المرتبطة بكاربونات الكالسيوم
 - دون التعتيم الصفائحي الحاد المرتبط بالتالك
- ومن ناحية الكثافة ترفع الكثافة النوعية للمنتج بشكل واضح دون إدخال تأثيرات بنيوية معقدة ولهذا تستخدم كبريتات الباريوم في التطبيقات التي يكون فيها :
- الوزن
 - الإحساس بالكتلة
 - ثبات اللون

- جدول (1) مقارنة مباشرة مع الموالي البصرية الأخرى :

الخاصية	كبريتات الباريوم	الكاولين	كربونات الكالسيوم
الكثافة	مرتفعة	متوسطة	منخفضة
العكورة	منخفضة	متوسطة	مرتفعة
العتامة	متجانسة	متوسطة	متوسطة
المظهر	أبيض مستقر	أبيض طباشيري	لبنّي/ضبابي
ثبات اللون	مرتفع	جيد	متوسط

- جدول (2) مقارنة وظيفية :

البند	BaSO ₄	الكاولين	CaCO ₃
هدف الاستخدام	كثافي/بصري	ضبط بصري	اقتصادي
تعزيز ميكانيكي	ضعيف	متوسط	محدود
الشفافية	غير مناسبة	غير مناسبة	غير مناسبة
التأثير البنيوي	منخفض	منخفض	منخفض

- متى تُستخدم كبريتات الباريوم كقرار صناعي ومتى لا تُستخدم ؟

- تُستخدم كبريتات الباريوم عندما يكون الهدف:

- زيادة الكثافة النوعية
- تحسين الإحساس بالكتلة
- تحقيق عتامة متجانسة
- الحفاظ على ثبات اللون والمظهر

- لا تُستخدم كبريتات الباريوم:

- لتخفيض التكلفة
- لتحقيق تعزيز ميكانيكي
- في التطبيقات الشفافة أو المرنة

- الجداول التفسيرية – كبريتات الباريوم :

جدول (3): الهوية الوظيفية

البند	التوصيف
نوع المالى	كثافي بصري
التأثير البنيوي	ضعيف
الكثافة النوعية	مرتفعة
العتامة	متجانسة
الاستخدام الاقتصادي	غير مناسب

الخلاصة أن كبريتات الباريوم مالى متخصص يستخدم لتحقيق ضبط كثافي وبصري دقيق في المنتجات البلاستيكية، دون إدخال تأثيرات ميكانيكية أو بنيوية معقدة. وتكمن قيمته في التطبيقات التي يكون فيها الوزن وثبات المظهر عاملين تصميميين مقصودين، لا في كونه بديلاً اقتصادياً أو معززا للخواص.

- 2.5 السيليكا كمالى وظيفي عالي الحساسية (Silica)

تعد السيليكا احد أكثر المواد التي يساء فهمها في صناعة البلاستيك، ويعود ذلك إلى تداخل المفاهيم بينها وبين الزجاج من جهة، وبينها وبين الموالى التقليدية من جهة أخرى. ففي حين تستخدم السيليكا أساسا بوصفها مادة وظيفية ذات تأثيرات ريولوجية وسطحية دقيقة، فإنها كثيرا ما تعامل في السوق كمالى يمكن أن يؤدي دورا بصريا أو حتى شفافية جزئية، وهو تصور غير صحيح علميا ولا صناعيا.

وتكمن خطورة هذا الخلط في أن السيليكا مادة عالية الحساسية، ذات تأثيرات حادة حتى عند نسب منخفضة، ولا تتحمل الاستخدام العشوائي أو التعويضي الذي قد يكون مقبولا مع الموالى العامة.

- التركيب الكيميائي والبنية الفيزيائية :

السيليكا هي ثاني أكسيد السيليكون، وصيغتها الكيميائية:

SiO_2 وتوجد في الطبيعة بأشكال متعددة، إلا أن السيليكا المستخدمة في صناعة البلاستيك تكون غالبا:

- صناعية

- غير متبلورة (Amorphous)

- ذات مساحة سطحية عالية جدا

ولا تتصرف السيليكا داخل البوليمر كمادة خاملة، بل كمادة ذات نشاط سطحي مرتفع، ما يجعلها مختلفة جوهريا عن المواد التي تم تناولها سابقا مثل كربونات الكالسيوم أو الكاولين أو كبريتات الباريوم.

السيليكا والزجاج: تصحيح المفهوم الشائع

من المفاهيم المنتشرة في السوق أن شفافية الزجاج ناتجة عن كونه سيليكا، وبالتالي يفترض أن السيليكا – أو حتى الزجاج المطحون – يمكن أن تستخدم لإنتاج مالى شفاف داخل البلاستيك. وهذا الاستنتاج غير صحيح.

وتعتمد شفافية الزجاج على:

- نقاء عالٍ جدا

- وبنية غير بلورية متصلة

- ناتجة عن الانصهار الكامل

- دون وجود جسيمات أو واجهات داخلية

في هذه الحالة، تكون السيليكا هي الوسط نفسه، لا مادة مضافة إليه.

أما في البلاستيك:

- تكون السيليكا جسيمات منفصلة

- موزعة داخل بوليمر

- مع وجود فرق واضح في معامل الانكسار

- واجهات متعددة لتشتت الضوء

ولهذا، فإن طحن الزجاج – مهما بلغت درجة نعومته أو نقاوته – لا ينتج مائلاً شفافاً عند استخدامه داخل البوليمرات، بل يؤدي حتماً إلى فقدان الشفافية نتيجة التشتت الضوئي.

هل يؤثر نوع السيليكا وطريقة تحضيرها على الشفافية؟ نعم، لكن ضمن حدود ضيقة جداً.

قد يؤثر نوع السيليكا وطريقة تصنيعها في:

- درجة العكورة
 - حدة التشتت
 - المظهر البصري النسبي
- إلا أن هذا التأثير:

- لا يحول السيليكا إلى مائى شفاف
 - ولا يجعلها مناسبة للتطبيقات الشفافة
- وبعبارة أدق، يمكن لبعض أنواع السيليكا أن تكون أقل ضرراً بصرياً من غيرها، لكنها لا تستخدم لتحقيق شفافية فعلية، ولا يمكن مقارنتها بالبوليمر النقي أو الأنظمة الشفافة الحقيقية.

- الحجم الحبيبي والمساحة السطحية :

في حالة السيليكا، لا يكون الحجم الحبيبي التقليدي هو العامل الحاسم، بل المساحة السطحية النوعية، التي تكون أعلى بكثير من جميع الموائى الأخرى التي تم تناولها في هذا الجزء من الكتاب. وهذا يعني أن: نسباً منخفضة جداً من السيليكا قد تؤدي إلى تغييرات كبيرة في السلوك الريولوجي والتشغيلي مقارنة بموائى تستخدم بنسب أعلى بكثير

ولهذا، فإن توصيف السيليكا يتم وفق مؤشرات تختلف عن الميكرن التقليدي المستخدم مع الموائى العامة.

الحاجة إلى المعالجة السطحية: السيليكا مادة عالية القطبية، واستخدامها مباشرة في البوليمرات غير القطبية يؤدي إلى:

- تكثف شديد
- صعوبة في التشغيل

- تدهور الخواص

ولهذا، فإن المعالجة السطحية للسيليكا:

- ضرورة وظيفية

- لا خيارا تقنيا

- وتهدف إلى تقليل النشاط السطحي وضبط التفاعل مع البوليمر

ويعد إهمال هذه النقطة من أكثر أسباب فشل استخدام السيليكا في التطبيقات البلاستيكية.

- تركيب السيليكا على البوليمر :

لا تستخدم السيليكا في البلاستيك كمالي حجمي بل:

- بنسب منخفضة جدا

- ضمن نظام إضافات

- بطريقة إدخال محكمة بدقة

وتضاف عادة عبر:

- ماستر باتش متخصص

- أو أنظمة خلط دقيقة

وأي محاولة لإضافتها مباشرة أو بأسلوب عشوائي تؤدي غالبا إلى نتائج سلبية واضحة.

- التأثير الريولوجي والتشغيلي :

من أهم أدوار السيليكا:

- تعديل اللزوجة

- التحكم في سلوك القص
 - التأثير على التدفق
 - تحسين أو إضعاف قابلية المعالجة حسب النوع والنسبة
- وهذه التأثيرات:

- شديدة الحساسية
- وتتغير بشكل غير خطي
- ما يجعل السيليكا مادة تتطلب ضبطا دقيقا وخبرة تشغيلية حقيقية

من الناحية الميكانيكية:

- لا تستخدم السيليكا لتعزيز الصلابة أو قوة الشد
- وقد تؤدي عند سوء الاستخدام إلى:

1. هشاشة

2. انخفاض استطالة

3. ضعف الصدم

ولهذا، فإن قيمتها ليست ميكانيكية بقدر ما هي وظيفية تشغيلية.

التأثير البصري :

- السيليكا تقلل النفاذية الضوئية
- تزيد العكورة
- ولا تعد خيارا للتطبيقات الشفافة

وأي تحسن بصري نسبي يلاحظ مع بعض الأنواع لا يرقى إلى مستوى الشفافية، بل يظل ضمن إطار تقليل الضرر فقط.

مقارنة ضمنية مع الموائى السابقة

- بخلاف كربونات الكالسيوم والكاولين، لا تستخدم السيليكا لملاء الحجم أو خفض التكلفة.
 - وبخلاف التالك والميكا والويلاستونيت، لا تستخدم لتعزيز بنيوي مباشر.
 - وبخلاف كبريتات الباريوم، لا تستخدم لضبط الكثافة أو العتامة المتجانسة.
- السيليكا مادة فريدة في دورها، لكنها ضيقة المجال، ولا تتحمل سوء الاختيار.

- الجداول التفسيرية – السيليكا

جدول (1): الهوية الوظيفية للسيليكا :

البند	التوصيف
نوع المادة	مالئ/إضافة وظيفية
النشاط السطحي	مرتفع جدا
النسب المستخدمة	منخفضة جدا
الشفافية	غير مناسبة
الحساسية التشغيلية	عالية

- جدول (2): مقارنة مفاهيمية مع الزجاج :

البند	السيليكا كمالي	الزجاج
البنية	جسيمات منفصلة	وسط متصل
الشفافية	غير ممكنة	عالية
واجهات ضوئية	موجودة	غير موجودة
التشتت	حتمي	معدوم

تعد السيليكا مادة وظيفية عالية الحساسية تستخدم لضبط السلوك الريولوجي والتشغيلي للبوليمرات، لا لتحقيق شفافية أو ملء حجمي. ورغم أن شفافية الزجاج تعتمد على نوع السيليكا وطريقة تحضيرها، فإن هذا المبدأ لا ينطبق على السيليكا المستخدمة كمالي داخل البلاستيك، حيث يؤدي وجود الجسيمات والواجهات الضوئية إلى فقدان الشفافية حتماً. ويمكن نجاح استخدام السيليكا في فهم حدودها بدقة، واستخدامها حيث تضيف قيمة وظيفية حقيقية، لا حيث يتوقع منها ما لا يمكنها تقديمه.

- جدول (3) مرجعي: اختيار المالى المناسب حسب التطبيق :

التطبيق / الهدف	السيليكا	كبريتات-الباريوم	الويلاستونيت	الميكس	الكاولين	التالك	كربونات الكالسيوم
خفض التكلفة	×	×	×	×	×	×	✓ مناسب جداً
ملء حجمي عام	×	×	×	×	✓ بشروط	×	✓
تعزيز ميكانيكي	×	×	✓✓	✓	متوسط	✓	محدود
تحسين الصلابة	×	×	✓✓	✓✓	✓	✓	محدود
الاستقرار البُعدي	×	×	✓✓	✓✓	متوسط	✓	محدود
تقليل الانكماش	×	×	✓✓	✓✓	متوسط	✓	محدود

التطبيق / الهدف	السيليكا	كبريتات-الباريوم	الويلاستونيت	الميكال	الكاولين	التالك	كربونات الكالسيوم
منتجات حقن هندسية	×	محدود	✓✓	✓✓	✓	✓	محدود
أفلام وأكياس	×	×	×	×	×	×	✓ غير شفافة
منتجات بيضاء غير شفافة	×	✓✓	×	×	✓✓	×	✓
ثبات اللون والمظهر	×	✓✓	✓	✓	✓✓	متوسط	متوسط
زيادة الكثافة / الإحساس بالوزن	×	✓✓	×	×	×	×	×
تطبيقات حرارية	×	✓	✓✓	✓✓	✓	✓	محدود
تطبيقات كهربائية	×	×	محدود	✓✓	محدود	محدود	×
الشفافية / شبه الشفافية	×	×	×	×	×	×	×
تعديل ريولوجي دقيق	✓✓	×	×	×	×	×	×
استخدام عام متسامح	×	×	×	×	✓	✓	✓✓

- ملاحظات تفسيرية ضرورية :

- لا يوجد مالى شفاف: أي مالى جسيمي يؤدي حتمًا إلى تشتت الضوء.
- السيليكا ليست مالنًا اقتصاديًا: تستخدم لضبط ريولوجي ووظيفي فقط.
- الميكال والويلاستونيت: قرارات هندسية لا اقتصادية.
- كبريتات الباريوم: اختيار بصري/كثافي، لا ميكانيكي.
- الكاولين: مالى توازن بصري وسلوكي، لا بديل مباشر لغيره.

لا يعد اختيار المالى قرار قائما على مادة واحدة (أفضل) من غيرها، بل على توافق المالى مع متطلبات التطبيق والوظيفة المطلوبة. ويظهر هذا الجدول أن سوء الاختيار لا ينتج عن نقص الخيارات، بل عن الخلط بين أدوار الموالى المختلفة.

2.7 الحلول الاقتصادية البديلة للموالى ودور الإضافات في تعويض الخواص المفقودة

بين منطق السوق وحدود المادة :

تواجه المصانع التحويلية، ولا سيما مصانع الأفلام والأكياس، معادلة شبه دائمة تقوم على السعي إلى خفض التكلفة مع الحفاظ على مظهر بصري مقبول يسمح بتسويق المنتج بسعر منافس. وفي هذا السياق، لا يقتصر التفكير الصناعي على الموالى وحدها، بل يتسع ليشمل بدائل أخرى، من بوليمرات منخفضة التكلفة أو إضافات خاصة، يعتقد أنها قد تحقق هذا التوازن. غير أن كثيرا من هذه المحاولات تبنى على افتراضات غير مكتملة، أو على نقل تجارب جزئية دون فهم الآلية الفيزيائية أو الكيميائية الكامنة خلفها، ما يؤدي إلى حلول مؤقتة ظاهريا، لكنها غير مستقرة صناعيا.

2.7.1 بدائل الموالى – ماهيتها وحدود استخدامها :

1. البوليمرات منخفضة التكلفة كمكونات مساعدة

تلجأ بعض المصانع، في سياق البحث عن خفض التكلفة أو تحسين بعض الخصائص الشكلية، إلى إدخال بوليمرات أقل تكلفة من البوليمر الأساسي أو بوليمرات منخفضة الوزن الجزيئي ضمن معادلة التصنيع، وذلك بهدف:

- تحسين المظهر البصري للمنتج
- تقليل العكورة الناتجة عن إضافة الموالى
- تحسين قابلية التشغيل والمعالجة أثناء التصنيع

وتشمل هذه المواد على سبيل المثال لا الحصر:

- بوليمرات منخفضة الوزن الجزيئي، مثل شموع البوليمر

• بوليمرات مرنة أو معدلة، مثل EVA و EMA

ورغم أن هذه المواد قد تحسّن نعومة السطح أو تعطي مظهرا بصريا أفضل في بعض التطبيقات، إلا أن دورها يظل محدودا من الناحية الوظيفية، إذ إنها:

- لا تحقق شفافية حقيقية بالمعنى البنيوي
 - لا تصلح أن تكون بديلا فعليًا عن البوليمر الأساسي
 - قد تؤدي، عند الإفراط في استخدامها، إلى تدهور الخواص الميكانيكية أو ضعف الاستقرار طويل الأمد للمنتج
- وبناءً عليه، فإن استخدام هذه البوليمرات يجب أن يُفهم ضمن إطارها الصحيح: وهو دور مساعد وضابط للخواص، لا دور بنائي أو إحلالي.

- ملاحظة تطبيقية مهمة :

من بين البدائل الأكثر توازنا، والتي يمكن أن تحافظ على علاقة مقبولة بين التكلفة والخواص عند استخدامها بأسلوب علمي ومدرّس، تبرز مواد Off-Grade كخيار عملي سليم. فهي، عند اختيارها بعناية وإخضاعها لفحوصات مخبرية مسبقة، قادرة على:

- خفض التكلفة دون الإخلال الجوهرى بالخصائص
 - الحفاظ على أداء المنتج ضمن الحدود المقبولة
 - تقليل الأثر السلبي على المعدات وخطوط الإنتاج مقارنة بالبدايل غير المدروسة
- وعليه، فإن نجاح هذا الخيار لا يكمن في كونه الأرخص، بل في كونه الأكثر توازنا بين الاقتصاد، الأداء، واستدامة التشغيل.

- معضلة الشفافية :

من الضروري التسليم بحقيقة أساسية مفادها: لا توجد مادة جسيمية تضاف إلى البوليمر وتحافظ على الشفافية الحقيقية. فالشفافية خاصية للوسط المتصل، لا للجسيمات المنفصلة. وكل ما يمكن تحقيقه عمليا هو:

- تقليل شدة العكورة
- الوصول إلى مظهر بصري مقبول تجاريا وذلك دون ادعاء شفافية فعلية وهذا ينطبق سواء على المولى التقليدية، أو على الموالى فائقة النعومة، أو حتى على المواد النانوية.

- سماكة المنتج والحجم الحبيبي: العلاقة الصحيحة :

ترتبط حساسية المنتج بصريا ارتباطا مباشرا بسماكته. فكلما انخفضت سماكة المنتج:

- زادت حساسيته لأي جسيم
- ازدادت أهمية اختيار حجم حبيبي أصغر

غير أن تصغير الحجم الحبيبي :

- لا يلغي التشتت
- ولا يجعل المالى شفافا تماما

كما أن اللجوء إلى الموالى النانوية لا يمثل حلا عمليا في معظم التطبيقات، نظرا لما تسببه من:

- تكثف
- اضطراب ريولوجي
- صعوبات تشغيل
- وارتفاع كبير في التكلفة
- والحل الصناعي الواقعي يكمن في:
- اختيار درجات ناعمة جدا

• بنسب منخفضة ومدرسة

• وبما يتناسب مع سماكة المنتج

ويبقى دائما المواد المصنفة ك (off grade) هي الخيار الأفضل بين كل ذلك

- 2.7.2 المالى لا يعمل منفردا – مفهوم النظام التركيبى :

المبدأ الأساسي: إضافة المالى إلى البوليمر تؤدي دائما إلى مكاسب وخسائر في آن واحد. فكما يحقق المالى خفضاً في التكلفة أو زيادة في الصلابة أو الحجم، فإنه يؤدي في المقابل إلى فقدان واحد أو أكثر من الخواص التالية:

• الاستطالة

• مقاومة الصدم

• التجانس

• الاستقرار الحراري

• سهولة التشغيل

• المظهر البصري

ولهذا، لا يقيم المالى بوصفه مادة مستقلة، بل كجزء من نظام تركيبى متكامل.

- 2.7.3 إضافات تعويض الخواص المفقودة بسبب الموالى :

• إضافات تحسين التوافق

تستخدم هذه الإضافات لتحسين الالتصاق البينى بين المالى والبوليمر، خصوصا عندما يكون المالى ذا طبيعة قطبية والبوليمر غير قطبي. ويؤدي استخدامها إلى:

• تحسين نقل الإجهاد

• استعادة جزء من القوة الميكانيكية

- تحسين الاستقرار العام للمنتج
 - إضافات تحسين التثنت
 - تعمل هذه الإضافات على:
 - منع تكتل المالى
 - تحسين توزيع الجسيمات
 - تقليل النقاط الضعيفة ميكانيكياً وبصرياً
- وهي من أهم الإضافات في التطبيقات الرقيقة، حيث يكون أي تكتل ظاهراً فوراً.

إضافات تحسين الصدم والمتانة

تستخدم لتعويض الهشاشة التي قد تسببها بعض الموالى، خاصة تلك التي ترفع الصلابة على حساب الاستطالة.

وتهدف إلى إعادة التوازن بين:

- الصلابة
- والمتانة
- ومقاومة الكسر

- إضافات تحسين الريولوجيا والتشغيل :

- كثير من مشاكل الموالى لا تظهر في المنتج النهائي، بل أثناء التشغيل. وتستخدم هذه الإضافات من أجل:
- تعويض زيادة اللزوجة
 - تحسين التدفق
 - تقليل الحمل على الماكينات
 - تثبيت العملية الإنتاجية

- إضافات تحسين المظهر البصري والسطحي
لا تصنع هذه الإضافات شفافية، لكنها:

- تقلل من حدة العكورة

- تُنعم السطح

- تحسن الإحساس البصري للمنتج

وهي شائعة في المنتجات التي تسوق على أساس الشكل العام لا الشفافية المطلقة.

- إضافات الاستقرار الحراري والمعالجة :

نظرًا لأن وجود الموائى يزيد من الحمل الحراري والقصي أثناء المعالجة، تستخدم إضافات:

- لمنع الأكسدة

- وتقليل التدهور الحراري

- والحفاظ على خواص البوليمر أثناء التشغيل

لا يعتبر المالى حلا قائما بذاته، كما لا تعد البدائل البوليمرية منخفضة التكلفة بديلا حقيقيا عن البوليمر الأساسي. فالحل الصناعي الواقعي يقوم على فهم النظام التركيبي الكامل، حيث يستخدم المالى لتحقيق هدف اقتصادي أو وظيفي محدد، وتستخدم الإضافات لتعويض ما يفقده المنتج نتيجة هذا الخيار.

ويعد تجاهل هذا التوازن أحد الأسباب الرئيسية لفشل كثير من التركيبات التي تبدو ناجحة ظاهريا، لكنها غير مستقرة صناعيا على المدى المتوسط والطويل.

- 2.7.4 كيف يختار المصنع المالى اقتصاديا دون التضحية بالشفافية ؟

تواجه أغلب المصانع التحويلية معضلة متكررة: الرغبة في تقليل التكلفة مع الحفاظ على مظهر بصري

مقبول، خصوصا في منتجات الأفلام والأكياس و القطع الشفافة . فالسوق غالبا لا يدفع فرقا كبيرا بين منتج شفاف وآخر ملون إذا كانا يخدمان نفس الغرض، بينما يسمح المنتج الملون عادة بإضافة المالى بنسبة أعلى دون أن تظهر العيوب البصرية بوضوح، مما يخلق هامش ربح أسهل. أما في المنتجات الشفافة، فإن أي زيادة في المالى قد ترفع العكورة وتقلل الشفافية وتضعف المظهر، وبالتالي يصبح المنتج غير منافس بصريا حتى لو كان أرخص تكلفة. لهذا السبب تبقى المصانع في بحث دائم عن خيار يحقق توازنا بين الاقتصاد والمظهر، ولو بنسبة تحميل منخفضة.

الحقيقة العلمية التي يجب تثبيتها للقارئ : هي أن المالمات بطبيعتها تحدث تشتتا للضوء داخل البوليمر،

وهذا يعني أن الشفافية ليست خاصية سهلة الجمع مع التحميل العالي. ومع ذلك، يمكن الوصول إلى مستوى مقبول من الشفافية عند التعامل مع المواد بطريقة ذكية، بشرط أن يكون الهدف واقعياً: تحسين المظهر مع تقليل التكلفة ضمن حدود، وليس صناعة شفافية كاملة بوجود تحميل مرتفع.

ولتحقيق هذا التوازن عملياً، تعتمد المصانع الناجحة على ثلاث قواعد رئيسية. القاعدة الأولى هي اختيار المادة بناءً على الحجم الحبيبي الحقيقي وتوزيعه وليس بناءً على الاسم التجاري أو السعر فقط، لأن المواد الأدق والأكثر تجانساً تعطي عكورة أقل عند نفس النسبة مقارنة بالمواد الخشنة أو المتذبذبة. القاعدة الثانية هي عدم الاعتماد على المادة وحدها، بل دعم التركيبة بإضافات مساعدة تقلل من الأثر السلبي على الخواص، مثل مساعدات التشنت أو التوافق، أو إضافات تساعد على الحفاظ على المتانة واللحام، لأن أي تحميل زائد أو غير مدروس سيؤثر على الاستطالة والتمزق وقوة اللحام. أما القاعدة الثالثة فهي أن قرار تخفيض التكلفة لا يؤخذ من أول تجربة إنتاج، بل من اختبارين متتابعين: اختبار استلام يحدد طبيعة المادة وثباتها، ثم اختبار تشغيل على خط مصغر أو تشغيل تجريبي مضبوط قبل تعميم القرار على الإنتاج التجاري.

وهنا تظهر توصية عملية بالغة الأهمية: إن أفضل خيار اقتصادي على الإطلاق في كثير من تطبيقات

الأفلام الشفافة ليس دائماً الاعتماد على المالمات التقليدية، بل الاعتماد على مواد Near- أو Off-Grade Prime من نفس عائلة البوليمر الأساسي، لأنها غالباً تكون متوافقة بنيوياً مع البوليمر وتحافظ على مستوى أعلى من الشفافية بطبيعتها مقارنة بالمالمات المعدنية، كما أنها تحقق ميزة اقتصادية واضحة عندما تكون متاحة بسعر مناسب. وهذا الخيار يحقق توازناً ذكياً لأنه يخفض التكلفة دون أن يفرض على المنتج عكورة المالمات، ودون أن يضعف المظهر بنفس الدرجة التي قد يسببها التحميل المعدني. ومع ذلك، لا ينبغي التعامل مع مواد الـ Off-Grade على أنها حل مجاني، لأنها ليست درجة قياسية ثابتة، وقد تختلف بين مورد وآخر وبين دفعة وأخرى، وقد تحمل معها تغيرات في مؤشر التدفق أو اللون أو الاستقرار الحراري أو حتى الرائحة. لذلك فإن استخدامها الصحيح يجب أن يكون ضمن منهج واضح يقوم على: إجراء الاختبارات المناسبة عند الاستلام، تحديد طريقة التعامل معها أثناء التشغيل، تحديد نسب الاستخدام الآمنة لكل تطبيق، ثم تثبيت القرار بالتجربة قبل الإنتاج التجاري. فالمكسب الاقتصادي الحقيقي لا يتحقق بمجرد شراء مادة أرخص، بل يتحقق عندما يكون المصنع قادر على إدخالها ضمن تركيبة مدروسة دون خسارة في الجودة أو توقفات تشغيل أو شكاوى العملاء. وبذلك يصبح الهدف الصناعي واضحاً: تقليل التكلفة دون كسر صورة المنتج، عبر التحكم العلمي في اختيار المادة، ونسبتها، وطريقة تشغيلها، ثم تثبيت القرار بالتجربة المخبرية قبل الإنتاج التجاري، بدل الأسلوب الشائع الذي يقوم على الشراء والإنتاج ثم انتظار رأي العميل، وهو أسلوب يهدر المال والوقت ويضعف ثقافة القرار الصناعي داخل المصنع.

3 – الباب الثالث الإضافات (Additives Systems)

- مقدمة :

- بعد فهم البوليمرات واختباراتها، ثم فهم الملائات واختباراتها وتأثيرها على التكلفة والمظهر والتشغيل، ننقل الآن إلى مجموعة أخرى لا تقل أهمية في صناعة البلاستيك، ألا وهي الإضافات الوظيفية التي تُستخدم لضبط أداء المنتج النهائي وتسهيل تصنيعه وحمايته وتحسين مظهره. هذه الإضافات لا تُضاف لمجرد تحسين بسيط، بل تستخدم غالباً لحل مشكلة واقعية في المصنع أو لتلبية شرط تسويقي أو تشريعي أو وظيفي لا يستطيع البوليمر وحده تحقيقه بشكل ثابت.

- والقاعدة الأساسية هنا أن الإضافة ليست خياراً تجميليّاً دائماً، بل قد تكون أحياناً شرطاً لنجاح المنتج من الأساس. فبعض المنتجات تفشل دون مثبتات حرارية، وبعضها يفشل دون إضافات انزلاق، وبعضها يفشل دون مقاومة للأشعة، وبعضها لا يُقبل في السوق دون لون ثابت، وبعضها لا يُسمح ببيعه دون متطلبات السلامة والاحتراق. لذلك فإن فهم الإضافات لا يجب أن يكون على شكل أسماء متفرقة، بل على شكل مجموعات وظيفية واضحة تساعد القارئ على اتخاذ القرار الصحيح: ما الإضافة التي يحتاجها؟ ولماذا؟ وكيف يثبت نجاحها بالاختبار؟

- وفي هذا الجزء سنعتمد تقسيم الإضافات إلى ثماني مجموعات رئيسية، بحيث تكون كل مجموعة مرتبطة مباشرة بهدف صناعي واضح، ثم نشرح اختبارات هذه المجموعة لاحقاً بنفس المنهج الذي اعتمدناه في الكتاب: اختبار استلام، اختبار في المصنع المصغر، ثم اختبار المنتج النهائي قبل اعتماد الاستخدام التجاري.

- إضافات اللون والمظهر :

- 3.1 مقدمة إضافات اللون والمظهر (Color & Optical Additives)

هذه الإضافات مسؤولة عن هوية المنتج بصريّاً. فاللون ليس مجرد شكل، بل معيار قبول في السوق، خصوصاً في الأفلام والأكياس والمنتجات الاستهلاكية التي تُرفض لأسباب بصرية حتى لو كانت خواصها الميكانيكية ممتازة. وتشمل هذه المجموعة الأصباغ والملونات والتونرات والتبييض البصري، كما تشمل الإضافات التي تُستخدم لضبط الانحرافات مثل الاصفرار أو الرمادية أو اختلاف الدفعات.

وتظهر أهمية هذه الإضافات في نقطتين: الأولى هي أن اللون قد يتغير مع الحرارة والقص وزمن المكوث في الماكينة، والثانية أن اللون قد يبدو صحيحاً في الحبيبات لكنه يظهر مختلفاً تماماً داخل المنتج النهائي. لذلك

فإن اعتماد اللون لا يتم بالعين فقط، بل يجب أن يمر عبر اختبار قياس فرق اللون وثباته وتشتته وتأثيره على الشفافية واللحم والطباعة.

- 3.2 اللون وأنظمة التلوين في صناعة البلاستيك :

اللون في البلاستيك: من الأصباغ إلى مركبات الألوان ومخاطر الهجرة

اللون في البلاستيك قرار صناعي قبل أن يكون قرارا جماليا لأن اللون يؤثر على قبول المنتج في السوق ويؤثر على ثبات الإنتاج ويؤثر على نسبة الهالك. اللون قد ينجح بصريا لكنه يفشل تشغيليا بسبب نقاط وخطوط أو انسداد فلتر أو تراكمات داخل الـ Die . وقد ينجح في منتج عام لكنه يفشل في تطبيق حساس بسبب الهجرة أو النزف أو تغير اللون مع الحرارة والضوء. لذلك يجب التعامل مع اللون كنظام مادي داخل البوليمر ليس كمادة واحدة، بل كمنظومة متكاملة يجب ضبطها علمياً وتشغيلياً

اللون في البلاستيك ليس مادة واحدة تضاف للبوليمر، بل منظومة سلوك داخل المصهور. فهو يتكون عندما تغير المادة الملونة امتصاص الضوء وانتشاره داخل المصفوفة البوليمرية، وتختلف آلية اللون بين الأصباغ (Pigments) غير الذائبة والألوان الذائبة (Dyes) وتعتمد النتيجة النهائية على عوامل عملية مثل البلل (Wetting) والتشتت (Dispersion) وتوافق الحامل (Carrier) والمواد المساعدة وظروف التشغيل؛ لذلك قد تكون مادة اللون صحيحة نظرياً، لكن تُظهر عيوباً تشغيلية مثل النقاط أو انسداد الفلاتر أو التراكمات إذا اختلف أحد عناصر المنظومة.

- التصنيف الأساسي لمواد اللون

- 3.2.1 الأصباغ Pigments

هي مواد ملونة غير ذائبة داخل البوليمر تبقى على شكل جسيمات صلبة دقيقة موزعة داخل المصفوفة البوليمرية. نجاحها يعتمد على الحجم الحبيبي Particle Size Distribution PSD ومنع التكتل Agglomeration وجودة التشتت Dispersibility وغياب الجسيمات الخشنة Grit

- 3.2.2 الألوان الذائبة Dyes

هي مواد ملونة تمتزج أو تذوب بدرجة أعلى داخل الوسط البوليمري لذلك قد تعطي مظهرا أكثر صفاء في بعض التطبيقات. لكنها قد تكون أكثر حساسية للهجرة أو النزف أو تغير اللون حسب طبيعتها الجزيئية وظروف التشغيل والتطبيق النهائي .

الفرق الصناعي بين ال Dyes وPigments الفرق يحدد قرار الاختيار ويحدد نوع المشاكل المتوقعة :

- جدول (1) مقارنة Dyes – Pigments

البند	ألوان Dyes	أصباغ Pigments
الحالة داخل البوليمر	تمتزج أو تذوب بدرجة أعلى	جسيمات صلبة غير ذائبة
آلية اللون	امتصاص ضوئي غالبا دون جسيمات صلبة كبيرة	امتصاص مع تشتيت ضوئي
الشفافية	أعلى غالبا	أقل غالبا
العكورة Haze	أقل غالبا	أعلى غالبا
العتامة Opacity	أقل	أعلى
النقاط Specks	منخفضة غالبا	مرتفعة عند ضعف التشتت
الحساسية للحجم الحبيبي PSD	منخفضة نسبيا	عالية جدا
الفلترية Screen Pack	تأثير أقل غالبا	قد تسبب انسداد
الهجرة Migration	أعلى احتمالا في بعض الأنواع	أقل غالبا لكن ليست قاعدة
النزف Bleeding	أعلى احتمالا	ممكن حسب النظام
الاستخدام الصناعي	محدود حسب التطبيق	واسع جدا

- الأصباغ حسب الأصل الكيميائي وتأثير ذلك صناعياً :

الأصباغ غير العضوية (Inorganic Pigments) هي مواد تلوين ذات أصل معدني وتركيب كيميائي

غير عضوي، تتكون غالباً من أكاسيد ومعادن وأملاح معدنية مستقرة مثل أكاسيد الحديد (Iron

Oxides) وثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) وأكسيد الكروم وغيرها، وتمتاز بأن بنيتها البلورية وروابطها

الكيميائية القوية تجعلها أكثر مقاومة للتحلل الحراري والضوئي والتأثيرات الجوية، لذلك تُعرف عادةً بثباتها

العالي في التطبيقات الخارجية وعمليات التشغيل ذات الحرارة المرتفعة. وبسبب طبيعتها الجسيمية ومعامل

انكسارها المرتفع وكثافتها الأعلى نسبياً، فإنها تميل إلى زيادة العتامة (Opacity) وتحسين التغطية، لكنها

قد ترفع الوزن النوعي للمنتج عند استخدام جرعات عالية، كما أن قوة التلوين فيها قد تكون أقل مقارنةً بالعديد من الأصباغ العضوية.

أما الأصباغ العضوية (Organic Pigments) فهي مركبات كربونية ذات هياكل جزيئية معقدة تعتمد على أنظمة روابط مزدوجة مترافقة (Conjugated Systems) ومجموعات كروموفورية (Chromophores) مسؤولة عن امتصاص أطوال موجية محددة من الضوء وإظهار اللون، وتمتاز عادةً بقوة تلوين أعلى وألوان أكثر زهواً وإمكانية الوصول إلى درجات دقيقة ومشبعة، إلا أن حساسيتها قد تكون أعلى تجاه الحرارة أو الضوء أو الأكسدة حسب العائلة الكيميائية، كما قد تظهر فيها ظواهر مثل النزف (Bleeding) أو الهجرة (Migration) أو الانتقال إلى سطح المنتج إذا لم يكن نظام التوافق والتشتت والحامل مضبوطاً بشكل صحيح، خصوصاً في التطبيقات التي تتطلب ثباتاً طويلاً الأمد أو تلامساً مع زيوت ومذيبات أو تعرضاً مستمراً للحرارة.

- قاعدة الاختيار :

لا توجد قاعدة مطلقة تقول إن العضوي أفضل أو اللاعضوي أفضل؛ القرار الصحيح يُبنى على التطبيق وظروف التشغيل ومتطلبات الثبات والسلامة

كيف تصنع مواد اللون ولماذا الطحن هو مركز الجودة ؟

مواد اللون تمر بمرحلتين تحددان جودة الأداء داخل البوليمر

- المرحلة الأولى تكوين المادة الملونة :

في هذه المرحلة تتكون الهوية الكيميائية للصبغة الذائبة أو الذاتية وتحدد درجة اللون الأساسية والثبات الأساسي للمادة

- مرحلة التحكم في البنية الحبيبية والسطحية :

وهذه المرحلة هي التي تحدد نجاح اللون داخل البلاستيك وتشمل الطحن Grinding والتحكم في توزيع الحجم الحبيبي والتحكم في التكتل والتجفيف والفرز عند الحاجة. الطحن لا يهدف فقط لتقليل الحجم بل يهدف لتقليل الذيل الخشن Coarse Tail وتفكيك التكتلات ورفع تجانس الجسيمات لأن وجود نسبة صغيرة من جسيمات خشنة قد يسبب نقاطاً وخطوطاً ويسد الفلاتر ويزيد الهالك

- الحجم الحبيبي Particle Size Distribution ولماذا لا يكفي رقم واحد :

الحجم الحبيبي ليس متوسطاً فقط بل هو توزيع. قد تكون الصبغة دقيقة في المتوسط لكن تحتوي ذيلًا خشناً وهذا الذيل هو السبب الرئيسي للنقاط والفلتر السئ. توزيع متجانس يعني تشتت أسهل ونتيجة أنعم ولمعان أكثر ثباتاً. كما أن التحكم في الحجم الحبيبي يرفع قوة التلوين Tinting Strength لأن الجسيمات المتجانسة تعطي مساحة سطح فعالة أعلى عند نفس الجرعة

- التكتل Agglomeration لماذا يحدث وكيف يؤثر :

الأصباغ الدقيقة تميل للتكتل بسبب طاقتها السطحية العالية. التكتل قد يتكون أثناء التصنيع أو أثناء التجفيف أو أثناء التخزين أو أثناء النقل. عوامل التكتل تشمل الرطوبة والضغط والكهرباء الساكنة والزمن والشوائب السطحية. التكتل هو السبب المباشر للنقاط والخطوط وضعف التشتت داخل البوليمر

التشتت Dispersion داخل البوليمر وما معناه عمليا :

التشتت يعني تفكيك التكتلات ثم توزيع الجسيمات بشكل متجانس داخل البوليمر المصهور. الخلط وحده لا يحقق تشتتاً لأن البوليمر المصهور وسط عالي اللزوجة ويحتاج قصا Shear كافيا وزمن مكوث Residence Time مناسب وبللا Wetting صحيحا لسطح الجسيمات. ضعف التشتت يؤدي إلى نقاط وخطوط وعكورة غير مستقرة وتفاوت بين الدفعات

كيف تأتي مواد اللون إلى المصنع؟

أشكال توريد الصبغات ومتى نستخدم كل شكل؟

عند الحديث عن اللون في البلاستيك قد يظن البعض أن الصبغة مادة واحدة ثابتة الشكل، لكن الواقع الصناعي مختلف فمواد اللون قد تصل إلى المصنع بأشكال متعددة، وكل شكل منها لا يختلف فقط في طريقة التعبئة أو الشكل الخارجي، بل يختلف في طريقة التشغيل، ودرجة الحساسية للأخطاء، واحتمالية ظهور العيوب، ومدى ملاءمته لنوع المصنع وخط الإنتاج.

ومن المهم التذكير بان:

اللون ليس مجرد مادة ملونة، بل هو نظام تشغيل كامل يبدأ من شكل التوريد، ثم طريقة الخلط والتغذية، ثم كفاءة التشتت داخل البوليمر، وصولاً إلى جودة المنتج النهائي وثباته. وفي هذا الفصل نعرض أشكال توريد مواد اللون الأكثر شيوعاً في صناعة البلاستيك، ونوضح الفروق بينها بشكل عملي يساعد القارئ على اتخاذ القرار الصحيح حسب التطبيق.

- بودرة الصبغة (Pigment Powder)

البودرة هي الشكل الخام الأكثر مباشرة للصبغة، حيث تصل المادة الملونة على هيئة مسحوق ناعم جداً. ورغم أن هذا الشكل شائع في أسواق الأصباغ، إلا أنه يتطلب تعاملًا صناعيًا دقيقًا لأن البودرة بطبيعتها حساسة للتكتل وتحتاج إلى خلط قوي حتى تتحول إلى لون متجانس داخل البوليمر وتكون مناسبة عندما يكون

المصنع قادرا على التحكم في الخط والتشتت، وعندما تكون هناك مرحلة تشغيل لاحقة تساعد على تفكيك التجمعات مثل مرحلة البثق في مصانع الماسترباتش أما في المصانع التحويلية الحساسة بصريا مثل مصانع الفلم، فإن البودرة قد تصبح مصدرا لمشاكل متكررة، خصوصا النقاط الناتجة عن التكتلات الصغيرة التي لا تتفكك بالكامل.

- الصبغة المشتتة مسبقا (Pre-Dispersed Pigment)

الصبغة المشتتة مسبقا هي مرحلة وسط بين البودرة الخام وبين الماسترباتش الجاهز. فهي ليست مجرد صبغة بودرة، وليست أيضا ماسترباتش بوليمري كامل، وإنما هي صبغة تم تجهيزها مسبقا بطريقة تجعلها أسهل في التوزيع وأقل قابلية للتكتل مقارنة بالبودرة الخام. وقد تأتي هذه الصبغة بأكثر من شكل حسب الشركة المنتجة، ومن أشهر الأشكال:

• حبيبات قليلة الغبار (Dust-Free Granules)

- تكون الصبغة مجمعة على هيئة حبيبات صغيرة لتقليل تطاير المسحوق داخل المصنع.

• صبغة مبللة داخل مادة رابطة (Pigment in Binder / Wax-based Preparation) تكون

الصبغة مبللة داخل مادة رابطة أو شمعية تساعد على تفكيك التكتلات وتحسين قابلية التشتت أثناء الخلط.

- **الفائدة الأساسية** من هذا الشكل هي تقليل مشاكل البودرة مثل الغبار والتكتل، مع الاحتفاظ بمرونة أعلى من الماسترباتش في بعض التطبيقات.

- 3.2.3 ماسترباتش اللون (Color Masterbatch)

الماسترباتش هو الشكل الأكثر استخداما في مصانع التحويل الحديثة، لأنه يقدم أعلى مستوى من الاستقرار التشغيلي. ويتمثل الماسترباتش في حبيبات بوليمرية (Carrier Resin) تحتوي داخلها على الصبغة، إضافة إلى مواد مساعدة تساعد على تحسين التشتت وتسهيل التشغيل.

الميزة العملية الأهم للماسترباتش أنه يُعدّ على خطوط الإنتاج بنفس طريقة تغذية الخام، ويعطي جرة ثابتة تقلل تفاوت العمال وتقلل احتمالية اختلاف اللون بين التشغيلات.

ولهذا السبب يعتبر الماسترباتش الخيار الأكثر أمانا لخطوط الفلم و الحقن و النفخ، وخطوط الإنتاج عالية السرعة، والتطبيقات التي يكون فيها الشكل البصري حساسا.

- الألوان الذائبة (Dyes) الألوان الذائبة تختلف من الأساس عن الأصباغ الصلبة. فالبيجمنت (Pigment) يكون على هيئة جسيمات صلبة لا تذوب داخل البوليمر، بينما الـ Dye يكون مادة ملونة تذوب أو تمتزج داخل البوليمر بدرجة أعلى.
- هذه الخاصية تمنح الألوان الذائبة ميزة مهمة وهي الحصول على لون شفاف ولمعان أعلى في بعض التطبيقات، لكنها في المقابل قد تحمل مخاطر تشغيلية وتنظيمية أكبر، وأهمها الهجرة (Migration) واحتمالية انتقال جزء من اللون إلى الوسط المحيط حسب نوع المادة وظروف الاستخدام. ولهذا تستخدم الألوان الذائبة عادة في التطبيقات الجمالية أو الشفافة، أو في تطبيقات خاصة تخضع لمواصفات دقيقة. تستخدم الألوان الذائبة (Dyes) غالبًا عندما يكون الهدف الحصول على لون شفاف ولمعان عالي دون عكارة، مثل تلوين المنتجات الشفافة بدرجات خفيفة (Tint) في بعض عبوات PET أو الأغذية والقطع الشفافة، وكذلك في بعض أفلام التغليف الشفافة الملونة التي تتطلب بقاء الرؤية عبر الفلم مع لون متجانس مثل أفلام الـ stretch. كما تُفضّل في التطبيقات الجمالية التي تحتاج عمق لون ومظهرًا قريبًا من الزجاج الملون، بشرط مراعاة متطلبات الثبات والهجرة خصوصًا في المنتجات الحساسة.

- جدول (2) وصف مبسط لأشكال توريد اللون :

شكل توريد اللون	الوصف المبسط	طريقة الاستخدام المعتادة	ملاحظة تشغيلية
Pigment Powder	صبغة خام بودرة ناعمة	خلط مباشر ثم تشغيل	أعلى حساسية للنقاط والغبار
Pre-Dispersed Pigment	صبغة مجهرة لتنتشت أسهل	خلط أسهل من البودرة	حل وسط بين البودرة والماستر باتش
Color Masterbatch	حببيات بوليمر محملة باللون	تغذية مثل الخام	الأعلى ثباتًا في الإنتاج التجاري
Dyes	لون يذوب داخل البوليمر	حسب نوع البوليمر والعملية	قد يرفع احتمالية الهجرة

- جدول (3) مقارنة تشغيلية واضحة بين الأشكال الأربعة :

العامل	Dyes	Masterbatch	Pre-Dispersed	Pigment Powder
سهولة التشغيل	متوسطة	عالية	متوسطة	منخفضة
الغبار داخل المصنع	شبه معدوم	شبه معدوم	منخفض	مرتفع
احتمال ظهور نقاط (Specks)	منخفض جداً (عادة)	منخفض	متوسط	مرتفع
ثبات الجرعة	يعتمد على النظام	عالي	متوسط	متوسط
مناسب للفلم	محدود حسب المتطلبات	ممتاز	محدود/بحذر	ضعيف غالباً
مناسب لـPVC	محدود	جيد	ممتاز	ممتاز
خطر الهجرة Migration	أعلى نسبياً	منخفض غالباً	منخفض غالباً	منخفض غالباً
مرونة تعديل اللون	متوسطة	متوسطة	عالية	عالية

- جدول (4) الاستخدام حسب نوع المصنع :

نوع المصنع / الخط	الشكل الأكثر شيوعاً	السبب العملي
مصنع ماسترباتش	Pigment Powder / Pre-Dispersed	لأنه يملك مرحلة بتق وتشتت لاحقة
مصنع فلم (Blown / Cast)	Masterbatch	لتجنب النقاط والغبار وتذبذب الجرعة

مصنع PVC أنابيب/بروفيلات	Pigment Powder / Pre-Dispersed	لأن الخلط الجاف يناسب المساحيق
حقن / نفخ	Masterbatch	ثبات الجرعة وسهولة التشغيل

الخلاصة

اختيار شكل توريد اللون ليس تفصيلاً ثانوياً، بل هو أحد مفاتيح نجاح اللون صناعياً. فكل شكل من أشكال الصبغة يملك مزايا وحدود، ويصبح ممتازاً في تطبيق، ومصدر مشاكل في تطبيق آخر. ومن هنا تأتي أهمية الربط بين شكل توريد اللون وبين طبيعة خط الإنتاج، لأن جودة اللون تُبنى علمياً داخل المختبر منذ البداية، ليس فقط عبر توصيف المادة الخام، بل أيضاً عبر إعداد عينات تطبيقية واختبار المنتج النهائي معملياً (مثل أفلام أو عينات حقن مصغرة) للتحقق من التشتت والثبات والمظهر. ثم بعد ذلك يُستكمل التقييم بالتشغيل الصناعي للتأكد من ثبات النتائج عند الانتقال إلى ظروف الإنتاج التجاري.

- أصباغ شائعة غذائياً وأخرى غير غذائية بشكل عام :

هذه القائمة ليست قرار اعتماد نهائي لأن القرار النهائي يعتمد على وثائق المطابقة والهجرة والجهة التنظيمية وطبيعة الاستخدام. لكنها تعطي القارئ فكرة عن أشهر ما يتكرر

- جدول (5) أصباغ شائعة غذائياً وأخرى غير غذائية بشكل عام :

اللون	أصباغ غالباً غير غذائية أو عالية القيود	أصباغ شائعة في الغذاء عند توفر مطابقة
أبيض	درجات غير مطابقة أو ذات شوائب أو صبغة بيضاء لا تعتمد على ثاني أكسيد التيتانيوم	ثاني أكسيد التيتانيوم Titanium Dioxide TiO2
أسود	كربون أسود غير مخصص للغذاء أو عالي شوائب	كربون أسود Carbon Black بدرجات مطابقة
أحمر أصفر بني	كادميوم وكرومات الرصاص غالباً ممنوعة	أكاسيد الحديد Iron Oxides بدرجات مطابقة

ألوان زاهية	أصباغ غالباً غير غذائية أو عالية القيود	أصباغ شائعة في الغذاء عند توفر مطابقة
أصباغ عضوية غير موثقة أو ذات قيود أمينات عطرية	أصباغ عضوية مختارة مع مطابقة	

- معايير حاسمة في التطبيقات الحساسة :

- الهجرة Migration لماذا هي معيار حاسم في التطبيقات الحساسة
- النزف Bleeding والفرق بينه وبين الهجرة

- الهجرة Migration لماذا هي معيار حاسم في التطبيقات الحساسة :

الهجرة تعني انتقال مكونات من البلاستيك إلى وسط ملامس مثل غذاء أو دواء أو زيت أو ماء أو منظفات. الهجرة قد تكون هجرة كلية Overall Migration وهي كمية عامة من المواد المنتقلة وقد تكون هجرة نوعية Specific Migration وهي انتقال مادة محددة بعينها. الهجرة لا ترتبط بالمادة الملونة وحدها بل ترتبط بالنظام كامل لأن ما قد يهاجر فعلياً هو مواد مساعدة أو شوائب أو مركبات منخفضة الوزن الجزيئي داخل نظام اللون

ما الذي يمكن أن يهاجر من نظام اللون ؟

في كثير من الحالات لا تهاجر جسيمات البيجمنت نفسها لأنها غير ذائبة لكن قد تهاجر مكونات أخرى مثل شوائب سطحية، أملاح، مواد مساعدة للتشتت، مركبات عضوية منخفضة الوزن الجزيئي، أما القالب (Die) فقد تكون قابلة للهجرة بسبب طبيعتها الأقرب للذوبان داخل الوسط

- العوامل التي ترفع الهجرة :

الهجرة تزيد مع الحرارة والزمن ومع الوسط الدهني ومع زيادة مساحة التلامس ومع انخفاض سماكة المنتج ومع زيادة نسبة الإضافة. لذلك قد يكون نظام اللون مقبولا في عبوة سميكة لكنه غير مناسب في فيلم رقيق لتغليف مباشر

- **النزف Bleeding والفرق بينه وبين الهجرة :**

النزف يعني انتقال اللون داخل البلاستيك أو إلى السطح أو إلى طبقة أخرى في المنتجات متعددة الطبقات أو أثناء التلامس بين قطعتين. النزف قد يسبب تلطيخ وتغير سطح وعدم ثبات لون. الهجرة مفهوم أوسع ويشمل انتقال مواد إلى وسط خارجي وقد يحدث دون ظهور لون واضح

- **تأثير اللون على المنتج والماكينة :**- **جدول (6) خريطة العيوب وربطها بالسبب العلمي :**

العيوب	السبب المرجح	نقطة التحكم الأساسية
نقاط Specks	تكتل أو Grit أو ذيل خشن	PSD Dispersion Filtration
خطوط Streaks	تغذية غير ثابتة أو تراكمات داخل القالب (Die)	Feeding Die Cleanliness
عكورة مرتفعة Haze	حجم حبيبي غير مناسب أو تكتل	PSD Dispersion Let Down
لمعان منخفض Gloss Loss	خشونة سطح أو عدم تجانس	Dispersion Surface System
انسداد فلتر سريع	جسيمات خشنة أو شوائب	Screen Pack PSD Supplier
تغير لون أثناء التشغيل	ضعف Heat Stability أو احتراق موضعي	Heat Profile Residence Time
نزف Bleeding	ألوان أو مواد منخفضة الوزن	System Selection Compliance
هجرة Migration	مكونات قابلة للانتقال	OML SML Compliance

اللون قد يؤثر على، العكورة والشفافية، اللمعان وتجانس السطح، الخواص الميكانيكية عبر التكتلات كنقاط ضعف، الفترة والضغط عبر الجسيمات الخشنة، استقرار التشغيل عبر تذبذب التغذية أو تراكمات داخل Die، اللحام في الأفلام عبر تأثيرات سطحية أو تغيير في سلوك الذوبان والطباعة عبر تغيير طاقة السطح أو وجود مواد سطحية تؤثر على التصاق الحبر

- اللون وأحبار الطباعة :

اللون في البلاستيك يستخدم لتلوين المنتج نفسه كما يستخدم في أحبار الطباعة على البلاستيك. أحبار الطباعة تعتمد على نفس مفهوم الصبغات والتشتت لكن في وسط مختلف. نجاح الحبر يعتمد على تشتته داخل وسطه وعلى التصاقه على سطح البلاستيك وعلى ثباته ضد الفرك والكحول والماء. لذلك قد يكون المنتج ملونا بشكل ممتاز لكن الطباعة عليه تفشل إذا كان سطحه غير مناسب أو إذا كانت هناك مواد سطحية ضمن نظام اللون تقلل التصاق الحبر

فاللون في البلاستيك منظومة تعتمد على المادة الملونة وعلى بنيتها الحبيبية وعلى قدرتها على التشتت داخل البوليمر. الجودة لا يحددها عمق اللون فقط بل يحددها الحجم الحبيبي والتكتل والتشتت وجودة ماسترباتش اللون وتوافق الحامل. وفي التطبيقات الحساسة تصبح الهجرة Migration معيارا حاسما لأن اللون قد يكون ثابتا بصريا لكنه غير آمن كيميائيا إذا كانت مكونات النظام قابلة للانتقال. كلما فهم المصنع هذه العناصر أصبح اللون قرارا مضبوطا يقلل الهالك ويرفع ثبات الإنتاج ويحسن جودة المنتج النهائي ويضمن تكرار اللون بين الدفعات .

- 3.3 الفصل الثالث إضافات دعم اللون وجودة المظهر

(Color Performance Additives)

بعد فهم طبيعة الأصباغ والألوان الذائبة وأشكال توريدها، يصبح السؤال الصناعي الأهم: كيف نضمن أن اللون الذي يبدو تصميمياً سيعتبر متجانساً داخل المنتج النهائي؟ هنا تظهر مجموعة من الإضافات التي لا يكون هدفها تغيير درجة اللون بحد ذاتها، بل دعم أداء نظام اللون داخل المصهور عبر تحسين البلل والتشتت وتقليل التكتل، وضبط سلوك السطح، ورفع ثبات التشغيل وتقليل العيوب البصرية مثل النقاط والخطوط والعكورة. لذلك تُعامل هذه الإضافات كجزء من منظومة اللون، ويُعتمد استخدامها بناءً على نتائج المنتج النهائي وليس على شكل المادة فقط.

وتبرز أهمية هذا الفصل لأن كثيراً من مشاكل اللون لا تكون بسبب الصبغة نفسها، بل بسبب فشل النظام في الوصول إلى توزيع متجانس داخل البوليمر، أو بسبب تداخل إضافات سطحية مع الطباعة واللحام ومعامل الاحتكاك (COF). لهذا سنعرض في هذا الفصل أهم الإضافات التي تدعم أداء اللون والمظهر، مع التركيز على تركيبة كل نوع، وآلية عمله، وحدوده، وكيفية اعتماده بشكل صناعي.

تشمل إضافات دعم اللون وجودة المظهر عادة الأنواع التالية:

- مساعدات التشتيت والبلل (Dispersants & Wetting Agents)
- الشمعيات البوليمرية (Polymer Waxes)
- المزلاقات الداخلية والخارجية (Internal & External Lubricants)
- مساعدات التشغيل غير الفلورية (Non-Fluoro Processing Aids)
- مساعدات التشغيل الفلورية (Fluorinated Processing Aids)

- جدول (1) — الإضافة وسبب استعمالها :

الإضافة	المشكلة التي تعالجها غالباً	أكثر تطبيق تظهر فيه	ملاحظة
Dispersants/Wetting	نقاط، تكتلات، فلترية سيئة، عكورة	ماستر باتش + فيلم	ليست بديلاً عن القص/التصميم الصحيح للولب
Polymer Waxes	تحسين تشتت + تشغيل + سطح	ماستر باتش	الجرة الزائدة تسبب Blooming وضعف طباعة
Lubricants	تقليل احتكاك/عزم + تحرير قالب	PVC/حقن/بثق	قد تضر اللحام والطباعة إذا أثرت على السطح
Non-Fluoro PPA	تحسين سطح/استقرار تشغيل	فيلم/بثق عام	أداؤه يعتمد على التركيبة أكثر من الاسم
Fluoro PPA	علاج عيوب قص عالية + تقليل Build-up	فيلم عالي السرعة	يحتاج زمن تشغيل حتى يظهر أثره

- 3.3.1 مساعدات التشييت والبلل (Dispersants & Wetting Agents)

- هي إضافات تستخدم لتحسين انتشار الجسيمات الدقيقة (Pigments / Fillers) داخل

البوليمر المصهور، عبر:

1- تقليل التكتل (Agglomeration)

2- تحسين بلل سطح الجسيمات (Wetting)

3- تسهيل تفكيك التكتلات تحت القص (Deagglomeration)

4- رفع تجانس اللون وتقليل النقاط والخطوط

وبعبارة عملية : هي الإضافة التي تجعل اللون يتوزع بدل أن يبقى ككتل صغيرة.

- التركيبة الكيميائية :

مساعداً التشتيت ليست مادة واحدة، بل عائلات وظيفية، وأكثر التركيبات شيوعاً صناعياً تكون ضمن أحد الأنظمة التالية:

أ) مشتقات أحماض دهنية/شمعيات وظيفية (Fatty Derivatives / Functional Waxes)

أميدات (Amides)

• إسترات (Esters)

• شمعيات مؤكسدة (Oxidized waxes)

وظيفتها الأساسية: تحسين البلل وتقليل التكتل.

ب) بوليمرات وظيفية متوافقة (Functional Polymers / Compatibilizers)

مثل بوليمرات ذات قطبية أعلى تساعد على ربط سطح الجسيمات بالمصفوفة البوليمرية، خصوصاً مع:

• الأصباغ العضوية

• المالئات الدقيقة

• أنظمة ذات حساسية عالية للنقاط

ج) نظام ماسترباتش تشتيت جاهز (Dispersant Masterbatch) غالباً يتكون من:

• مادة فعالة (Dispersant Active)

• حامل (Carrier) مثل PE أو PP أو EVA حسب التطبيق

• وقد يحتوي على شمع مساعد أو مادة انسياب

نقطة مهمة : مساعد تشتيت ممتاز للأصباغ العضوية قد لا يكون الأفضل للمالئات المعدنية، والعكس صحيح.

كيف تعمل فعليا ؟ مساعدات التشتيت تعمل عبر وظيفتين متكاملتين:

(1) **البلل Wetting** تساعد البوليمر المصهور على تغطية سطح الجسيم بسرعة، فتقل فرصة تجمع الجسيمات.

(2) **تفكيك التكتلات Deagglomeration** : تقلل القوى التي تربط الجسيمات ببعضها،

فيصبح القص داخل (Injection Mould) قادرا على تفكيكها إلى توزيع أدق.

أين تظهر فائدتها بوضوح؟

• مصانع الماسترباتش (ألوان + فيلر)

• مصانع الفيلم (خصوصا الشفاف وشبه الشفاف)

• خطوط حساسة للنقاط (خيوط / تغليف / شرنك / سترتش)

• أنظمة فيها Screen Pack حساس أو فلتر دقيقة

آثار جانبية محتملة عند سوء الاختيار أو زيادة الجرعة قد يحدث:

• تغير في اللمعان

• تغير في COF

• ضعف لحام في بعض الأفلام

• ضعف طباعة (خصوصا إذا ترك أثرا سطحيا)

منهج الاعتماد الصحيح :

- تشغيل خط أساس بدون الإضافة
- إضافة جرة منخفضة
- تقييم: النقاط + الفلتر + العكورة + ثبات اللون
- رفع تدريجي فقط عند الحاجة
- تثبيت الجرعة ضمن مواصفة معتمدة

- جدول (2) — متى تحتاج مساعد تشتيت ؟ (من واقع تجارب عملية) :

المؤشر في الإنتاج	السبب المرجح (علمياً/تشغيلياً)	هل مساعد التشتيت مناسب؟ ولماذا؟
نقاط (Specks) متكررة	تكتلات صبغة/فيلر، ذيل خشن Coarse Tail، ضعف قص داخل (Injection Mould)	نعم غالباً لأنه يساعد على تفكيك التكتلات وتحسين البلل لكن بشرط وجود فلتر مناسبة وعدم وجود شوائب صلبة كبيرة
عكورة أعلى من المتوقع مرتفع (Haze)	توزيع غير متجانس للجسيمات الدقيقة، أو بلل ضعيف لسطح البيجمنت/الفيلر	نعم لأنه يحسن البلل ويقلل التجمعات الدقيقة التي ترفع العكورة
انسداد شاشات سريع (Screen Pack Blocking)	جسيمات خشنة، تكتلات، أو شوائب غير ذائبة ضمن نظام اللون/المالي	نعم جزئياً إذا كان السبب تكتلات قابلة للتفكيك، لكن إذا كانت شوائب صلبة/خشنة فالحل الأساسي يكون فلتر أفضل + فحص المورد
اختلاف لون بين دفعات الإنتاج	اختلاف مستوى التشتيت/البلل، اختلاف قص أو زمن مكوث، أو تفاوت في التغذية	نعم لأنه يقلل حساسية اللون لتغيرات الخلط ويعطي تجانساً أعلى، مع ضرورة تثبيت طريقة الخلط والجرعة

المؤشر في الإنتاج	السبب المرجح (علمياً/تشغيلياً)	هل مساعد التشييت مناسب؟ ولماذا؟
نقاط سببها شوائب صلبة واضحة (Contamination)	تلوث خام/أتربة/معدن/خشب/بوليمر غريب أو احتراق قديم	لا لأن مساعد التشييت لا يزيل الشوائب ولا يذيبها؛ الحل يكون تنظيف، فلتره، تحسين الفرز، ومعالجة مصدر التلوث

- 3.3.2 الشمعيات البوليمرية :

(Polymer Waxes – PE Wax / PP Wax / Functional Waxes)

- هي مواد ذات طبيعة شمعية تُستخدم غالباً لتحقيق هدفين رئيسيين:

- تحسين التشغيل وتقليل الاحتكاك أثناء الخلط والبتق

- دعم تشتت الألوان والمالئات وتقليل التكتلات

التركيبية الكيميائية :

الشمعيات البوليمرية ليست شمع واحد، وأكثر الأنواع شيوعاً:

(أ) شمع بولي إيثيلين (PE Wax) بوليمر PE منخفض الوزن الجزيئي (Low MW) يعطي سلوكاً شمعيًا.

(ب) شمع بولي بروبيلين (PP Wax) بوليمر PP منخفض الوزن الجزيئي، يفيد أحياناً في أنظمة PP أو في تحرير القالب.

(ج) شمع مؤكسد (Oxidized Waxes) مثل Oxidized PE Wax

يتميز بقطبية أعلى، وغالباً يعطي:

- تشييت أفضل

- توافق أعلى مع بعض الأنظمة لكنه قد يؤثر على السطح أكثر

(د) شمع كوبوليمر (Copolymer Waxes) مثل EVA Wax يفيد في أنظمة تحتاج مرونة أو قطبية أعلى.

كيف تعمل؟

- تقلل الاحتكاك بين سلاسل البوليمر

- تقلل الاحتكاك بين البوليمر والجسيمات الصلبة
- تسهل حركة الخلطة تحت القص
- تساعد على فككة التكتلات وتحسين التوزيع

أين تستخدم غالبا ؟

- خطوط كومباودينغ ماستر باتش: أساسية
- خطوط سحب: أساسية في التطبيقات التي تعتمد على مكونات جافة
- الالات فيلم: بحذر لأن السطح حساس
- الالات حقن/نفخ: لتحسين التدفق أو التحرير حسب الحاجة

متى تتحول إلى مشكلة؟

- Blooming انفصال سطحي
- سطح زيتي يضعف الطباعة
- ضعف لحام
- تغير COF خارج المطلوب

- جدول (3) — مقارنة مختصرة بين أنواع الشموع الشائعة :

النوع	التركيب	الميزة	المخاطر
PE Wax	PE منخفض MW	تشغيل + تشتيت	سطح COF / عند الزيادة
PP Wax	PP منخفض MW	تشغيل لبعض الأنظمة	قد لا يناسب بعض أفلام PE
Oxidized Wax	شمع مؤكسد أكثر قطبية	تشتيت أقوى	تأثير سطحي أعلى

EVA Wax	كوبوليمر أكثر قطبية	توافق و تشتيت	قد يغير خواص سطحية
---------	---------------------	---------------	-----------------------

- 3.3.3 المزلقات الداخلية والخارجية

(Internal & External Lubricants)

لماذا نضعها ضمن دعم اللون والمظهر؟

لأنها تؤثر مباشرة على:

- نعومة السطح
- اللمعان
- الطباعة
- اللحام
- COF

وبالتالي قد تحسن المظهر أو تفسده رغم أن اللون صحيح.

التركيبية الكيميائية :

المزلقات عائلات كبيرة، أشهرها:

- شمعيات بوليمرية (Polymer Waxes)
- مشتقات أحماض دهنية (Fatty Acid Derivatives)
- إسترات شمعية (Ester Waxes)

- أميدات (Amides) مثل EBS وبعض Slip additives
- ستيرات معدنية (Metal Stearates) خصوصا في PVC

الفرق العملي :

- مزلق داخلي (Internal): يقلل الاحتكاك داخل الذوبان وبالتالي يحسن الانسيابية والعزم
- مزلق خارجي (External): يقلل الاحتكاك بين الذوبان والمعدن وبالتالي يقلل الالتصاق ويحسن الخروج

مخاطر مهمة :

- زيادة المزلق الخارجي قد تضعف الطباعة واللحام
- قد تسبب Blooming
- قد تغير COF بشكل غير مرغوب

- جدول (4) — الفرق بين Internal Lubricants و External Lubricants

البند	External Lubricant	Internal Lubricant
مكان التأثير	بين الذوبان والمعدن	داخل الذوبان
النتيجة	خروج أسهل + التصاق أقل	انسيابية + عزم أقل
المخاطر	ضعف طباعة/لحام + Blooming	ضعف خلط إذا زاد
أشهر التطبيقات	PVC/حقن/قوالب	ماسترباتش/بثق عام

3.3.4 مساعدات تشغيل غير فلورية (Non-Fluorinated Processing Aids)

هي إضافات تشغيلية تعتمد على أنظمة غير فلورية، تُستخدم لتحسين بعض جوانب الاستقرار التشغيلي وسلوك المصهور السطحي أثناء التشغيل، دون إحداث آلية الانزلاق الجداري العميق المرتبطة بمساعدات التشغيل الفلورية.

ويقتصر دورها عادة على:

- تحسين الانزلاق الداخلي أو السطحي للمصهور
- تقليل التذبذب التشغيلي البسيط
- تحسين المظهر السطحي في التطبيقات غير الحرجة

ويتم اللجوء إليها عندما:

1. لا تكون عيوب القص أو الانسياب حادة
2. تُفضل أنظمة غير فلورية لأسباب تنظيمية أو تطبيقية
3. يكون الهدف تحسين الاستقرار التشغيلي العام وليس معالجة ظواهر Melt Fracture أو

Sharkskin جذريًا

التركيبية الكيميائية :

المساعدات غير الفلورية ليست مادة واحدة ثابتة، بل أنظمة مختلفة قد تشمل:

- بوليمرات وظيفية (Functional Polymers)
 - أنظمة شمعية أو سطحية محسنة
 - إضافات تقلل الاحتكاك الداخلي أو تحسن سلوك الانصهار
- وغالبًا تُورد تجاريًا على شكل ماسترباتش يتكوّن من:

- مادة فعالة
- بوليمر حامل PE / PP حسب التطبيق
- إضافات توزيع لضمان التجانس

آلية العمل تعمل هذه الأنظمة عبر:

- تقليل الاحتكاك الداخلي أو السطحي للمصهور
- تحسين سلوك الطبقة القريبة من جدار قالب
- تقليل التذبذب البصري في بعض التركيبات الحساسة
- تأثيرها تشغيلي بالدرجة الأولى، وليس معالجة سطحية نهائية.

حدودها التشغيلية تكون فعاليتها محدودة في الحالات التالية:

- أفلام عالية القص جدًا
- مشاكل ناتجة عن:

1. شوائب صلبة
2. رطوبة
3. تكتلات
4. فلترة ضعيفة

وذلك لأنها:

- لا تعالج الجسيمات الصلبة
- ولا تعوّض خللاً ميكانيكياً أو تشغيلياً في الخط

- 3.3.5 مساعدات التشغيل الفلورية

Fluorinated Processing Aids – Fluoro PPAs

- هي إضافات متخصصة تستخدم بجرعات صغيرة جدًا لتحسين سلوك المصهور داخل القالب، خصوصاً في:

- خطوط الفيلم عالية القص
- السرعات المرتفعة

• التطبيقات الحساسة لعيوب السطح

وتهدف إلى:

• تقليل ظواهر مثل Melt Fracture / Sharkskin

• تقليل Die Build-up

• تحسين ثبات المظهر عند التشغيل المستمر

التركيبية الكيميائية :

تستخدم عادة ضمن نظام ماسترباتش يحتوي على:

المادة الفعالة (Fluorinated Polymer)

بوليمر فلوري يتميز بـ:

• طاقة سطحية منخفضة جدًا

• قابلية عالية للانزلاق على الأسطح المعدنية

• ثبات حراري مناسب للبتق

البوليمر الحامل (Carrier Resin)

غالبًا:

• PE

• وأحيانًا حامل متوافق حسب التطبيق

إضافات ثانوية

• لتحسين التوزيع

• لمنع التكتل

• دون أن تكون هي مصدر التأثير الأساسي

كيف تعمل مع التشغيل المستمر ؟ :

- تهاجر الإضافة تدريجيًا إلى سطح القلب
- تُكوّن طبقة رقيقة تقلل الاحتكاك بين المصهور والمعدن

فينتج:

- تدفق أكثر سلاسة قرب الجدار
- اضطرابات أقل
- تأخير تراكمات القلب

ملاحظة تشغيلية مهمة: تأثيرها ليس فوريًا دائمًا، وقد يتطلب زمن تشغيل حتى يظهر بوضوح.

آثار جانبية محتملة عند سوء الاختيار أو زيادة الجرعة:

- تأثير على الطباعة
- تأثير على اللحام
- تداخل مع Slip و Anti-block
- تغيير في COF

ولهذا لا يجوز استخدامها دون فهم النظام السطحي الكامل.

- جدول — (C-5) مقارنة تشغيلية بين Fluoro PPA و Non-Fluoro PPA

البند	Non-Fluoro PPA	Fluoro PPA
آلية العمل	تحسين تدفق باليات غير فلورية	انزلاق على القلب + تأثير فلوري
القوة في فيلم عالي القص	متوسطة / حسب النظام	عالية
زمن ظهور التأثير	غالبًا أسرع	قد يحتاج زمن تشغيل

البند	Non-Fluoro PPA	Fluoro PPA
الحساسية للتداخلات	أقل نسبياً	أعلى
الاستخدام النموذجي	بثق عام / حلول تشغيل مرنة	Blown Film عالي السرعة

منهج اعتماد مساعدات التشغيل داخل المصنع :

أي إضافة من هذه الفئة لا تُعتمد لمجرد تحسّن المظهر ، بل يجب أن تمر بمنهج تقييم متوازن:

- تشغيل خط أساس (Baseline)
- إضافة أقل جرعة ممكنة
- تشغيل بزم من كاف خصوصاً PPAs الفلورية
- تقييم المنتج النهائي من حيث:
 - التجانس البصري
 - النقاط والخطوط
 - العكورة واللمعان
 - الطباعة واللحام
- COF عند الحاجة
- تثبيت الجرعة ضمن مواصفة معتمدة
- التأكد من عدم حدوث تداخلات غير مقصودة مع:

Slip

Anti-block

Antioxidants

الخلاصة

مساعداً التشغيل، سواء كانت فلورية أو غير فلورية، ليست إضافات سطحية ولا إضافات لون، بل أدوات لضبط سلوك المصهور داخل القالب.

والتعامل معها كحل منفصل يؤدي غالباً إلى:

- تحسّن مؤقت
- ثم ظهور مشاكل لاحقة في السطح أو الطباعة أو اللحام
- أما التعامل الصحيح، فيكون بوضعها ضمن منظومة الإضافات الكاملة، حيث:
- اللون يعتمد على التشتت

• السطح يعتمد على Slip و Anti-block

• والمعالجة تعتمد على ضبط التدفق والقص

وبذلك يتحول التشغيل من رد فعل إلى قرار هندسي مضبوط.

3.3.6 معدلات الريولوجيا

Rheology Modifiers

- **تعريف الريولوجيا** الريولوجيا هي وصف سلوك المصهور تحت القص والحرارة والزمن. وفي البلاستيك هي لغة التدفق داخل الماكينة، أي كيف تتغير اللزوجة والاستجابة عند تغيير السرعة والقص ودرجة الحرارة.

- **ما هي معدلات الريولوجيا كإضافة :** معدلات الريولوجيا هي مواد بوليمرية أو أنظمة بوليمرية مصممة

تضاف بجرعات محددة لإعادة تشكيل سلوك المصهور أثناء التدفق، أي تعديل:

• منحنى اللزوجة مقابل معدل القص (Viscosity–Shear Rate)

• و/أو الاستجابة المرنة للمصهور (Elasticity)

• و/أو زمن الاسترخاء (Relaxation Behavior)

وبذلك فهي ليست مزلق ولا Slip ، وليست PPA ، وليست مادة سطحية؛ بل هي إضافة تؤثر في كتلة المصهور (Bulk melt) وتظهر آثارها أثناء التشكيل.

- التركيبة الكيميائية: ممّ تصنع؟

-

هذه الإضافات ليست نوعاً واحداً، لكنها تقع غالباً ضمن 3 عائلات رئيسية

✓ بوليمرات عالية الوزن الجزيئي High MW Polymers

تُستخدم عندما يكون الهدف:

• رفع/تثبيت اللزوجة عند القص المنخفض

• أو تقليل حساسية التدفق للتغيرات التشغيلية

وتكون عادة بوليمرات متوافقة مع البوليمر الأساسي لكن بوزن جزيئي أعلى أو توزيع وزني مختلف.

✓ بوليمرات متفرعة أو طويلة التفرع – Long-Chain Branched

Polymers (LCB)

تُستخدم عندما يكون الهدف:

• زيادة المرونة في المصهور

• أو تحسين الاستقرار في عمليات تتطلب سحب وتمدد (Extensional behavior)

- أو دعم الثبات في الفقاعة/الشّد أثناء التشكيل

و أحيانًا المشكلة ليست لزوجة فقط، بل مرونة المصهور أثناء السحب.

✓ أنظمة تفاعلية/شبكة خفيفة Reactive or Light Network Systems

تُستخدم عندما يُراد:

- تعديل الريولوجيا داخل الخط عبر تفاعل محدود
- أو تقوية التشابك الفيزيائي/الكيميائي بشكل مضبوط
- وقد تكون ضمن ماسترباتش وظيفي مصمم لخط أو تطبيق محدد.

- الشكل التجاري داخل المصنع غالبًا تُورّد Rheology Modifiers على شكل:

- Masterbatch المادة الفعالة + Carrier + مساعدات توزيع
أو:

- Functional Concentrate مخصص للـ PE أو PP أو Blends

والسبب في ذلك أن توزيعها غير الجيد قد يعطي:

- تذبذبًا أسوأ من المشكلة الأصلية
- أو مناطق غنية بالإضافة ومناطق فقيرة منها

- كيف تعمل فعليًا داخل المصهور تعمل عبر واحد أو أكثر من هذه الآليات:

- إعادة توزيع الإجهاد داخل المصهور فتقل القفزات المفاجئة في التدفق

- تعديل الاستجابة للقص

- تثبيت سلوك اللزوجة عند القص المنخفض
- أو تهدئة التغيرات الحادة عند القص العالي
- رفع المكوّن المرن (Elastic component) عند الحاجة وهذا يظهر في:

– ثبات الفقاعة

– ثبات السماكة

– مقاومة الانهيار أثناء السحب

لذلك لا يجوز اختزالها في رفع اللزوجة فقط.

- متى تكون حلاً صحيحاً عندما تكون المشكلة:

- عدم استقرار تدفق ريولوجي وليس تلوّناً
 - تذبذب سماكة ناتج عن سلوك المصهور
 - حساسية شديدة لتغير السرعة/القص
 - انهيار في الاستقرار رغم ثبات الحرارة والضغط
- وخاصة في:

• أفلام متعددة الطبقات

• سماعات رقيقة

• تركيبات عالية المالتات

• خطوط تعمل بسرعات متغيرة

- متى تتحول إلى مشكلة :

الخطأ 1: استخدامها لتعويض شوائب أو رطوبة

إذا كان السبب الحقيقي:

- رطوبة
- تكتلات
- شوائب
- تدهور حراري سابق

فالإضافة لن تعالج السبب، وقد تُخفيه مؤقتاً ثم يعود بشكل أسوأ.

الخطأ 2: عدم التوافق مع البوليمر الأساسي

قد يؤدي إلى:

- عدم تجانس
- نقاط/عيوب
- تذبذب غير مفسر

الخطأ 3: تداخلها مع PPAs أو أنظمة السطح قد يُحدث:

- تحسن تدفق مقابل تدهور الطباعة/اللحام أو تغير COF إذا لم يتم ضبط النظام ككل.

- تداخل معدلات الريولوجيا تتداخل مع مع بقية الإضافات:

• Processing Aids (PPA):

PPA يعالج الاحتكاك قرب جدار القالب، بينما Rheology Modifier يعيد ضبط

سلوك المصهور في الكتلة. الخلط بينهما يخلق قراراً خاطئاً.

• Strength Modifiers Melt تركيز على مقاومة الشد أثناء السحب، بينما

Modifier Rheology يركز على منحنى التدفق والاستجابة للقص.

• Fillers عالية السطحية:

قد ترفع اللزوجة وتسبب عدم استقرار، وهنا يكون دور المعدل إما مساعدًا أو قد يزيد التعقيد إذا لم يُصمم للتعامل معها.

- منهج الاعتماد داخل المصنع :

• تثبيت خط أساس Baseline

• التأكد أن سبب المشكلة ليس: رطوبة/شوائب/تدهور

• اختيار نظام متوافق مع البوليمر

• بدء جرعة منخفضة

• تشغيل في ظروف ممثلة للإنتاج

• تقييم استقرار التدفق والسماكة ومظهر المنتج وملاءمته للعمليات اللاحقة (طباعة/لحام عند الحاجة)

• تثبيت الجرعة ضمن مواصفة معتمدة

- الخلاصة :

معدلات الريولوجيا هي إضافات بوليمرية وظيفية هدفها إعادة تشكيل سلوك المصهور داخل الماكينة، وليس تعديل السطح. وهي تعمل عبر ضبط منحنى التدفق والاستجابة للقص والمرونة داخل المصهور. نجاحها لا يتحقق بوصفها زيادة لزوجة، بل بتشخيص صحيح لنوع عدم الاستقرار، واختيار نظام متوافق، وضبط التداخل مع PPAs وإضافات السطح ضمن منظومة واحدة.

- 3.3.7 معَدَلات قوة المصهور

Melt Strength Modifiers

- ما المقصود بقوة المصهور (Melt Strength)

قوة المصهور هي قدرة البوليمر المنصهر على مقاومة الشد والانهييار أثناء السحب والتمدد قبل التصلب، خصوصاً في العمليات التي يتعرض فيها المصهور لقوى شد محورية أو ثنائية الاتجاه.

وبخلاف الريولوجيا التي تركز على سلوك التدفق تحت القص، فإن قوة المصهور تركز على:

- الاستقرار أثناء السحب
- مقاومة التمزق أو الانهييار
- الحفاظ على الشكل قبل التبريد

بعبارة صناعية دقيقة:

الريولوجيا تتحكم في كيف يتدفق المصهور وقوة المصهور تتحكم في كيف يصمد المصهور أثناء الشد.

- ما هي معَدَلات قوة المصهور كإضافة؟

معَدَلات قوة المصهور هي إضافات بوليمرية أو أنظمة تفاعلية تُضاف بهدف زيادة مقاومة المصهور للتمدد والانهييار، دون تحويله إلى مادة عالية اللزوجة غير قابلة للتشغيل.

وهي لا تُستخدم لتحسين السطح، ولا لمعالجة القص العالي، بل لضبط السلوك التمددي

Extensional Behavior للمصهور.

- متى نحتاج إلى معَدَلات قوة المصهور؟

يتم اللجوء إليها عندما تظهر مشاكل مثل:

- انهيار الفقاعة في Blown Film
- تمزق الحواف أو عدم استقرار السحب

• ترهل المصهور في Sheet / Thermoforming

• ضعف الاحتفاظ بالشكل قبل التبريد

• صعوبة التحكم في السماكة أثناء التمدد

وُستخدم بشكل شائع في:

• Blown Film

• Cast Film

• Sheet & Thermoforming

• Foaming

• Extrusion Coating

- التركيبية الكيميائية :

معدّلات قوة المصهور ليست مادة واحدة، لكنها تقع عادة ضمن ثلاث فئات رئيسية:

- بوليمرات متفرعة طويلة السلسلة

Long-Chain Branched Polymers

• تُضاف بكميات محدودة

• ترفع المكوّن المرن للمصهور

• تحسّن مقاومة الشد دون رفع مفرط للزوجة

- أنظمة تفاعلية داخل الخط

Reactive Melt Strength Systems

- تُحدث تشابكًا محدودًا أثناء البثق
- تزيد قوة المصهور تدريجيًا
- تتطلب ضبطًا دقيقًا للحرارة والزمن

- معدلات خاصة لبعض البوليمرات

- مثل أنظمة خاصة لـ PP لتحسين أدائه في عمليات كان ضعيفًا فيها تقليديًا

- أو أنظمة مخصصة للخلطات (Blends)

وغالبًا تُقدّم هذه الإضافات على شكل:

- Masterbatch وظيفي
- أو Concentrate تفاعلي مصمم لتطبيق محدد

- تعمل فعليًا داخل المصهور عبر :

- زيادة التشابك الفيزيائي أو البنيوي داخل المصهور
- رفع القدرة على تخزين الطاقة المرنة أثناء السحب
- إبطاء الانهيار قبل التصلب

والنتيجة:

- فقاعة أكثر استقرارًا
- مقاومة أفضل للترهل

- تحكم أعلى في السماكة والشكل

هي لا تزيد اللزوجة بالضرورة، بل ترفع التحمل أثناء الشد.

- ماذا تفعل وظيفيًا؟

- تحسين استقرار الفقاعة
- دعم عمليات السحب والتمدد
- تقليل التمزق والانهييار
- توسيع نافذة التشغيل لبعض البوليمرات

- ماذا لا تفعل؟

- لا تعالج Melt Fracture أو Sharkskin
- لا تحسن الانزلاق أو السطح
- لا تعوض ضعف الريولوجيا أو سوء القص
- لا تعالج مشاكل شوائب أو رطوبة

- الفرق المنهجي بينها وبين Rheology Modifiers

البند	Melt Strength Modifiers	Rheology Modifiers
مجال التأثير	السلوك تحت الشد	التدفق تحت القص
الهدف	استقرار السحب	استقرار التدفق
المشكلة الأساسية	انهيار أو تمزق	تذبذب لزوجة/قص
الاستخدام النموذجي	Blown / Sheet / Foaming	بثق عام

البند	Melt Strength Modifiers	Rheology Modifiers
هل ترفع اللزوجة؟	ليس الهدف	ليس بالضرورة

- **التداخل مع بقية الإضافات :** تتداخل معدلات قوة المصهور مع:

• Rheology Modifiers

• Processing Aids

• أنظمة اللون عالية التحميل

• المالنات

وسوء التنسيق بينها قد يؤدي إلى:

• تحسن في الاستقرار مقابل صعوبة في التشغيل

• أو استقرار شكلي مقابل تدهور في السطح

- **حدود الاستخدام :** فعاليتها محدودة عندما يكون سبب المشكلة:

• قص غير متوازن

• حرارة غير مستقرة

• شوائب أو رطوبة

• تصميم قالب غير مناسب

في هذه الحالات، رفع قوة المصهور قد يخفي المشكلة دون حلها.

- **منهج الاعتماد داخل المصنع :**

• تحديد ما إذا كانت المشكلة شديدة وليست قصية

- تثبيت ظروف تشغيل مستقرة
- اختيار نظام متوافق مع البوليمر
- بدء جرعة منخفضة جدًا
- تشغيل بزمان كافٍ لظهور التأثير
- تقييم الاستقرار دون التأثير السلبي على التشغيل أو السطح
- تثبيت الجرعة ضمن مواصفة معتمدة

- الخلاصة:

معدّلات قوة المصهور هي إضافات وظيفية متقدمة تُستخدم لضبط السلوك التمددي للمصهور، وليس مجرد زيادة لزوجته. وهي ضرورية عندما يكون التحدي الحقيقي هو الصمود أثناء السحب لا سهولة التدفق . **والفصل بينها وبين معدّلات الريولوجيا ضروري،** لأن الخلط بينهما يؤدي غالبًا إلى حلول خاطئة وتحسينات مؤقتة.

4. 3 الفصل الرابع

إضافات الثبات والحماية من التدهور (Stabilizers & Protection)

— بعد أن تناولنا إضافات دعم اللون وجودة المظهر، من حيث دورها في تحسين البلب والتشنت وتقليل التكتل وضبط سلوك السطح وثبات التشغيل، يبقى السؤال الأهم عمليا: هل سيبقى هذا اللون ثابتا بعد التشغيل؟ وهل سيحافظ المنتج على مظهره وخواصه بعد التخزين والاستخدام؟

فنجاح اللون لا يقاس فقط بظهوره المتجانس عند بداية الإنتاج، بل بقدرته على مقاومة التغير مع الزمن والحرارة والقص والأكسجين والضوء. وفي كثير من الحالات لا تكون مشكلة تغير اللون ناتجة عن الصبغة نفسها، بل عن تدهور البوليمر أو تحلل بعض مكونات نظام الإضافات أثناء المعالجة، مما يؤدي إلى اصفرار أو اسمرار أو نقاط احتراق أو تغير تدريجي في الدرجة اللونية بين الدفعات.

ولهذا تعد إضافات الثبات والحماية من التدهور جزءًا مكملًا لمنظومة اللون، لأنها لا تصنع اللون، لكنها تحميه وتحمي البوليمر من فقدان استقراره أثناء التصنيع وبعده، وتضمن أن اللون الذي تم اعتماده بصريا سيبقى ثابتا ضمن حدود الجودة المطلوبة في الإنتاج التجاري .

3.4.1 - مثبتات المعالجة ومضادات الأكسدة أثناء التصنيع

(Process Stabilizers & Antioxidants)

لماذا نحتاج هذا النوع؟ عند تشغيل البلاستيك داخل (Injection Mould) أو أي عملية تحويل (فلم/حقن/نفخ/بثق)، يتعرض البوليمر في نفس اللحظة إلى مجموعة ظروف قاسية تعمل معًا:

- حرارة (Heat)
- قص ميكانيكي (Shear)
- زمن مكوث داخل الماكينة (Residence Time)

• وجود أكسجين (Oxygen)

هذه العوامل كافية لإحداث تدهور تدريجي في البوليمر حتى لو كانت الخامة ممتازة عند الاستلام. والنتيجة قد تظهر على شكل مشاكل تشغيلية أو بصرية أو ميكانيكية مثل:

• اصفرار أو اسمرار تدريجي في اللون (Yellowing/Browning)

• تغير درجة اللون بين الدفعات رغم ثبات الصبغة

• رائحة احتراق أو رائحة بلاستيك محروق

• نقاط سوداء أو شوائب محترقة (Black Specks)

• انخفاض الاستطالة وزيادة الهشاشة مع الزمن

• تذبذب في نتائج اللحام في بعض الأفلام

• ضعف ثبات التشغيل عند التوقيفات وإعادة التشغيل

ملاحظة مهمة للقارئ:

هذه الإضافات لا تهدف الى تحسين اللون كصبغة، بل هدفها حماية البوليمر نفسه حتى لا ينهار اللون بسبب تدهور المادة أثناء التصنيع.

- ما هي مثبتات المعالجة ومضادات الأكسدة؟ هي إضافات تُستخدم لحماية البوليمر من التدهور أثناء المعالجة، عبر:

• إبطاء أو إيقاف تفاعلات الأكسدة الحرارية داخل المصهور

• تقليل تكون الجذور الحرة (Free Radicals)

• منع تحول التدهور إلى تغير دائم في اللون والخواص

• الحفاظ على استقرار المادة أثناء التشغيل والتوقيفات

- متى تكون أهميتها أعلى ؟ تكون هذه الإضافات أكثر أهمية في الحالات التالية:

(أ) إعادة التدوير (Recycling) لأن المادة المعاد تدويرها تكون غالباً:

- تعرضت سابقاً لحرارة وأكسدة
- تحتوي بقايا إضافات مستهلكة
- تحتوي شوائب ومحفزات تدهور

(ب) مصانع الماسترباتش (ألوان و فيلر) لأنها تعمل على:

- نسب تحميل عالية من أصباغ/مالونات
- قص أعلى
- زمن مكوث أطول في بعض التركيبات

(ج) خطوط الفيلم عالية السرعة لأنها حساسة لأي تغير:

- في اللون
- في السطح
- في الاستقرار

(د) الخامات الحساسة أو التشغيل القاسي مثل:

- حرارة مرتفعة
- توقفات كثيرة
- إعادة طحن داخلية بنسبة عالية
- لولب غير مناسب يسبب قص زائد

- **التركيبية الكيميائية:**

- **الأنواع الرئيسية** مضادات الأكسدة ليست مادة واحدة، بل نظام .وأفضل أداء غالبا يأتي من دمج أكثر من

نوع، لأن كل نوع يحمي جزءًا مختلفًا من سلسلة التدهور.

سنقسمها عمليا إلى:

- مضادات أكسدة أولية (Primary Antioxidants)
- مضادات أكسدة ثانوية (Secondary Antioxidants)
- مثبتات معالجة/مساعدات حماية إضافية-Co (Process Stabilizers / Co-stabilizers)

- **1- مضادات أكسدة أولية (Primary Antioxidants)**

ما هي وظيفتها؟

تسمى أحياناً مضادات أكسدة كاسرة للجذور الحرة (Radical Scavengers)، لأن وظيفتها

الأساسية هي:

- التقاط الجذور الحرة الناتجة عن الحرارة والقص
 - إيقاف سلسلة التدهور في بدايتها
- التركيبية الكيميائية الشائعة و أشهر عائلة مستخدمة صناعيا هي:

- الفينولات المعوقة (Hindered Phenolic Antioxidants)

كيف تعمل؟ عندما يبدأ البوليمر بتكوين جذور حرة، يقوم مضاد الأكسدة الأولي بالتفاعل معها وإيقافها قبل أن تتحول إلى تدهور متسلسل.

أين تظهر فائدته؟

- تقليل الاصفرار أثناء التشغيل
- تحسين ثبات اللون في التشغيل الطويل
- تقليل الرائحة الناتجة عن تدهور المادة

- 2- مضادات أكسدة ثانوية (Secondary Antioxidants)

ما هي وظيفتها ؟

تُسمى أحياناً مضادات تفكك الهيدروبيروكسيدات (Hydroperoxide Decomposers). لأن تدهور البوليمر لا ينتج فقط جذور حرة، بل ينتج مركبات وسيطة مثل الهيدروبيروكسيدات، وهذه تتحول لاحقاً إلى تدهور أشد .

وظيفتها الأساسية:

- تفكيك نواتج الأكسدة الثانوية قبل أن تتفاقم
- دعم النظام الأساسي ومنع التدهور المتسلسل
- التركيبة الكيميائية الشائعة أشهر عائلة مستخدمة صناعياً:
الفوسفائيت/الفوسفونيت (Phosphites / Phosphonites)

كيف تعمل؟ تقوم بتحويل نواتج الأكسدة إلى مركبات أقل ضرراً، وتقلل التدهور الحراري أثناء المعالجة.

أين تظهر فائدته؟

- حماية اللون في درجات حرارة أعلى

• تحسين ثبات الخامة أثناء البثق المتكرر

• تقليل تغير اللون عند إعادة التشغيل

- 3 - مثبتات المعالجة (Process Stabilizers / Co-stabilizers)

- ما المقصود بها؟

هي إضافات داعمة قد لا تكون Antioxidant بالاسم التجاري، لكنها تُستخدم لتعزيز الاستقرار أثناء التشغيل، وقد تشمل أنظمة مختلفة مثل:

• مواد تقلل حساسية البوليمر للتدهور

• مواد تحمي اللون من التغير في ظروف تصنيع محددة

• مواد تقلل أثر شوائب معينة محفزة للتدهور

ملاحظة مهمة: في السوق كثيراً ما يباع نظام Stabilizer package يحتوي خليطاً جاهزاً من:

Primary AO + Secondary AO + مساعدات أخرى

خصوصاً لخطوط إعادة التدوير أو الماسترباتش.

- جدول (1) — تصنيف مضادات الأكسدة حسب الوظيفة والتركيب

التصنيف	متى يكون ضرورياً أكثر؟	أمثلة صناعية شائعة (للتوضيح)	العائلات الكيميائية الشائعة	الوظيفة الأساسية داخل المصهور
مضادات أكسدة أولية (Primary Antioxidants)	تشغيل طويل، إعادة تدوير، حساسية لون/رائحة	AO 1010 وأشباهه	Hindered Phenols	إيقاف الجذور الحرة ومنع بداية سلسلة التدهور

التصنيف	متى يكون ضرورياً أكثر؟	أمثلة صناعية شائعة (للتوضيح)	العائلات الكيميائية الشائعة	الوظيفة الأساسية داخل المصهور
مضادات أكسدة ثانوية (Secondary Antioxidants)	حرارة أعلى، قص أعلى، إعادة تشغيل متكرر	AO 168 وأشباهه	Phosphites / Phosphonites	تفكيك نواتج الأكسدة الثانوية (Hydroperoxides) ودعم النظام
مثبتات معالجة (Process Stabilizers)	تدوير، ماسترباتش، خامات حساسة	Stabilizer Package	أنظمة متعددة حسب الشركة	تعزيز الاستقرار حسب التطبيق وتقليل التدهور في ظروف خاصة

- كيف نعرف أن المصنع بحاجة لهذا النوع؟

تزداد الحاجة لمثبتات المعالجة ومضادات الأكسدة عندما تظهر واحدة أو أكثر من العلامات التالية:

- اصفرار أو تغير لون غير مبرر رغم ثبات اللون المستخدم
- رائحة احتراق في المنتج النهائي
- نقاط سوداء تظهر أكثر مع طول التشغيل
- تدهور خواص بعد إعادة تشغيل المادة أو بعد إعادة الطحن
- تذبذب في نتائج اللحام أو اختلاف سطح بين التشغيلات
- حساسية شديدة للتوقفات (Start/Stop)

- أين تستخدم عمليا داخل التطبيقات؟

- في مصانع إعادة التدوير ضرورية غالبا لأن:
- المادة مرت عليها دورة حرارية سابقة

- جزء من مضادات الأكسدة الأصلية مستهلك
- الشوائب قد تسرع التدهور
- في مصانع الماسترباتش تستخدم لحماية:
 - الحامل (Carrier)
- منع تغير اللون بسبب تدهور البوليمر
- تقليل نقاط الاحتراق في التشغيل الطويل
- في مصانع الفيلم تستخدم خصوصاً عندما:
 - تكون السرعة عالية
 - تكون التوقيفات متكررة
 - تكون سماكات الفيلم رقيقة لأن أي تغير لون يظهر مباشرة في المنتجات الرقيقة
- في الحقن والنفخ تستخدم عندما يكون مطلوب:
 - لون ثابت بين الدفعات
 - رائحة منخفضة
 - خواص مستقرة مع الزمن
- الأشكال التجارية وطريقة التوريد تتوفر غالباً بأحد الأشكال التالية:
 - بودرة (Powder)
 - حبيبات (Granules)
 - ماسترباتش (Masterbatch)
- وفي كثير من الحالات الصناعية (خصوصاً إعادة التدوير) يتم توريدها ك:
 - حزمة إضافات جاهزة (Additive Package)
 - قد تجمع أكثر من وظيفة في منتج واحد.

- الآثار الجانبية المحتملة : مثل أي إضافة، سوء الاستخدام قد يسبب مشاكل، فيما يلي كثر الأخطاء الشائعة

الخطأ (1): استخدام جرعة أعلى دون حاجة قد يؤدي إلى:

- تكلفة إضافية بدون فائدة حقيقية

- تداخل مع إضافات أخرى

- تغيير غير مرغوب في بعض الخصائص حسب التركيبة

الخطأ (2): اختيار نظام غير مناسب للبوليمر أو التطبيق قد يعطي:

- حماية ضعيفة رغم إضافة المادة

- استمرار الاصفرار أو الرائحة

لأن نوع البوليمر وظروف التشغيل تختلف.

الخطأ (3): توقع أن مضادات الأكسدة تعالج شوائب أو رطوبة مضادات الأكسدة لا تعالج:

- شوائب صلبة

- تكتلات

- رطوبة

- فلتر سيئة

هذه مشاكل لها حلول أخرى (تنظيف/تجفيف/فلتر/تحسين فرز).

- منهج الاعتماد الصحيح داخل المصنع :

اعتماد مضادات الأكسدة يجب أن يكون بمنهج واضح:

- تشغيل خط أساس بدون تعديل (Baseline)

- إضافة جرعة منخفضة من النظام

- تقييم:

1. اللون (اصفرار/اسمرار)

2. الرائحة

3. ظهور نقاط سوداء

4. ثبات التشغيل عند التوقفات

5. ثبات اللحام (في الأفلام)

- رفع تدريجي فقط عند الحاجة
- تثبيت الجرعة المثلى ضمن مواصفة معتمدة

- جدول (2) — مؤشرات التدهور أثناء التشغيل وربطها بالسبب والحل

المؤشر في الإنتاج	ملاحظة مهمة قبل القرار	دور مضادات الأكسدة/المثبتات	السبب المرجح
اصفرار تدريجي في المنتج	راجع الحرارة وزمن المكوث	تقليل الاصفرار وحماية البوليمر	تدهور حراري/أكسدة داخل المصهور
رائحة احتراق	قد تكون الرطوبة/التلوث سبباً إضافياً	تخفيف الرائحة الناتجة عن التدهور	أكسدة وتكون نواتج تحلل
نقاط سوداء مع طول التشغيل	يحتاج تنظيف وفحص مناطق الاحتجاز Dead spots	تقليل تكون النقاط وتحسين الاستقرار	احتراق موضعي + بقايا متدهورة
اختلاف لون بين الدفعات	ثبت الجرعات والخلط	تحسين ثبات اللون بين التشغيلات	اختلاف تدهور وليس اختلاف صبغة

المؤشر في الإنتاج	ملاحظة مهمة قبل القرار	دور مضادات الأكسدة/المثبتات	السبب المرجح
ضعف لحام في بعض الأفلام	تأكد من نظام الانزلاق والسطح	دعم استقرار الخامة وتقليل التدهور	تغير في سلوك الذوبان بسبب تدهور

- الخلاصة :

مضادات الأكسدة ومثبتات المعالجة هي خط الدفاع الأول لحماية البوليمر أثناء التصنيع، وهي ليست إضافة تجميلية ولا تستخدم لرفع اللون مباشرة، بل لمنع انهيار اللون والخواص بسبب التدهور الحراري والأكسدة داخل الماكينة. وأفضل نتائجها تأتي عندما تُستخدم كنظام متكامل (Primary + Secondary) وبمنهج اعتماد واضح يثبت فائدتها دون مبالغة أو آثار جانبية.

- 3.4.2 مثبتات الأشعة فوق البنفسجية ومقاومة الضوء

(UV Stabilizers & Light Stabilizers)

هذا النوع هدفه الأساسي : حماية اللون والبوليمر من التغير بسبب الضوء خصوصاً الأشعة فوق البنفسجية UV، لأن كثيراً من المنتجات تكون ممتازة عند الإنتاج لكن تفشل بعد أسابيع أو أشهر من التعرض للشمس أو الإضاءة القوية.

- لماذا نحتاج مثبتات UV ؟

الضوء ليس مجرد إضاءة، بل طاقة تسبب تفاعلات كيميائية داخل البوليمر تؤدي إلى:

- تغير لون تدريجي (Color Shift / Yellowing)

- بهتان اللون (Fading)

- تطبيل أو طباشيرية السطح (Chalking)
 - فقدان اللمعان (Gloss Loss)
 - تشقق هشّ أو تكسير سطحي (Cracking / Embrittlement)
 - انخفاض الخواص الميكانيكية مع الزمن
- ويجب التنويه الى:

قد يكون اللون صحيحاً عند خروج المنتج من الخط، لكن يفشل في السوق لأن المادة نفسها تدهورت ضوئياً وليس لأن الصبغة سيئة .

- الفرق بين UV Stabilizer و Light Stabilizer ؟

في الصناعة نقسم أنظمة الحماية الضوئية إلى مجموعتين رئيسيتين:

- UV Absorbers (UVA) ممتصات الأشعة فوق البنفسجية تمتص الأشعة الضارة وتحولها لطاقة أقل ضرراً
- HALS — Hindered Amine Light Stabilizers لا تمتص الأشعة مباشرة، لكنها تعمل ك نظام إطفاء للجذور الحرة الناتجة عن التدهور الضوئي وتعيد تثبيت السلسلة.

النتيجة العملية:

- UVA : تمنع بداية المشكلة
 - HALS: تمنع استمرار المشكلة وتضخمها
- و أفضل نظام حماية خارجي يكون نظاماً مزدوجاً يجمع بين النوعين UVA + HALS

- التركيبة الكيميائية والأنواع الرئيسية :

1. ممتصات الأشعة فوق البنفسجية (UV Absorbers) UVA

Benzotriazoles من أشهر عائلات UVA في البلاستيك. تُستخدم بكثرة في:

- الأفلام
- منتجات شفافة أو شبه شفافة
- تطبيقات تحتاج ثبات لون جيد

Benzophenones عائلة أخرى من ممتصات UV. تُستخدم في تطبيقات مختلفة لكن لها حدود حسب البوليمر

كيف تعمل UVA ؟

- تمتص UV قبل أن يكسر الروابط داخل البوليمر
- تقلل تكوين الجذور الحرة الناتجة عن الضوء
- تحافظ على اللون والشفافية والخواص

حدودها

- فعاليتها تقل في بعض الأنظمة إذا كان المنتج سميك جداً أو فيه امتصاص عالي
- قد تحتاج جرعة مناسبة حسب سماكة المنتج
- بعض الأنواع لها قيود تنظيمية حسب التطبيق (غذاء/دواء)

2. مثبتات الضوء HALS (Hindered Amine Light Stabilizers)

ما هي؟

هي إضافات تعمل كمضاد تدهور ضوئي عبر آلية مختلفة عن UVA

كيف تعمل HALS ؟

HALS لا تمتص UV بشكل مباشر، لكنها:

- تتفاعل مع الجذور الحرة الناتجة عن الضوء
- توقف سلسلة التدهور
- تعيد تكوين نفسها جزئيا (لهذا تكون فعاليتها طويلة في كثير من الحالات)

ميزتها الكبيرة :

في كثير من المنتجات الخارجية، HALS تعطي:

- ثبات ميكانيكي أفضل مع الزمن
- مقاومة تشقق وهشاشة أعلى
- حماية طويلة الأمد مقارنة ببعض UVA وحدها

حدودها وملاحظات مهمة :

- قد تتأثر فعاليتها بوجود بعض الإضافات أو الملوثات
- قد لا تكون مناسبة لبعض الأنظمة الحساسة (حسب التطبيق والمواصفة)
- في بعض التركيبات تحتاج دمج مع UVA للحصول على أفضل أداء

- جدول (1) مقارنة UVA و HALS

البند	HALS (Light Stabilizers)	UVA (UV Absorbers)
آلية العمل	إيقاف سلسلة التدهور عبر تعطيل الجذور الحرة	امتصاص UV وتحويلها لطاقة أقل ضرراً
الدور الأساسي	منع استمرار الضرر وتضخمه	منع بداية الضرر الضوئي
الأفضلية	ممتازة لحماية الخواص مع الزمن ومنع التشقق	ممتازة لحماية اللون والشفافية

البند	HALS (Light Stabilizers)	UVA (UV Absorbers)
الأداء طويل الأمد	غالبًا ممتاز في التطبيقات الخارجية	جيد حسب النوع والجرعة
الاستخدام الشائع	تطبيقات خارجية، منتجات تحتاج عمر أطول	أفلام، قطع شفافة، عبوات
أفضل نظام	غالبًا أفضل مع UVA	تعمل وحدها أو مع HALS

- ما الذي يحميه نظام UV فعلي؟

مثبتات UV لا تحمي فقط اللون بل تحمي:

- البوليمر نفسه من التدهور
- اللون من البهتان أو تغير الدرجة
- السطح من الطباشيرية وفقدان اللمعان
- المنتج من التشقق والهشاشة مع الزمن

- أين تستخدم عادة؟

تستخدم في المنتجات التي تتعرض إلى:

(أ) الشمس المباشرة

- أفلام زراعية (Mulch / Greenhouse films)

- خراطيم/أنابيب خارجية

- صناديق وخزانات وقطع خارجية

- اثاث الحدائق والمساح

(ب) ضوء قوي مستمر (Indoor High Light)

- بعض العبوات وقع الديكورات

- تطبيقات تجارية تحت إضاءة قوية

(ج) منتجات تحتاج عمر خدمة طويل

- أثاث خارجي

- أجزاء سيارات خارجية (حسب البوليمر)

- عوامل تحدد اختيار النظام :

اختيار UV Stabilizer لا يكون اسم مادة ، بل يعتمد على:

- نوع البوليمر (PE/PP/PET/PVC...)

- سماكة المنتج

- شفافية المنتج ولونه

- الصبغة المستخدمة اذا كانت عضوية أو غير عضوية

- هل المنتج خارجي أم داخلي

- مدة الخدمة المطلوبة

- متطلبات المطابقة في منتجات خاصة مثل الغذاء و الدواء

الآثار الجانبية المحتملة عند سوء الاختيار أو الجرعة قد تظهر:

- تغير بسيط في اللون الأساسي (Hue shift)

- تأثير على الشفافية أو العكورة (خصوصا في المنتجات الشفافة)

- تداخل مع أنظمة أخرى (مثل مضادات الأكسدة أو إضافات السطح)

- تكلفة أعلى بدون فائدة إذا كانت المشكلة أصلا ليست ضوئية

- منهج الاعتماد داخل المصنع

الاعتماد الصحيح يتم عبر :

- تحديد هدف واضح:
- ثبات لون؟ منع تشقق؟ عمر خدمة؟
- تجهيز خلطة أساس بدون UV
- إضافة UVA وحدها (جرعة منخفضة)
- إضافة HALS وحدها (جرعة منخفضة)
- تجربة نظام مزوج UVA + HALS
- إجراء اختبارات تسريع (Accelerated Weathering)
- مقارنة النتائج واعتماد الأفضل

- جدول (2) — خريطة العيوب الضوئية وربطها بالسبب والحل

العيب بعد التعرض للضوء	السبب المرجح	الحل العملي
بهتان اللون (Fading)	تدهور صبغة عضوية أو نظام غير محمي	UVA HALS + حسب التطبيق
اصفرار/تغير لون	تدهور البوليمر أو أكسدة ضوئية	HALS + نظام مضادات أكسدة داعم

العيب بعد التعرض للضوء	السبب المرجح	الحل العملي
طباشيرية السطح (Chalking)	تدهور سطحي ضوئي	HALS قوي + اختيار خامة مناسبة
تشقق وهشاشة	تدهور ميكانيكي ضوئي	HALS + تصميم خلطة متوازنة
فقدان اللمعان	خشونة سطح وتدهور ضوئي	نظام UV مناسب + ضبط الإضافات السطحية

الخلاصة

مثبتات الأشعة فوق البنفسجية ليست إضافات تجميلية، بل هي نظام حماية يضمن أن اللون والخواص التي نجحت عند الإنتاج ستبقى ثابتة أثناء التعرض للضوء. وتنقسم عمليا إلى ممتصات (UVA) و UV ومثبتات الضوء HALS ، و أفضل أداء يأتي من دمجها وفق نوع البوليمر وسماكة المنتج ومتطلبات العمر التشغيلي.

3.4.3 مثبتات الحرارة ومنع التدهور الحراري

Heat Stabilizers / Thermal Stabilizers

لماذا نحتاج مثبتات الحرارة؟

عند تشغيل أي بوليمر داخل (Injection Mould) أو الماكينة ، يتعرض البوليمر لبيئة تشغيل قاسية تتكون من:

- حرارة (Heat)
- قص (Shear)
- زمن مكوث داخل الماكينة (Residence Time)
- وجود أكسجين (Oxygen)

• بقايا معادن أو شوائب أو أثر محفزات (Metal residues / Catalysts)

- هذه الظروف قد تطلق سلسلة تدهور حراري تؤدي إلى:

• اصفرار أو اسمرار تدريجي (Yellowing / Browning)

• تغير لون واضح بين بداية التشغيل ونهايته

• نقاط سوداء (Black Specks)

• رائحة احتراق أو رائحة بلاستيك متعب

• انخفاض الاستطالة وزيادة الهشاشة

• ضعف لحام في بعض الأفلام

• تدهور خواص ميكانيكية بعد إعادة التشغيل أو إعادة التدوير

• زيادة الهالك بسبب عدم ثبات اللون والسطح

- الفكرة الأساسية:

اللون قد يكون صحيحا، لكن البوليمر نفسه يتدهور حراريا، فتتغير النتيجة البصرية والميكانيكية حتى لو كانت الصبغة ممتازة.

- ما المقصود بمثبتات الحرارة؟

مثبتات الحرارة هي إضافات تُستخدم بهدف:

• حماية البوليمر من التدهور أثناء التصنيع

• منع أو تقليل الاصفرار الناتج عن الحرارة

• تقليل تكوّن الجذور الحرة ونواتج الأكسدة الحرارية

• حماية اللون من التغير أثناء التشغيل

• تحسين ثبات التشغيل وتقليل مشاكل الاحتراق الموضعي

وهذه الإضافات لا تستخدم عادة لتقوية المنتج بشكل مباشر، لكنها تمنع المنتج من أن يضعف بسبب التصنيع.

- التركيبة الكيميائية لمثبتات الحرارة :

مثبتات الحرارة تختلف جذرياً حسب نوع البوليمر. لذلك سنقسمها إلى مجموعتين واضحتين:

- مثبتات حرارة خاصة بـ PVC وهو البوليمر لأكثر حساسية للحرارة
- أنظمة تثبيت الحرارة في البوليوليفينات (PE/PP) وباقي البوليمرات

- مثبتات الحرارة في PVC Heat Stabilizer Systems

لماذا PVC يحتاج نظام تثبيت خاص؟

PVC من أكثر البوليمرات حساسية للحرارة، لأنه عند ارتفاع الحرارة يبدأ في تفاعل تدهور معروف يؤدي إلى:

- انطلاق HCl حمض هيدروكلوريك
- تدهور سريع متسلسل (Autocatalytic Degradation)
- تغير لون تدريجي (من شفاف/أبيض أصفر بني)
- انخفاض الخواص وظهور هشاشة
- فشل المنتج بسرعة إذا لم يكن نظام التثبيت مضبوطاً
- ولهذا السبب: PVC لا يعمل صناعياً بدون نظام مثبتات حرارة واضح.

- 3.4.3.1 مثبتات الكالسيوم-زنك

- Calcium-Zinc Stabilizers (Ca/Zn Stabilizers)

- التركيبة الكيميائية :

غالباً ليست مادة واحدة، بل نظام يحتوي على:

- مركبات كالسيوم (Calcium soaps / Calcium compounds)
- مركبات زنك (Zinc soaps / Zinc compounds)

- مواد مساعدة مثل:

1. Lubricants

2. Co-stabilizers

3. Acid scavengers

4. Antioxidants

- وهي تعمل على :

- تثبيت PVC ضد التدهور الحراري
- تقليل سرعة تغير اللون
- تقليل تأثير HCl المتكون أثناء التدهور

- الاستخدامات الشائعة :

- مواسير PVC
- بروفابلات PVC
- أفلام PVC
- بعض تطبيقات الكابلات

- المميزات والقيود

مميزات:

- نظام واسع الاستخدام صناعيًا
- مناسب لكثير من الأسواق والتطبيقات

قيود:

- الأداء يعتمد على تركيبة النظام وليس اسم Ca/Zn فقط

- يحتاج توازن دقيق مع نظام المزلقات خصوصاً في PVC

- 3.4.3.2 مثبتات القصدير العضوية

Organotin Stabilizers (Tin Stabilizers)

التركيبية الكيميائية:

هي مركبات عضوية تحتوي على عنصر القصدير (Sn) ضمن بنية عضوية.

لماذا تستخدم؟

لأنها تعطي:

- ثبات حراري قوي
- ثبات لون جيد (خصوصاً في بعض التطبيقات الحساسة بصرياً)

الاستخدامات الشائعة :

- PVC شفاف أو عالي المتطلبات البصرية
- تطبيقات تحتاج ثبات لون ممتاز

ملاحظات مهمة :

- قد تكون مقيدة أو حساسة تنظيمياً حسب السوق والتطبيق
- ليست أفضل دائماً، بل أفضل في مكانها الصحيح

- 3.4.3.3 مثبتات الرصاص Lead Stabilizers

التركيبية الكيميائية :

أنظمة تعتمد على مركبات الرصاص كمثبت حراري.

لماذا كانت شائعة لأنها تاريخياً كانت:

- قوية جداً في تثبيت PVC

- مناسبة للتطبيقات الثقيلة

لماذا أصبحت مرفوضة في كثير من الأسواق؟
لأسباب السلامة والاشتراطات التنظيمية.

- جدول (1) — مقارنة أنظمة تثبيت PVC

البند	Lead Stabilizers	Organotin Stabilizers	Ca/Zn Stabilizers
نوع البوليمر المستهدف	PVC	PVC	PVC
طبيعة النظام	مركبات رصاص	مركبات قصدير عضوية	نظام متعدد المكونات
قوة التثبيت الحراري	عالية جدًا تاريخياً	عالية جدًا في بعض التطبيقات	عالية (حسب التركيبة)
ثبات اللون	جيد	ممتاز في بعض الشفاف	جيد إلى عالي
الوضع التنظيمي	مقيد/مرفوض في كثير من الأسواق	حساس حسب السوق	مقبول غالبًا حسب السوق
الاستخدام الشائع	تطبيقات قديمة/خاصة	PVC شفاف ومتطلبات عالية	أنابيب/بروفيلات/أفلام

- الفرق بين التثبيت الحراري في PE و PP البوليوليفينات :

- في PE و PP غالباً لا نقول Heat Stabilizer بمعنى PVC ، لأن المشكلة الأساسية هنا تكون:

- أكسدة حرارية أثناء التصنيع

- تدهور بسبب إعادة التسخين (خصوصاً في إعادة التدوير)

- اصفرار أو تغير لون مع الزمن

- نقاط سوداء عند توقفات طويلة أو مناطق ساخنة

وهنا يكون نظام التثبيت الحراري:

مضادات الأكسدة + مثبتات المعالجة Antioxidants + Process Stabilizers

وهذا ليس تكراراً، بل هو العمود الفقري لتثبيت PE/PP حرارياً أثناء التشغيل.

- التركيبية الكيميائية :

- مضادات أكسدة أولية (Primary Antioxidants)

وظيفةها: إيقاف سلسلة الجذور الحرة في بدايتها.

- مضادات أكسدة ثانوية (Secondary Antioxidants)

وظيفةها: تفكيك نواتج الأكسدة مثل Hydroperoxides ومنعها من تدمير البوليمر.

- Co-stabilizers مساعدات تثبيت إضافية

قد تستخدم لدعم النظام حسب ظروف التشغيل.

لماذا هذا النظام مهم جداً في إعادة التدوير؟

لأن المادة المعاد تدويرها غالباً:

- مرت بتسخين سابق

- تحتوي نواتج أكسدة قديمة

- تكون أكثر حساسية لأي حرارة إضافية

كيف يعمل التثبيت الحراري عملياً داخل الماكينة؟

عند تشغيل المادة، تبدأ تفاعلات تدهور، أهمها:

- تكون جذور حرة (Free Radicals)

- تفاعلها مع الأكسجين
- تكون نواتج أكسدة
- تغيير لون ورائحة وضعف خواص

مهمة مثبتات الحرارة هي:

- إبطاء هذه السلسلة
- منع تضخمها
- تقليل أثرها على اللون والخواص

أين تظهر فائدتها بوضوح ؟

تكون مثبتات الحرارة ضرورية جدا عندما يكون لديك واحد أو أكثر من التالي:

- (أ) تشغيل إعادة تدوير
- تقلب جودة الخامة
- اختلاف روائح
- اختلاف درجات MFI
- حساسية عالية للاصفرار
- (ب) خطوط فيلم عالية السرعة
- قص أعلى
- حرارة أعلى
- حساسية بصرية عالية
- (ج) توقفات طويلة على الخط
- المادة تبقى ساخنة داخل البرميل أو Die
- تبدأ نقاط احتراق أو تغيير لون عند الرجوع للتشغيل

(د) استخدام أصباغ حساسة للحرارة

- بعض الأصباغ العضوية قد تتغير أو تضعف مع الحرارة

متى لا تكون مثبتات الحرارة هي الحل؟

مثبتات الحرارة لا تحل مشاكل مثل:

- شوائب صلبة

- تكتلات بيجمنت

- ذيل خشن Coarse Tail

- فلتر سيئة

- رطوبة وغازات

- تلوث معدني أو رمل/سيليكات

هذه مشاكل مصدرها جسيمات/ملوثات وليست تدهورًا حراريًا

- الآثار الجانبية المحتملة عند سوء الاختيار أو الجرعة :

- تكلفة أعلى بدون نتيجة

- تداخل مع نظام اللون أو إضافات أخرى

- تغير بسيط في اللون الأساسي (خصوصًا في الأبيض/الشفاف)

- نتائج غير مستقرة إذا لم يكن النظام متوازن (Primary + Secondary)

- منهج الاعتماد الصحيح داخل المصنع :

الطريقة الصحيحة لاعتماد مثبتات الحرارة:

- تشغيل خط الأساس

وتسجيل:

- لون البداية
- لون بعد 30-60 دقيقة
- رائحة
- نقاط سوداء
- ضغط/أمبير
- تحديد نوع المشكلة بدقة
- هل المشكلة تظهر مع الوقت مما يعني تدهور تدريجي
- هل تظهر بعد توقف مما يعني احتراق موضعي
- هل تظهر فقط عند رفع الحرارة مما يعني حساسية حرارية
- إضافة النظام المناسب بجرعة منخفضة
- التشغيل بزمن كافٍ
- تقييم اللون والرائحة والنقاط
- رفع تدريجي عند الحاجة فقط
- تثبيت الجرعة ضمن مواصفة مكتوبة

- جدول (2) — متى تحتاج مثبت حرارة :

المؤشر في الإنتاج	السبب المرجح	هل مثبت الحرارة مناسب؟
اصفرار تدريجي أثناء التشغيل	تدهور حراري/أكسدة	نعم

المؤشر في الإنتاج	السبب المرجح	هل مثبت الحرارة مناسب؟
اسمرار واضح عند رفع الحرارة	حساسية حرارية عالية	نعم + ضبط حرارة
نقاط سوداء بعد توقفات	احتراق موضعي وزمن مكوث	نعم + تنظيف + تقليل زمن مكوث
رائحة احتراق	تدهور حراري	نعم
اختلاف لون بين بداية ونهاية الوردية	تدهور تدريجي	نعم
نقاط بسبب شوائب صلبة	Contamination	لا (لأن المصدر شوائب)
انسداد فلتر سريع	Grit / Coarse tail	PSD/فلتر (لا لأنها تحتاج

- الخلاصة :

مثبتات الحرارة هي خط الدفاع الأساسي ضد التدهور الناتج عن الحرارة والقص وزمن المكوث، وهي ضرورية خصوصاً في PVC وفي إعادة التدوير وخطوط التشغيل القاسية. وهي لا تُختار كاسم تجاري فقط، بل كنظام متوازن حسب نوع البوليمر وظروف التشغيل ومتطلبات ثبات اللون والخواص، مع اعتماد تدريجي يثبت فائدتها دون آثار جانبية.

3.5 الفصل الخامس إضافات السطح والتحكم الوظيفي للمنتج النهائي

Surface & Functional Control Additives

بعد ضبط اللون وجودة المظهر، ثم استقرار المادة وحمايتها من التدهور الحراري والضوئي، نصل إلى المرحلة التي يُختبر فيها المنتج فعليًا في الاستخدام النهائي، وهي مرحلة سلوك السطح أثناء التعامل، التخزين، والاستخدام.

فالمنتج قد يكون صحيحًا كيميائيًا، ثابتًا حراريًا، ومتجانس اللون، ومع ذلك يُرفض بسبب مشاكل وظيفية بحتة، مثل:

صعوبة فتح الكيس، التصاق الطبقات ببعضها، انزلاق زائد أو ناقص، فشل الطباعة، ضعف اللحام، أو خروج معامل الاحتكاك عن القيم المطلوبة.

وهنا تظهر إضافات السطح بوصفها إضافات لا تهدف إلى تغيير البوليمر في كتلته، ولا إلى تلوين المنتج، ولا إلى حمايته من التدهور، بل إلى التحكم في التفاعل بين سطح المنتج والوسط المحيط:

- سطح مقابل سطح
- سطح مقابل معدن
- سطح مقابل يد المستخدم
- سطح مقابل حبر الطباعة أو سكين القطع
- وتُعد هذه الإضافات من أكثر الإضافات حساسية في النظام التركيبي، لأن تأثيرها:
- مباشر على السطح
- سريع الظهور
- وسهل الانحراف عند سوء الاختيار أو زيادة الجرعة

كما أن كثيرًا من مشاكلها لا تظهر أثناء التشغيل الأولي، بل بعد التخزين، أو بعد اللف، أو عند الاستخدام الفعلي.

لذلك يُتناول هذا الفصل بوصفه منظومة تحكم وظيفي متكاملة، لا مجموعة إضافات منفصلة، مع ربطه باللون، والشمعيات، ومساعدات التشنيت، ومتطلبات اللحام والطباعة، لأن أي تعديل سطحي لا يعمل في فراغ، بل داخل نظام إضافات واحد في أربع أنواع :

- 3.5.1 مضافات الانزلاق Slip Additives

- 3.5.2 مضافات منع الالتصاق Anti-block Additives

- 3.5.3 المضافات المضادة للكهرباء الساكنة Antistatic Additives

- 3.5.4 المعالجة السطحية الفيزيائية Corona Treatment & Surface Activation

- 3.5.1 مضافات الانزلاق Slip Additives

- الدور الوظيفي :

مضافات الانزلاق تُستخدم للتحكم في معامل الاحتكاك (COF) لسطح المنتج، وليس لتسهيل التشغيل داخل الماكينة.

- القاعدة الأساسية: مضاف الانزلاق لا يجعل المادة أسهل تصنيعا بل يجعل المنتج أسهل استخداما.

- آلية العمل تعتمد على:

• الذوبان داخل المصهور

• الهجرة التدريجية إلى السطح

• تكوين طبقة سطحية دقيقة تقلل الاحتكاك

ولهذا فإن قياس COF مباشرة بعد الإنتاج غير معتمد لاتخاذ قرار نهائي، ويجب مراعاة زمن الاستقرار.

- أنواع شائعة :

الصفة الكيميائية	ثبات COF	سرعة الهجرة	ملاحظات تشغيلية
Oleamide	متوسط	سريعة	مناسب للاستخدام السريع
Erucamide	أعلى	أبطأ	مناسب للتخزين
Stearamide	عالية	بطيئة	تأثير أقل على الطباعة
Behenamide	عالية جداً	بطيئة جداً	جرعات دقيقة
أنظمة مركبة	عالية	حسب التصميم	تحكم أدق

- تداخلات حرجية :

- لا تمنع الالتصاق الفيزيائي
- قد تُضعف الطباعة واللحام
- تتأثر بالـ Anti-block والشمعيات
- تتفاعل مع الألوان والملائات عالية السطحية

- 3.5.2 مضافات منع الالتصاق Anti-block Additives

- الدور الوظيفي مضافات Anti-block تُستخدم لمنع التصاق الأسطح البلاستيكية ببعضها بعد التبريد واللف والتخزين.

- تمييز منهجي أساسي:

• Anti-block: يمنع الالتصاق

• Slip: يسهل الانزلاق بعد الفصل

- آلية العمل

تعتمد على خلق خشونة ميكروية مدروسة عبر جسيمات صلبة دقيقة تقلل مساحة التلامس بين السطحين.

- الأنواع وتأثيرها

النوع	التأثير البصري	منع الالتصاق	أثره على الكورونا
Silica طبيعية	عكورة أعلى	ممتاز	قد يضعف التجانس
Silica صناعية	أقل	جيد جدًا	أكثر تجانسًا
Talc ناعم	منخفض	متوسط	تأثير محدود
Anti-block صناعي	منخفض جدًا	مضبوط	مستقر

- ملاحظة منهجية :

اختيار الحجم الحبيبي الخاطئ قد يحل مشكلة الالتصاق ويخلق مشكلة طباعة أو مظهر.

- 3.5.3 الإضافات المضادة للكهرباء الساكنة Antistatic Additives

- الدور الوظيفي :

هذه الإضافات تُستخدم لتقليل تراكم الشحنات الكهربائية الساكنة على سطح المنتج، وتسهيل تفريغها.

لا تمنع تولد الشحنة، بل تمنع تراكمها واستمرارها.

لماذا هي ضرورية؟

لأن الكهرباء الساكنة تسبب:

- التصاق غير مفسر ميكانيكياً
- جذب الغبار
- مشاكل تعبئة
- شكاوى استخدام رغم سلامة COF

آلية العمل تعتمد على:

- الهجرة السطحية
- تكوين طبقة ذات توصيلية جزئية
- ويتأثر أداؤها بالزمن والرطوبة

أنواع وظيفية :

النوع	زمن التأثير	الاستقرار	ملاحظات
Internal Antistatic	متوسط	متوسط	الأكثر شيوعاً
Surface-active	سريع	ضعيف	مؤقت
Permanent Antistatic	طويل	عالي	تطبيقات خاصة

3.5.4 المعالجة السطحية الفيزيائية Corona Treatment & Surface Activation

- الدور الوظيفي :

المعالجة بالكورونا هي معالجة فيزيائية تُطبق بعد الإنتاج لرفع طاقة السطح وتحسين التصاق الأحبار والمواد اللاصقة.

المبدأ الثابت: الكورونا ليست إضافة كيميائية، وليست بديل عن نظام إضافات مضبوط، بل أداة تصحيح نهائي له.

- العلاقة مع نظام الإضافات

- Slip يخفض طاقة السطح و يزيد الحاجة للكورونا
- Anti-block الكبير قد يضعف تجانس المعالجة
- الشمعيات والهجرة السطحية تؤثر على استقرارها
- Antistatic قد يسرع تراجع المعالجة مع الزمن

حدودها Corona لا تعالج:

تلوث السطح

- هجرة مفرطة
 - أخطاء اختيار الإضافات
- فشل الطباعة قد يكون كيميائياً في الأصل.

- منظومة التحكم السطحي المتكاملة

- جدول الوظائف الأساسية :

العنصر	يعالج	لا يعالج
Slip	COF والانزلاق	الالتصاق
Anti-block	الالتصاق الفيزيائي	الشحنة
Antistatic	الشحنات الساكنة	COF
Corona	التصاق الحبر	مشاكل التركيبة

- جدول اتخاذ القرار الصناعي

المشكلة الظاهرة	الأداة الأساسية
التصاق الطبقات	Anti-block
صعوبة الفتح	Slip + Anti-block
جذب الغبار	Antistatic
ضعف الطباعة	Corona
فشل بعد التخزين	مراجعة النظام كاملاً

الخلاصة

التحكم السطحي ليس إضافة واحدة، بل منظومة دقيقة متعددة الأدوات. أي خلل في أحد عناصرها قد يُفشل أداء البقية، مهما كانت جودة المادة أو اللون.

ولهذا:

- لا يُعتمد أي نظام سطحي
- إلا بعد اختبار وظيفي مناسب
- وفي توقيته الصحيح بعد الاستقرار والتخزين

أما شرح طرق الاختبار ومعايير القبول، فسنتناولها لاحقاً في الجزء المخصص لاختبارات الأداء والاعتماد.

3.6 الفصل السادس : أنظمة التحكم في الرطوبة والمواد المتطايرة

3.6.1 التحكم في الرائحة في المنتجات البلاستيكية

Odor Control & Deodorizing Additives

الرائحة من أكثر العيوب التي تؤدي إلى رفض المنتج تجارياً رغم سلامته الميكانيكية والبصرية. وهي عيب لا يقاس بالعين، لكنه يقيم مباشرة من قبل المستخدم النهائي، خصوصاً في منتجات التغليف، الأدوات المنزلية، العبوات، والأكياس. ومشكلة الرائحة ليست مشكلة مادة واحدة، بل نتيجة تراكم مصادر : خام، إضافات، تحلل حراري، أو تفاعلات ثانوية أثناء التصنيع والتخزين. لذلك لا يمكن علاجها بإضافة واحدة عشوائية، بل عبر نظام تحكم منهجي يحدد المصدر ثم يختار أداة المعالجة المناسبة دون الإضرار بالخواص أو السلامة.

- أولاً مصادر الرائحة في البلاستيك :

مصادر مرتبطة بالبوليمر :

- خام معاد تدويره
- بقايا محفزات أو مونومرات
- أكسدة جزئية للسلاسل

مصادر مرتبطة بالتصنيع :

- تدهور حراري (حرارة + قص + زمن مكوث)
- توقفات متكررة
- احتراق موضعي داخل القالب أو البرميل

مصادر مرتبطة بالإضافات :

- شموع أو أميدات منخفضة الوزن الجزيئي
- بعض مضادات الأكسدة الثانوية

- مضافات انزلاق عالية الهجرة

ويجب العلم بأنه لا يوجد مزيل رائحة ناجح دون تشخيص المصدر

- ثانياً إضافات امتصاص الرائحة

Odor Absorbers (Physical Adsorbents)

التركيبية الكيميائية :

- مواد ذات مساحة سطحية عالية قادرة على احتجاز المركبات المتطايرة: (VOC)

- Zeolites

- Activated Carbon معدل صناعيا

- Mineral-based Odor Absorbers أنظمة سيليكاتية معدلة

اللية العمل :

- لا تتفاعل كيميائيا

- تمتص المركبات المسببة للرائحة داخل بنيتها

- تقلل تركيز VOC في المنتج النهائي

أين تستخدم :

- إعادة التدوير

- عبوات غير غذائية

- منتجات سميكة نسبياً

الحدود :

- قد تؤثر على اللون أو العكورة

- فعاليتها محدودة مع الروائح المتولدة لاحقا

- لا تعالج مصدر التدهور

- ثالثاً مزيلات الرائحة التفاعلية :

Reactive Deodorizing Additives

التركيبية الكيميائية :

أنظمة تتفاعل كيميائيا مع المركبات المسببة للرائحة:

- مركبات تتفاعل مع الأحماض

- أنظمة تتفاعل مع الكبريتات أو الأمينات

- إضافات معدلة كيميائيا ضمن ماستريباتش

آلية العمل :

- تحييد المركبات المسببة للرائحة

- تحويلها إلى مركبات غير متطايرة أو عديمة الرائحة

أين تستخدم ؟ :

- إعادة التدوير عالية الرائحة

- تطبيقات صناعية غير حساسة غذائيا او دوائيا

الحدود :

- تتطلب توافقا دقيقا

- قد تتداخل مع إضافات أخرى

- لا تصلح عادة للمنتجات الحساسة للرائحة وخاصة للتغليف الغذائي والدوائي

- رابعاً أنظمة منع تولد الرائحة :

Odor Prevention Systems

التركيبية : ليست مزيل رائحة مباشر، بل نظام يتكون من:

- مضادات أكسدة مناسبة
- مثبتات معالجة
- تقليل إضافات منخفضة الوزن الجزيئي
- تحسين التفريغ والتهوية

آلية العمل :

- منع تكون المركبات المسببة للرائحة من الأساس
- تقليل التحلل أثناء التصنيع

أهميتها :

هذا هو الحل الصحيح طويل الأمد، خصوصاً في:

- منتجات غذائية
- منتجات ذات متطلبات حساسة

- خامساً العطور الصناعية – (Masking Agents)

ما هي : عبارة عن مواد تُضاف لإخفاء الرائحة عبر عطر قوي.

الموقف الصناعي

- ليست حلاً تقنياً
- قد تُرفض تنظيمياً
- لا تُستخدم في المنتجات الجادة

في هذا الكتاب : العطور ليست حلاً صناعياً معتمداً إلا في تطبيقات خاصة جداً وغير غذائية.

- جدول (1) تشخيص الرائحة واختيار الحل :

المؤشر	المصدر المرجح	الحل الأنسب
رائحة قوية في المعاد تدويره	VOC متراكمة	Absorber + Prevention
رائحة احتراق	تدهور حراري	Prevention + AO
رائحة أمينية	إضافات سطحية	Reactive Deodorizer
رائحة خفيفة بعد التخزين	هجرة إضافات	ضبط النظام
رائحة من شوائب	Contamination	معالجة المصدر

- جدول (2) مقارنة أنواع التحكم في الرائحة

النوع	آلية العمل	المزايا	الحدود
Absorbers	امتصاص فيزيائي	سهل التطبيق	تأثير بصري
Reactive	تحديد كيميائي	فعالية عالية	توافق حساس
Prevention	منع التكوّن	الأفضل طويل الأمد	يحتاج ضبطاً
Masking	إخفاء	سريع	غير معتمد

- منهج الاعتماد الصحيح داخل المصنع

- تحديد مصدر الرائحة
- قياس الرائحة قبل وبعد حسيا و القيام بتحليل VOC إن أمكن
- اختيار النظام الأنسب
- اختبار الأثر على اللون والخواص
- تثبيت الحل ضمن مواصفة معتمدة

الخلاصة

الرائحة ليست عيبا تجمياليا، بل مؤشر على خلل كيميائي أو تشغيلي. علاجها الصحيح يبدأ بمنع تكونها، ثم احتوائها عند الحاجة، وليس بإخفائها. فأي نظام تحكم في الرائحة يجب أن يبنى على تشخيص المصدر، والتوافق مع بقية الإضافات، ومتطلبات السلامة والاستخدام النهائي.

3.6.2 التحكم في الهجرة والرائحة

Migration & Odor Control Systems

مقدمة الفصل

الهجرة والرائحة ليستا ظاهرتين منفصلتين كما يعتقد في كثير من المصانع، بل هما نتيجتان لمسار واحد: وجود مركبات قادرة على الحركة داخل البوليمر، سواء كانت هذه الحركة باتجاه وسط ملامس تسمى (هجرة) أو باتجاه الهواء تكون (رائحة).

وقد يكون المنتج:

- مستقرا تشغيليا
- ممتازا بصريا
- ومتوافق ميكانيكيا

لكنه يرفض:

- تنظيميا بسبب الهجرة او تنظيما بسبب الرائحة او لكلا السببين معا
- تجاريا بسبب الرائحة

ولهذا لا يمكن التعامل مع الهجرة والرائحة كاختبارين منفصلين، بل يجب التعامل معهما كنظام ضبط واحد يبدأ من اختيار التركيبة وينتهي عند اعتماد المنتج النهائي.

أولاً: الأساس العلمي المشترك بين الهجرة والرائحة :

ما العامل المشترك ؟

العامل المشترك هو مركبات منخفضة الوزن الجزيئي (Low Molecular Weight Compounds)

وتشمل:

- إضافات غير مثبتة بشكل جيد
- مواد مساعدة للتشتت أو السطح

- بقايا مونومرات
- نواتج تحلل حراري أو أكسدة
- بعض أنظمة اللون أو الشموع أو مواد الانزلاق
- الفرق بين الظاهرتين :
- الهجرة :انتقال إلى وسط ملامس (غذاء، دواء، زيت، ماء)
- الرائحة :تطاير إلى الهواء المحيط

لكن المصدر واحد.

ثانياً: أنواع الهجرة وأنواع الرائحة :

(A) الهجرة :

- الهجرة الكلية (OML) وهي انتقال إجمالي غير محدد لمواد من البلاستيك.
- الهجرة النوعية (SML) وهي انتقال مادة محددة بعينها.

(B) الرائحة :

- رائحة معالجة ناتجة عن حرارة وقص وتدهور.
- رائحة إضافات Carrier، Antioxidant، Wax، Slip.
- رائحة مواد معاد تدويرها VOC، تحلل سابق، تلوث.

ثالثاً: العوامل التي تزيد الهجرة والرائحة معاً :

- انخفاض الوزن الجزيئي
- ارتفاع الحرارة
- طول زمن المكوث

- التلامس مع وسط دهني
 - سماكة منخفضة (خصوصًا الأفلام)
 - زيادة نسبة الإضافات
 - تدهور حراري سابق
 - توقفات طويلة على الخط
- أي عامل يرفع الهجرة غالبًا يرفع الرائحة أيضًا.

رابعًا: أنظمة التحكم المدمجة (Migration + Odor)

- النوع الأول : اختيار إضافات منخفضة الهجرة والرائحة

التركيبية

- إضافات ذات وزن جزيئي أعلى
- أنظمة مصممة للتلامس الغذائي
- أنظمة ألوان منخفضة التطاير

• Wax وSlip مخصصان Low Odor / Low Migration

آلية العمل

- تقليل قابلية الحركة داخل البوليمر
- تثبيت الإضافات داخل المصفوفة

- النوع الثاني : أنظمة الاحتجاز والامتصاص Absorbers / Scavengers

التركيبية :

- مواد قادرة على امتصاص:

1. VOC

2. نواتج التحلل

3. بعض المركبات القابلة للهجرة

آلية العمل :

- احتجاز المركبات بدل انتقالها أو تطايرها

الملاحظات

- ليست بديلا عن اختيار خامة صحيحة
- قد تؤثر على الشفافية أو اللون

- النوع الثالث : التحكم في التدهور الحراري

لماذا مهم؟

لأن:

- التدهور يولد مركبات صغيرة
- هذه المركبات هي مصدر الهجرة والرائحة

الادوات

- نظام مضادات أكسدة متوازن
- تقليل الاحتراق
- ضبط الحرارة وزمن المكوث
- تقليل التوقفات الطويلة

- النوع الرابع ضبط نظام السطح

عناصر حرجة

- Slip Additives
- Anti-block
- Waxes
- مواد تشحيم سطحية

المبدأ كثير من:

- الرائحة
- والهجرة
- تبدأ من السطح وليس من قلب المنتج.

- النوع الخامس إدارة المواد المعاد تدويرها**المشكلة :**

المواد المعاد تدويرها قد تحتوي:

- VOC متراكمة
- نواتج أكسدة
- روائح كامنة تظهر بعد التصنيع

الحل :

- Degassing
- Vacuum Venting
- Odor Absorbers
- نظام تثبيت أقوى

- جدول (1) التشخيص السريع :

المؤشر	السبب المرجح	الإجراء الصحيح
رائحة قوية بعد الإنتاج	تدهور Slip/	ضبط الحرارة + تغيير النظام
فشل SML	إضافة منخفضة الوزن	إعادة تصميم التركيبة

المؤشر	السبب المرجح	الإجراء الصحيح
رائحة تظهر بعد أيام	VOC كامنة	Absorber + Stabilizer
نجاح بصري وفشل تنظيمي	مواد مساعدة	مراجعة النظام كاملاً
رائحة مع إعادة تدوير	تحلل سابق	Degassing + Control

- جدول (2) متى لا تتفع الإضافات:

المشكلة	هل تُحل بإضافة؟	التصرف الصحيح
شوائب صلبة	لا	معالجة المصدر
رطوبة عالية	لا	تجفيف
تلوث خارجي	لا	فصل وتنظيف
احتراق شديد	جزئياً	تعديل ظروف التشغيل

منهج الاعتماد داخل المصنع

- تحديد نوع التلامس
- تحديد الوسط والحرارة والزمن
- اختيار نظام منخفض الهجرة والرائحة
- تصنيع عينات بالسماكة الحقيقية
- اختبار + OML / SML تقييم الرائحة

- تحليل النتائج
- تثبيت التركيبة بمواصفة معتمدة

الخلاصة

الهجرة والرائحة ليستا مشكلتين منفصلتين، بل عرضان لمشكلة واحدة. وأي مصنع يعالج الرائحة دون فهم الهجرة، أو يعالج الهجرة دون فهم الرائحة، سيقع في فشل متكرر. والحل الصحيح هو نظام إضافات متكامل، واختبار واقعي، واعتماد منضبط لا يقبل الحلول الجزئية و المؤقتة.

3.6.3 التحكم في الإضافات البصرية

Optical & Visual Control Additives

يُقيّم المنتج البلاستيكي في كثير من التطبيقات بصرياً قبل أن يُختبر ميكانيكياً أو وظيفياً، إذ إن الشفافية والبياض واللّمعان ونقاء السطح وتجانس المظهر تلعب دوراً حاسماً في قبول المنتج تجارياً حتى عندما يكون مطابقاً من حيث الخواص الفيزيائية والكيميائية. ويعود ذلك إلى أن المستخدم النهائي يتفاعل مع المظهر أولاً، ويكون حكمه المبني بناءً على الانطباع البصري قبل أي اختبار تقني.

وتُستخدم الإضافات البصرية للتحكم في هذا الانطباع النهائي عبر التأثير في كيفية تفاعل الضوء مع المنتج، سواء من خلال تحسين الشفافية أو رفع درجة البياض أو تقليل العيوب البصرية الدقيقة أو ضبط مستوى اللّمعان، دون أن يكون هدفها الأساسي تلوين المنتج أو تغيير درجته اللونية الاسمية. فوظيفتها لا تتعلق باللون بحد ذاته، بل بكيفية إدراك الضوء داخل المادة البلاستيكية بعد اكتمال التركيبة والتصنيع.

وقد تم في هذا الكتاب فصل الإضافات البصرية عن أنظمة اللون فصلاً منهجياً مقصوداً، متغاً للخلط الشائع بين الوظيفتين في الممارسة الصناعية. فاللون يحدد الدرجة اللونية وقوة التلوين والتغطية وثبات الصبغة، في حين تتحكم الإضافات البصرية في السلوك البصري للضوء من حيث الانعكاس والانتشار والامتصاص والسطوع. وقد يكون المنتج صحيح اللون ومطابقاً للمواصفة اللونية، ومع ذلك يعاني من عكورة أو ضعف شفافية أو بياض غير نقي أو لمعان غير متجانس أو عيوب بصرية دقيقة لا يمكن معالجتها بتغيير نظام اللون أو زيادة تركيز الصبغة.

لذلك تُتناول الإضافات البصرية في هذا الجزء من الكتاب بوصفها أنظمة تحكم مستقلة في المظهر البصري للمنتج النهائي، تُستخدم لمعالجة مشكلات إدراكية لا ترتبط مباشرة باللون، مع الإشارة عند الحاجة إلى تفاعلها مع أنظمة اللون دون دمج أو خلط مفاهيمي بين الدورين. ويهدف هذا الفصل إلى ترسيخ تشخيص أدق لمشكلات المظهر، واختيار أدوات المعالجة الصحيحة، واعتماد حلول صناعية مستقرة لا تعتمد على الحلول المؤقتة أو الالتفافية.

1 - 3.6.3 عوامل التعقيم والتحكم في العكورة

Opacifying Additives & Controlled Haze Systems

ما هي عوامل التعقيم؟

عوامل التعقيم هي إضافات تُستخدم للتحكم المتعمد في نفاذ الضوء داخل المنتج البلاستيكي، عبر إدخال طور مادي ثانوي داخل المصفوفة البوليمرية يؤدي إلى تشتيت الضوء المرئي ومنع مروره المنتظم. وهي لا تُعد عيباً بصرياً ولا نتيجة خلل تشغيلي، بل أداة تصميم بصري تُستخدم عندما يكون المطلوب تقليل الشفافية أو إخفاء المحتوى أو تحقيق مظهر أبيض أو معتم أو حليبي متجانس.

وبخلاف الاعتقاد الشائع، فإن التعقيم ليس وظيفة لونية، ولا يتحقق بالصبغة وحدها، بل هو نتيجة تفاعل بصري بين الضوء والبنية الداخلية للمادة، ولهذا تم فصل هذا الفصل عن أنظمة اللون فصلاً منهجياً.

لماذا تُستخدم عوامل التعقيم؟

تُستخدم عوامل التعقيم عندما يكون المطلوب:

- حجب الرؤية أو إخفاء المحتوى
- تقليل نفاذ الضوء لأسباب وظيفية
- تحقيق مظهر أبيض أو معتم متجانس
- تقليل الحساسية البصرية لتفاوت السماكة
- إخفاء البنية الداخلية أو العيوب الدقيقة بصرياً

ولا تُستخدم:

- لتصحيح لون غير مطابق
- لتعويض ضعف قوة الصبغة
- لإخفاء شوائب أو تكتلات حقيقية
- لمعالجة تدهور حراري أو سوء تشتت

- التركيب المادي :

عوامل التعتيم هي مواد جسيمية صلبة تُضاف إلى البوليمر ، وتعمل كطور منفصل بصريًا داخل المصفوفة، ويُشترط فيها أن تمتلك معامل انكسار مختلفًا بوضوح عن البوليمر الأساسي.

وتنتمي هذه المواد غالبًا إلى:

- مواد غير عضوية عالية الكثافة البصرية
- أنظمة جسيمية معدلة السطح
- أو نظم مركبة مصممة لتحقيق تعتيم بصري دون تحميل ميكانيكي مفرط

ولا تكمن فعاليتها في الكمية وحدها، بل في:

- الحجم الحبيبي
- توزيع الأحجام
- تجانس الانتشار داخل البوليمر
- ثبات الجسيمات وعدم تكتلها

وهذه النقطة مماثلة تمامًا لمنهج المالنات: الحجم والتوزيع أهم من النسبة.

- آلية العمل البصرية :

تعمل عوامل التعتيم عبر آلية فيزيائية بحتة تقوم على تشتيت الضوء. فعندما يمر الضوء داخل البوليمر ويصطدم بجسيمات تختلف في معامل الانكسار عن الوسط المحيط، ينحرف مساره ويتوزع في اتجاهات متعددة، مما يؤدي إلى فقدان النفاذية وارتفاع العكورة.

وكلما:

- كان حجم الجسيمات مناسبًا لطول موجة الضوء المرئي
- وكان توزيعها متجانسًا تحقق تعتيم منتظم دون بقع أو تفاوت بصري.

أما الجسيمات الكبيرة أو سينة التوزيع، فقد تعطي:

- تعتيمًا غير متجانس

- بقعًا بصرية

- أو إحساسًا بخشونة داخلية

- التأثيرات المتوقعة الاستخدام الصحيح لعوامل التعتيم يؤدي إلى:

- انخفاض الشفافية

- ارتفاع العكورة بشكل متحكم فيه

- مظهر بصري متجانس

- تقليل إبراز العيوب الداخلية بصريًا

وقد يصاحب ذلك، بحسب النظام المستخدم:

- تغير في اللمعان

- تغير في الإحساس البصري بالسماكة

- تغير إدراكي في درجة اللون دون تغييرها فعليًا

- الآثار الجانبية المحتملة كما هو الحال في المالينات، فإن الإفراط أو سوء الاختيار قد يؤدي إلى:

- ارتفاع الكثافة

- تدهور بعض الخواص الميكانيكية

- زيادة تآكل القوالب

- تأثير سلبي على الطباعة أو اللحام

- تغير غير مرغوب في اللمعان أو السطح

ولهذا لا يجوز التعامل مع عامل التعتيم كإضافة “بصرية فقط”، بل كمكون مادي له تبعات تشغيلية.

- التداخل مع الإضافات الأخرى كالتداخل عوامل التعقيم مع:

• أنظمة اللون (إدراكياً لا كيميائياً)

• إضافات اللمعان والسطح

• المالنات الأخرى

• أنظمة السطح والطباعة

وأي قرار بتغيير مستوى التعقيم يجب أن يُراجع ضمن المنظومة الكاملة للإضافات، لا كقرار منفصل.

- حدود الاستخدام لا يمكن لعوامل التعقيم:

• معالجة شوائب أو تلوث

• تصحيح تدهور حراري

• تعويض سوء تصميم المنتج

• إصلاح خلل تشغيلي جذري

وهي ليست حل لإخفاء المشاكل، بل أداة لتحقيق متطلبات بصرية محددة عندما تكون المنظومة صحيحة أساساً.

موقعها ضمن منظومة الإضافات

- تصنف عوامل التعقيم ضمن:

• إضافات تحكم بصري بنيوي

• تؤثر على إدراك الضوء داخل الكتلة

• وتأتي بعد التنبيت وقبل التحكم السطحي البصري

وهي أقرب في منطقتها إلى المالنات من قربها إلى أنظمة اللون.

- الخلاصة :

عوامل التعتيم ليست أصبغاً ولا حلولاً تجميلية، بل إضافات جسيمية تُستخدم للتحكم في نفاذ الضوء والعكورة وفق تصميم بصري واعٍ. نجاحها يعتمد على اختيار المادة المناسبة، وضبط الحجم الحبيبي والتوزيع، وربط القرار البصري بالسماكة والتطبيق الحقيقي، لا بالاكتفاء بانطباع بصري سريع أو عينة غير ممثلة.

- 3.6.3.2 محسنات البياض والتوهج البصري

Optical Brighteners (OBAs)

- ما هي محسنات البياض البصري؟

محسنات البياض البصري هي إضافات تُستخدم لتحسين إدراك البياض والنقاء البصري للمنتج البلاستيكي عبر تعديل كيفية تفاعل الضوء مع سطحه وبنية القربية من السطح، دون أن تغيّر اللون الاسمي أو تضيف صبغة بيضاء بالمعنى اللوني التقليدي. وهي لا تعمل كمواد تعتيم ولا كأصبغ، بل كإضافات بصرية إدراكية تُغيّر استجابة العين البشرية للضوء المنعكس من المنتج.

ولهذا السبب تُفصل منهجياً عن أنظمة اللون؛ فاللون الأبيض يتحقق بصبغات أو مواد تعتيم، أما “البياض” الذي تعالجه هذه الإضافات فهو إحساس بصري بالنقاء والسطوع وليس قيمة لونية مباشرة.

- لماذا تستخدم محسنات البياض؟

تُستخدم عندما يكون المنتج:

- أبيض اللون اسمياً لكنه يبدو مائلاً للاصفرار
- نظيف التركيب لكنه يفتقر إلى التوهج البصري
- متجانساً ميكانيكياً لكنه غير جذاب بصرياً
- مطابقاً للمواصفة اللونية ومع ذلك مرفوض بصرياً

ولا تستخدم:

- لتصحيح لون خاطئ
- لتعويض نقص في التعتيم

- لإخفاء شوائب أو تدهور

- كبديل عن نظام لون صحيح

- التركيب المادي :

محسّنات البياض البصري هي مركبات عضوية فلورية ذات بنية جزيئية قادرة على امتصاص جزء من الضوء فوق البنفسجي غير المرئي وإعادة إصداره ضمن نطاق الضوء الأزرق المرئي. وبذلك تُضيف إلى الضوء المنعكس مكوّنًا أزرق خفيفًا يعادل الاصفرار الطبيعي في المواد البوليمرية، فيُدرك المنتج على أنه أكثر بياضًا ونقاءً.

وتستخدم هذه الإضافات بجرعات منخفضة جدًا، وغالبًا تُورّد على شكل:

- ماسترباتش بصري

- أو مركز وظيفي عالي الفعالية

ولا تعتمد فعاليتها على الكتلة أو الحجم الحبيبي كما في المالفات، بل على:

- ثبات المركب الفلوري

- توافقه مع البوليمر

- توزيعه المنتظم

- واستقراره الحراري والضوئي

- آلية العمل البصرية:

تعتمد آلية العمل على ظاهرة فلورية بحتة؛ حيث تمتص جزيئات محسّن البياض الإشعاع فوق البنفسجي القريب، ثم تعيد إطلاقه كضوء أزرق مرئي. هذا الضوء الأزرق المضاف لا يُرى كصبغة، لكنه يوازن الميل الطبيعي للاصفرار، فيُدرك المنتج على أنه:

- أنقى

- أكثر إشراقًا

- وأكثر بياضًا

وهذا التأثير إدراكي بصري لا تعبيرى كيميائى، ولا يظهر في الظلام أو دون وجود مصدر ضوئى مناسب.

- **التأثيرات المتوقعة نتيجة الاستخدام الصحيح لمُحسّنات البياض يؤدي إلى:**

- زيادة الإحساس بالبياض
 - تقليل الاصفرار الإدراكي
 - رفع التوهج البصري
 - تحسين مظهر المنتجات البيضاء أو شبه البيضاء
- وقد يؤدي أيضًا إلى:

- إبراز النقاء في المنتجات الشفافة أو شبه الشفافة
- تحسين التباين البصري في بعض التطبيقات

- **الآثار الجانبية المحتملة كما في المالنات، فإن الإفراط أو سوء الاختيار قد يؤدي إلى:**

- لمعان أزرق غير مرغوب
 - اختلاف إدراكي تحت إضاءات مختلفة
 - ضعف الاستقرار الضوئي مع الزمن
 - تداخل بصري مع أنظمة اللون الأخرى
- ولهذا لا يجوز استخدام هذه الإضافات لتعويض:
- تدهور حراري
 - شوائب
 - لون غير مضبوط لأنها قد تُخفي المشكلة بصريًا مؤقتًا دون حلها.

- التداخل محسّنات البياض مع الإضافات الأخرى:

- أنظمة اللون الأبيض
- عوامل التعنيم
- إضافات التثبيت الضوئي
- نوع الإضاءة في التطبيق النهائي

كما أن تأثيرها يتأثر بوضوح بـ:

- سماكة المنتج
- درجة الشفافية أو التعنيم
- طبيعة السطح

ولهذا يجب تقييمها ضمن النظام البصري الكامل، لا كإضافة مستقلة.

- حدود الاستخدام حيث لا يمكن لمُحسّنات البياض :

- تغيير لون خاطئ إلى لون صحيح
- تعويض نقص التعنيم
- إصلاح تدهور كيميائي
- إخفاء عيوب بنيوية حقيقية

وهي إضافات حساسة جدًا للجرعة والبيئة الضوئية، وتحتاج ضبطًا دقيقًا.

موقعها ضمن منظومة الإضافات وفق منهج الكتاب، تُصنّف محسّنات البياض كإضافات:

- إدراكية بصرية
 - لا تغيّر البنية ولا السطح
 - وتأتي بعد التعتيم وقبل التحكم في اللمعان والعيوب الدقيقة
- وهي أبعد الإضافات البصرية عن أنظمة اللون من حيث الآلية، رغم قربها الظاهري منها في التطبيق.

- الخلاصة :

محسّنات البياض ليست أصباغاً ولا مواد تعتيم، بل إضافات فلورية تُستخدم لضبط إدراك البياض والنقاء البصري عبر تعديل الضوء المنعكس. نجاحها يعتمد على استخدامها في موضعها الصحيح، وبجرعات دقيقة، وضمن نظام بصري متكامل، لا كحل تجميلي لتعويض خلل لوني أو تشغيلي.

3.6.3.3- إضافات تقليل العيوب البصرية الدقيقة

Anti-Gel & Defect Masking Additives

- ما هي إضافات تقليل العيوب البصرية؟

إضافات تقليل العيوب البصرية هي إضافات تُستخدم للحد من ظهور العيوب الدقيقة جداً التي تؤثر على نقاء المظهر البصري للمنتج، مثل الجِلّات (Gels) ، النقاط، البقع الدقيقة، أو التفاوتات الموضعية التي لا تُعد فشلاً ميكانيكياً أو كيميائياً، لكنها تؤدي إلى رفض بصري مباشر، خصوصاً في الأفلام والمنتجات الشفافة أو عالية المتطلبات الجمالية.

وهذه الإضافات لا تُزيل العيب من مصدره، ولا تُصلح خللاً بنيوياً في المادة، بل تعمل على تقليل إدراك العيب بصرياً أو الحد من بروزه للعين، ضمن حدود مدروسة. ولهذا تُصنّف كإضافات تحكم بصري، لا كحلول تصحيح تشغيلي أو تركيب.

- لماذا تُستخدم هذه الإضافات ؟

تُستخدم عندما يكون المنتج:

- سليماً ميكانيكياً وكيميائياً
- مطابقاً للمواصفات الوظيفية

- لكن مرفوضاً بسبب عيوب بصرية دقيقة متناثرة

وُستخدم بشكل خاص في:

- أفلام التغليف الشفافة
- أفلام متعددة الطبقات
- تطبيقات تتطلب نقاءً بصرياً عالياً

ولا تُستخدم:

- لمعالجة شوائب كبيرة أو تلوث صلب
- لتعويض تدهور حراري
- لإخفاء تكتلات أو سوء تشتت حقيقي
- كبديل عن تنظيف الخط أو تحسين الفترة

- التركيب المادي :

إضافات تقلل العيوب البصرية ليست مادة واحدة، بل أنظمة مادية دقيقة تُصمم للتأثير في كيفية انتشار الضوء حول العيب البصري. وغالباً ما تكون:

- مواد جسيمية فائقة الدقة
- أو أنظمة بوليمرية منخفضة التركيز
- أو إضافات تُعدل التباين البصري المحلي بين العيب والمحيط

ولا تعمل هذه الإضافات عبر إزالة الجِل أو النقطة، بل عبر تقليل الفرق البصري بين العيب والمادة المحيطة، سواء بتعديل معامل الانكسار الموضعي، أو بتشتيت الضوء بشكل يمنع تركّزه على العيب.

وكما في المالئات، فإن:

الحجم والتوزيع أهم من الكمية، وأي تكتل في الإضافة نفسها قد يُحوّلها إلى مصدر عيب إضافي.

- آلية العمل البصرية :

تعتمد آلية العمل على مبدأ فيزيائي بصري يتمثل في:

- تقليل التباين البصري المحلي
 - أو إعادة توزيع الضوء حول منطقة العيب
 - أو كسر الحواف الحادة بصرياً
- فعندما يصبح الفرق في الانكسار أو الانعكاس بين الجِلّ والمادة المحيطة أقل وضوحاً، يتراجع إدراك العين للعيب، حتى وإن بقي موجوداً فيزيائياً. وهذا يختلف جذرياً عن حلول إزالة الجِلّ أو منعه، التي تقع خارج نطاق هذه الإضافات.

- التأثيرات المتوقعة للإستخدام الصحيح يؤدي إلى:

- تقليل وضوح الجِلّات الدقيقة
- تحسين النقاء البصري العام
- مظهر أكثر تجانساً
- انخفاض معدل الرفض البصري

وقد يصاحب ذلك:

- تغير طفيف في اللمعان
 - تغير محدود في العكورة
- وهي آثار يجب أخذها في الحسبان عند التصميم البصري للمنتج.

- الآثار الجانبية المحتملة عند سوء الاختيار أو الجرعة، قد تظهر:

- زيادة غير مرغوبة في العكورة
- فقدان الشفافية العالية
- تفاوت بصري جديد
- إحساس “ضبابي” بدل النقاط

ولهذا لا يجوز استخدام هذه الإضافات كحل سريع دون تقييم شامل للأثر البصري الكلي.

- التداخل مع الإضافات الأخرى حيث تتداخل إضافات تقليل العيوب البصرية مع:

- عوامل التصفية البصرية

- عوامل التعتيم

- محسّنات البياض

- أنظمة اللون الشفافة

وقد يؤدي الجمع غير المدروس بينها إلى:

- تضارب بصري

- أو إلغاء تأثير أحدها الآخر

ولهذا يجب التعامل معها كجزء من منظومة بصرية متكاملة.

- حدود الاستخدام حيث لا يمكن لهذه الإضافات:

- إزالة الجِلّات الكبيرة

- معالجة مصدر العيب

- تعويض سوء تشغيل أو فترة

- إصلاح مادة متدهورة أو ملوثة

وأي اعتماد مفرط عليها بدل معالجة السبب الحقيقي سيؤدي إلى تكرار المشكلة أو تفاقمها.

موقعها ضمن منظومة الإضافات

وفق منهج الكتاب، تُصنّف هذه الإضافات كأدوات:

- تحكم بصري دقيق

- تأتي بعد التصفية والتعتيم والبياض

- وتسبق التحكم في اللمعان النهائي

وهي أقرب في منطقتها إلى إخفاء بصري محسوب لا إلى تعديل بنيوي.

- الخلاصة :

إضافات تقليل العيوب البصرية ليست حلولاً علاجية للعيوب، بل أدوات لتقليل إدراكها ضمن حدود مدروسة. نجاحها يعتمد على دقة الاختيار، وضبط الحجم والتوزيع، وربطها بالمنظومة البصرية كاملة، مع الالتزام بأن معالجة السبب الحقيقي للعيوب تظل دائماً الخيار الصناعي الصحيح طويل الأمد.

- 5.6.3.4 إضافات التحكم في اللمعان والمظهر السطحي البصري

Gloss & Matte Control Additives

- ما هي إضافات التحكم في اللمعان؟

إضافات التحكم في اللمعان هي إضافات تُستخدم لضبط كيفية انعكاس الضوء عن سطح المنتج البلاستيكي، بحيث يُحدّد المظهر النهائي ليكون لامعاً، شبه لامع، أو مطفاً بدرجة محسوبة، وفق متطلبات التصميم والتطبيق. وهي لا تُغيّر لون المنتج ولا بنيته الداخلية، بل تتحكم في السلوك البصري للسطح الناتج عن التشكيل والتبريد وتوزيع الإضافات.

ويجب التمييز منهجياً بين اللمعان بوصفه خاصية بصرية سطحية، وبين النقاء أو الشفافية التي ترتبط ببنية المادة، وبين اللون الذي يحدد الدرجة اللونية. فاللمعان لا يُصنع باللون، ولا يُعالج بالمئات، بل يُضبط عبر أدوات سطحية بصرية مخصصة.

- لماذا تُستخدم إضافات التحكم في اللمعان؟

تُستخدم عندما يكون المطلوب:

- تحقيق مظهر لامع مرتفع يعطي إحساساً بالنظافة والجودة
- أو مظهر مطفاً يقلل الانعكاسات ويخفي آثار الاستخدام
- أو توحيد المظهر السطحي بين دفعات إنتاج مختلفة
- أو تقليل التفاوت البصري الناتج عن اختلاف السماكة أو ظروف التشغيل

ولا تُستخدم:

- لتصحيح لون غير مطابق
- لتعويض شوائب أو تدهور
- لإخفاء عيوب بنيوية كبيرة
- كبديل عن ضبط القالب أو ظروف التبريد

- التركيب المادي :

تعتمد إضافات التحكم في اللمعان على أنظمة مادية تؤثر في خشونة السطح الميكروية أو في تكوين طبقة سطحية ذات خصائص انعكاس مختلفة. وقد تكون:

- جسيمات دقيقة تُحدث خشونة سطحية محسوبة
- أنظمة شمعية أو بوليمرية سطحية
- إضافات تُعدل توزيع المصهور قرب السطح أثناء التصلب
- ولا تكمن فعاليتها في الجرعة وحدها، بل في:

- حجم الجسيمات أو طبيعة الطبقة السطحية
- انتظام التوزيع
- توافقها مع البوليمر
- سلوكها أثناء التبريد

وكما في المالنات، فإن أي تكتل أو عدم تجانس في الإضافة قد يتحول إلى عيب بصري بدل حل بصري.

- آلية العمل البصرية:

تعتمد آلية التحكم في اللمعان على مبدأ فيزيائي بسيط يتمثل في أن السطح الأملس يعكس الضوء بشكل منتظم فيظهر لامعاً، بينما السطح ذو الخشونة الميكروية يبعثر الضوء فيظهر مطفأً. وتعمل هذه الإضافات على ضبط هذه الخشونة أو الطبقة السطحية ضمن نطاقات دقيقة، بحيث لا تُشعر المستخدم بخشونة ملمسية، لكنها تغيّر انعكاس الضوء بصرياً.

وفي الأنظمة اللامعة، يكون الهدف تقليل الاضطرابات السطحية وتحسين انتظام السطح، بينما في الأنظمة المطفأة يكون الهدف خلق تشتت سطحي محسوب دون الوصول إلى تعقيم أو عكورة غير مرغوبة.

- التأثيرات المتوقعة :

الاستخدام الصحيح يؤدي إلى:

- ضبط مستوى اللمعان وفق التصميم
- توحيد المظهر السطحي
- تقليل حساسية المظهر لتغيرات التشغيل
- تحسين الانطباع البصري العام للمنتج

وقد يصاحب ذلك:

- تغير طفيف في الإحساس اللمسي
- تغير محدود في إدراك اللون أو البياض وهي آثار إدراكية لونية يجب أخذها في الحسبان.

- الآثار الجانبية المحتملة :

عند سوء الاختيار أو الجرعة، قد تظهر:

- انخفاض غير مرغوب في الشفافية
- زيادة العكورة
- تفاوت لمعان موضعي
- ضعف الطباعة أو الالتصاق في بعض التطبيقات
- تغير سلوك السطح عند اللف أو التخزين

ولهذا فإن التحكم في اللمعان يجب ألا يُفصل عن منظومة إضافات السطح والطباعة واللحام.

- التداخل مع الإضافات الأخرى مع:

- إضافات السطح مثل Anti-block و Slip
- عوامل التعنيم
- محسنات البياض
- أنظمة اللون الشفافة
- المعالجة بالكورونا
- وقد يؤدي عدم التنسيق بينها إلى:
- مظهر غير مستقر
- أو تعارض بين المتطلبات البصرية والوظيفية

- حدود الاستخدام :

لا يمكن لإضافات التحكم في اللسان:

- إصلاح سطح متدهور أو ملوث
- تعويض سوء تصميم القالب
- معالجة شوائب أو جلات
- إخفاء عيوب بنيوية كبيرة

وأي محاولة لاستخدامها كحل تجميلي لمشكلة تشغيلية ستؤدي إلى نتائج مؤقتة وغير مستقرة.

- موقعها ضمن منظومة الإضافات وفق منهج الكتاب، تُعد إضافات التحكم في اللسان:

- آخر حلقة في منظومة الإضافات البصرية
- تؤثر على المظهر النهائي مباشرة

وتعتمد فعاليتها على سلامة كل ما سبقها من أنظمة

وهي بذلك تمثل الضبط البصري النهائي للمنتج.

- الخلاصة :

إضافات التحكم في اللمعان ليست أدوات تجميل سطحية، بل إضافات بصرية دقيقة تُستخدم لضبط انعكاس الضوء والمظهر السطحي وفق تصميم واعٍ. نجاحها يعتمد على فهم آلية انعكاس الضوء، وضبط الخشونة الميكروية أو الطبقة السطحية، وربطها بمنظومة الإضافات كاملة دون فصلها عن متطلبات الطباعة واللحام والاستخدام النهائي.

الفصل السابع التحكم في الرطوبة والمواد المتطايرة في الخلطات البوليمرية

Moisture Control & Desiccant Systems

تُعد الرطوبة من أكثر العوامل التي تُسبب اضطرابات صناعية في تصنيع المنتجات البلاستيكية، ليس بسبب ندرتها أو تعقيدها، بل بسبب شيوع سوء فهمها. ففي عدد كبير من المصانع يُنظر إلى الرطوبة بوصفها مشكلة تشغيلية يمكن احتواؤها عبر فتحات تبريد أو مضخات فاكيوم، بينما الواقع الكيميائي والصناعي يثبت أن الرطوبة عامل سببي سابق لمرحلة الانصهار، وإذا لم يُعالج في موقعه الصحيح، فإن كل ما بعده يتحول إلى معالجة لأعراض ظهرت بعد وقوع الضرر.

هذا الفصل يتعامل مع الرطوبة بوصفها مكونًا كيميائيًا وفيزيائيًا داخل الخامة، لا كغاز متطاير يمكن سحبه لاحقًا. ومن هنا تأتي ضرورة فصل أنظمة التحكم في الرطوبة عن فصول معالجة اضطرابات المصهور، لأن الخلط بينهما يؤدي إلى قرارات إضافات خاطئة، وحلول مؤقتة، وفشل متكرر في تثبيت الجودة.

- الرطوبة: طبيعتها وموقعها الحقيقي داخل المادة:

الرطوبة داخل الخلطات البوليمرية لا تكون عادة ماءً حرًا، بل تكون ممتصة داخل السلاسل البوليمرية، أو محبوسة داخل البنية المسامية للملأونات المعدنية، أو مرتبطة بإضافات ذات وزن جزيئي منخفض، أو كأمثلة داخل مواد معاد تدويرها تعرضت سابقًا لامتصاص طويل الأمد. هذه الرطوبة تدخل الخط وهي غير مرئية، وغير قابلة للإزالة بالوسائل اللاحقة بسهولة، لأنها لم تتحول بعد إلى بخار.

عند ارتفاع درجة الحرارة والقص داخل البرميل، تتحول هذه الرطوبة تدريجيًا إلى بخار ماء داخل المصهور. وفي هذه اللحظة تبدأ المشكلات الفعلية: تمدد موضعي، تكون فقاعات دقيقة، اضطراب في سلوك التمدد، أو تحلل جزئي

للسلاسل البوليمرية، خصوصًا في الأنظمة الحساسة أو عند وجود إضافات تسرع هذه التفاعلات. وبذلك يكون الضرر قد وقع داخل المصهور قبل أن يصل أي بخار إلى منطقة التفريغ أو الفاكيوم.

- تفكيك الالتباس الصناعي: لماذا لا يحل Vacuum Venting مشكلة الرطوبة؟

التمييز هنا أساسي: أنظمة Vacuum Venting و Degassing صُممت لسحب الغازات الحرة والمواد المتطايرة التي تستطيع الانفصال عن المصهور، مثل الهواء المحبوس أو بعض المركبات العضوية المتطايرة. لكنها لم تُصمم لتجفيف خامة رطبة.

بخار الماء الناتج عن الرطوبة الداخلية لا يتصرف كغاز صناعي حر، بل يكون غالبًا محبوسًا داخل المصهور أو موزعًا على هيئة فقاعات دقيقة، وقد يكون قد تسبّب بالفعل في اضطراب بنيوي أو تحلل موضعي قبل وصوله لأي فتحة تفريغ. لذلك فإن الفاكيوم، في أفضل حالاته، يسحب جزءًا من الأثر المتبقي، لكنه لا يمنع حدوث الضرر ولا يعالج السبب الجذري.

ومن هنا فإن الاعتماد على الفاكيوم لمعالجة الرطوبة هو خطأ منهجي، لأنه يعالج نواتج المشكلة بعد أن تكون قد أثّرت على بنية المصهور.

- مفهوم أنظمة التحكم في الرطوبة:

أنظمة التحكم في الرطوبة هي إضافات صُممت للتعامل مع الماء داخل الخامة قبل تحوّلها إلى بخار مؤذٍ. وهي لا تعمل بعد الانصهار الكامل، بل في المراحل الأولى من التسخين والخلط، حيث تكون الرطوبة لا تزال في حالتها الممتصة أو المرتبطة.

هذه الأنظمة ليست بديلاً عن التجفيف الميكانيكي، لكنها أدوات مساعدة عندما يكون التجفيف غير كافٍ، أو عندما تكون مصادر الرطوبة متعددة ومتغيرة كما في كثير من تطبيقات إعادة التدوير أو الخلطات المعقدة.

- التركيبة الكيميائية لأنظمة التحكم في الرطوبة :

من الناحية الكيميائية، لا توجد مادة واحدة تُسمى “مزيل رطوبة” تصلح لكل التطبيقات. أنظمة التحكم في الرطوبة تُصمم عادة كنظم مركبة تعتمد على واحد أو أكثر من المسارات التالية.

بعض هذه الأنظمة يعتمد على مواد ذات بنية مسامية عالية قادرة على احتجاز جزيئات الماء داخل شبكتها البلورية. من أشهر هذه المواد الألومينوسيليكات، والسيليكات المعدلة، والزيولايت الصناعي. تمتلك هذه المواد تجاويف بلورية قادرة على استيعاب الماء ومنعه من التحرر أثناء التسخين. هذه الآلية فيزيائية بحتة، لا يدخل فيها تفاعل كيميائي مباشر، لكنها فعّالة طالما لم تتجاوز الرطوبة سعة الامتصاص المتاحة. تُدمج هذه المواد عادة داخل حامل بوليمري مثل البولي

إيثيلين أو البولي بروبيلين على شكل ماسترباتش، مع استخدام معالجات سطحية لتقليل التكتل وتحسين التوزيع. نجاح هذه الأنظمة يعتمد على حجم الجسيمات، ومعالجتها السطحية، وقدرتها على الاحتفاظ بالماء دون إعادة إطلاقه عند درجات حرارة التشغيل.

أنظمة أخرى تعتمد على التفاعل الكيميائي مع الرطوبة، حيث تدخل جزيئات الماء في تفاعل مع مجموعات فعالة داخل الإضافة، فتنحول إلى مركبات غير متطايرة. تُستخدم في هذه الأنظمة مركبات مصممة خصيصاً للتفاعل مع الماء، مثل أنظمة تعتمد على مشتقات أنهيدريدية معدلة، أو مركبات أكسيدية مرتبطة بحوامل بوليمرية، أو أنظمة scavenging مطوّرة للاستخدام داخل المصهور. هذه الأنظمة أكثر فاعلية عند درجات منخفضة، لكنها أكثر حساسية للتوافق الكيميائي، وقد تؤثر على اللون أو الاستقرار الحراري إذا لم تُضبط بعناية.

وفي التطبيقات الأكثر تعقيداً، تُستخدم أنظمة هجينة تجمع بين الامتصاص الفيزيائي والتفاعل الكيميائي المحدود، خصوصاً عندما تكون مصادر الرطوبة متعددة، أو عندما تحتوي الخلطة على بوليمر أساسي مع مالتات، وإضافات سطحية، ومكونات معاد تدويرها ذات تاريخ مختلف من الامتصاص الرطوبي.

- آلية العمل داخل المصهور من منظور كيميائي:

الخطر الحقيقي للرطوبة لا يكمن في وجودها بحد ذاته، بل في تفاعلها مع الحرارة والقص داخل المصهور. فوجود الماء عند درجات حرارة التشغيل قد يؤدي إلى تحلل هيدروكربوني موضعي، أو إلى تكوين سلاسل قصيرة ونواتج أكسدة ثانوية، وهي مركبات منخفضة الوزن الجزيئي تصبح لاحقاً مصدرًا للعيوب البصرية، والرائحة، والهجرة.

عندما تُضاف أنظمة التحكم في الرطوبة في مرحلة مبكرة، فإنها تمنع هذا المسار من أساسه. الأنظمة الامتصاصية تحتجز الماء قبل تحوّلِهِ إلى بخار، والأنظمة التفاعلية تستهلكه كيميائياً، وفي كلا الحالتين ينخفض تركيز الماء الفعّال داخل المصهور، فتنحسّر استقرارية الانصهار، ويقل احتمال تشكّل الفقاعات والاضطرابات البنيوية.

- حدود الاستخدام ولماذا تفشل أحياناً :

تفشل هذه الأنظمة عندما تُستخدم لتعويض غياب التجفيف تماماً، أو عندما تكون الرطوبة أعلى من قدرة النظام، أو عندما يكون الماء محبوساً داخل شوائب أو تلوّث صلب لا يمكن الوصول إليه. كما تفشل عندما يكون العيب ناتجاً عن تحلل سابق أو تلوّث كيميائي لا علاقة له بالماء. لهذا فإن أنظمة التحكم في الرطوبة لا يت اختيارها بمعزل عن إدارة الخامة، بل يجب أن تكون جزءاً من منظومة تشمل التخزين، والتجفيف، والتشغيل.

- الخلاصة

الرطوبة ليست غازاً يُسحب بالفاكيوم، ولا عيباً سطحياً يُخفى بإضافة تجميلية، بل عامل كيميائي سببي يجب التحكم فيه قبل الانصهار. وأنظمة التحكم في الرطوبة، عندما تُصمم وتُستخدم وفق فهم كيميائي صحيح، تمنع سلسلة كاملة من

العيوب قبل نشوئها. أما استخدامها لتعويض تجفيف غائب أو تشخيص خاطئ، فيحولها إلى حل مؤقت يُخفي المشكلة دون أن يعالجها.

4. الباب الرابع : إضافات معالجة العيوب والاضطرابات داخل المصهور

Melt Defect & Instability Control Additives

بعد ضبط جودة الخامة، والتحكم في الرطوبة والمواد المتطايرة، وتثبيت النظام الحراري، نصل إلى المرحلة التي يكون فيها المصهور نفسه هو مصدر الاضطراب. في هذه المرحلة لا تعود المشكلة مرتبطة بوجود ماء أو تلوث سابق، بل بسلوك المصهور تحت تأثير الحرارة والقص والضغط داخل البرميل والقالب. هنا تظهر عيوب مثل الجِلّ، والعيون السمكية، والفقاعات غير الرطوبية، وعدم الاستقرار السطحي، وهي عيوب لا يمكن علاجها بتجفيف إضافي ولا بإعادة ضبط اللون أو المالنات.

هذا الفصل يتناول الإضافات المصممة خصيصاً للتعامل مع الاضطرابات التي تنشأ داخل المصهور ذاته، لا قبل الانصهار ولا بعد التشكيل. ويجب التنبيه منذ البداية إلى أن استخدام هذه الإضافات دون استبعاد الرطوبة كمصدر سببي يُعد خطأ منهجياً يؤدي إلى حلول مؤقتة أو فشل متكرر.

4.1 الفصل الأول اضطرابات المصهور

- ما المقصود باضطرابات المصهور ؟

اضطرابات المصهور هي عيوب ناتجة عن عدم تجانس التدفق، أو تحلل موضعي، أو وجود جسيمات غير ذائبة، أو تمدد غازي داخل الكتلة المنصهرة، وتظهر عادة تحت ظروف قص مرتفع، أو درجات حرارة غير متوازنة، أو زمن مكوث غير مناسب. هذه الاضطرابات تختلف عن العيوب السطحية البحتة، لأنها تنشأ داخل بنية المصهور ثم تنعكس على المنتج النهائي.

4.1.1 إضافات منع الجِلّ Anti-Gel Additives

- التعريف والموقع السببي :

الجِلّ في السياق الصناعي هو وجود مناطق ذات لزوجة أو تركيب مختلف داخل المصهور، قد تكون ناتجة عن تحلل سابق، أو تشابك مفرط للسلاسل، أو جسيمات بوليمرية لم تنصهر أو لم تتجانس بالكامل. إضافات Anti-Gel لا تُذيب الجِلّ القائم، بل تُقلل من تكوّنه وتمنع تضخمه أثناء التشغيل.

- التركيبة الكيميائية :

تعتمد هذه الإضافات غالبًا على أنظمة بوليمرية وظيفية منخفضة الوزن الجزيئي، أو معدّلات لزوجة مصممة للتداخل مع مناطق القص العالي. وتشمل من حيث العائلات:

- بوليمرات معدلة وظيفيًا ذات توافق عالٍ مع البوليمر الأساسي

- أنظمة شمعية مصممة للتحكم في توزيع القص

- إضافات تشحيم داخلية محسّنة لا تُهاجر إلى السطح

وتُقدّم عادة ضمن ماسترباتش بحامل متوافق PE أو PP ، مع إضافات تثبتت تمنع التكتل.

- آلية العمل :

تعمل هذه الأنظمة على تقليل الفوارق المحلية في اللزوجة داخل المصهور، وتحسين انتقال الحرارة والقص عبر الكتلة المنصهرة. من منظور كيمياء المصهور، هي تمنع تشكّل مناطق عالية التشابك أو متدهورة جزئيًا تتحول لاحقًا إلى جلّ مرئي.

- الحدود :

لا تعالج الجلّ الناتج عن تلوث صلب، ولا تعوّض خامة متدهورة بشدة، ولا تُصلح تصميم برمّل أو لولب غير مناسب.

4.1.2 إضافات منع العيون السمكية Anti-Fish-Eye Additives

- التعريف والموقع السببي :

العيون السمكية هي عيوب دائرية أو بيضاوية تظهر في الأفلام والمنتجات الرقيقة نتيجة تمدد موضعي أو عدم تجانس داخل المصهور. وهي ليست دائمًا جلًّا، وقد تكون ناتجة عن فقاعات غازية غير رطوبية، أو مناطق لزوجة مختلفة.

- التركيبة الكيميائية :

تعتمد هذه الإضافات على أنظمة محسّنة لسلوك التدفق، وغالبًا ما تكون قريبة تركيبًا من:

- معدّلات الريولوجيا

- مساعدات تشغيل غير فلورية

- أنظمة تشحيم داخلية عالية التوافق

ولا تعتمد عادة على جسيمات صلبة، لأن الهدف هو معالجة سلوك المصهور لا خلق خشونة.

- آلية العمل :

تعمل على تحسين تجانس التدفق ومنع تمدد موضعي غير متوازن عند الخروج من القالب. هي لا تزيل مصدر الغاز إن وجد، بل تمنع تحوُّله إلى عيب بصري واضح.

- الحدود :

إذا كان سبب العيب رطوبة أو تلوُّثاً أو تحللاً سابقاً، فإن استخدام Anti-Fish-Eye سيُخفي المشكلة دون حلّها.

4.1.3 إضافات إزالة الغازات Degassing Aids

- التعريف والموقع السببي :

تُستخدم للتعامل مع الغازات المتولدة داخل المصهور نتيجة تحلل حراري، أو تحرر VOC ، أو تفاعلات ثانوية. وهي تختلف عن التحكم في الرطوبة، لأنها تتعامل مع غازات متكوّنة فعلاً داخل المصهور.

- التركيبية الكيميائية :

تعتمد هذه الإضافات على:

- أنظمة تقلل لزوجة السطح البيني للفقاعات
 - مواد تحسّن اندماج الفقاعات وخروجها
 - إضافات تشحيمية داخلية مصممة لتسهيل تحرر الغاز
- ولا تكون فعّالة إلا بوجود مسار تفريغ مناسب.

- آلية العمل :

من منظور فيزيائي-كيميائي، تقلل هذه الأنظمة من طاقة احتجاز الغاز داخل المصهور، فتسمح له بالاندماج والخروج عند مناطق التفريغ أو القالب.

— الحدود : لا تمنع تولد الغاز، ولا تعالج الرطوبة، ولا تُغني عن تصميم تفريغ صحيح.

4.1.4 أنظمة التفريغ والفاكيوم Vacuum Venting Additives / Systems

– التعريف والموقع السببي :

أنظمة التفريغ ليست إضافات كيميائية بحد ذاتها، بل جزء من منظومة معالجة اضطرابات المصهور. دورها سحب الغازات الحرة والمتطايرة القابلة للتحرر من المصهور.

– العلاقة مع الإضافات :

تعمل بفعالية فقط عند:

- معالجة الرطوبة مسبقا
- استخدام Degassing Aids عند الحاجة
- وجود مصهور متجانس نسبياً

– الحد المنهجي :

لا تُجفف خامّة، ولا تمنع تحللاً حدث مسبقاً، ولا تُصلح مصهوراً غير مستقر كيميائياً.

– التداخل بين هذه الإضافات :

إضافات معالجة اضطرابات المصهور تعمل كنظام مترابط:

- Anti-Gel و Anti-Fish-Eye يعالجان عدم التجانس
- Degassing يعالج الغازات المتولدة
- Vacuum Venting يوفّر مسار الخروج

وأي خلل في أحدها يُضعف أداء البقية.

الخلاصة

إضافات معالجة اضطرابات المصهور ليست حلولاً تجميلية، بل أدوات تدخل سببي داخل الكتلة المنصهرة. استخدامها الصحيح يتطلب استبعاد الرطوبة والتلوث أولاً، ثم تشخيص مصدر الاضطراب داخل المصهور نفسه. وأي محاولة

لاستخدام هذه الإضافات لتعويض خلل سابق ستؤدي إلى تحسّن مؤقت يعقبه فشل متكرر. النجاح الحقيقي يتحقق عندما يُعامل المصهور كنظام كيميائي-فيزيائي متكامل، لا كسطح يُعاد صقله بعد تشكّله.

4.2 الفصل الثاني البوليمرات الوظيفية وأنظمة التوافق البنوي

Functional Polymers & Compatibilization Systems

في كثير من التركيبات الصناعية لا تكون المشكلة في التشغيل، ولا في السطح، ولا في اللون، بل في غياب التوافق البنوي بين مكونات الخلطة نفسها. قد يكون البوليمر الأساسي سليماً، والمالئ مناسباً، والإضافات صحيحة، ومع ذلك يبقى المنتج هشاً، أو غير متجانس، أو متقلب الخواص بين دفعة وأخرى. في هذه الحالات لا يكون الحل إضافة "مساعدة"، بل إعادة تصميم العلاقة بين الأطوار المختلفة داخل المصهور.

تتناول هذه الفئة من الإضافات ما يُعرف بالبوليمرات الوظيفية أو أنظمة التوافق، وهي مواد لا تعمل كإضافات تحسين عرضي، بل تدخل في بنية المصهور نفسها لتعمل كوسيط بنيوي بين مكونات غير متوافقة طبيعياً. ولهذا تُفصل هذه المواد منهجياً عن مساعدات التشغيل، وعن إضافات السطح، وعن حلول معالجة العيوب، لأنها تعالج مشكلة تصميم تركيبي لا عرضاً تشغيلياً.

- ما المقصود بعدم التوافق البنوي؟

عدم التوافق البنوي يعني وجود طورين أو أكثر داخل الخلطة البوليمرية لا يمتلكان قابلية طبيعية للامتزاج أو الالتصاق أو نقل الإجهاد بينهما. يظهر هذا عدم التوافق في صورة:

- انفصال أطوار دقيق
- ضعف في مقاومة الصدم
- هشاشة غير مبررة
- تذبذب خواص ميكانيكية
- عدم استقرار ريولوجي

وغالباً ما يكون ناتجاً عن:

- خلط بوليمرين مختلفين كيميائياً

- إدخال مالئات أو ألياف غير متوافقة
- استخدام مواد معاد تدويرها ذات تركيب غير متجانس
- أو الجمع بين أطوار مطاطية وبوليمرية دون وسيط مناسب

- تعريف البوليمرات الوظيفية المتوافقة :

البوليمرات الوظيفية المتوافقة هي بوليمرات ذات وزن جزيئي محدد صُممت لتحمل مجموعات كيميائية أو خصائص فيزيائية تمكّنها من التفاعل أو الارتباط أو التوافق مع أكثر من طور داخل الخلطة، بحيث تعمل كجسر بنيوي ينقل الإجهاد ويُحسن التجانس.

هي ليست:

- مزائج
- ولا مساعدات تشغيل
- ولا إضافات سطحية
- ولا حلول تجميلية

بل عناصر تصميم تركيبى تستخدم عندما يكون الخلل في العلاقة بين المكونات لا في أحدها منفردًا.

- التركيبة الكيميائية لأنظمة التوافق :

من الناحية الكيميائية، تنتمي أنظمة التوافق إلى عدة عائلات رئيسية، يختلف اختيارها بحسب طبيعة الأطوار غير المتوافقة.

أكثر هذه الأنظمة شيوعاً هي البوليمرات المعدلة بمجموعات وظيفية نشطة، مثل بوليمرات أوليفينية جرى تطعيمها بمجموعات أنهيدريدية أو كربوكسيلية أو إيبوكسيدية. هذه المجموعات لا تتغير الطبيعة الأساسية للبوليمر، لكنها تمنحه القدرة على التفاعل أو الارتباط مع أطوار قطبية أو مع أسطح مالئات وألياف.

عائلة أخرى تعتمد على بوليمرات أوليفينية مرنة أو شبه مطاطية ذات توزيع خاص للبنية البلورية، تسمح لها بالتوضع بين طور صلب وطور مرن، فتعمل كوسيط امتصاص إجهاد ونقل حمل دون الحاجة إلى تفاعل كيميائي مباشر. هذه البوليمرات تُستخدم خصوصاً في أنظمة تحسين الصدم والتوافق بين بوليمرات غير متجانسة، لكنها لا تُصنّف كمعدلات صدم تقليدية، لأنها تؤدي دوراً بنيوياً أعمق من مجرد امتصاص الطاقة.

كما توجد أنظمة تعتمد على بوليمرات كتلية أو متعددة القطاعات (Block / Graft Polymers) ، حيث يكون جزء من السلسلة متوافقاً مع طور، وجزء آخر متوافقاً مع طور مختلف، مما يسمح بتشكيل منطقة انتقالية مستقرة بينهما.

وفي تطبيقات المالنات والألياف، تُستخدم أنظمة ربط تعتمد على مواد وظيفية قادرة على التفاعل مع سطح المالى من جهة، ومع البوليمر من جهة أخرى، سواء عبر روابط كيميائية مباشرة أو عبر تحسين البلل والالتصاق البيني.

- آلية العمل البنيوي :

من منظور كيمياء وفيزياء المصهور، تعمل أنظمة التوافق على تقليل طاقة السطح البيني بين الأطوار غير المتوافقة، وتحسين الالتصاق ونقل الإجهاد عبر هذا الحد الفاصل. عندما يكون هذا الحد ضعيفاً، ينفصل الطوران تحت أقل إجهاد، ويظهر الفشل الهش. أما عند وجود بوليمر وظيفي متوافق، فإن هذا الحد يتحول من نقطة ضعف إلى منطقة انتقالية قادرة على توزيع الإجهاد.

في الأنظمة التفاعلية، يحدث ارتباط كيميائي محدود عند الواجهة، ما يثبت الطورين ببعضهما. وفي الأنظمة غير التفاعلية، يحدث توافق فيزيائي يعتمد على التشابك الجزيئي والتموضع الانتقائي داخل المصهور. وفي كلا الحالتين، تكون النتيجة تحسناً في التجانس، وثباتاً في الخواص، وتقليلاً للتباين بين الدفعات.

- ماذا تعالج هذه الأنظمة فعلياً؟

- ضعف التوافق بين بوليمرات مختلفة
- هشاشة ناتجة عن انفصال أطوار
- ضعف نقل الإجهاد بين البوليمر والمالى
- عدم استقرار خواص في الخلطات المعقدة
- تباين أداء المواد المعاد تدويرها

ولا تُستخدم لعلاج:

- مشاكل تشغيل مؤقتة
- عيوب سطحية

- رطوبة
 - تحلل حراري
 - شوائب صلبة
- **حدود الاستخدام :** تفشل أنظمة التوافق عندما تُستخدم كحل سريع لمشكلة ليست بنيوية، أو عندما تُضاف دون تشخيص دقيق لطبيعة الأطوار غير المتوافقة. كما أن الإفراط في استخدامها قد يؤدي إلى تليين غير مرغوب، أو تغير في الريولوجيا، أو فقدان خواص صلابة مطلوبة.
- لهذا لا يجوز اعتمادها بناءً على تحسن عرضي في خاصية واحدة، بل يجب تقييم أثرها على النظام ككل.
- **التداخل مع الإضافات مع :**
- المالنات والألياف
 - معدلات الصدم
 - معدلات الريولوجيا
 - بعض إضافات السطح
- واستخدامها دون تنسيق قد يؤدي إلى تضارب في الوظائف أو إلغاء تأثير بعض الإضافات الأخرى.
- **الخلاصة :**
- البوليمرات الوظيفية المتوافقة ليست إضافات تحسين، بل أدوات تصميم بنيوي تُستخدم عندما يكون الخلل في العلاقة بين مكونات الخلطة. نجاحها يعتمد على تشخيص دقيق لعدم التوافق، واختيار عائلة كيميائية مناسبة، وربط استخدامها بمنظومة الإضافات كاملة. وأي استخدام لها خارج هذا السياق يحولها من حل جذري إلى عبء تركيبي غير مبرر.

4.3 إضافات مقاومة الاشتعال والحماية من اللهب

Flame Retardant & Fire Protection Systems

في كثير من التطبيقات الصناعية لا يكون القبول أو الرفض مرتبطاً بالخواص الميكانيكية أو البصرية أو السطحية، بل بمتطلبات السلامة من الحريق. فالمنتج قد يكون متجانساً، مستقرًا، وقابلًا للتشغيل، ومع ذلك يُرفض تنظيميًا أو تجاريًا بسبب سلوكه عند التعرض للحرارة أو اللهب .

لهذا تُعد إضافات مقاومة الاشتعال جزءًا من تصميم السلامة وليس تحسينًا تشغيليًا أو بصريًا، ولا يجوز التعامل معها كإضافات ثانوية تُضاف في نهاية التركيبة، بل كنظام متكامل يُبنى منذ مرحلة اختيار البوليمر والتركيب الأساسية.

ويجب التنبيه منذ البداية إلى أن هذه الإضافات لا تهدف إلى “منع الحريق”، بل إلى تعديل سلوك المادة أثناء الاشتعال، سواء عبر تأخير الاشتعال، أو تقليل انتشار اللهب، أو خفض انبعاث الحرارة والدخان.

– ما المقصود بسلوك الاشتعال في البوليمرات؟ عند تعرض البوليمر للحرارة، تمر المادة بسلسلة أحداث:

• تسخين

• تحليل حراري

• انبعاث غازات قابلة للاشتعال

• اشتعال وانتشار لهب

– إضافات مقاومة الاشتعال تتدخل في واحدة أو أكثر من هذه المراحل، إما بتعديل مسار التحلل، أو بعزل السطح، أو بتخفيف الطاقة الحرارية المتولدة، أو بالتأثير على كيمياء اللهب نفسه.

– التصنيف المنهجي لأنظمة مقاومة الاشتعال

– أولاً: الأنظمة غير العضوية عالية التحميل : تعتمد هذه الأنظمة على مواد غير عضوية تتحلل حراريًا مطلقة ماءً أو غازات خاملة تمتص الحرارة وتخفف الاشتعال.

– التركيبة الكيميائية النموذجية:

• Aluminum Hydroxide

• Magnesium Hydroxide

Mineral-based flame-retardant fillers •

آلية العمل:

- امتصاص حرارة التحلل
- إطلاق بخار ماء يخفف تركيز الغازات القابلة للاشتعال
- تكوين طبقة عازلة جزئيًا

حدودها:

- تتطلب نسب تحميل عالية
- تؤثر على الخواص الميكانيكية
- ترفع الكثافة وتغير الريولوجيا

ثانيًا: الأنظمة الفوسفورية أنظمة تعتمد على مركبات فوسفورية تعمل غالبًا في الطور الصلب عبر تكوين طبقة فحمية (Char) عازلة.

التركيبية الكيميائية:

Phosphates •

Phosphinates •

Phosphorus-containing polymers •

آلية العمل:

- تحفيز التفحم
- تكوين حاجز حراري
- تقليل انتقال الحرارة والأكسجين

- مزايا منهجية:

- تحميل أقل من الأنظمة غير العضوية
- تأثير أقل على الكثافة
- مناسبة لتطبيقات هندسية

ثالثاً : الأنظمة النيتروجينية والمركبة

تُستخدم منفردة أو مع الفوسفور ضمن أنظمة منتفخة (Intumescent Systems).

- التركيبة:

- Nitrogen-containing compounds
- Melamine derivatives
- Intumescent multi-component systems

- آلية العمل:

- تكوين رغوة فحمية منتفخة
- عزل المادة عن اللهب
- تقليل الدخان

- رابعاً: الأنظمة المهلجنة أنظمة تعتمد على مركبات تحتوي على هالوجينات، تؤثر مباشرة على كيمياء اللهب.

- ملاحظة منهجية صارمة:

رغم فعاليتها العالية، فإن استخدامها أصبح مقيداً تنظيمياً في كثير من التطبيقات، ولا تعتمد إلا في نطاقات صناعية محدودة جداً، ومع متطلبات تنظيمية صارمة.

- ماذا تعالج هذه الإضافات فعلياً؟

- سرعة الاشتعال
- انتشار اللهب

- معدل إطلاق الحرارة

- تكوين الفحم العازل

ولا تعالج:

- ضعف التركيبة البنيوية

- تحلل سابق

- عيوب تشغيل

- مشاكل سطحية أو بصرية

- التداخل مع بقية نظام الإضافات أنظمة مقاومة الاشتعال تتداخل بقوة مع:

- المالنات

- البوليمرات الوظيفية

- معدلات الصدم

- أنظمة اللون

- الريولوجيا

وأي اعتماد لها دون إعادة توازن النظام قد يؤدي إلى فشل ميكانيكي أو تشغيلي.

الخلاصة

إضافات مقاومة الاشتعال ليست تحسينًا وظيفيًا، بل عنصر أمان بنيوي. اختيارها يجب أن يُبنى على متطلبات التطبيق، والبيئة التنظيمية، وتأثيرها على التركيبة كاملة، لا على اختبار واحد أو نتيجة عملية معزولة.

4. 4 الإضافات المضادة للميكروبات والفطريات

Antimicrobial & Antifungal Additives

في بعض التطبيقات لا يكون الخطر الأكبر هو الكسر أو الاشتعال، بل النمو الميكروبي غير المرئي. فالمنتج قد يؤدي وظيفته ميكانيكيًا بشكل كامل، لكنه يفشل صحيًا أو تنظيميًا بسبب تلوث ميكروبي أو نمو فطري أثناء الاستخدام أو

التخزين.

لهذا تُستخدم الإضافات المضادة للميكروبات كجزء من تصميم النظافة والاستقرار الحيوي، لا كحل تجميلي أو دعائي.

ويجب التفريق بوضوح بين:

- التحكم في الميكروبات داخل المادة
- وبيان الادعاءات الصحية أو الطبية، التي تخضع لتنظيم مختلف تمامًا

- ما المقصود بالنشاط الميكروبي في البلاستيك؟

البلاستيك نفسه لا يُعد غذاءً للميكروبات، لكن:

- الرطوبة
 - الملوثات
 - المواد العضوية السطحية
 - أو ظروف الاستخدام
- قد تتيج نمو بكتيريا أو فطريات على السطح، مما يؤدي إلى:

- روائح
- بقع
- تدهور مظهر
- مخاطر صحية في بعض التطبيقات

- التصنيف الكيميائي للإضافات المضادة للميكروبات

أولاً: الأنظمة غير العضوية المعدنية

تعتمد على أيونات معدنية ذات نشاط مضاد للميكروبات.

- التركيبية:

• Silver-based compounds

• Zinc-based systems

• Copper-based systems

- آلية العمل:

• تعطيل نشاط الخلايا الميكروبية

• التأثير على الإنزيمات والبروتينات

• نشاط طويل الأمد نسبيًا

- الحدود:

• تكلفة مرتفعة

• اعتبارات تنظيمية

• تأثيرات لونية محتملة

ثانيًا: الأنظمة العضوية أنظمة كيميائية عضوية ذات نشاط حيوي محدد.

- التركيبية:

• Organic biocides

• Fungistatic compounds

• Antimicrobial organic systems

- آلية العمل:

• تثبيط النمو

• تعطيل الجدار الخلوي

- تأثير أسرع لكنه أقل دواماً

- ثالثاً: الأنظمة السطحية مقابل الحجمية

- **Bulk additives** : موزعة داخل المادة
- **Surface-active systems** : تعمل قرب السطح

الاختيار بينهما يعتمد على:

- سماكة المنتج
- نوع الاستخدام
- مدة الخدمة المتوقعة

- ماذا تعالج هذه الإضافات؟

- نمو البكتيريا
- نمو الفطريات
- الروائح الحيوية
- تدهور المظهر الناتج عن التلوث

ولا تعالج:

- سوء التصميم الصحي
- الرطوبة العالية
- تلوث خام
- مشاكل تنظيف أو تخزين

- حدود منهجية صارمة

- لا تُستخدم كبديل للتنظيف

• لا تُعوض تصميمًا صحيًا سيئًا

• لا تُمنح صفة “طبية” إلا وفق تشريعات خاصة

• لا تُعتمد دون فهم بيئة الاستخدام

- التداخل مع نظام الإضافات

قد تتداخل مع:

• مثبتات حرارية

• أنظمة اللون

• إضافات السطح

• أنظمة الرائحة والهجرة

ويجب تقييمها ضمن النظام الكامل، خصوصًا في التطبيقات الحساسة.

- الخلاصة :

الإضافات المضادة للميكروبات ليست أداة تسويق، بل أداة ضبط وظيفي في تطبيقات محددة. نجاحها يعتمد على فهم بيئة الاستخدام، واختيار العائلة الكيميائية المناسبة، وربطها بنظام متكامل من التحكم في الرطوبة، السطح، والهجرة، لا على إضافتها كحل منفرد .

4.5 إضافات مقاومة الصدم وامتصاص الطاقة

Impact Modifiers / Anti-Shock Additives

بعد ضبط التركيبة الكيميائية، والتجانس البنيوي، والسلوك السطحي، والقبول الصحي والتنظيمي، تظهر فئة من الإضافات لا تهدف إلى تحسين التشغيل ولا إلى تعديل السطح، بل إلى إعادة تعريف استجابة المادة للإجهاد المفاجئ . كثير من المنتجات البلاستيكية تفشل ليس لأنها ضعيفة ميكانيكيًا في الاختبارات الساكنة، بل لأنها غير قادرة على امتصاص الصدمات أو توزيع الطاقة عند السقوط، الطرق، أو التحميل السريع.

إضافات مقاومة الصدم لا تُستخدم لتعويض تصميم خاطئ، ولا لمعالجة تدهور كيميائي، ولا لإخفاء هشاشة ناتجة عن خامة رديئة، بل تُستخدم عندما يكون البوليمر الأساسي صحيحًا في بنيته، لكنه يحتاج إلى تحسين نمط الكسر وسلوك التشوه ليتوافق مع متطلبات الاستخدام الفعلي.

- ما المقصود بسلوك الصدم في البوليمرات؟

عند تعرض المادة لإجهاد مفاجئ، لا يُقاس الأداء فقط بقيمة القوة القصوى، بل بكيفية:

- امتصاص الطاقة
- توزيع الإجهاد
- تأخير أو تغيير نمط الكسر

البوليمرات الهشة تميل إلى كسر سريع ونظيف، بينما البوليمرات المعدلة بالصدم تُظهر تشوهاً موضعياً، أو انتشاراً متدرجاً للشقوق، ما يسمح بامتصاص طاقة أعلى قبل الفشل.

- التصنيف المنهجي لإضافات مقاومة الصدم

- أولاً: معدلات الصدم المطاطية (Elastomeric Impact Modifiers)

وهي بوليمرات أو أنظمة بوليمرية مرنة تُضاف إلى المصفوفة الصلبة لتكوين طور مطاطي مشتت.

- التركيبة الكيميائية العامة:

- بوليمرات أوليفينية مرنة
- بوليمرات مطاطية معدلة
- أنظمة مطاطية ذات توزيع جزيئي مصمم لامتصاص الإجهاد

- آلية العمل:

تشكيل جزر مطاطية دقيقة داخل البوليمر الصلب تعمل كنقاط امتصاص للطاقة، حيث:

- تنحرف الشقوق
- يتوزع الإجهاد
- يتغير نمط الكسر من هش إلى مطيل

- الحدود:

- قد تقل الصلابة

- قد تتغير الريولوجيا
- يتطلب توازنًا دقيقًا مع البوليمر الأساسي

ثانيًا: معدلات الصدم الهيكلية (Core–Shell Systems)

أنظمة متعددة الطبقات تتكون من نواة مرنة محاطة بقشرة متوافقة مع البوليمر الأساسي.

- التركيبة:

- نواة مطاطية منخفضة معامل المرونة
- قشرة بوليمرية متوافقة مع المصفوفة

- آلية العمل:

تحسين نقل الإجهاد بين الطور المرن والطور الصلب، مع الحفاظ على:

- التجانس
- ثبات الخواص
- توزيع دقيق للطور المطاطي

- الاستخدام النموذجي:

تطبيقات تتطلب توازنًا بين الصدم والصلابة، خصوصًا في البوليمرات الهندسية.

ثالثًا: أنظمة التوافق الصدمي (Compatibilized Impact Systems)

تُستخدم عندما يكون معدل الصدم نفسه غير متوافق طبيعيًا مع البوليمر الأساسي.

- المبدأ:

دمج معدل الصدم مع بوليمر وظيفي متوافق يعمل كوسيط بنيوي، ما يمنع انفصال الأطوار ويحسن كفاءة امتصاص الطاقة.

- ماذا تعالج إضافات مقاومة الصدم؟

تعالج:

- الهشاشة
- الكسر المفاجئ
- ضعف مقاومة السقوط
- فشل التحميل الديناميكي

ولا تعالج:

- تحللًا حراريًا
- رطوبة
- شوائب
- عيوب تشغيل
- ضعفًا ناتجًا عن تصميم خاطئ للسمكة أو الشكل

- تتداخل إضافات مقاومة الصدم مع:

- البوليمرات الوظيفية
- المالنات
- أنظمة اللون
- الريولوجيا
- بعض إضافات السطح

وأي استخدام غير منسق قد يؤدي إلى:

- فقدان صلابة
- تغير في COF
- ضعف لحام أو طباعة

- عدم استقرار بين الدفعات

- الخلاصة :

إضافات مقاومة الصدم ليست علاجاً للشاشة فقط، بل أداة لتصميم سلوك الفشل. نجاحها يعتمد على فهم نمط الإجهاد، واختيار العائلة الكيميائية المناسبة، وربطها بنظام الإضافات كاملاً. وأي اعتماد لها دون هذا الفهم يحولها من حل هندسي إلى تنازل غير محسوب في الخواص.

4.6 إضافات منع التكاثف والضبابية السطحية Anti-Fog Additives

في عدد كبير من تطبيقات الأفلام والمنتجات الشفافة لا يكون فشل المنتج مرتبطاً بضعف ميكانيكي أو عيب تركيبي أو خلل بصري داخلي، بل بفقدان الرؤية أثناء الاستخدام الفعلي. قد يكون الفيلم متجانساً، شفافاً، مضبوط الانزلاق، ومستقرًا كيميائيًا، ومع ذلك يفشل وظيفيًا بسبب تكاثف بخار الماء على السطح وتحوله إلى ضباب يعيق الرؤية. لهذا السبب تُصنّف إضافات Anti-Fog ضمن إضافات الأداء الوظيفي النهائي، لا ضمن أنظمة اللون أو الإضافات البصرية، لأن دورها لا يتعلق بتعديل امتصاص الضوء أو تشتته داخل المادة، بل بالتحكم في سلوك الماء على السطح البلاستيكي عند التعرض للرطوبة أو فروقات الحرارة.

وقد جرى فصل هذا النوع من الإضافات منهجيًا عن أنظمة اللون في هذا الكتاب منعا للخلط الشائع بين العكورة البنيوية والضباب السطحي، إذ إن كلاً منهما ناتج عن آلية فيزيائية وكيميائية مختلفة تمامًا.

- ما المقصود بظاهرة الضباب (Fogging)

الضباب السطحي هو نتيجة مباشرة لتكاثف بخار الماء على سطح بلاستيكي منخفض الطاقة السطحية مثل PE أو PP. عند هذا التكاثف يتجمع الماء على هيئة قطرات دقيقة منفصلة بدلاً من الانتشار كغشاء مستمر. هذه القطرات تعمل كعناصر تشتت ضوئي دقيقة، فتقل الشفافية بشكل حاد رغم أن بنية المادة الداخلية لم تتغير.

وبالتالي فإن المشكلة ليست:

- عكورة داخلية
- تشتتاً ناتجاً عن مائعات أو بلورات
- أو خللاً في اللون

بل مشكلة بلل سطحي وزاوية تماس بين الماء وسطح البوليمر.

- الدور الوظيفي لإضافات Anti-Fog تُستخدم لتعديل خصائص السطح بحيث:

- تمنع تكوّن قطرات ماء منفصلة
 - أو تحوّل التكاثف إلى طبقة مائية رقيقة مستمرة
 - وبذلك تسمح بمرور الضوء دون تشتيت
- وهي لا:

- تمنع تكاثف بخار الماء
 - ولا تمتص الرطوبة من الجو
 - ولا تعالج رطوبة داخل البوليمر
- بل تغيّر سلوك انتشار الماء بعد حدوث التكاثف.

- التركيبة الكيميائية :

من الناحية الكيميائية، تنتمي معظم إضافات Anti-Fog إلى فئة المواد النشطة سطحياً غير الأيونية المصممة للعمل داخل بوليمرات منخفضة القطبية. ويشترك معظمها في بنية ثنائية الوظيفة:

جزء غير قطبي متوافق مع البوليمر، وجزء قطبي محب للماء.

- إسترات الأحماض الدهنية مع الغليسرول Glycerol Fatty Acid Esters

تشمل هذه الفئة مركبات من نوع:

- Mono- and Di-glycerides of fatty acids
- إسترات غليسرولية لأحماض دهنية طويلة السلسلة

الجزء الدهني الطويل يمنح التوافق مع PE و PP، بينما توفر مجموعات الهيدروكسيل في الغليسول قطبية كافية لتعديل بلل السطح. هذه الأنظمة شائعة الاستخدام، وتعطي توازنًا جيدًا بين سرعة التأثير وسهولة المعالجة، لكنها قد تكون حساسة للتداخل مع الشمعيات أو إضافات الانزلاق عالية الهجرة.

- مشتقات السوربيتان وإستراتها

Sorbitan Esters & Ethoxylated Sorbitan

السوربيتان مركب متعدد الهيدروكسيل، وعند أستراته بأحماض دهنية ينتج نظامًا ذا قطبية متوسطة. وتشمل هذه العائلة:

• Sorbitan fatty acid esters

• Ethoxylated sorbitan esters أنظمة إيثرية

تتميز هذه الفئة بقدرة عالية على تعديل زاوية البلل، خصوصًا الأنظمة المؤكسلة (Ethoxylated)، لكنها أكثر حساسية للتداخل مع Slip واللحام والطباعة، وقد تكون أعلى قابلية للهجرة إذا لم يُضبط الوزن الجزيئي بعناية.

- أنظمة إيثرية قائمة على سلاسل بولي إيثر

PEG-based Non-Ionic Systems

تعتمد على سلاسل إيثرية (مثل polyether segments) مرتبطة بجزء دهني متوافق مع البوليمر. توفر هذه الأنظمة قدرة عالية على جذب الماء ونشره، لكنها قد تُظهر:

• استقرارًا أقل على المدى الطويل

• حساسية أعلى للحرارة والرطوبة

• احتمالية تراجع التأثير بعد التخزين

- أنظمة أميدية أو أمينية معدلة قطبيًا

Modified Fatty Amides / Amine-Containing Systems

بعض إضافات Anti-Fog تُبنى على مركبات دهنية تحتوي مجموعات أميدية أو أمينية مع تعديل قطبي. غير أن هذه الأنظمة تُستخدم بحذر شديد بسبب:

- احتمال توليد رائحة
- تداخل مباشر مع مضافات الانزلاق لأن الأميدات عائلة Slip أصلاً
- اعتبارات تنظيمية في بعض التطبيقات

- أنظمة بوليمرية سطحية منخفضة الهجرة

Polymeric / Oligomeric Anti-Fog Systems

وهي أنظمة ذات وزن جزيئي أعلى، صُممت لتقليل الهجرة السريعة وتحقيق أداء طويل الأمد. تُستخدم عندما تكون متطلبات الاستقرار والهجرة صارمة، لكنها تتطلب تصميمًا دقيقًا للتوافق مع البوليمر الأساسي حتى لا تُسبب عيوبًا سطحية.

- آلية العمل السطحية

تمر آلية العمل بثلاث مراحل مترابطة:

أولاً: الذوبان والتوزيع

تذوب الإضافة داخل المصهور أثناء التصنيع وتنتشر داخل المصفوفة البوليمرية.

ثانيًا: الهجرة السطحية المنضبطة

بعد التبريد، تبدأ الإضافة بالتحرك نحو السطح وفق توازن بين القطبية والوزن الجزيئي، دون انفصال كامل عن المصفوفة.

ثالثًا: تعديل سلوك الماء

عند تكاثف بخار الماء، يتموضع المجموعات القطبية على السطح وتسمح بانتشار الماء كغشاء رقيق بدلاً من تكوين قطرات منفصلة، فتختفي الضبابية.

- التداخل مع نظام الإضافات مباشرة مع:

- Slip Additives تنافس على السطح

- Polymer Waxes

- Anti-Block

Corona Treatment

ظروف التخزين والزمن

وأي خلل في هذا التوازن قد يؤدي إلى ضعف الأداء أو عدم ثباته.

- ماذا تعالج وماذا لا تعالج؟

تعالج:

الضباب الناتج عن التكاثف

فقدان الرؤية السطحية

مشاكل الشفافية أثناء الاستخدام الرطب

ولا تعالج:

رطوبة داخل المادة

شوائب أو تلوث

عيوب بنيوية

سوء تصميم السماكة أو التطبيق

- الخلاصة :

إضافات Anti-Fog ليست إضافات بصرية ولا حلول رطوبة، بل أدوات تحكم سطحي دقيق في تفاعل الماء مع البوليمر. نجاحها يعتمد على اختيار العائلة الكيميائية المناسبة، وضبط الهجرة، وربطها بنظام الإضافات السطحية كاملاً، مع اختبار الأداء في ظروف استخدام حقيقية زمنًا وبيئةً.

4.7 إضافات منع الرغوة والتحكم في الفقاعات

Anti-Foam & Defoaming Additives

الرغوة ليست دائماً عيباً بصرياً فقط، بل قد تكون مؤشراً على خلل في المصهور أو في عمليات الخلط، التفرغ، أو المعالجة اللاحقة. ظهور الفقاعات أو الرغوة أثناء البثق أو الخلط أو التحبيب قد يؤدي إلى عدم استقرار السطح، ضعف ميكانيكي موضعي، أو تذبذب في الخواص. لهذا تُستخدم إضافات Anti-Foam كأدوات تحكم تشغيلي وبنوي، لا كحلول تجميلية، ويجب فصلها منهجياً عن إضافات السطح أو الانزلاق.

- ما المقصود بالرغوة في الأنظمة البوليمرية؟

الرغوة تنشأ من:

- احتجاز غازات (هواء، بخار ماء، نواتج تحليل)
- أو من مواد ذات نشاط سطحي غير مرغوب
- أو من خلط غير متجانس

وقد تظهر:

- داخل المصهور
- أو أثناء الخلط
- أو في مراحل ما بعد التصنيع

- التركيبة الكيميائية لإضافات Anti-Foam

- أنظمة سيليكونية Silicone-Based Defoamers

تعتمد على بوليمرات سيليكونية ذات طاقة سطحية منخفضة جداً. تعمل على كسر الفقاعات عبر إضعاف جدار الفقاعة بسرعة. فعالة جداً بجرات صغيرة، لكنها قد تسبب:

- عيوب سطحية
- تداخل مع الطباعة
- مشاكل تجانس إذا أسيء استخدامها

- أنظمة غير سيليكونية Non-Silicone Defoamers

- كحولات دهنية طويلة السلسلة

- إسترات دهنية

- أنظمة شمعية معدلة

أقل عدوانية من السيليكون، وأكثر توافقاً مع بعض الأنظمة، لكنها تحتاج جرعات أعلى.

- أنظمة بوليمرية منخفضة الذوبان Polymeric Defoaming Systems

أنظمة مصممة لتكون غير قابلة للذوبان الكامل في المصهور، فتعمل كنقاط كسر للرغوة دون انتشار مفرط.

- آلية العمل :

تعتمد إضافات Anti-Foam على:

- خفض الاستقرار السطحي لجدار الفقاعة

- كسر التوازن بين الطور الغازي والبوليمري

- السماح بخروج الغاز واندماج الفقاعات

- ماذا تعالج وماذا لا تعالج ؟

تعالج:

- الرغوة الناتجة عن الخلط

- الفقاعات التشغيلية

- عدم استقرار المصهور

ولا تعالج:

- رطوبة عالية غير مُزالة

- تحلل حراري

- تلوث خام

- تصميم تفريغ سيئ

- الخلاصة :

إضافات Anti-Foam أدوات تحكم دقيقة تُستخدم عند تشخيص سبب الرغوة بشكل صحيح. استخدامها دون فهم مصدر الغاز أو الخلل قد يخفي المشكلة مؤقتاً دون حلها جذرياً، وهو ما يتعارض مع منهج هذا الكتاب القائم على معالجة السبب لا العرض.

- الجدول الختامي الجامع لإضافات Anti-Additives

- جدول (1) إضافات مقاومة العيوب البنيوية واضطرابات المصهور

الإضافة	ما لا تعالجه	آلية العمل	الظاهرة التي تقاوم	الإضافة
Anti-Block	COF غير مضبوط	خشونة ميكروية تقلل مساحة التلامس	التصاق الأسطح	Anti-Block
Slip Additives	الالتصاق الفيزيائي	طبقة سطحية منخفضة الاحتكاك	احتكاك مرتفع	Slip Additives
Anti-Static	تولد الشحنة نفسه	طبقة موصلة جزئياً/تفريغ	تراكم الشحنات	Anti-Static
Anti-Stick	عيوب بنيوية	تعديل طاقة السطح	الالتصاق بالأسطح/المعادن	Anti-Stick

الإضافة	ما لا تعالجه	آلية العمل	الظاهرة التي تُقاوم	الإضافة
Corona Treatment*	هجرة مفرطة، تلوث	رفع طاقة السطح (فيزيائي)	ضعف التصاق الحبر	Corona Treatment*

- جدول (2) إضافات مقاومة الظواهر السطحية أثناء الاستخدام :

الإضافة	الظاهرة التي تقاوم	ما لا تعالجه	آلية العمل الأساسية
Anti-Gel Additives	الجلّات وتكتلات المصهور	رطوبة، شوائب صلبة، تحلل حراري	تحسين التفتك والتجانس وتقليل بقايا غير منصهرة
Anti-Fish-Eye Additives	نقاط/عيون سطحية	تلوث خام، فلترة سيئة	تحسين البلل والتجانس وتقليل انفصال الأطوار
Anti-Sharkskin / Anti-Melt Fracture	تشقق السطح عالي القص	رطوبة، تصميم برغي ضعيف	تعديل الجريان قرب القالب (PPAs)
Degassing Aids	احتجاز غازات	تولّد بخار ماء مستمر	تسهيل تحرر الغازات من المصهور
Vacuum Venting Systems	غازات متحررة	تجفيف الخام أو منع تولّد البخار	سحب الغازات بعد تحررها
Anti-Foam / Defoaming	رغوة مستقرة	رطوبة، تحلل حراري، Venting ضعيف	كسر استقرار جدار الفقاعة
Desiccants / Moisture Scavengers	بخار ماء	رغوة نشاط سطحي	امتصاص/تحييد الرطوبة

ليست إضافة كيميائية لكنها جزء من منظومة. Anti-Surface-Failure.

- جدول (3) إضافات مقاومة الظواهر البصرية غير المرغوبة :

الظاهرة	الإضافة	آلية العمل	ما لا تعالجه
ضباب التكاثف	Anti-Fog	تحويل القطرات لغشاء مائي	رطوبة داخلية
عكورة سطحية	Anti-Haze	ضبط التشتت السطحي	عكورة بنيوية
نزف إضافات	Anti-Bloom	تقليل الهجرة/رفع الوزن الجزيئي	سوء اختيار الإضافات
اصفرار	Anti-Yellowing	تنشيط حراري/ضوئي	تلوث أو احتراق

- جدول (4) إضافات مقاومة الفشل الميكانيكي والأدائي :

الظاهرة	الإضافة	آلية العمل	ما لا تعالجه
الكسر الهش	Anti-Shock / Impact Modifiers	امتصاص الطاقة/تغيير نمط الكسر	تحلل، شوائب
التشقق الإجهادي	Anti-Crack / ESCR	تحسين نقل الإجهاد/التوافق	تصميم سماكة سيئ
فشل دوري	Anti-Fatigue	توزيع الإجهاد	إجهاد زائد غير مصمم

- جدول (5) إضافات مقاومة المخاطر الصحية والتنظيمية :

الظاهرة	الإضافة	آلية العمل	ما لا تعالجه
نمو بكتيري	Antimicrobial	تعطيل النشاط الحيوي	رطوبة/تلوث
نمو فطري	Antifungal	تنشيط/تعطيل	تصميم صحي ضعيف
روائح	Anti-Odor	امتصاص/تحييد/منع تولد	مصدر التحلل
الهجرة	Anti-Migration	رفع الوزن الجزيئي/الاحتجاز	اختيار خام خاطئ
الاشتعال	Flame Retardants (Anti-Flame)	تعطيل مسار الاشتعال	ضعف بنيوي
الدخان	Smoke Suppressants	تقليل الانبعاث	الاشتعال نفسه

- جدول (6) الربط السببي (Decision Matrix) :

العيب الظاهر	أول أداة تُراجع	إن لم تنجح
فقايعات/رغوة	تشخيص: رطوبة أم رغوة؟	Anti-Foam + Desiccant Venting
التصاق الأسطح	Anti-Block	Slip مضبوط

العيب الظاهر	أول أداة تُراجع	إن لم تنجح
صعوبة الفتح	Slip + Anti-Block	ضبط الهجرة
ضباب على السطح	Anti-Fog	مراجعةSlip/Wax
فشل الطباعة	Corona + ضبط السطح	تقليل الهجرة
هشاشة	Impact Modifier	Compatibilizer
رائحة	Prevention + Absorber	ضبط التشغيل
فشل تنظيمي	Anti-Migration	إعادة تصميم التركيبة

الباب الخامس

الباب الخامس فلسفة الإختبار فى البوليمرات : من توصيف المادة إلى إعتداد الأداء :

The philosophy of testing in polymers: from material characterization to performance evaluation

5.1 الفصل الأول مقدمة طرق إختبار البوليمرات وتفسير نتائجها

- المختبر كمنطلق للتصنيع الناجح :

تُعد اختبارات البوليمرات أحد الأعمدة الأساسية في صناعة البلاستيك، غير أن قيمتها الحقيقية لا تكمن في الأرقام التي تنتج عنها بقدر ما تكمن في طريقة فهمها وربطها بسلوك المادة أثناء التصنيع والاستخدام. فالبلاستيك مادة تتأثر بعدد كبير من المتغيرات الفيزيائية والكيميائية، مثل الحرارة والقص والزمن والإضافات والتاريخ الحراري، الأمر الذي يجعل التعامل معها قائمًا على التحليل المنهجي لا على الانطباع أو التجربة العشوائية.

ومن هذا المنطلق، لا يمكن النظر إلى الاختبارات على أنها إجراءات لاحقة للإنتاج، بل يجب اعتبارها جزءًا بنيويًا من عملية التصنيع نفسها، تبدأ قبل الإنتاج وتستمر أثناءه وتحقق بعده.

- المختبر: المصنع الحقيقي لصناعة البلاستيك :

في التصور الصناعي المتقدم، لا يُنظر إلى المختبر على أنه مجرد وحدة فحص أو قسم جودة تابع للإنتاج، بل يُعد المختبر المركز الحقيقي الذي تُبنى فيه القرارات التقنية. فالمختبر هو المكان الذي يتم فيه فهم المادة، وتصميم سلوكها، والتحقق من صلاحية التركيبة قبل الانتقال إلى الإنتاج واسع النطاق.

ويؤدي المختبر ثلاث وظائف مترابطة لا يمكن فصل إحداها عن الأخرى:

- **توصيف المادة:** فهم الخصائص الأساسية للبوليمر وسلوكه تحت ظروف مختلفة.
- **تصميم المادة:** تعديل السلوك من خلال الإضافات ونسبها وشرائط المعالجة.
- **التحقق المسبق:** إنتاج نماذج مصغرة وفحصها للتأكد من تحقيق المتطلبات قبل التنفيذ الصناعي.

وبناءً على ذلك، فإن المعدات الموجودة في المصنع لا تمثل سوى أدوات تنفيذ لما تم التوصل إليه داخل المختبر. فالإنتاج الصناعي الناجح هو في جوهره تكرار منضبط لما تم إثباته مسبقاً على نطاق مخبري.

- الإنتاج يبدأ في المختبر !!

يعتمد التصنيع السليم على تسلسل منطقي واضح يبدأ في المختبر ولا ينتهي فيه:

- فحص المواد الأولية قبل استخدامها.
- إجراء تجارب تصنيع مصغرة كاملة داخل المختبر تشمل التشغيل وإنتاج عينات فعلية.
- فحص المنتج الناتج مخبرياً وفق متطلبات المواصفة.
- تثبيت التركيبة ونسب الإضافات وظروف التشغيل المعتمدة.
- تنفيذ الإنتاج واسع النطاق بوصفه مرحلة تكرار لا مرحلة اكتشاف.
- فحص عينات من الإنتاج للتحقق من المطابقة والتدقيق، لا لاكتشاف الأخطاء.

وبهذا يصبح فحص الإنتاج الصناعي أداة تأكيد لما تم إثباته علمياً، لا وسيلة لمحاولة تصحيح نتائج غير مدروسة.

- فلسفة الاختبار في صناعة البلاستيك :

الاختبار في صناعة البلاستيك ليس غاية بحد ذاته، بل وسيلة لاتخاذ قرار. وقبل إجراء أي اختبار، يجب أن يكون الهدف واضحاً: هل الغاية قبول مادة خام، أم تطوير تركيبة، أم تشخيص مشكلة تشغيل، أم مطابقة منتج نهائي؟

ويترتب على اختلاف الهدف اختلاف نوع العينة، وطريقة تحضيرها، وشروط القياس، وطريقة تفسير النتيجة. ولهذا لا قيمة لأي رقم مختبري ما لم يُذكر معه شرط القياس والسياق الذي أُجري فيه.

ويعتمد هذا الكتاب قاعدة أساسية في قراءة النتائج:

لا توجد نتيجة بلا شرط، ولا شرط بلا سبب، ولا رقم بلا تفسير.

كما أن أي اختبار منفرد لا يقدّم صورة كاملة عن البوليمر، بل يقدّم نافذة محددة على جانب واحد من سلوكه، ولا تكتمل الرؤية إلا بربط عدة اختبارات معاً ضمن سياق واحد.

- منهجية عرض الاختبارات في هذا الفصل :

يُعرض كل اختبار في هذا الفصل وفق منهجية ثابتة تشمل:

- ما الذي يقيسه الاختبار.
- المبدأ الفيزيائي أو الكيميائي الذي يعتمد عليه.
- جهاز الاختبار ووظيفته العملية.
- تحضير العينة وأثره على النتيجة.
- شروط الاختبار وكيفية اختيارها.
- ما الذي يمكن استنتاجه، وما الذي لا يمكن استنتاجه.
- مصادر الخطأ وسوء التفسير الشائعة.
- الربط بين نتيجة الاختبار وسلوك المادة والإضافات والمنتج النهائي.

- فحوصات شركات البتروكيماويات: من المصدر إلى الحبيبات

على الرغم من أن هذا الكتاب يتناول اختبارات البوليمرات من زاوية المصانع التحويلية، حيث تُعد الحبيبات مادة خام، فإن من الضروري التوقف بإيجاز عند منظومة الفحوصات التي تُجريها شركات البتروكيماويات قبل وصول البوليمر إلى هذه الصورة. فالحبيبات ليست نقطة البداية في السلسلة الصناعية، بل هي نقطة تسليم تفصل بين مرحلتين مختلفتين في طبيعة العمل، والاختبارات، وأهداف القياس.

تجرى فحوصات البتروكيماويات بمنهج تحكمي-تشغيلي يهدف إلى ضمان استقرار العملية وجودة المنتج النهائي (الحبيبات)، وليس إلى اختيار تطبيق أو تصميم منتج نهائي، وهو ما يميزها جوهرياً عن الاختبارات التي تُجرى لاحقاً في مختبرات المصانع التحويلية.

- أولاً: فحوصات مرحلة الاستخراج والمعالجة الأولية

في هذه المرحلة، لا يكون الهدف إنتاج بوليمر، بل ضمان نقاء واستقرار اللقيم. وتشمل الفحوصات هنا:

- تحليل تركيب النفط أو الغاز
- قياس نسب الشوائب
- مراقبة المحتوى الكبريتي أو الرطوبة أو الغازات الحمضية

- فحوصات فيزيائية وكيميائية تضمن ملائمة المادة لعمليات التكرير أو الفصل اللاحقة

هذه الفحوصات ذات طابع كيميائي بحث، ولا تمتد آثارها مباشرة إلى خصائص البوليمر، لكنها تشكّل الأساس الذي تُبنى عليه جميع المراحل اللاحقة.

- ثانيًا: فحوصات اللقيم البتروكيميائي

بعد التكرير أو الفصل، يُحوّل المصدر الطبيعي إلى لقيم مناسب للبلمرة، مثل النافثا أو الإيثان أو البروبان. وتُجرى هنا فحوصات تهدف إلى:

1. تأكيد نقاء اللقيم
2. استقرار تركيبه
3. ملائمة لظروف التفاعل
4. خلوه من مركبات قد تُعطّل المحفزات

هذه الفحوصات لا تهدف إلى توصيف منتج، بل إلى حماية العملية التفاعلية وضمان استمراريتها.

- ثالثًا: فحوصات المونومر قبل البلمرة (Monomer Quality Control)

بعد تحويل اللقيم إلى مونومرات صالحة للبلمرة (مثل الإيثيلين، البروبلين، الستايرين وغيرها)، تُجرى منظومة فحوصات دقيقة تُعد من أكثر مراحل الاختبار حساسية في الصناعة البتروكيميائية، نظرًا لتأثيرها المباشر على سلوك التفاعل، ونشاط المحفز، وبنية السلسلة البوليمرية الناتجة.

وتشمل هذه الفحوصات عادةً:

قياس نقاوة المونومر (Monomer Purity)

تحليل آثار الرطوبة (Moisture / ppm-level)

الكشف عن الأكسجين أو المركبات المؤكسدة

تحليل الملوثات القطبية أو الكبريتية

مراقبة المركبات التي قد:

تُسَمَّى المحفز

تغيّر آلية نمو السلسلة

تؤدي إلى تفرعات أو توقف مبكر للتفاعل

هذه الفحوصات لا تهدف إلى توصيف البوليمر المستقبلي، بل إلى حماية التفاعل ذاته وضمان أن يبدأ التكوين الجزيئي في بيئة مضبوطة وخاضعة للتحكم الكامل.

- رابعاً : فحوصات أثناء البلمرة (التحكم في العملية)

خلال تفاعل البلمرة، تُجرى فحوصات مستمرة أو دورية داخل المصنع، مثل:

1. مراقبة معدل التحويل
2. تقدير الوزن الجزيئي أو توزيعه
3. متابعة نشاط المحفز
4. قياس خواص ريولوجية للمصهور داخل المفاعل

هذه الفحوصات ذات طابع تشغيلي لحظي، ولا تُجرى على منتج نهائي، بل على مادة في طور التشكل، وهدفها الأساسي ضبط التفاعل لا توصيف المادة للاستخدام الصناعي.

- خامساً : فحوصات ما قبل البثق وصناعة الحبيبات

قبل تحويل البوليمر إلى حبيبات، تُجرى فحوصات للتأكد من:

- 1- إزالة بقايا المحفزات
- 2- استقرار المصهور
- 3- تجانس الخواص
- 4- ملائمة المادة لعملية التحبيب نفسها

وهذه المرحلة تمثل الجسر الأخير بين التفاعل الكيميائي والمنتج التجاري.

- سادسا: فحوصات الحبيبات او البوليمر (اعتماد المنتج التجاري)

عند هذه النقطة، تصبح الحبيبات او البوليمر منتجًا نهائيًا بالنسبة لشركة البتروكيماويات. وتُجرى عليها فحوصات تهدف إلى:

توحيد المواصفات

إعداد النشرات الفنية (Datasheets)

ضمان الاتساق بين الدفعات

تلبية متطلبات السوق الصناعي

وهنا فقط تبدأ الفحوصات التي تشبه في مظهرها تلك المستخدمة في المصانع التحويلية، مثل اختبار السيولة والكثافة والخصائص الحرارية

من الضروري التمييز بين:

- اختبارات البتروكيماويات: اختبارات تحكم وجودة تهدف إلى إنتاج حبيبات مستقرة ومتسقة
- اختبارات المصانع التحويلية: اختبارات قرار وتصميم تهدف إلى اختيار التطبيق، وضبط التصنيع، واعتماد المنتج النهائي

وبهذا التمييز، تصبح الحبيبات او البوليمر النهائي نقطة التقاء بين عالمين مختلفين في الهدف والمنهج، وهو ما يفسر اختلاف فلسفة الاختبارات بين الطرفين، رغم تشابه بعض الأدوات.

- من اعتماد البوليمر إلى دور المختبر الصناعي

يتضح مما سبق أن منظومة الفحوصات التي تُجرىها شركات البتروكيماويات تمتد من مراحل الاستخراج والمعالجة الأولية، مرورًا باللقيم والبلمرة، وانتهاءً بالحبيبات بوصفها منتجًا نهائيًا معتمدًا وجاهزًا للتداول الصناعي. وتُعد هذه الفحوصات كافية من منظور المنتج البتروكيماوي لضمان اتساق الصنف واستقراره ضمن الحدود التصميمية التي وُضع لها.

إلا أن انتقال البوليمرات من بوابة شركة البتروكيماويات إلى بوابة المصنع التحويلي لا يعني نهاية مسار الاختبار، بل بداية مسار جديد يختلف في الهدف والمنهج. ففي هذه النقطة تنتقل المسؤولية التقنية من مُصنِّع البوليمر إلى مستخدمه، وتتحول الحبيبات من منتج نهائي إلى مادة خام يُبنى عليها قرار التصنيع، والاستثمار، وجودة المنتج النهائي.

وهنا يبرز الدور الحقيقي للمختبر في المصانع التحويلية، ليس بوصفه أداة تحقق روتيني مما ورد في نشرة البيانات DATASHEET، بل بوصفه مركزاً لاتخاذ القرار، وحلقة وصل بين التصميم النظري والتطبيق العملي. فالمختبر لا يقتصر دوره على إعادة إجراء اختبارات معروفة، بل يمتد ليشمل فهم ما استُلم فعلياً، وكيف سيتصرف داخل خطوط الإنتاج، وتحت ظروف التشغيل الخاصة بكل مصنع.

إضافة إلى ذلك، لا ينبغي النظر إلى المختبر على أنه ذراع رقابية فقط، بل يجب أن يُعامل بوصفه وحدة بحث وتطوير داخلية. فالإكتفاء بشراء صنف محدد وتشغيله بطريقة تقليدية قد يحقق استقراراً قصير الأمد، لكنه لا يضمن تطوراً أو قدرة تنافسية مستدامة. في المقابل، يُفترض أن يستمر الإنتاج التقليدي في خطوطه المعتمدة، بينما يعمل المختبر بالتوازي على:

- 1- دراسة أصناف بديلة أو مكافئة،
- 2- تحليل تأثير إضافات مختلفة على الأداء والكلفة،
- 3- تحسين شروط التشغيل لرفع الإنتاجية أو تقليل الهدر
- 4- تطوير منتجات جديدة أو خصائص إضافية تلبي متطلبات سوق متغيرة.

وبهذا المعنى، يصبح المختبر ليس فقط نقطة بداية للتصنيع، بل محركاً مستمراً للتطوير، ووسيلة لانتقال المصنع من مرحلة التشغيل إلى مرحلة التصميم والتحسين ومن هذا المنطلق، تأتي الاختبارات التي ستعرض في الفصول التالية بوصفها أدوات عمل داخل هذا المختبر، تُستخدم لا لفحص المادة فحسب، بل لفهمها، وتطويرها بما يخدم أهداف المصنع التقنية والاقتصادية على حد سواء.

- المختبر في المصانع التحويلية :

استناداً إلى ما سبق، يتبين أن اختبارات المصانع التحويلية لا تُجرى لمجرد إعادة ما قامت به شركات البتروكيماويات، ولا تمارس بوصفها إجراءات تحقق روتينية من بيانات مُعلنة سلفاً، بل تُصمَّم لتخدم هدفاً مختلفاً كلياً. فالمختبر داخل المصنع التحويلي يعمل في سياق تشغيلي واقتصادي محدد، وتكون أسئلته مختلفة بطبيعتها: كيف ستصرف هذه المادة داخل هذه الآلة؟ كيف ستفاعل مع ظروف التشغيل الفعلية؟ وما هو الهامش الآمن للتعديل قبل أن يتأثر الاستقرار أو الجودة أو الكلفة؟

ومن هذا المنطلق، تبنى اختبارات المختبر التحويلي على منهج قرار لا على منهج اعتماد منتج. فهي لا تبحث عن تطابق اسمي مع صنف محدد، بل عن توافق عملي مع تطبيق بعينه. كما أنها لا تُفسر نتائجها بمعزل عن ظروف التشغيل، ولا تُقرأ أرقامها كقيم مطلقة، بل كمؤشرات تُستخدم لبناء تصور متكامل عن سلوك المادة قبل وأثناء وبعد التصنيع.

5.2 الفصل الثاني الاختبارات

- 5.2.1 اختبارات توصيف المادة قبل التصنيع النهائي

(Material Characterization Tests)

- الاختبارات وتفسير نتائجها :

تمثل الاختبارات العملية أداة أساسية لفهم سلوك المواد البوليمرية وتقييم ملاءمتها للتطبيقات الصناعية المختلفة. وقد جرى العرف في المراجع الأكاديمية والمعايير الفنية على تصنيف هذه الاختبارات وفق نوع الخاصية التي يتم قياسها، مثل الاختبارات الفيزيائية أو الميكانيكية أو الحرارية أو الزمنية، وهو تصنيف مفيد من الناحية التعليمية والتنظيمية، ويساعد على توحيد لغة الفحص بين المختبرات والمصانع.

إلا أن التطبيق الصناعي العملي يكشف أن هذا التصنيف التقليدي، على الرغم من أهميته، لا يكون كافياً وحده لتفسير نتائج الاختبارات أو ربطها بأسبابها الفعلية. فالعديد من الاختبارات التي يُنظر إليها نظرياً بوصفها اختبارات “مادة خام” لا يمكن إجراؤها إلا على عينات مشكّلة، لا لأنها تمثل المنتج النهائي، بل لأنها الوسيلة الوحيدة لفهم سلوك المادة البوليمرية نفسها. كما أن وجود ظروف مثل الحرارة أو الحمل أو القص أثناء الاختبار لا يعني بالضرورة أن الاختبار حراري أو ميكانيكي بطبيعته، إذ تكون هذه الظروف في كثير من الحالات مجرد شروط اختبار وليست هدفه الأساسي.

ففي الواقع الصناعي، لا تُقرأ نتائج الاختبارات بمعزل عن سياقها، ولا يُنظر إلى الاختبار بوصفه غاية مستقلة، بل كأداة تشخيصية تهدف إلى الإجابة عن سؤال عملي محدد:

هل السلوك الملاحظ ناتج عن طبيعة المادة الخام؟

أم عن تركيبة المادة والإضافات المستخدمة؟

أم عن ظروف التشغيل والتصنيع؟

أم عن تأثير الزمن أو البيئة المحيطة؟

وانطلاقاً من هذا المفهوم، يعتمد هذا الكتاب في الجزء الثاني منهجاً وظيفياً في عرض الاختبارات وتفسير نتائجها، دون إلغاء أو إنكار للتصنيف التقليدي المعتمد. ويقوم هذا المنهج على ربط كل اختبار بهدفه التشخيصي، وإرجاع نتائجه إلى أصلها المحتمل، بدل الاكتفاء بتصنيفه الشكلي ضمن فئة فيزيائية أو ميكانيكية أو حرارية.

وعليه، لا تعرض الاختبارات في هذا الجزء بوصفها قوائم أو إجراءات معزولة، بل كأدوات لفهم السلوك الحقيقي للمادة البوليمرية في مختلف مراحل استخدامها الصناعي. وسيتم التأكيد في كل مجموعة من الاختبارات على ما يمكن استخلاصه من النتائج، وما لا يجوز استنتاجه، وحدود كل اختبار، ودوره ضمن منظومة القرار الصناعي ككل.

بهذا الأسلوب، يهدف هذا الجزء إلى مساعدة القارئ على قراءة نتائج الاختبارات قراءة واعية ومتوازنة، تميّز بين ما يعود إلى المادة نفسها، وما يرتبط بتركيبها أو بطريقة تشغيلها، وصولاً إلى قرارات صناعية أكثر دقة وواقعية.

يقتصر نطاق اختبارات توصيف المادة قبل التصنيع النهائي على دراسة المادة البوليمرية بوصفها مادة ذات بنية وسلوك أساسيين، قبل الدخول في مرحلة التصنيع الفعلي للمنتج النهائي. ولا تهدف هذه الاختبارات إلى الحكم على الأداء الوظيفي للمنتج أو صلاحية استخدامه النهائي، بل تستخدم لتكوين صورة أولية عن هوية المادة وبنيتها العامة ونطاق خصائصها الأساسية، بما يسمح باتخاذ قرار مبدئي بشأن إمكانية الانتقال إلى مرحلة التجربة التصنيعية.

وتعد نتائج هذه الاختبارات محدودة بطبيعتها، إذ لا تغني عن الاختبارات اللاحقة التي تجرى أثناء التشكيل أو بعد إنتاج المنتج النهائي، ولا يجوز الاعتماد عليها وحدها لاستنتاج سلوك المادة تحت ظروف التشغيل الفعلية. فالمادة البوليمرية في هذه المرحلة تدرس في حالتها الساكنة نسبياً، أو في صورة عينات اختبار تُستخدم لغرض التوصيف لا لغرض تمثيل المنتج النهائي.

وبانتهاء مرحلة توصيف المادة، يكون المختبر قد كوّن فهماً أولياً لطبيعة البوليمر وبنيته ونطاق خصائصه العامة، إلا أن هذه الصورة، على أهميتها، تظل غير مكتملة ما لم تُستكمل بدراسة سلوك المادة عند تعرّضها لظروف التشغيل الواقعية داخل آلات التصنيع. فالانتقال من البوليمر إلى المنتج لا يتم في فراغ، بل يمر عبر مراحل تسخين وقص وتدقيق وتبريد، وهي ظروف تُظهر جوانب من السلوك لا يمكن استنتاجها من اختبارات التوصيف وحدها.

وعليه، فإن ما يلي من اختبارات لا يهدف إلى إعادة توصيف المادة، بل إلى فهم كيفية تفاعل بنيتها مع متغيرات التشغيل المختلفة، تمهيداً للانتقال من المختبر إلى التجربة التصنيعية. أما اختبارات توصيف المادة نفسها، فتبدأ دائماً بخطوات بسيطة وغير إتلافية، تُستخدم لرصد المؤشرات الأولية التي قد تعكس طبيعة المادة وتاريخها وظروف تعاملها السابقة، ويأتي في مقدمتها الفحص البصري.

- 2.5.2 : اختبار الفحص البصري للبوليمر بوصفة مادة خام

(Visual Inspection of Raw Polymer)

- موقع الفحص البصري في تسلسل الاختبارات :

يُعد الفحص البصري نقطة البداية المنهجية توصيف المادة قبل التصنيع النهائي ، ويأتي قبل أي اختبار عددي أو قياسي. فعلى الرغم من بساطته الظاهرية، يوفر هذا الاختبار معلومات أولية بالغة الأهمية، ويُشكل الأساس الذي تُبنى عليه قراءة نتائج الاختبارات اللاحقة. فكثير من العيوب البنيوية أو التشغيلية يمكن اكتشافها منذ هذه المرحلة، وإذا أهملت، قد تؤدي إلى سوء تفسير نتائج أكثر تقدماً.

- ما الذي يقيسه الفحص البصري فعلياً؟

لا يهدف الفحص البصري إلى قياس خاصية رقمية، بل إلى تقييم المظهر العام والبنية الظاهرة للمادة كما استلمت، والكشف عن مؤشرات قد تدل على عدم تجانس أو تدهور أو مشاكل في المعالجة السابقة. وهو اختبار نوعي تشخيصي يقدّم صورة أولية عن حالة المادة قبل إخضاعها لأي ظروف اختبارية.

- أدوات الفحص وحدوده :

يعتمد الفحص البصري على:

1- العين المجردة في إضاءة مناسبة،

2- عدسة مكبرة بسيطة (يدوية أو إلكترونية منخفضة التكبير)

3- مشرط وأدوات تثبيت مثل الملقط المعدني

ولا يتطلب هذا الفحص مجاهر دقيقة أو أجهزة قياس متخصصة، كما لا يُستخدم لإصدار أحكام نهائية، بل لتوجيه مسار الاختبارات التالية وتحديد نقاط الحذر.

- أولاً إجراءات الفحص البصري :

1. مظهر الحبيبات وتجانسها الخارجي :

يُلاحظ شكل الحبيبات وحجمها وانتظامها، ومدى تجانسها داخل العينة الواحدة. التفاوت الواضح في الحجم أو الشكل قد يشير إلى اضطراب في عملية التقطيع إلى حبيبات أو ما اصطلح على تسميته (التحبيب) أو اختلاف في ظروف التشغيل أثناء البثق.

2. اللون ودرجة التوحد :

يُفحص اللون من حيث تجانسه ودرجته، مع الانتباه إلى وجود بقع داكنة أو شفافة أو اختلافات غير مبررة بين الحبيبات. وقد يكون اختلاف اللون مؤشرًا على تدهور حراري، أو تلوث، أو خلط بين درجات مختلفة.

3. الشوائب والملوثات المرئية :

يُلاحظ وجود أي جسيمات غريبة، أو بقايا معدنية، أو ألياف، أو غبار ملتصق بالحبيبات. وتُعد هذه الملاحظات ذات أهمية خاصة، لأن أثرها قد يكون كبيرًا أثناء التشكيل حتى عند وجودها بنسب منخفضة.

4. الملمس والمظهر السطحي :

يُقيّم السطح من حيث نعومته أو خشونته، ووجود آثار ذوبان جزئي، أو التصاق بين الحبيبات، أو تكثف غير طبيعي. وقد تشير هذه المظاهر إلى ظروف تخزين غير مناسبة أو تعرض سابق لحرارة أو رطوبة.

5. فحص المقطع الداخلي للحبيبات

ضمن إجراءات الفحص البصري، يقوم الفاحص إلى فحص البنية الداخلية لبعض الحبيبات عند وجود مؤشرات غير طبيعية في المظهر الخارجي. ويتم ذلك باختيار حبيبات عشوائيًا، أو اختيار حبيبات يظهر عليها انتفاخ أو زيادة في الحجم مقارنة ببقية العينة، ثم قطعها باستخدام مشرط نظيف وفحص مقطعها تحت عدسة مكبرة.

وجود ثقب داخلية أو فقاعات أو فراغات واضحة في مقطع الحبيبة يُعد مؤشرًا على وجود غازات محتبسة أو اضطراب في عملية المعالجة أو (التحبيب) السابقة. ولا يُفسّر هذا المؤشر بمعزل عن التطبيق المطلوب، بل يُقيّم بناءً على حساسية المنتج النهائي لهذه الظاهرة، وكذلك على نسبة تكرار هذه الحبيبات داخل العينة المفحوصة.

-كيف يفكر الفاحص أثناء الفحص البصري؟

لا يُستخدم الفحص البصري لإصدار قرار قبول أو رفض مباشر، بل لتكوين سياق بصري يساعد الفاحص على:

- 1- فهم طبيعة العينة قبل القياس
 - 2- تعديل طريقة تحضير العينات اللاحقة إن لزم
 - 3- وتفسير النتائج العددية ضمن إطار واقعي
- فالفحص البصري لا يجب عن سؤال هل المادة صالحة؟ بل عن سؤال أكثر دقة: هل ما أراه يتوافق مع ما يفترض أن تكون عليه هذه المادة؟

- حدود الفحص البصري والربط بما بعده :

لا يقدم الفحص البصري معلومات عن السيولة أو الكثافة أو السلوك الحراري أو الميكانيكي، لكنه يضمن أن تكون هذه الاختبارات مبنية على عينة مفهومة السياق وخالية من مؤشرات قد تفسد تفسير النتائج. وبعد استكمال الفحص البصري، يصبح من المنطقي الانتقال إلى أول اختبار عددي يصف سلوك المادة في الحالة المنصهرة، وهو اختبار السيولة.

5.2.3 اختبار السيولة (MFI / MFR)

مبدأ القياس وتفسير النتائج :

يُعد اختبار السيولة من أكثر الاختبارات استخدامًا في صناعة البلاستيك، وهو في الوقت نفسه من أكثرها تعرضًا لسوء الفهم. ويقاس هذا الاختبار معدل تدفق المصهور عبر فتحة قياسية تحت ضغط ناتج عن حمل معلوم، عند درجة حرارة محددة خلال زمن معين، ويُعبّر عن النتيجة عادةً بوحدة غرام لكل عشر دقائق.

من المهم التأكيد على أن هذا الاختبار لا يقيس اللزوجة مباشرة، ولا يصف السلوك الكامل للمصهور داخل آلة الإنتاج، بل يقدم مؤشرًا مقارنًا لسلوك الجريان تحت شروط قياسية محددة.

وقد يُساء فهم مصطلح **Rate** الوارد في تسمية **Melt Flow Rate** على أنه يشير إلى تذبذب في النتائج أو إلى متوسط إحصائي لعدة قراءات، وهو فهم غير دقيق. فالمقصود بالمعدل هنا هو معدل التدفق الكتلي للمصهور خلال زمن محدد، وليس معدلًا ناتجًا عن تكرار القياس. وبالمثل، فإن مصطلح **Index** في **Melt Flow Index** لا يحمل دلالة على ثبات أعلى أو اختلاف في طبيعة النتيجة، إذ إن المصطلحين يشيران عمليًا إلى نفس القياس تحت شروط اختبار قياسية.

جهاز اختبار السيولة ووظيفته :

يتكوّن جهاز اختبار السيولة من أسطوانة مسخنة بدقة، وفتحة خروج ذات أبعاد قياسية، ومكبس يطبق الحمل المعياري، ونظام لجمع المادة الخارجة وقياسها. أثناء الاختبار، يتعرض المصهور لقص أثناء مروره عبر الفتحة، ما يجعل النتيجة مرتبطة بلزوجة المصهور وحساسيته للقص وأي تأثيرات ناتجة عن الإضافات أو التدهور الحراري.

تحضير العينة وأثره على القياس :

يُعد تحضير العينة من أكثر العوامل تأثيرًا على نتيجة اختبار السيولة. فالرطوبة، وعدم تجانس العينة، والتاريخ الحراري السابق، جميعها قد تؤدي إلى نتائج مضللة. فبعض البوليمرات أو التركيبات تتأثر بالرطوبة من حيث استقرار

الجريان أو ظهور فقاعات، في حين قد تؤدي إعادة الصهر المتكرر إلى ارتفاع السيولة نتيجة تكسر السلاسل البوليمرية.

ولهذا لا يمكن تفسير نتيجة السيولة بمعزل عن معرفة كيفية تحضير العينة وظروفها السابقة.

- اختيار درجة الحرارة: لماذا هي درجة حرارة محددة لكل مادة °C؟

درجة الحرارة المستخدمة في اختبار السيولة ليست بالضرورة درجة تشغيل المصنع، بل هي درجة قياسية وُضعت لتسهيل المقارنة بين المواد. فعلى سبيل المثال، تُستخدم درجة 190 °C على نطاق واسع في اختبار كثير من درجات البولي إيثيلين لأنها تحقق حالة مصهور مستقرة وقابلة للقياس دون تعريض المادة لتدهور ملحوظ خلال زمن الاختبار.

ويجب التأكيد على أن تغيير درجة الحرارة يعني تغيير شرط القياس، وبالتالي لا يجوز مقارنة نتائج أجريت تحت شروط مختلفة دون مراعاة ذلك.

- إختيار الحمل (الوزن) وأثره على النتيجة :

يحدد الحمل المستخدم مستوى الضغط والقص داخل الفتحة. ويُعد الحمل 2.16 كجم شرطاً قياسياً شائعاً لأنه يعطي نطاق تدفق مناسباً لكثير من المواد. ومع ذلك، قد يتطلب الأمر استخدام أحمال أعلى أو أقل لضمان تدفق قابل للقياس ودقة مقبولة، خصوصاً في المواد منخفضة أو عالية السيولة وحسب نوع المادة .

- تفسير نتائج اختبار السيولة :

داخل العائلة البوليمرية الواحدة، غالباً ما تشير السيولة الأعلى إلى وزن جزيئي أقل، والعكس صحيح، لكن هذه العلاقة تظل تقريبية وتتأثر بتوزيع الأوزان الجزيئية والإضافات وسجل المعالجة الحرارية.

ولا يجوز اعتبار السيولة مؤشراً مباشراً على جودة المنتج أو سهولة التشغيل دون ربطها ببقية الخصائص وبالاختبارات الأخرى، كما أن ارتفاع السيولة قد يكون في بعض الحالات مؤشراً على تدهور غير مرغوب فيه وليس ميزة صناعية أو مؤشراً لاستخدام المادة في تطبيق معين.

- حدود الاختبار وأخطاء شائعة :

لا يقدم اختبار السيولة معلومات مباشرة عن قوة المصهور، أو استقراره الزمني، أو سلوك التبلور، أو الأداء الميكانيكي للمنتج النهائي. كما أن من أكثر الأخطاء شيوعاً مقارنةً بنتائج أجريت تحت شروط مختلفة، أو الاعتماد على رقم السيولة وحده لتحديد تطبيق المادة أو صلاحيتها التشغيلية.

وتتضاعف هذه الإشكالية عند التعامل مع المواد غير البكر، مثل المواد الأوف صنف أو المعاد تدويرها، حيث تُستخدم في كثير من الأحيان اختبارات السيولة والكثافة بوصفها أدوات تعريف، رغم أنها غير مصممة لهذا الغرض. فالطريقة العلمية الصحيحة للتعامل مع هذه المواد تقتضي البدء بتحديد هوية المادة وتركيبها قبل تفسير أي رقم سيولة، وذلك من خلال تسلسل اختبارات تأسيسية يشمل، في مقدّمته، تحليل **FTIR** بوصفه اختبار الهوية الأول، يليه تقييم السلوك الحراري ومؤشرات التلوث أو المالنات، ثم تأتي اختبارات السيولة والكثافة لاحقاً بوصفها اختبارات سلوك وتشغيل لا اختبارات تعريف.

ورغم أن هذا التسلسل قد يُعد مكلفاً مقارنةً بالاعتماد المباشر على التجربة التشغيلية، إلا أن تجاوز مرحلة التعريف والاكتفاء بالتشغيل التجريبي المباشر يعد إجراء غير علمي، وقد يؤدي إلى استنتاجات خاطئة حول طبيعة المادة، أو إلى قرارات تشغيلية غير مستقرة أو غير قابلة للتكرار. ولذلك وجب التنويه إلى أن اختبار السيولة، خصوصاً في المواد غير البكر، يجب أن يُستخدم ضمن منظومة فحص متكاملة، لا كمرجع وحيد أو نقطة انطلاق لاتخاذ القرار.

- كيف يفكر الفاحص عند قراءة نتيجة السيولة؟

عند التعامل مع نتائج اختبار السيولة، لا ينظر الفاحص إلى الرقم بوصفه قيمة مطلقة تحدد صلاحية المادة لتطبيق معين، بل يتعامل معه كإشارة أولية ضمن سلسلة قرارات. فالسيولة لا تُستخدم لاختيار التطبيق مباشرة، وإنما لتحديد نطاق السلوك المحتمل للمادة، واستبعاد الخيارات غير المنطقية منذ البداية.

عندما تصل إلى المختبر عدة عينات من نفس البوليمر أو من بوليمرات متقاربة، فإن أول ما يفعله الفاحص هو تصنيف العينات حسب نطاق السيولة، لا حسب الرقم الدقيق. فالفارق بين سيولة 2 و 20 ليس فارقاً عددياً فقط، بل يعكس اختلافاً جوهرياً في الوزن الجزيئي وسلوك المصهور وإمكانية التشكيل.

في هذه المرحلة، لا يسأل الفاحص: هل هذه السيولة مناسبة لهذا التطبيق؟ بل يسأل سؤالاً أدق: أي أنواع التطبيقات تُستبعد تلقائياً بناءً على هذه السيولة؟

فالقيم المرتفعة جداً تُخرج المادة مباشرة من نطاق التطبيقات التي تتطلب مصهوراً متماسكاً أو استقراراً شكلياً عالياً، في حين أن القيم المنخفضة جداً تستبعد التطبيقات التي تعتمد على سهولة الجريان أو ملء القوالب المعقدة. وبهذا تُستخدم السيولة كأداة فرز أولي قبل الدخول في أي اختبار أعمق.

ولا يُبنى قرار التطبيق على رقم السيولة وحده، بل على توافقه أو تعارضه مع نتائج اختبارات أخرى. فسيولة متوسطة، على سبيل المثال، لا تُعد ميزة بحد ذاتها، ما لم تكن متوافقة مع كثافة مناسبة وسلوك حراري يسمح بالمعالجة المستقرة. وإذا أظهرت الاختبارات اللاحقة تعارضًا واضحًا، فإن الفاحص لا يُعدّل تفسير الرقم، بل يُعيد تقييم المادة ككل.

وعند وجود نتائج سيولة متقاربة لعينات مختلفة، لا يعني ذلك تشابهها في التطبيق المحتمل. فالفاحص لا يقارن الأرقام مجردة، بل يربطها دائماً بنوع البوليمر وتركيبه البنيوي. فالتشابه العددي لا يلغي الفروقات الجوهرية في آلية الجريان أو التبلور أو الاستجابة للقص. وبذلك، فإن السيولة لا تُستخدم ك مفتاح اختيار التطبيق، بل ك بوابة قرار: إما أن تسمح للمادة بالانتقال إلى مرحلة الاختبارات التالية المرتبطة بالتشكيل، أو تستبعدا مبكراً لتجنّب إهدار الوقت والموارد في مسار غير منطقي. وباختصار يمكننا القول: أن اختبارات البوليمرات تمثل أداة أساسية لفهم المادة والتحكم في سلوكها، لكنها لا تكتسب قيمتها إلا عندما تُستخدم ضمن منهج متكامل يبدأ في المختبر ويقود الإنتاج الصناعي. فالمختبر هو المكان الذي تُبنى فيه المعرفة التقنية وتُثبت فيه الحلول، بينما يُعد المصنع مرحلة تنفيذ لما تم التوصل إليه علمياً. وبهذا يصبح الاختبار أداة تصميم وقرار، لا مجرد رقم يُسجل.

- هل يمكن التحكم في السيولة؟

على الرغم من شيوع الاعتقاد بأن السيولة خاصية يمكن تعديلها بسهولة، فإن الواقع الصناعي يفرض فهماً أكثر دقة. فالسيولة ليست خاصية مستقلة، بل نتيجة مباشرة للبنية الجزيئية للبوليمر، وعلى رأسها الوزن الجزيئي وتوزيعه وسلامة السلاسل البوليمرية.

يمكن زيادة السيولة بطرق مختلفة، مثل خفض الوزن الجزيئي أو خلط المادة مع راتنج أعلى سيولة أو استخدام إضافات مساعدة للجريان. غير أن هذه الطرق لا تخلو من آثار جانبية، إذ غالباً ما تكون زيادة السيولة مصحوبة بانخفاض في الخواص الميكانيكية أو الاستقرار طويل الأمد، خصوصاً عندما تكون ناتجة عن تدهور غير متحكم فيه.

أما خفض السيولة بعد تكوين البوليمر، فيُعد أكثر صعوبة من الناحية العملية، نظراً لعدم إمكانية زيادة طول السلاسل البوليمرية بعد اكتمال البلمرة. وتبقى الخيارات المتاحة في هذه الحالة محدودة، وغالباً ما تعتمد على الخلط أو تعديل شروط المعالجة بدلاً من تعديل البنية الجزيئية نفسها.

وعليه، فإن التحكم الحقيقي في السيولة يتم أساساً أثناء مرحلة البلمرة، حيث تُصمّم المادة منذ البداية لتقع ضمن نطاق سيولة محدد يناسب تطبيقها. أما ما يتم بعد ذلك في مرحلة التركيب أو التصنيع، فهو إدارة للسلوك وليس إعادة تصميم للمادة.

5.2.4 : اختبار الكثافة (Density)

قراءة هوية المادة وبنيتها من خلال الكتلة والحجم

يُعد اختبار الكثافة من أقدم وأبسط الاختبارات في صناعة البلاستيك من حيث المبدأ، لكنه من أكثرها أهمية من حيث الدلالة. فالكثافة لا تمثل مجرد خاصية فيزيائية ثابتة، بل تعكس بصورة غير مباشرة التركيب البنوي للمادة، ودرجة انتظام السلاسل البوليمرية، ومستوى التبلور، ووجود الإضافات أو مواد الملء، وأحياناً جودة التحضير والمعالجة السابقة.

ولهذا يحتل اختبار الكثافة موقعاً محورياً في المختبر، خصوصاً في مرحلة توصيف المادة الخام، كما يُستخدم لاحقاً كأداة تفسير عند تحليل سلوك المنتج النهائي، دون أن يكون بحد ذاته اختبار اعتماد وظيفي.

ما الذي يقيسه اختبار الكثافة فعلياً؟

من حيث التعريف الفيزيائي، تُعرّف الكثافة بأنها نسبة الكتلة إلى الحجم. غير أن هذا التعريف البسيط لا يعكس التعقيد الحقيقي للكثافة في البوليمرات. فحجم البوليمر لا يتحدد فقط بأبعاده الهندسية الظاهرة، بل يتأثر بعوامل داخلية عديدة، من أبرزها:

- 1- درجة تراص السلاسل البوليمرية
- 2- نسبة المناطق المتبلورة إلى غير المتبلورة
- 3- وجود مواد ملء أو إضافات صبغية
- 4- وجود فراغات دقيقة أو بنية رغوية
- 5- امتصاص الرطوبة في بعض الأنواع

وعليه، فإن الكثافة تعبر عن الحالة البنوية الكلية للمادة وقت القياس، لا عن تركيبها الكيميائي المجرد فقط.

أهمية اختبار الكثافة في المختبر الصناعي

تنبع أهمية اختبار الكثافة من كونه يؤدي عدة وظائف في آن واحد:

- 1- **تضييق نطاق هوية المادة** لا تُعرّف الكثافة البوليمر تعريفاً قاطعاً، لكنها تستبعد عائلات كاملة وتقرّب أخرى، خصوصاً عند دمجها مع الفحص البصري واختبار السيولة.
- 2- **الكشف عن وجود مواد ملء أو تغيير في التركيبة** إضافة مواد غير عضوية أو مائتات عالية الكثافة تنعكس غالباً مباشرة على القيمة المقاسة، حتى عند ثبات بقية الخصائص.

3- مراقبة اتساق الدفعات أي تغيير غير مبرر في الكثافة بين دفعتين من نفس المادة قد يكون مؤشراً مبكراً على اختلاف في التركيبة أو جودة التحضير.

4- ربط البنية بالسلوك اللاحق في البوليمرات شبه المتبلورة، قد تعكس الكثافة اختلافاً في درجة التبلور، وهو ما يؤثر لاحقاً على الانكماش، والاستقرار البعدي، والخواص الميكانيكية.

- الكثافة والبنية البوليمرية وما يعرف بخاصية التبلور (Crystallinity)

في البوليمرات شبه المتبلورة، يؤدي ازدياد التبلور إلى تراص أعلى للسلاسل البوليمرية، وبالتالي إلى كثافة أعلى. وعلى العكس، تؤدي زيادة المناطق غير المتبلورة إلى انخفاض الكثافة. ولهذا قد تختلف كثافة نفس البوليمر تبعاً لظروف التبريد أو المعالجة، حتى مع ثبات تركيبه الكيميائي.

- التفرع وانتظام السلاسل :

يؤثر شكل السلسلة البوليمرية على قدرتها على التراص. فالسلاسل الأكثر انتظاماً تميل إلى كثافة أعلى، في حين تؤدي زيادة التفرعات إلى تقليل التراص وخفض الكثافة.

- الإضافات ومواد الملء :

وجود مواد ذات كثافة أعلى من البوليمر الأساسي يرفع الكثافة الكلية للمركب. غير أن مقدار هذا الارتفاع يعتمد على:

- 1- نوع المادة المضافة
- 2- نسبتها
- 3- درجة توزيعها وتجانسها داخل البوليمر

- أنواع الكثافة التي يجب التمييز بينها :

من الضروري عدم الخلط بين أكثر من مفهوم للكثافة:

- **كثافة المادة (Material Density) :** وهي الكثافة الحقيقية للبوليمر أو التركيب بعد التجانس،

وتُستخدم في توصيف المادة ومقارنتها.

- **الكثافة الظاهرية (Bulk Density) :** وهي كثافة الحبيبات أو المسحوق كما تُعبأ في وعاء، وتشمل

الفراغات بين الحبيبات. تُعد هذه القيمة مهمة لعمليات التغذية والمعالجة، لكنها لا تعبر عن كثافة المادة نفسها، ولا يجوز الخلط بينها وبين كثافة البوليمر.

- طرق قياس الكثافة في البوليمرات :

- مبدأ الإزاحة (مبدأ أرخميدس) :

تعتمد هذه الطريقة على مقارنة وزن العينة في الهواء ووزنها وهي مغمورة في سائل معلوم الكثافة. ومن الفرق بين القيمتين يُحسب حجم العينة، وبالتالي كثافتها.

تُستخدم هذه الطريقة على نطاق واسع لأنها:

1- مناسبة للمواد الصلبة والمنتجات غير المسامية

2- بسيطة من حيث المبدأ

3- تعطي نتائج جيدة عند تحضير العينة بشكل صحيح

غير أنها تتطلب الانتباه إلى:

1- وجود مسامية أو فراغات داخلية

2- امتصاص السائل في بعض البوليمرات

3- وجود فقاعات هواء على سطح العينة أثناء الغمر

ولهذا لا يجوز إجراء قياس الكثافة لعينة تحتوي مسامية مفتوحة أو بنية رغوية دون توثيق ذلك صراحة في تقرير الاختبار.

- عمود التدرج الكثافي (Density Gradient Column)

تُستخدم هذه الطريقة للمقارنات الدقيقة بين عينات متقاربة الكثافة، حيث تستقر العينة عند مستوى يعادل كثافتها داخل عمود سائل متدرج. تتميز هذه الطريقة بدقتها العالية، لكنها تتطلب تحكماً دقيقاً في درجة الحرارة ولا تُستخدم عادة في الفحوص الروتينية اليومية.

- تحضير العينة وأثره على نتيجة الكثافة

تحضير العينة يؤثر تأثيراً مباشراً على النتيجة. فقياس كثافة عينة مصبوبة قد يعطي قيمة مختلفة عن قياس كثافة نفس المادة على شكل منتج رغوي أو قطعة تحتوي فراغات. كما أن الرطوبة أو عدم التجانس قد يؤديان إلى نتائج مضللة.

ولهذا يجب على الفاحص أن يحدد منذ البداية: هل يقيس كثافة المادة أم كثافة المنتج؟ والتمييز بين هذين الهدفين أساسي لتفسير النتيجة بشكل صحيح.

- تفسير نتائج اختبار الكثافة :

عند قراءة نتيجة الكثافة، يجب طرح الأسئلة التالية:

- 1- هل العينة تمثل المادة الخام أم شكلاً من أشكال المنتج؟
 - 2- هل توجد إضافات أو مواد ملء تفسر القيمة المقاسة؟
 - 3- هل التغير في الكثافة متوافق مع التغيرات التي أدخلت على التركيبة؟
 - 4- هل القيمة ضمن النطاق المتوقع مقارنة بدفعات سابقة؟
- اختبار الكثافة لا يعطي حكماً نهائياً، لكنه غالباً ما يكون إشارة مبكرة تستدعي اختبارات إضافية أو مراجعة التحضير.
- #### - كيف يفكر الفاحص عند قراءة نتيجة الكثافة؟
- لا تُقرأ نتيجة اختبار الكثافة بوصفها قيمة فيزيائية مجردة، بل تُستخدم كأداة تصنيف بنيوي أولي تساعد الفاحص على فهم طبيعة البوليمر من حيث تركيبه الداخلي ودرجة انتظام سلسله ومستوى التبلور المتوقع فيه.
- فالكثافة لا تحدد التطبيق مباشرة، لكنها تضيق أو توسع نطاق الخيارات الممكنة قبل الدخول في اختبارات أكثر تعقيداً. وعند وصول عدة عينات إلى المختبر، ينظر الفاحص إلى موقع قيمة الكثافة ضمن نطاق البوليمر نفسه، لا إلى الرقم بمعزل عن سياقه.

في هذه المرحلة، لا يسأل الفاحص: هل هذه الكثافة جيدة؟ بل يسأل: ما الذي تخبرني به هذه الكثافة عن بنية المادة؟

فالكثافة الأعلى داخل نفس البوليمر تشير غالباً إلى درجة تبلور أعلى، وهو ما ينعكس عادةً على الصلابة والاستقرار البعدي، وقد يكون على حساب المرونة أو مقاومة الصدم. أما الكثافة الأقل، فغالباً ما تدل على بنية أقل انتظاماً وسلاسل أكثر حرية حركة، وهو ما يفتح المجال لتطبيقات تتطلب ليونة أو قابلية تشكّل أعلى.

- هل يمكن التحكم في الكثافة؟

على الرغم من شيوع الاعتقاد بإمكانية تعديل الكثافة بسهولة، فإن الكثافة في البوليمرات تُعد خاصية بنيوية تعكس تصميم المادة، ولا يمكن تغييرها جوهرياً بعد اكتمال تكوين البوليمر.

يتم التحكم الحقيقي في الكثافة خلال مرحلة البلمرة، من خلال تصميم البنية الجزيئية واختيار آلية التفاعل المناسبة.

ولهذا تظهر داخل العائلة البوليمرية الواحدة مواد ذات كثافات مختلفة صُممت منذ البداية لتلبية تطبيقات محددة.

أما بعد اكتمال البلمرة، فإن ما يُعرف بالتحكم في الكثافة يقتصر غالبًا على إدارة الكثافة الظاهرية أو الكلية من خلال الخلط أو استخدام مواد ملء أو تعديل شروط المعالجة. وعلى الرغم من أن هذه الأساليب قد تغيّر القيمة المقاسة، فإنها لا تُنتج مادة مكافئة بنيويًا لمادة صُمّمت أصلاً بتلك الكثافة.

- حدود اختبار الكثافة :

لا يقدّم اختبار الكثافة معلومات مباشرة عن:

- 1- سلوك المصهور أو السبولة
- 2- المتانة أو الخواص الميكانيكية
- 3- الاستقرار الحراري
- 4- قابلية التشغيل داخل آلة معينة

ولهذا لا يجوز استخدام الكثافة وحدها لتحديد تطبيق المادة، بل يجب دمجها مع اختبارات أخرى ضمن إطار واحد. وبعد تثبيت الكثافة وربطها ببنية المادة وتركيبها، يصبح من الضروري الانتقال إلى اختبار يكشف سلوك البوليمر تحت الحرارة والقص، ويعطي مؤشرًا عن قابليته للمعالجة، وهو ما يقودنا منطقيًا إلى الاختبار التالي.

- 5.2.5 اختبار الوزن النوعي: القياس المطلق والمقارنة النسبية

- مفهوم الوزن النوعي في البوليمرات :

الوزن النوعي هو تعبير عددي يصف نسبة كثافة المادة إلى كثافة مرجعية، وغالبًا ما تكون كثافة الماء عند درجة حرارة محددة. وبخلاف الكثافة التي تُعطى بوحدات مطلقة (غ/سم³)، فإن الوزن النوعي قيمة بلا وحدة، تُستخدم للمقارنة النسبية بين المواد ففي البوليمرات، لا يُستخدم الوزن النوعي كبديل للكثافة، بل كوسيلة تبسيطية مقارنة تتيح للفاحص أو المصنّع تكوين تصور سريع عن طبيعة المادة دون الدخول في تفاصيل حسابية.

- فلسفة اختبار الوزن النوعي :

لا يهدف اختبار الوزن النوعي إلى توصيف الأداء أو التحمل، ولا إلى التنبؤ المباشر بالسلوك أثناء التصنيع، بل يجيب عن سؤال أساسي مفاده هذه المادة أخف أم أثقل نسبيًا من مادة أخرى مرجعية؟

ولهذا يُستخدم الوزن النوعي تاريخيًا وفي كثير من المواصفات بوصفه لغة مشتركة بين المختبر، والمصنّع، والمستخدم النهائي، خصوصًا في المقارنات العامة بين المواد.

- مبدأ اختبار الوزن النوعي :

يعتمد مبدأ القياس على مقارنة وزن العينة في الهواء بوزنها عند غمرها في سائل مرجعي (غالبًا الماء)، ثم حساب النسبة الناتجة. وبما أن كثافة السائل المرجعي معلومة، يمكن استنتاج الوزن النوعي مباشرة دون الحاجة إلى حساب الكثافة المطلقة. هذا المبدأ يجعل الاختبار:

- بسيطاً من حيث الفكرة
- لكنه حساساً جداً لطريقة التنفيذ

العينة المستخدمة في اختبار الوزن النوعي :

تُستخدم عينات صغيرة نسبياً، ويُشترط أن تكون:

- خالية من الفقاعات
- غير مسامية
- ممثلة لبنية المادة الحقيقية

وفي المواد الرغوية أو المعاد تدويرها، قد يصبح الوزن النوعي غير معبرٍ ما لم تُحدّد بوضوح حالة العينة، وهو ما يجب التنبيه إليه .

أجهزة ووسائل القياس :

يمكن إجراء اختبار الوزن النوعي باستخدام:

- ميزان دقيق مع ملحق غمر
- أو أدوات قياس تعتمد على مبدأ الطفو

ولا تكمن دقة الاختبار في الجهاز وحده، بل في:

- ثبات درجة الحرارة
- نظافة العينة
- إزالة الفقاعات السطحية
- اختيار السائل المرجعي المناسب

– قراءة نتائج اختبار الوزن النوعي :

قراءة الوزن النوعي لا تُفسَّر بمعزل عن سياقها. ففرق صغير في الوزن النوعي قد يدل على:

- 1- اختلاف في درجة التبلور
- 2- وجود مواد مألثة
- 3- اختلاف في التركيب البنوي

لكن لا يجوز تفسيره على أنه مؤشر مباشر على:

- القوة
- المتانة
- أو سهولة التشغيل

ماذا يقول الوزن النوعي للفاحص؟ يعطي الوزن النوعي للفاحص إشارات أولية مثل:

- هل المادة أقرب إلى بوليمر خفيف أم محمّل بمواد مألثة؟
- هل هناك انحراف واضح عن القيمة المتوقعة لعائلة بوليمرية معينة؟
- هل تستحق المادة فحصاً أعمق للكثافة أو التركيب؟

– ماذا لا يقول الوزن النوعي؟

من المهم التأكيد على أن الوزن النوعي:

- لا يحدد التطبيق
- لا يعكس السلوك الميكانيكي
- لا يغني عن اختبار الكثافة
- ولا يُستخدم لاتخاذ قرار اعتماد

وأي محاولة لاستخدامه خارج هذا الإطار تؤدي إلى استنتاجات مضللة.

– العلاقة بين الوزن النوعي والكثافة :

الوزن النوعي مرتبط بالكثافة لكنه ليس بديلاً عنها. فالكثافة تُستخدم في الحسابات الهندسية الدقيقة، بينما يُستخدم الوزن النوعي للمقارنة السريعة والتواصل الفني.

ولهذا غالباً ما يُذكر الوزنان معاً في الموصفات، لكن لكل منهما وظيفة مختلفة داخل المنهج المختبري.

– القرار الناتج عن اختبار الوزن النوعي :

لا يُستخدم اختبار الوزن النوعي لاتخاذ قرار تصنيع أو رفض، بل:

- كأداة فرز أولي
- وكإشارة تحذير عند وجود انحرافات غير متوقعة
- وكوسيلة دعم لتفسير نتائج الكثافة لاحقاً

وبهذا يكتمل دوره ضمن منظومة اختبارات توصيف المادة بوصفه اختبار تعريف وتوجيه لا اختبار اعتماد.

– 5.2.6 اختبار نقطة الانصهار (Melting Point)

– مفهوم نقطة الانصهار في البوليمرات :

تشير نقطة الانصهار في البوليمرات إلى درجة الحرارة التي تفقد عندها المناطق المتبلورة انتظامها البلوري وتتحول من حالة صلبة مرتبة إلى حالة مصهور. وعلى عكس المواد البلورية البسيطة، لا تمتلك معظم البوليمرات نقطة انصهار حادة واحدة، بل تُظهر نطاقاً حرارياً يحدث خلاله هذا التحول، نتيجة لاختلاف أطوال السلاسل وتوزيعها البلوري ودرجة التبلور.

ولهذا فإن نقطة الانصهار في البوليمرات لا تُفهم بوصفها قيمة مطلقة، بل بوصفها مؤشراً بنيوياً يعكس طبيعة المادة الداخلية وليس مجرد درجة حرارة تشغيل.

– ماذا يقيس اختبار نقطة الانصهار فعلياً؟

لا يقيس هذا الاختبار بداية الذوبان السطحية، بل يكشف:

- درجة تفكك البنية المتبلورة

- مستوى انتظام السلاسل الجزيئية
- طبيعة الترتيب الداخلي للمادة
- الفرق بين المواد المتشابهة اسميًا والمختلفة بنيويًا

وبذلك يعد اختبار نقطة الانصهار أداة توصيف بنيوي، لا اختبار تشغيل مباشر.

– العلاقة بين نقطة الانصهار والبنية البوليمرية

ترتبط نقطة الانصهار مباشرة بـ:

- درجة التبلور: كلما زادت، ارتفعت نقطة الانصهار
- انتظام السلاسل: السلاسل الأكثر انتظامًا تنصهر عند درجات أعلى
- وجود التفراعات: التفراعات تُضعف التراص وتخفض درجة الانصهار
- نوع الروابط الجزيئية: داخل السلسلة

ولهذا قد تختلف نقطة الانصهار داخل نفس العائلة البوليمرية باختلاف التصميم البنيوي، حتى وإن تشابهت بقية الخصائص.

– طريقة قياس نقطة الانصهار

في البوليمرات، لا تُقاس نقطة الانصهار غالبًا بالطرق التقليدية المستخدمة في المواد الصغيرة، بل تُحدد عادة باستخدام التحليل الحراري التفاضلي (DSC)، حيث:

- تُسخَّن العينة بمعدل حراري مضبوط
- يُرصد الامتصاص الحراري الناتج عن تفكك البنية المتبلورة
- يظهر منحنى حراري يحدد نطاق الانصهار وقمته

وتُعد درجة الحرارة عند قمة الامتصاص الحراري هي المؤشر العملي لنقطة الانصهار.

– تحضير العينة وأثره على النتيجة

تحضير العينة له تأثير مباشر على نتيجة الاختبار، إذ:

- قد يؤدي التاريخ الحراري السابق إلى تغيير درجة التبلور
- قد تختلف نتيجة الحبيبات عن المنتج المصبوب
- قد يؤثر معدل التسخين على موقع القمة الحرارية

ولهذا لا تُفسَّر نتيجة نقطة الانصهار دون معرفة:

- شكل العينة
 - تاريخها الحراري
 - شروط الاختبار المستخدمة
- كيف يفكر الفاحص عند قراءة نقطة الانصهار؟

لا يسأل الفاحص: هل هذه نقطة انصهار عالية أم منخفضة؟

بل يسأل: هل هذه القيمة منسجمة مع البنية المتوقعة للمادة؟

فعند مقارنة عينات متعددة:

- 1- اختلاف نقطة الانصهار قد يشير إلى اختلاف في درجة التبلور
- 2- تطابقها قد لا يعني تطابق السلوك الكامل
- 3- تغييرها عن القيمة المرجعية قد يدل على:

- a. تدهور حراري
- b. اختلاف في التصميم البنيوي
- c. تأثير إضافات أو شوائب

ولهذا تُستخدم نقطة الانصهار لتأكيد أو نفي فرضيات تولدت من اختبار الكثافة والسيولة، لا لاتخاذ قرار مستقل.

– هل يمكن التحكم في نقطة الانصهار؟

نقطة الانصهار ليست خاصية يمكن تعديلها بسهولة بعد تكوين البوليمر. فالتحكم الحقيقي فيها يتم خلال:

- تصميم السلسلة البوليمرية
- اختيار نوع المونومر

- آلية البلرة ودرجة انتظامها

أما بعد اكتمال البلرة، فلا يمكن تصحيح نقطة الانصهار، بل يمكن فقط:

- التأثير الظاهري عليها عبر الإضافات
- أو تغيير سلوك المادة أثناء التشغيل دون تغيير جوهر بنيتها

– حدود اختبار نقطة الانصهار

لا يقدم هذا الاختبار معلومات مباشرة عن:

- سهولة التشغيل
- قوة المصهور
- السلوك الميكانيكي
- مقاومة الصدم أو الزحف

كما أن الاعتماد عليه منفرداً قد يؤدي إلى استنتاجات مضللة إذا لم يُربط ببقية الاختبارات.

– ربط اختبار نقطة الانصهار بالاختبارات السابقة واللاحقة

تُقرأ نقطة الانصهار دائماً في ضوء:

- السيوولة: لفهم التوازن بين البنية والجريان
- الكثافة: لتفسير درجة التبلور
- امتصاص الرطوبة: لتفادي تشويه النتائج الحرارية

وبعد تحديد نقطة الانصهار ونطاقها، يصبح بالإمكان الانتقال إلى اختبارات حرارية أخرى تُعنى بسلوك المادة تحت الحمل أو أثناء التشكيل.

– القرار الناتج عن اختبار نقطة الانصهار

لا يُستخدم اختبار نقطة الانصهار لاتخاذ قرار اعتماد أو رفض نهائي، بل لتحديد:

- مدى انسجام المادة مع تصميمها البنوي
- صلاحيتها المبدئية للدخول في مرحلة التجربة التصنيعية
- الحاجة إلى تعديل التصميم أو العودة لمرحلة التوصيف

وبذلك يُعد اختبار نقطة الانصهار خطوة أساسية ضمن منظومة توصيف المادة الخام، لا محطة نهائية في مسار التطوير.

الفصل الثالث

5.3 الفصل الثالث الاختبارات الحرارية وتقييم السلوك

- الاختبارات الحرارية وتقييم السلوك

بعد استكمال توصيف المادة البوليمرية من حيث هويتها وبنيتها وسلوكها الأساسي، يصبح من الضروري الانتقال إلى مرحلة أعمق من التقييم، تُعنى بدراسة استجابة المادة للحرارة بوصفها عاملاً حاسماً في معظم التطبيقات الصناعية. فالحرارة ليست مجرد ظرف تشغيلي، بل عنصر مؤثر في البنية، والسلوك، والاستقرار، والعمر الخدمي للمادة.

تختلف الاختبارات الحرارية عن اختبارات توصيف المادة في أنها لا تكتفي بقراءة الخصائص البنيوية أو المؤشرات الأولية، بل تسعى إلى فهم كيفية تفاعل البوليمر مع الطاقة الحرارية، سواء في حالته الساكنة أو تحت تأثير الحمل، ومع تكرار التعرض أو امتداده الزمني. وبهذا تنتقل عملية التقييم من سؤال :ما هي المادة؟ إلى سؤال أكثر عملياً :كيف تتصرف هذه المادة عند التعرض للحرارة أثناء الاستخدام؟

لا تُقدّم الاختبارات الحرارية في هذا الجزء بوصفها اختبارات اعتماد نهائي أو مؤشرات مباشرة على جودة المنتج، بل كأدوات تحليلية تساعد على تفسير السلوك المتوقع للمادة، وتحديد حدود استخدامها الحراري الآمن، وفهم آليات التليين، والتشوه، والتدهور، والاستقرار مع الزمن. كما تُستخدم هذه الاختبارات لربط النتائج البنيوية التي تم التوصل إليها سابقاً—مثل درجة التبلور أو طبيعة الانتقالات الحرارية—بالأداء العملي للمادة في ظروف قريبة من ظروف الخدمة.

ويعتمد هذا الجزء في عرضه للاختبارات الحرارية تسلسلاً منطقيًا يبدأ بفهم الانتقالات والبنية الحرارية الداخلية، ثم ينتقل إلى تقييم السلوك تحت الحمل الحراري، ويتدرج بعد ذلك إلى اختبارات الاستقرار والتحمل، وصولاً إلى دراسة تأثير الزمن والشيخوخة الحرارية. ويهدف هذا التسلسل إلى تمكين القارئ من قراءة نتائج الاختبارات ضمن سياق مترابط، يوضح العلاقة بين البنية الحرارية للمادة وسلوكها أثناء الاستخدام، دون عزل أي اختبار عن غيره.

وبهذا، تمثل الاختبارات الحرارية حلقة وصل أساسية بين توصيف المادة من جهة، وتقييم أدائها واستقرارها على المدى القصير والطويل من جهة أخرى، وتمهّد للانتقال لاحقاً إلى اختبارات أخرى تُعنى بالسلوك الميكانيكي، أو الاستقرارية الزمنية، أو القرار الصناعي النهائي.

5.3.1 التحليل الحراري التفاضلي

Differential Scanning Calorimetry (DSC)

- الدور المنهجي لاختبار DSC في صناعة البوليمرات :

لا يُنظر إلى اختبار التحليل الحراري التفاضلي (DSC) في الصناعة بوصفه اختباراً حرارياً مستقلاً، بل باعتباره المرجع البنيوي الحراري الذي تُفسّر في ضوئه نتائج معظم الاختبارات الحرارية والميكانيكية اللاحقة. فبينما تُظهر اختبارات مثل Vicat و HDT كيف يتصرّف البوليمر تحت الحمل الحراري، يوضّح DSC لماذا يتصرّف بهذه الطريقة من حيث البنية الداخلية وانتقالات الطاقة.

ولهذا يحتل DSC موقعاً محورياً في المختبر الصناعي، إذ يربط بين التصميم البنيوي للمادة وبين سلوكها العملي عند التعرض للحرارة.

المبدأ الفيزيائي للاختبار

يقوم اختبار DSC على قياس الفرق في التدفق الحراري بين عينة البوليمر ومرجع خامل، عند تعرّضهما لبرنامج حراري متماثل. ويُسجّل هذا الفرق بوصفه إشارة حرارية تعكس التغيرات الطاقية المصاحبة للانتقالات البنيوية داخل المادة.

ولا يُقاس في DSC ارتفاع درجة الحرارة بحد ذاته، بل الطاقة اللازمة لإحداث التحول البنيوي، وهو ما يجعل الاختبار أكثر تعبيراً عن طبيعة المادة من مجرد قياس درجات الحرارة الاسمية.

الانتقالات الحرارية التي يكشف عنها DSC

- درجة الانتقال الزجاجي (Tg)

تمثل درجة الانتقال الزجاجي النقطة التي تنتقل عندها المناطق غير المتبلورة في البوليمر من حالة صلابة زجاجية إلى حالة أكثر مرونة. ولا تظهر هذه الظاهرة على شكل قمة حرارية واضحة، بل كتحوّل في خط الأساس، ما يتطلب خبرة في قراءة المنحنى.

— وتُعد الانصهار ونطاقه الحراري (Tm Range)

مؤشرًا بالغ الأهمية لفهم:

4- مدى مرونة المادة عند درجات الحرارة المنخفضة

5- سلوكها قبل التلّين

6- حساسيتها للتغيرات الحرارية أثناء الاستخدام

في البوليمرات شبه المتبلورة، لا تحدث عملية الانصهار عند درجة واحدة حادة، بل عبر نطاق حراري يعكس:

6. تباين أطوال السلاسل

7. اختلاف درجة انتظامها

8. تعدد أشكال التبلور

ويُعد موقع قمة الانصهار وشدها من أهم المؤشرات البنيوية التي تُستخدم لاحقًا لتفسير نتائج اختبارات التلّين والانحراف الحراري.

— التبلور أثناء التبريد (Crystallization)

يُظهر DSC قدرة البوليمر على إعادة التبلور عند التبريد، وهو سلوك له أثر مباشر على:

5- الانكماش

6- الاستقرار البعدي

7- سرعة التصلب أثناء التشكيل

كما أن اختلاف درجة حرارة التبلور أو شدته بين عينات متشابهة قد يشير إلى:

1. اختلاف في التصميم البنيوي

2. أو تأثير إضافات

3. أو تاريخ حراري مختلف

- DSC والتاريخ الحراري للمادة

يُعد DSC أداة فعالة لكشف أثر التاريخ الحراري السابق على المادة. فإعادة الصهر، أو التعرض غير المتحكم فيه للحرارة، قد يؤدي إلى:

1. تغيير درجة التبلور

2. انتقالات حرارية غير متوقعة

3. تغيير شكل المنحنى الحراري

ولهذا تُستخدم دورات التسخين المتكررة في DSC ليس فقط لقياس الخصائص، بل لفهم استقرار البنية مع الزمن والحرارة.

- تأثير تحضير العينة على نتائج DSC

يتأثر منحنى DSC بعدة عوامل متعلقة بالعينة، من أهمها:

8- شكل العينة (حببيات، شريحة، منتج مشكّل)

9- كتلة العينة

10- معدل التسخين

11- درجة التجانس

12- وجود رطوبة أو إضافات طيارة

ولهذا لا تُفسّر نتائج DSC دون توثيق ظروف الاختبار وشكل العينة، إذ قد يؤدي اختلاف بسيط في التحضير إلى فروق حرارية تُفسّر خطأً على أنها اختلاف بنيوي.

- كيف يقرأ الفاحص منحنى DSC قراءة صناعية؟

لا يتعامل الفاحص الصناعي مع منحنى DSC بوصفه مخططاً أكاديمياً، بل يستخدمه للإجابة عن أسئلة عملية، مثل:

13- هل البنية الحرارية للمادة متسقة مع مواصفاتها الاسمية؟

14- هل تظهر انتقالات غير متوقعة قد تشير إلى خلط أو تلوث؟

15- هل تؤكد نتائج DSC ما ظهر في اختبار الكثافة والسيولة؟

16- هل من المتوقع أن تتصرف المادة بثبات عند درجات حرارة قريبة من T_g أو T_m ؟

وبذلك يعمل DSC كأداة تحقق وتفسير ، لا كأداة قرار منفردة.

- العلاقة بين DSC والاختبارات الحرارية اللاحقة تمثل نتائج DSC الأساس الذي تُفسر على ضوءه نتائج:

17- اختبار التلّين فيكات

18- اختبار التشوّه الحراري تحت الحمل (HDT)

19- اختبارات الثبات والشيخوخة الحرارية

فانخفاض درجة التلّين، أو التشوه المبكر، أو ضعف الاستقرار الحراري، غالبًا ما يكون انعكاسًا مباشرًا لخصائص بنيوية تظهر بوضوح في منحنى DSC.

- حدود اختبار DSC

على الرغم من عمق المعلومات التي يقدّمها، لا يوفر DSC بيانات مباشرة عن:

20- تحمل الحمل الميكانيكي

21- سلوك المصهور تحت القص

22- الأداء الوظيفي أثناء الخدمة

23- العمر الخدمي الفعلي

ولهذا لا يُستخدم منفردًا لتحديد صلاحية المادة للتطبيق، بل ضمن منظومة اختبارات متكاملة.

- القرار الناتج عن اختبار DSC

تُستخدم نتائج DSC في الصناعة من أجل:

- تثبيت الهوية البنيوية الحرارية للمادة
- دعم تفسير نتائج الاختبارات الحرارية التطبيقية
- كشف الانحرافات البنيوية المبكرة
- تحديد الحاجة لاختبارات إضافية أو مراجعة التركيبية

وبذلك يُعد اختبار DSC مرجعاً تحليلياً لا غنى عنه في فهم السلوك الحراري للبوليمرات، وجسراً يربط بين توصيف المادة وبين تقييم أدائها الحراري أثناء الاستخدام.

بعد فهم الانتقالات والبنية الحرارية الداخلية للمادة باستخدام DSC ، يصبح الانتقال إلى اختبارات مثل **Vicat** و **HDT** انتقالاً طبيعياً ومنطقياً، إذ تنتقل عملية التقييم من قراءة البنية إلى اختبار استجابة المادة للحرارة تحت وجود حمل فعلي.

- مقارنة منهجية بين التحليل الحراري التفاضلي (DSC) والتحليل الحراري الوزني (TGA)

على الرغم من أن كلاً من التحليل الحراري التفاضلي (DSC) والتحليل الحراري الوزني (TGA) يُصنَّفان ضمن الاختبارات الحرارية، فإن طبيعة المعلومات التي يقدمها كل منهما مختلفة جوهرياً، ويخدم كل اختبار هدفاً تحليلياً مختلفاً داخل المنهج الصناعي لتقييم البوليمرات. والخلط بين نتائج الاختبارين أو تفسير أحدهما بمنطق الآخر يؤدي غالباً إلى استنتاجات غير دقيقة.

- أولاً: الاختلاف في المبدأ الفيزيائي :

يعتمد اختبار **DSC** على قياس التغيرات في الطاقة الحرارية المصاحبة للانتقالات البنيوية داخل المادة، مثل الانصهار، والتبلور، والانتقال الزجاجي. فهو لا يقيس فقدان مادة أو تغييراً في الكتلة، بل يرصد كيف تتفاعل البنية البوليمرية مع الطاقة الحرارية أثناء التسخين أو التبريد.

في المقابل، يعتمد اختبار **TGA** على قياس التغير في الكتلة مع تغير درجة الحرارة أو الزمن، ويكشف عن فقدان مكونات من المادة نتيجة التبخّر أو التحلل أو التفكك الحراري. وبذلك فإن **TGA** لا يهتم بالانتقالات البنيوية التي لا يصاحبها فقدان كتلة، بل يركّز على الاستقرار الكيميائي والتركيبية للمادة.

—ثانيًا: طبيعة المعلومات التي يقدمها كل اختبار

يقدم **DSC** معلومات بنيوية حرارية، من أهمها:

4- درجة الانتقال الزجاجي

5- نطاق الانصهار ودرجة انتظام التبلور

6- سلوك التبلور أثناء التبريد

7- التغيرات البنيوية الناتجة عن التاريخ الحراري

وتُستخدم هذه المعلومات لفهم كيف صُممت المادة حراريًا، وكيف يمكن أن تتصرف عند الاقتراب من حدودها البنيوية.

أما **TGA** فيقدم معلومات تركيبية واستقرارية، من أبرزها:

8- درجة بداية التحلل الحراري

9- فقدان المكونات الطيارة أو الرطوبة

10- محتوى المواد المائلة أو غير العضوية

11- استقرار المادة مع الزمن والحرارة

وتُستخدم هذه المعلومات لفهم متى تبدأ المادة في فقدان مكوناتها أو تدهورها الكيميائي.

— ثالثًا: ما الذي لا يستطيع كل اختبار كشفه؟

على الرغم من تكامل الاختبارين، فإن لكل منهما حدودًا واضحة:

12- لا يستطيع **DSC**:

a. كشف فقدان الكتلة

b. تحديد نسبة المواد المائلة

c. تشخيص التحلل الكيميائي مباشرة

d. تقييم الاستقرار طويل الأمد

13- ولا يستطيع: TGA

a. كشف الانتقال الزجاجي

b. تحديد درجة التبلور

c. تفسير التلّين أو التشوه البنيوي

d. التمييز بين مواد متشابهة بنيويًا إذا لم يصاحب الاختلاف فقدان كتلة

— رابعًا: دور كل اختبار في تفسير السلوك الحراري

يُستخدم **DSC** لتفسير لماذا يحدث التلّين أو التشوه عند درجة حرارة معينة، من خلال ربط ذلك بالانتقالات البنيوية

الداخلية للمادة. ولهذا يُعد المرجع الأساسي لتفسير نتائج اختبارات مثل Vicat و HDT.

أما **TGA** فيُستخدم لتحديد إلى أي مدى يمكن تعريض المادة للحرارة قبل أن تبدأ في فقدان استقرارها الكيميائي أو مكوناتها، وهو المرجع الأساسي لتفسير نتائج اختبارات الثبات والشيخوخة الحرارية.

— خامسًا: العلاقة بين DSC و TGA في التطبيق الصناعي

في التطبيق العملي، لا يُستخدم أي من الاختبارين بمعزل عن الآخر. فمثلًا:

- قد يُظهر **DSC** أن المادة تحتفظ ببنيّتها حتى درجة حرارة معينة، بينما يكشف **TGA** أن التحلل يبدأ عند درجة أدنى نسبيًا بسبب وجود إضافات غير مستقرة.
- وقد يُظهر **TGA** استقرارًا وزنيًا جيدًا، بينما يكشف **DSC** انتقالًا زجاجيًا منخفضًا يحد من استخدام المادة في درجات حرارة معينة.

وبذلك فإن **DSC** يفسّر السلوك البنيوي، بينما **TGA** يحدّد حدود الاستقرار الكيميائي، ولا يُغني أحدهما عن الآخر.

— سادساً: كيف يفكر الفاحص عند استخدام الاختبارين معاً؟

لا يسأل الفاحص الصناعي: هل نتائج DSC أفضل أم نتائج TGA؟

بل يسأل:

- هل تتوافق الانتقالات البنيوية التي كشف عنها DSC مع حدود التحلل التي حددها TGA ؟
 - هل يمكن تشغيل المادة ضمن نطاق حراري يقع أسفل كل من Tg ودرجة بداية التحلل؟
 - هل تشير نتائج الاختبارين معاً إلى مادة متوازنة حرارياً أم إلى تركيبة حساسة؟
- وعند وجود تعارض ظاهري بين نتائج الاختبارين، لا يُعد ذلك خطأً في القياس، بل إشارة إلى تعقيد بنيوي أو تركيبى يستدعي تحليلاً أعمق.

- المقارنة المنهجية :

يمكن تلخيص الفرق الجوهرى بين الاختبارين كما يلي:

• DSC يجب عن سؤال:

كيف تتغير البنية الحرارية للمادة مع الحرارة؟

14- TGA يجب عن سؤال:

متى تبدأ المادة في فقدان مكوناتها أو استقرارها مع الحرارة؟

وبهذا يشكّل الاختباران معاً أساساً متكاملًا لفهم السلوك الحراري للبوليمرات، ويمهّدان للانتقال المنطقي إلى اختبارات السلوك الحراري تحت الحمل، ثم إلى اختبارات الاستقرار والشيخوخة الحرارية.

بعد أن يوضح DSC طبيعة الانتقالات الحرارية والبنية الداخلية للمادة، ويحدد TGA حدود الاستقرار الكيميائي

وبدء التدهور عند التعرض للحرارة، يبقى سؤال صناعي مباشر لا تجيب عنه التحليلات البنيوية وحدها: كيف تتصرف المادة عندما ترتفع الحرارة مع وجود حمل ميكانيكي فعلي يشبه ظروف الاستخدام؟ فالتلين والتشوه الحراري لا يحدثان بسبب الحرارة وحدها، بل نتيجة تفاعل الحرارة مع البنية ومع قدرة المادة على مقاومة الانحناء أو الاختراق

أو فقدان الشكل تحت الضغط. ومن هنا تأتي اختبارات التلّين والمقاومة الحرارية تحت الحمل، وعلى رأسها **Vicat** و **HDT**، بوصفها اختبارات تطبيقية تربط الفهم البنيوي الحراري بالسلوك العملي أثناء الخدمة.

5.3.2 اختبار درجة التلّين فيكات

Vicat Softening Temperature (VST)

- فلسفة الاختبار وماذا يعني “التلّين” في البوليمرات :
لا يُقصد بالتلّين في اختبار فيكات الانصهار أو التحول الكامل إلى مصهور، بل يُقصد به وصول المادة إلى حالة يصبح فيها مقاومتها للاختراق أو التشوه الموضعي منخفضة إلى حد يسمح للإبرة القياسية بالاختراق بمقدار محدد تحت حمل ثابت. أي أن الاختبار يقيس بداية فقدان الصلابة البنيوية تحت الحرارة، وليس درجة ذوبان المادة.
ولهذا يُستخدم Vicat لتحديد حد عملي يُقارب “بداية فقدان الثبات الشكلي” للمواد الصلبة عند التسخين، خاصة في التطبيقات التي قد تتعرض لحرارة تلامس أو بيئات دافئة مع حمل خفيف إلى متوسط.

- ما الذي يقيسه اختبار Vicat فعلياً ؟

يعطي اختبار Vicat درجة الحرارة التي تتحقق عندها الشروط الآتية مجتمعة:

- عينة صلبة تحت تسخين بمعدل محدد
- إبرة/مخترق قياسي على سطح العينة
- حمل معياري ثابت
- الوصول إلى عمق اختراق محدد المعيار الأكثر شيوعاً 1 مم

وبذلك فهو لا يقيس:

- درجة الانصهار

- ولا Tg بشكل مباشر

بل يقيس استجابة مركبة تتأثر بالبنية غير المتبلورة والمتبلورة معاً، وبمقاومة المادة للاختراق أثناء التسخين.

- لماذا يُعد Vicat اختبارًا تطبيقيًا مهمًا؟

تتبع أهمية Vicat من أنه يترجم المعلومات البنوية التي نراها في DSC إلى حد عملي يُستخدم في:

- تحديد حدود الاستخدام الحراري للمنتج عند وجود حمل خفيف

- المقارنة بين درجات مختلفة من نفس البوليمر

- تقييم أثر الإضافات المالئة أو الملدنات أو معدلات الصدمة على الثبات الحراري

- مراقبة اتساق الدُفعات عند تصنيع نفس المنتج

- الفرق بين Vicat ودرجة الانصهار :

من الأخطاء الشائعة تفسير Vicat على أنه “درجة انصهار مبكرة.” والصحيح أن:

- نقطة الانصهار (أو نطاقها) تعبر عن تفكك المناطق المتبلورة

- بينما Vicat يعكس بداية فقدان الصلابة تحت اختراق موضعي مع ارتفاع الحرارة

وقد تكون مادة ذات نقطة انصهار مرتفعة نسبيًا لكن Vicat أقل مما يتوقعه البعض، بسبب طبيعة الجزء غير

المتبلور أو وجود إضافات تُضعف مقاومة الاختراق.

- العوامل التي تؤثر على نتيجة Vicat :

نتيجة Vicat ليست رقمًا “طبيعيًا ثابتًا” للمادة، بل تتأثر بوضوح بـ:

- معدل التسخين

كلما زاد معدل التسخين قد تتغير استجابة المادة لأن البنية لا تحصل على وقت كافٍ لإعادة الترتيب،

وقد تظهر فروق بين عينات متقاربة.

- الحمل المستخدم

الزيادة في الحمل تسرع حدوث الاختراق وتُخفض درجة Vicat المقاسة؛ لذلك لا تُقارن النتائج إلا

عند توحيد شرط الحمل.

● تحضير العينة وسُمكها

السطح، التجانس، وجود فراغات دقيقة، أو بقايا رطوبة، كلها قد تغيّر استجابة العينة للاختراق وتنتج قيمًا مضللة.

● درجة التبلور والإضافات

● زيادة التبلور غالبًا ترفع مقاومة التشوه وتحسّن الثبات الشكلي

● الملدنات قد تخفض Vicat بشكل ملحوظ

● بعض المالنات قد ترفع Vicat ظاهريًا أو تحسن الثبات الشكلي حسب نوعها وتوزيعها

- تفسير نتيجة Vicat داخل المختبر الصناعي :

لا يُقرأ رقم Vicat بوصفه “درجة حرارة تشغيل”، بل كحد مرجعي يساعد على الإجابة عن أسئلة مثل:

- هل المنتج سيفقد شكله تحت حرارة تلامس معينة؟
- هل التغيير في التركيبة (حشو/إضافات/خلط) رفع أو خفض مقاومة التلّين؟
- هل هناك اختلاف غير مبرر بين دفعات يفترض أنها متطابقة؟
- هل تتوافق النتيجة مع ما كشفه DSC عن البنية) مثل درجة التبلور أو (Tg ؟

- ماذا لا يقول اختبار Vicat ؟

من المهم تثبيت حدود الاختبار حتى لا يُساء استخدامه:

● لا يحدد وحده مدى تحمل المنتج للأحمال الكبيرة

● لا يصف سلوك المصهور أو سهولة التشغيل

● لا يعكس الأداء الميكانيكي الكامل

● لا يغني عن HDT عند تقييم التشوه تحت حمل انحناء

ولهذا يُستخدم Vicat كأداة “حدود تلّين” ضمن منظومة، لا كأداة اعتماد مستقلة.

- القرار الناتج عن اختبار Vicat :

لا يؤدي Vicat عادة إلى قرار قبول/رفض نهائي بمفرده، لكنه يُستخدم لتحديد:

- حدود استخدام حراري أولية
- الحاجة لرفع الثبات الحراري عبر تعديل التركيبة أو الإضافات
- ضرورة الانتقال لاختبار **HDT** عندما يكون المطلوب تقييم التشوه تحت حمل انحنائي أو ثبات شكلي أقوى

وإذا كان اختبار Vicat يركّز على التلّين تحت اختراق موضعي، فإن اختبار **HDT** يقيّم التشوه والانحراف تحت حمل انحنائي، وهو أقرب لواقع كثير من المنتجات التي تفشل حراريًا عبر الانحناء أو فقدان الأبعاد، لا عبر الاختراق.

5.3.3 اختبار درجة التشوّه الحراري تحت الحمل

Heat Deflection Temperature (HDT)

- فلسفة الاختبار ومفهوم التشوّه الحراري

يُعنى اختبار درجة التشوّه الحراري تحت الحمل (HDT) بدراسة سلوك المادة أو المنتج عند تعرّضه لارتفاع تدريجي في درجة الحرارة مع وجود حمل ميكانيكي ثابت يسبب انحناءً. وعلى خلاف اختبار Vicat الذي يركّز على التلّين الموضعي تحت اختراق، فإن HDT يقيس فقدان الثبات الشكلي والانحراف البنيوي تحت ظروف أقرب إلى الواقع العملي للمنتجات البلاستيكية.

ولا يُقصد بالتشوّه هنا الانصهار أو الفشل الكامل، بل الوصول إلى حد معياري من الانحناء يدل على أن المادة لم تعد قادرة على الحفاظ على شكلها تحت الحمل والحرارة معًا.

- ما الذي يقيسه اختبار HDT فعليًا؟

يقيس اختبار HDT درجة الحرارة التي يحدث عندها انحراف محدد مسبقًا لعينة قياسية خاضعة:

- لحمل انحنائي ثابت

- وتسخين بمعدل منتظم
- حتى بلوغ مقدار انحراف معياري (غالبًا 0.25 مم)
- وبذلك فإن HDT يقيس استجابة مركبة تجمع بين:

- الصلابة الحرارية
- مقاومة الانحناء
- تأثير البنية البوليمرية مع الحرارة

ولا يقيس:

- درجة الانصهار
- ولا Tg بشكل مباشر
- ولا قوة المادة في الظروف الباردة

– لماذا يُعد HDT اختبارًا محوريًا في التقييم الصناعي؟

تتبع أهمية HDT من كونه من أقرب الاختبارات المختبرية لمحاكاة سلوك المنتج أثناء الاستخدام، خصوصًا في التطبيقات التي:

- تتعرض لحرارة محيطية مرتفعة
- تحمل وزنًا أو ضغطًا مستمرًا
- تتطلب ثباتًا شكليًا وأبعاديًا

ولهذا يُستخدم HDT لتحديد:

- حدود الخدمة الحرارية للمنتج
- ملاءمته لتطبيقات إنشائية أو شبه إنشائية
- أثر التعديلات التركيبية على الثبات الحراري

– الفرق الجوهرى بين Vicat و HDT

على الرغم من ارتباط الاختبارين بالحرارة، فإن الفرق بينهما جوهري:

• Vicat يحدد:

- بداية التليّن الموضعي
- مقاومة الاختراق تحت حمل عمودي
- مؤشرًا مبكرًا لفقدان الصلابة السطحية

• HDT يحدد:

- التشوّه والانحناء تحت حمل انحنائي
- فقدان الثبات الشكلي الكلي
- سلوك المادة في ظروف أقرب للاستخدام الحقيقي

ولهذا قد تُظهر مادة Vicat مرتفعًا نسبيًا، لكنها تفشل مبكرًا في HDT إذا كانت صلابتها الانحنائية أو بنيتها غير كافية.

– العوامل المؤثرة في نتيجة HDT :

• مستوى الحمل

يُجرى اختبار HDT تحت أحمال معيارية مختلفة. وكلما زاد الحمل:

• زادت سرعة الانحناء

• وانخفضت درجة HDT المقاسة

ولهذا لا يجوز مقارنة نتائج HDT دون توحيد الحمل المستخدم.

• معدل التسخين

معدل التسخين يؤثر على كيفية تفاعل البنية مع الحرارة. التسخين السريع قد يخفي بعض مظاهر إعادة الترتيب البنيوي، في حين قد يعطي التسخين البطيء نتائج أدق لكن أطول زمنًا.

• درجة التبلور والبنية الداخلية

المواد الأعلى تبلورًا غالبًا تُظهر HDT أعلى

المواد ذات البنية غير المتجانسة قد تفشل مبكرًا

اختلاف التاريخ الحراري قد يغيّر النتيجة حتى مع نفس التركيبة الكيميائية

• الإضافات والتركيبة

المالئات قد ترفع HDT إذا حسّنت الصلابة الانحنائية

الملدنات تخفض HDT بوضوح

التوزيع غير المتجانس للإضافات يؤدي إلى نتائج متذبذبة

– تفسير نتائج HDT داخل المختبر الصناعي :

لا يُقرأ رقم HDT بوصفه “درجة حرارة تشغيل قصوى”، بل يُستخدم للإجابة عن أسئلة عملية مثل:

– هل يحافظ المنتج على شكله تحت حرارة تشغيل متوقعة؟

– هل التعديل في التركيبة حسّن الثبات الشكلي فعليًا؟

– هل هناك فرق غير مبرر بين دفعات إنتاج؟

– هل تتوافق النتيجة مع ما كشفه DSC عن البنية ومع Vicat عن التليّن؟

وتُعد المقارنة بين HDT و Vicat أداة قوية لفهم طبيعة الفشل الحراري المتوقع. هل يبدأ بتليّن موضعي أم بانحناء بنيوي شامل؟

– ماذا لا يقول اختبار HDT ؟

على الرغم من أهميته، لا يقدّم HDT معلومات عن:

سلوك المصهور

مقاومة الصدم

المتانة طويلة الأمد

الأداء تحت أحمال متغيرة أو صدمات حرارية

ولهذا لا يُستخدم منفردًا لتحديد صلاحية المادة لكل التطبيقات.

– القرار الناتج عن اختبار HDT يُستخدم اختبار HDT بوصفه:

• أداة تحديد حدود الخدمة الحرارية

• مرجعًا لتقييم الثبات الشكلي تحت الحمل

• داعيًا لقرارات التصميم أو اختيار المادة

• أساسًا للانتقال إلى اختبارات الثبات والشيخوخة الحرارية

ولا يُبنى عليه قرار اعتماد نهائي إلا عند دمج مع نتائج DSC و TGA و Vicat واختبارات أخرى ذات صلة.

وبعد تقييم سلوك المادة تحت الحرارة مع وجود حمل ميكانيكي، يصبح من الضروري الانتقال إلى اختبارات تُعنى باستقرار المادة عند التعرض الحراري المستمر أو طويل الأمد، وهو ما تتناوله اختبارات الثبات الحراري والشيخوخة الحرارية.

4. الفصل الرابع اختبار الثبات الحراري

5.4 اختبار الثبات الحراري Thermal Stability Test

– مفهوم الثبات الحراري في البوليمرات :

يُقصد بالثبات الحراري قدرة البوليمر أو التركيبة البوليمرية على الحفاظ على بنيته وخصائصها الأساسية عند تعريضها لدرجة حرارة محددة لفترة زمنية معينة، دون وجود حمل ميكانيكي مباشر. ويركز هذا الاختبار على مقاومة المادة للتدهور الحراري التدريجي الذي قد يحدث حتى في حال عدم ظهور تشوّه شكلي أو فقدان فوري للوظيفة.

ويختلف مفهوم الثبات الحراري عن التلّين أو التشوّه الحراري، إذ لا يهتم هذا الاختبار بتغيّر الشكل تحت الحمل، بل يدرس استقرار المادة نفسها من حيث تركيبها، ولونها، وخواصها، وقدرتها على تحمّل التعرض الحراري المستمر.

موقع اختبار الثبات الحراري ضمن منظومة الاختبارات يأتي اختبار الثبات الحراري بعد اختبارات:

DSC التي تكشف الانتقالات والبنية الحرارية، و TGA التي تحدد بداية التحلل وفقدان الكتلة،

و Vicat HDT / التي تقيّم السلوك تحت الحمل، ليملاً فجوة مهمة تتمثل في الإجابة عن سؤال:

هل تستطيع المادة أن تحافظ على استقرارها عند التعرض الحراري المستمر، حتى لو لم تصل إلى حدود التلّين أو التحلل؟ وبذلك يُعد اختبار الثبات الحراري اختبارًا انتقاليًا بين تقييم السلوك الحراري الفوري وتقييم تأثير الزمن.

- ما الذي يقيسه اختبار الثبات الحراري فعليًا؟

لا يقيس اختبار الثبات الحراري درجة حرارة فشل لحظية، بل يقيّم معدل ونمط التدهور الحراري مع الزمن عند درجة حرارة مختارة تمثل ظروف تشغيل متوقعة أو قريبة منها.

ويُرصّد خلال الاختبار:

- ظهور تغيّر لوني تدريجي
- انبعاث روائح تحلل
- تغيّر في الملمس أو التماسك
- فقدان اللمعان أو الهشاشة
- تدهور الخواص الفيزيائية أو الميكانيكية بعد التعريض

وبذلك فإن الاختبار يقيس الاستقرار الوظيفي للمادة تحت الحرارة لا مجرد تحملها اللحظي.

- الفرق بين الثبات الحراري وبداية التحلل الحراري

من الضروري التمييز بين:

بداية التحلل الحراري التي يكشفها TGA ،

وفقدان الثبات الحراري.

فقد تبدأ بعض المواد في فقدان اللون أو الخواص أو إطلاق نواتج تحلل قبل أن يظهر أي فقدان ملحوظ في الكتلة. ولهذا فإن مادة قد تُظهر استقرارًا وزنيًا جيدًا في TGA ، لكنها تفشل مبكرًا في اختبار الثبات الحراري بسبب تدهور بنيوي أو أكسدة حرارية.

- طرق إجراء وتقييم اختبار الثبات الحراري

لا توجد طريقة واحدة موحدة لإجراء اختبار الثبات الحراري، بل يُنقّد وفق مبدأ عام يعتمد على تعريض العينة لدرجة حرارة ثابتة أو متدرجة لفترة زمنية محددة، ثم تقييم التغيرات الناتجة.

وتُقيّم النتائج بإحدى الطريقتين أو كليهما:

التقييم الكيفي ويشمل:

- الملاحظة البصرية لتغير اللون أو السطح
- رصد الروائح الناتجة
- مقارنة المظهر قبل وبعد التعريض
- تقييم الهشاشة أو فقدان المرونة

ويُستخدم هذا التقييم كإشارة أولية وسريعة على بدء التدهور.

التقييم الكمي ويشمل:

- قياس التغير في الخواص الميكانيكية بعد التعريض
- قياس التغير في السيولة (MFI) كمؤشر على تكسر السلاسل
- قياس التغير اللوني (ΔE)
- مقارنة نتائج اختبارات لاحقة قبل وبعد التعريض الحراري

ويُعد هذا التقييم أكثر دقة، ويُستخدم لاتخاذ قرارات صناعية.

العوامل المؤثرة في نتائج اختبار الثبات الحراري

- نوع البوليمر وتركيبه البنوي
- وجود مثبتات حرارية أو مضادات أكسدة
- نوع الوسط المحيط (هواء، وسط خامل)
- درجة الحرارة المختارة
- مدة التعرض
- شكل العينة وتجانسها

ولهذا لا تُفسر نتائج اختبار الثبات الحراري دون توثيق كامل لشروط الاختبار.

كيف يفكر الفاحص عند قراءة نتائج الثبات الحراري؟

لا يبحث الفاحص عن “نجاح أو فشل” مطلق، بل يقيم:

- سرعة ظهور مؤشرات التدهور
- طبيعة التغير (سطحي، بنيوي، كيميائي)
- مدى تأثير التدهور على الخواص الوظيفية

– الفارق بين المادة المختبرة ومواد أو دفعات مرجعية

ويُستخدم الاختبار للإجابة عن أسئلة مثل:

- هل التركيبية مستقرة ضمن ظروف التشغيل الحرارية المتوقعة؟
- هل نظام المثبتات الحرارية كافٍ؟
- هل المادة المعاد تدويرها تحتاج دعمًا حراريًا إضافيًا؟
- هل التعديل في التركيبية حسن الاستقرار أم أضعفه؟

– ماذا لا يقول اختبار الثبات الحراري؟

على الرغم من أهميته، لا يقدّم اختبار الثبات الحراري:

- درجة حرارة فشل دقيقة
- وصفًا للتشوّه تحت الحمل
- تقييمًا مباشرًا للعمر الخدمي الطويل
- معلومات عن سلوك المصهور أثناء التشغيل

ولهذا لا يُستخدم بوصفه اختبار اعتماد نهائي، بل كأداة تقييم واستقرار.

– القرار الناتج عن اختبار الثبات الحراري

تُستخدم نتائج اختبار الثبات الحراري من أجل:

- تحديد مدى ملاءمة المادة للتعرض الحراري المستمر
- اختيار أو تعديل نظام المثبتات الحرارية
- دعم قرارات التشغيل عند درجات حرارة مرتفعة
- تقرير الحاجة للانتقال إلى اختبارات الشيخوخة الحرارية

وبذلك يُعد اختبار الثبات الحراري مرحلة أساسية في تقييم قابلية المادة للاستخدام الحراري، وجسرًا منطقيًا للانتقال إلى دراسة تأثير الزمن.

وبعد تقييم استقرار المادة عند التعرض الحراري المستمر، يصبح من الضروري دراسة تأثير الزمن الطويل والتعرض المتكرر للحرارة، وهو ما نتناوله اختبارات الشيخوخة الحرارية.

5.4.1 اختبار الشيخوخة الحرارية

Thermal Aging Test

- مفهوم الشيخوخة الحرارية في البوليمرات :
يُقصد بالشيخوخة الحرارية التغير التدريجي الذي يطرأ على خصائص البوليمر أو المنتج البلاستيكي نتيجة التعرض الطويل أو المتكرر للحرارة مع مرور الزمن .ولا يقتصر هذا التغير على جانب واحد من السلوك، بل قد يشمل البنية، والخواص الفيزيائية، والأداء الميكانيكي، والمظهر، وحتى الاستقرار الكيميائي.
وتختلف الشيخوخة الحرارية عن اختبار الثبات الحراري في أن عامل الزمن هنا عنصر أساسي في التقييم، إذ لا يُسأل فقط :هل تتحمل المادة الحرارة؟ بل :كيف تتغير خصائصها مع استمرار التعرض الحراري على المدى المتوسط أو الطويل؟
- موقع اختبار الشيخوخة الحرارية ضمن منظومة الاختبارات
يأتي اختبار الشيخوخة الحرارية بعد:
 - اختبارات الانتقالات والبنية الحرارية (DSC)
 - اختبارات الاستقرار الكيميائي (TGA)
 - اختبارات السلوك الحراري تحت الحمل (Vicat / HDT)
 - اختبار الثبات الحراري قصير أو متوسط المدى
- ليكون أداة تقييم زمنية تُستخدم لاستشراف أداء المادة خلال عمرها الخدمي، وليس فقط عند التعرض الحراري اللحظي.
- ما الذي يقيسه اختبار الشيخوخة الحرارية فعلياً؟
لا يقيس اختبار الشيخوخة الحرارية درجة حرارة فشل أو نقطة انهيار مباشرة، بل يقيّم معدل واتجاه تدهور الخصائص مع الزمن عند تعريض المادة لحرارة محددة أو لعدة درجات حرارة على فترات زمنية مختلفة.

ويُرى خلال هذا الاختبار:

- التغير التدريجي في الخواص الميكانيكية
- فقدان المرونة أو زيادة الهشاشة
- التغير في اللون أو المظهر السطحي
- التغير في السيولة أو الوزن الجزيئي
- تراجع الأداء الوظيفي مقارنة بالحالة الأصلية

— وبذلك يقدّم الاختبار صورة عن سلوك المادة مع الزمن لا عن تحملها الحراري اللحظي.

— أساليب إجراء اختبار الشيخوخة الحرارية :

يُجرى اختبار الشيخوخة الحرارية عادة بتعريض العينات إلى:

- درجة حرارة ثابتة لفترات زمنية متزايدة
أو

- دورات حرارية متكررة تمثل ظروف تشغيل واقعية

ثم تُسحب العينات عند فواصل زمنية محددة لإجراء اختبارات مقارنة قبل/بعد التعريض. ولا تكمن أهمية الاختبار في التعريض الحراري وحده، بل في ما يُقاس بعده.

— طرق تقييم نتائج الشيخوخة الحرارية :

تُقيّم نتائج اختبار الشيخوخة الحرارية باستخدام مؤشرات كمية وكيفية، من أهمها:

التقييم الكمي

ويشمل:

- قياس التغير في الخواص الميكانيكية (مثل الشد أو الاستطالة)
- قياس التغير في السيولة كمؤشر على تدهور السلاسل
- مقارنة نتائج HDT أو Vicat قبل وبعد الشيخوخة

- قياس التغير اللوني أو الكتلي عند الحاجة

التقييم الكيفي

ويشمل:

- الملاحظة البصرية للتشققات أو التصلب

- تغير الملمس أو فقدان اللمعان

- ظهور علامات أكسدة أو تحلل سطحي

العوامل المؤثرة في نتائج اختبار الشيخوخة الحرارية

تتأثر نتائج الشيخوخة الحرارية بعدة عوامل أساسية، من أهمها:

- نوع البوليمر وطبيعة بنيته
- وجود أو غياب المثبتات الحرارية
- درجة الحرارة المختارة
- مدة التعرض
- الوسط المحيط (هواء، بيئة خاملة)
- شكل العينة وسُمكها

ولهذا لا تُفسر نتائج الشيخوخة الحرارية دون ربطها الكامل بظروف الاختبار.

كيف يفكر الفاحص عند قراءة نتائج الشيخوخة الحرارية؟

لا يبحث الفاحص عن رقم نهائي، بل يركّز على:

- معدل التدهور مع الزمن
- طبيعة التغير (تدريجي، مفاجئ، خطي، متسارع)
- الفارق بين الأداء الأولي والأداء بعد الشيخوخة
- مدى توافق التدهور مع العمر الخدمي المتوقع

ويُستخدم الاختبار للإجابة عن أسئلة مثل:

- هل ستحافظ المادة على أدائها خلال فترة الخدمة المتوقعة؟
- هل نظام التثبيت الحراري كافٍ على المدى الطويل؟

- هل المادة المعاد تدويرها مناسبة لتطبيق طويل العمر؟
- هل يلزم خفض درجة التشغيل أو تغيير التركيبة؟

- ماذا لا يقول اختبار الشيخوخة الحرارية؟

على الرغم من أهميته، لا يقدّم اختبار الشيخوخة الحرارية:

- تحديدًا دقيقًا لعمر الخدمة الفعلي
- محاكاة كاملة لكل ظروف التشغيل الواقعية
- وصفًا لسلوك المادة تحت صدمات حرارية مفاجئة
- بديلاً عن اختبارات الاستخدام الميداني

ولهذا يُستخدم كأداة تنبؤية ومقارنة لا كدليل قاطع منفرد.

- القرار الناتج عن اختبار الشيخوخة الحرارية

تُستخدم نتائج اختبار الشيخوخة الحرارية من أجل:

تقييم ملاءمة المادة لتطبيقات طويلة الأمد

اختيار أو تعديل نظام المثبتات الحرارية

مقارنة مواد أو تركيبات مختلفة من حيث الاستقرار الزمني

دعم قرارات التصميم أو تحديد حدود العمر الخدمي

الانتقال إلى اختبار الاستقرار الحراري طويل الأمد عند الحاجة

وبعد دراسة تأثير الزمن والتعرض الحراري المتكرر، يصبح من الضروري تقييم قدرة المادة على الحفاظ على استقرارها الحراري خلال فترات تشغيل طويلة جدًا، وهو ما تتناوله اختبارات الاستقرار الحراري طويل الأمد.

5.4.2 اختبار الاستقرار الحراري طويل الأمد

Long-Term Thermal Stability Test

المفهوم العام للاستقرار الحراري طويل الأمد :

يُقصد بالاستقرار الحراري طويل الأمد قدرة البوليمر أو المنتج البلاستيكي على الاحتفاظ ببنية وخصائصه الوظيفية ضمن حدود مقبولة عند التعرض المستمر أو المتكرر لدرجات حرارة مرتفعة نسبيًا، خلال فترات زمنية طويلة قد تمتد إلى أشهر أو سنوات، بما يحاكي العمر الخدمي المتوقع للمنتج.

ولا يهتم هذا الاختبار بحدوث الفشل الحراري اللحظي، ولا ببداية التلّين أو التَشَوُّه السريع، بل يركّز على التدهور التراكمي البطيء الذي قد لا يكون ملحوظًا في المراحل الأولى، لكنه يؤدي في النهاية إلى فقدان الأداء أو القبول الوظيفي.

وبذلك فإن الاستقرار الحراري طويل الأمد لا يجيب عن سؤال متى تفشل المادة؟

بل يجيب عن سؤال أَدَق وأخطر صناعيًا:

هل تبقى المادة صالحة وظيفيًا بعد فترة خدمة طويلة تحت الحرارة؟

– الفرق الجوهرى بين الاستقرار الحراري طويل الأمد والاختبارات السابقة

لفهم وظيفة هذا الاختبار، يجب تمييزه بوضوح عن غيره:

– DSC يوضح الانتقالات البنيوية الحرارية

– TGA يحدد بداية التحلل وفقدان الكتلة

– Vicat / HDT يقيمان السلوك الحراري تحت الحمل

○ الثبات الحراري يقيّم مقاومة التدهور خلال تعرّض حراري قصير أو متوسط

○ الشيخوخة الحرارية تقيّم معدل التدهور مع الزمن

أما الاستقرار الحراري طويل الأمد فيُستخدم لتقييم:

○ استمرار الأداء

○ استدامة الخصائص

○ صلاحية المادة للخدمة طويلة المدى

وهو بذلك اختبار قرار استراتيجي لا اختبار توصيف.

— ما الذي يقيسه اختبار الاستقرار الحراري طويل الأمد فعليًا؟

لا يقيس هذا الاختبار قيمة واحدة أو رقمًا معياريًا بسيطًا، بل يقيس سلوك المادة عبر الزمن عند تعريضها لحرارة ثابتة أو متكررة، من خلال مراقبة:

- مدى احتفاظ المادة بخواصها الميكانيكية الأساسية
- درجة التدهور البنيوي غير المرئي ظاهريًا
- تطور الهشاشة أو فقدان المرونة
- تغيير السيولة أو الوزن الجزيئي مع الزمن
- استقرار اللون والمظهر السطحي
- بقاء المنتج ضمن حدود الأداء المقبول وظيفيًا

وبذلك فإن الاختبار يقيّم الاستقرار الوظيفي طويل الأمد، لا مجرد التحمل الحراري.

— أسلوب إجراء اختبار الاستقرار الحراري طويل الأمد

يُجرى هذا الاختبار عادة بتعرض عينات ممثلة للمادة أو المنتج إلى:

- درجة حرارة ثابتة يتم اختيارها أقل من حدود التلّين أو التحلل
- فترات زمنية طويلة تمتد لأسابيع أو أشهر
- وسط محدد (هواء، بيئة خاملة، أو بيئة محكمة)

وتُسحب العينات عند فواصل زمنية محددة مسبقًا لإجراء اختبارات مقارنة، بحيث يتم بناء منحنى تدهور زمني بدلًا من قراءة نقطة واحدة.

ولا تكمن أهمية الاختبار في درجة الحرارة وحدها، بل في التفاعل التراكمي بين الحرارة والزمن.

— المؤشرات المستخدمة في تقييم الاستقرار طويل الأمد :

— مؤشرات ميكانيكية

- مقارنة مقاومة الشد أو الانحناء قبل وبعد التعريض
- قياس فقدان الاستطالة أو زيادة الهشاشة
- رصد تغيير الصلابة أو المرونة

– مؤشرات بنيوية

- تغير السيولة كمؤشر على تكسر السلاسل
- تغير الوزن الجزيئي إن أمكن
- ظهور تدهور داخلي غير مرئي ظاهريًا

– مؤشرات شكلية ووظيفية

- التشققات السطحية
- فقدان اللمعان
- تغير اللون التدريجي
- تدهور الأداء الوظيفي للمنتج

وَيُقَيَّم الأداء دائمًا كنسبة احتفاظ بالخواص وليس كقيم مطلقة.

– دور المثبتات الحرارية في هذا الاختبار

يُعد اختبار الاستقرار الحراري طويل الأمد من أهم الاختبارات المستخدمة لتقييم فعالية نظام المثبتات الحرارية ومضادات الأكسدة داخل التركيبة.

فقد تظهر مادة نتائج جيدة في اختبارات الثبات أو الشيخوخة القصيرة، لكنها تقشَل على المدى الطويل بسبب:

استهلاك المثبتات

تراكم نواتج الأكسدة

تدهور بطيء للسلاسل البوليمرية

ولهذا يُستخدم هذا الاختبار لتحديد:

كفاية نظام التثبيت

الحاجة إلى تعديل نوع أو تركيز المثبتات

حدود التشغيل الحراري الآمن طويلة الأمد

– كيف يفكر الفاحص عند قراءة نتائج الاستقرار الحراري طويل الأمد؟

لا يبحث الفاحص عن فشل مفاجئ، بل يقيّم:

منحنى التدهور مع الزمن

سرعة فقدان الخصائص

نقطة الخروج عن حدود القبول الوظيفي

مدى توافق النتائج مع العمر الخدمي المطلوب

ويطرح أسئلة مثل:

هل تحتفظ المادة بنسبة كافية من خواصها بعد فترة الخدمة المتوقعة؟

هل التدهور تدريجي ومقبول أم متسارع وخطير؟

هل يمكن تحسين الأداء عبر تعديل التركيبة؟

○ هل المادة مناسبة لتطبيق طويل العمر أم يجب استبعادها؟

– حدود اختبار الاستقرار الحراري طويل الأمد

على الرغم من أهميته القصوى، فإن هذا الاختبار:

لا يعطي عمر خدمة دقيقاً بالأعوام

لا يحاكي جميع ظروف التشغيل الواقعية

لا يغني عن الاختبارات الميدانية

ولا يمثل ضماناً مطلقاً للأداء

لكنه يبقى أقوى أداة مختبرية لتقييم الاستدامة الحرارية قبل الانتقال إلى التطبيق الفعلي.

– القرار الناتج عن اختبار الاستقرار الحراري طويل الأمد

تُستخدم نتائج هذا الاختبار لاتخاذ قرارات حاسمة، مثل:

اعتماد مادة لتطبيق طويل الخدمة

تحديد حدود التشغيل الحراري الآمن

اختيار أو تعديل نظام التثبيت الحراري

الانتقال من مرحلة التقييم المختبري إلى القرار الصناعي النهائي

وبذلك يُعد اختبار الاستقرار الحراري طويل الأمد الخاتمة المنطقية لمسار الاختبارات الحرارية، والنقطة التي يتحول عندها التحليل العلمي إلى قرار صناعي.

— الاختبارات الحرارية وتقييم السلوك الحراري للبوليمرات

تناولت فصول هذا الجزء منظومة الاختبارات الحرارية بوصفها أدوات تحليلية مترابطة تهدف إلى فهم سلوك البوليمرات عند التعرض للحرارة، وليس بوصفها اختبارات منفصلة أو أرقامًا مستقلة تُقرأ بمعزل عن سياقها. فقد بدأ التقييم من دراسة الانتقالات والبنية الحرارية الداخلية للمادة، ثم انتقل إلى تحديد حدود الاستقرار الكيميائي، وتدرّج بعد ذلك إلى تقييم السلوك تحت الحمل الحراري، قبل أن يصل إلى تحليل تأثير التعرض الحراري المستمر والزمني طويل الأمد.

وأظهر هذا التسلسل أن السلوك الحراري للبوليمرات لا يمكن اختزاله في قيمة واحدة مثل درجة الانصهار أو حد التشوّه، بل هو نتاج تفاعل معقد بين البنية الجزيئية، ونظام الإضافات، وشروط التشغيل، والزمن. فاختبارات مثل التحليل الحراري التفاضلي والتحليل الحراري الوزني توفّر الأساس البنوي والكيميائي لفهم المادة، في حين تترجم اختبارات التلّين والتشوّه الحراري هذه المعرفة إلى سلوك عملي تحت ظروف قريبة من الاستخدام. أما اختبارات الثبات والشيخوخة والاستقرار الحراري طويل الأمد، فتمثّل أدوات تقييم زمنية تُستخدم لاستشراف الأداء والاستدامة، لا لاكتشاف الفشل اللحظي فقط.

ولا يُقصد من هذه الاختبارات أن تُستخدم بوصفها أدوات اعتماد نهائي مفردة، بل كمنظومة تحليلية تُبنى عليها القرارات الصناعية المتعلقة باختيار المادة، وتصميم التركيبة، وتحديد حدود التشغيل، وتقدير العمر الخدمي المتوقع. فالقيمة الحقيقية للاختبارات الحرارية لا تكمن في الأرقام التي تنتجها، بل في طريقة تفسيرها وربطها ببقية نتائج الفحوصات ضمن إطار منهجي متكامل.

وباكتمال هذا الجزء، يكون القارئ قد امتلك فهمًا واضحًا للأسس الحرارية التي تحكم سلوك البوليمرات أثناء التصنيع والاستخدام، مما يمهد للانتقال إلى الجزء التالي الذي يتناول الاختبارات الميكانيكية، حيث يُستكمل تقييم المادة من حيث قدرتها على تحمّل الأحمال والقوى والتشوهات في ظروف التشغيل الفعلية، وبناء الصورة الكاملة التي تقود إلى القرار الصناعي النهائي.

الباب السادس

اختبارات السلوك والأداء

- 1.6 الفصل الأول اختبارات السلوك والأداء الميكانيكي للمنتج

- 6.1.1 اختبار الشد Tensile Test

- 6.1.2 اختبار الصدم Impact Test

– 6.1.2.1 اختبار الصدم المشقوق Notched Impact Test

– 6.1.2.2 اختبار الصدم غير المشقوق Unnotched Impact Test

– 6.1.3 اختبار الضغط Compression Test

بعد توصيف المادة الخام ودراسة سلوكها الحراري والزمني، ينتقل التقييم في هذا الجزء إلى المرحلة التي يصبح فيها المنتج نفسه محور الاختبار. فاختبارات السلوك والأداء الميكانيكي لا تهدف إلى توصيف البوليمر بوصفه مادة مجردة، بل إلى تقييم قدرة المنتج المُشكَّل على أداء وظيفته تحت ظروف التحميل الفعلية التي سيتعرض لها أثناء الاستخدام.

تُجرى هذه الاختبارات على عينات تمثل الشكل الهندسي الحقيقي للمنتج أو على نماذج معيارية تحاكي سلوكه، وتركز على فهم أنماط التشوّه والفسل، سواء كانت لحظية أو تدريجية، تحت تأثير الأحمال الثابتة أو المتكررة أو المفاجئة. ولا تُقرأ نتائج هذه الاختبارات بوصفها أرقامًا مستقلة، بل كجزء من منظومة تحليلية تربط بين التصميم، وطريقة التشكيل، والخواص البنيوية، وظروف التشغيل.

ويتميز هذا الجزء بأن كثيرًا من اختبارات تقييم الأداء مع الزمن، أو عند تجاوز حدود التحميل الآني، وهو ما يجعلها أدوات قرار أساسية لتحديد صلاحية المنتج، وحدود استخدامه الآمن، والحاجة إلى تعديل التصميم أو التركيب قبل الانتقال إلى مرحلة الاعتماد أو الإنتاج الكامل.

وبذلك تمثل اختبارات السلوك والأداء الميكانيكي المرحلة التي تتحول فيها نتائج المختبر من بيانات توصيفية إلى قرارات هندسية مباشرة تمس جودة المنتج واعتماده في التطبيق النهائي.

6.1.1 اختبار الشد (Tensile Test)

– قراءة سلوك المنتج تحت الحمل من المرونة إلى الفشل :

يُعد اختبار الشد حجر الأساس في الاختبارات الميكانيكية للمنتجات البلاستيكية، ليس لأنه الأكثر شيوعاً فحسب، بل لأنه الاختبار الذي يكشف القصة الكاملة لسلوك المادة تحت الحمل. فمن خلال اختبار واحد، يمكن تتبع انتقال المنتج من الحالة غير المحملة، إلى التشوه المرن، ثم التشوه اللدن، وصولاً إلى الفشل. ويمثل اختبار الشد أول اختبار ميكانيكي يُبنى عليه قرار حقيقي بشأن صلاحية المنتج للاستخدام، بعد التأكد من استقرار أبعاده وعدم خضوعه لتغيرات لاحقة غير متحكم بها.

– لماذا اختبار الشد تحديداً؟

تكمُن أهمية اختبار الشد في أنه:

- يختبر المادة تحت حمل تدريجي ومضبوط
- يسمح بمراقبة التشوه لحظة بلحظة
- يكشف الفرق بين السلوك المرن واللدن
- يوضح نمط الفشل (هش أو مطيلي)
- يربط الخواص الميكانيكية بالبنية والتركيب والتشكيل

كما أن معظم الأحمال التي تتعرض لها المنتجات البلاستيكية في الواقع يمكن، بشكل مباشر أو غير مباشر، ردها إلى إجهاد شد.

– فلسفة اختبار الشد :

اختبار الشد لا يهدف إلى معرفة كم تتحمل المادة قبل أن تنكسر فقط، بل يهدف إلى الإجابة عن أسئلة أعمق، مثل:

- كيف تتصرف المادة قبل الفشل؟
- هل تعطي إنذاراً قبل الانهيار أم تفشل فجأة؟
- هل التشوه قابل للضبط أو غير متوقع؟
- هل المنتج آمن في فشله؟

ولهذا فإن منحنى الشد أهم من القيم الرقمية المفردة.

– العينة المستخدمة في اختبار الشد

– شكل العينة

تُجرى اختبارات الشد على عينات ذات شكل وأبعاد محددة، غالبًا تُعرف باسم عينة العظم (Dog-bone specimen)، وذلك لضمان:

- تركّز الفشل في منطقة القياس
- توزيع منتظم للإجهاد
- إمكانية المقارنة بين النتائج

وقد تكون العينة:

- مقولبة خصيصًا للاختبار
- أو مقطوعة من منتج مُسكّل، بشرط أن تمثل اتجاه الجريان الحقيقي

ملاحظة بالغة الأهمية:

اتجاه الجريان أثناء التشكيل يؤثر مباشرة على نتيجة اختبار الشد، ولا يجوز تجاهله عند تفسير النتائج.

– جهاز اختبار الشد يتكوّن جهاز اختبار الشد من:

- إطار تحميل
- فكّين لتثبيت العينة
- خلية تحميل لقياس القوة
- نظام لقياس الإزاحة أو الاستطالة
- وحدة تحكم تسجّل البيانات وتعرض المنحنى

ويضبط الجهاز بحيث:

- تُطَبّق القوة تدريجيًا وبمعدل ثابت
- يُقاس التغيّر في الطول بدقة
- تُسجّل القوة والتشوه بشكل متزامن

– طريقة إجراء الاختبار تُثبت العينة بين الفكّين مع التأكد من:

1. المحاذاة الصحيحة
2. عدم وجود انحناء أولي

يبدأ التحميل بمعدل محدد مسبقاً

يُسجّل التغيّر في القوة والاستطالة حتى:

- حدوث الفشل
 - أو الوصول إلى حد تشوّه محدد حسب المعيار
- يُستخرج منحنى الشد تلقائيًا من بيانات القياس

– منحنى الشد: قراءة السلوك لا الرقم

يمثل منحنى الشد العلاقة بين:

- الإجهاد (Stress)
- والانفعال (Strain)

ويمكن تقسيمه (سلوكيًا) إلى مراحل:

المنطقة المرنة في هذه المرحلة:

- يكون التشوّه مؤقتًا
- تعود المادة إلى طولها الأصلي بعد إزالة الحمل
- يمثل ميل المنحنى معامل المرونة

نقطة الخضوع في بعض البوليمرات:

تظهر نقطة يبدأ عندها التشوّه الدائم دون زيادة كبيرة في الحمل ، و وجود أو غياب هذه النقطة يعطي دلالة مهمة على طبيعة المادة.

المنطقة اللدنة في هذه المرحلة:

- يستمر التشوّع مع زيادة أو ثبات الحمل
- تبدأ إعادة ترتيب السلاسل البوليمرية
- يظهر السلوك المطّيلي للمادة

الفشل يمثل نهاية الاختبار، وقد يكون:

- فشلاً هتئاً (انكسار مفاجئ)
- أو فشلاً مطّيلئاً (تمدد كبير قبل الانقطاع)

ونمط الفشل بحد ذاته معلومة هندسية بالغة الأهمية

– القيم المستخرجة من اختبار الشد

من منحني الشد يمكن استخراج:

- مقاومة الشد القصوى
- الاستطالة عند الكسر
- معامل المرونة
- سلوك الخضوع
- طاقة الامتصاص قبل الفشل

لكن يجب التأكيد أن: القيم لا تُفسّر منفردة، بل ضمن سياق الاستخدام.

– ربط اختبار الشد بما قبله وبعده

نتائج اختبار الشد تتأثر مباشرة بـ:

- التركيب والإضافات
- درجة التبلور
- الانكماش والاستقرار البُعدي
- اتجاه الجريان أثناء التشكيل

ولهذا فإن اختبار الشد لا يُفهم دون ربطه بمجموعة اختبارات.

– القرار الناتج عن اختبار الشد

بناءً على نتائج الاختبار، يمكن:

- اعتماد المنتج ميكانيكياً
- أو تعديل التركيبة
- أو تغيير شروط التشكيل
- أو إعادة تصميم المنتج هندسياً

وهنا يظهر دور المختبر مرة أخرى بوصفه: مركز القرار، لا مجرد جهة فحص.

6.1.2 اختبار الصدم (Impact Test)

– كيف يتصرّف المنتج عند التعرّض لقوة مفاجئة؟

بعد دراسة سلوك المنتج تحت الأحمال التدريجية في اختبري الشد والانحناء، ننتقل إلى نوع مختلف جذرياً من الأحمال، يتمثل في **الأحمال السريعة والمفاجئة**. هنا لا يُمنح البوليمر الوقت الكافي لإعادة ترتيب سلسله أو توزيع الإجهادات تدريجياً، بل يُجبر على الاستجابة خلال جزء من الثانية.

يمثل اختبار الصدم أحد أكثر الاختبارات الميكانيكية حساسية، لأنه يكشف سلوك المنتج في أسوأ سيناريو استخدام: السقوط، الضرب، الاصطدام، أو التحميل الفجائي غير المتوقع.

– لماذا اختبار الصدم ضروري؟

تكمن أهمية اختبار الصدم في أن كثيراً من المنتجات البلاستيكية:

- لا تقشّل تحت حمل بطيء
- لكنها تقشّل فجأة عند تعرّضها لصدمة

وقد يكون المنتج:

- ناجحاً في الشد
- مقبولاً في الانحناء
- مستقرّاً بُعدياً

ثم يفشل فشلاً هشاً عند صدمة بسيطة.

ولهذا فإن اختبار الصدم لا يقيّم (قوة) المنتج، بل يقيّم: قدرته على امتصاص الطاقة دون فشل كارثي

– فلسفة اختبار الصدم

اختبار الصدم لا يسأل:

كم قوة يحتاج المنتج لينكسر؟

بل يسأل:

- كم طاقة يمكن للمنتج امتصاصها؟
- هل يمتص الطاقة بالتشوّه أم بالكسر؟
- هل الفشل تدريجي أم مفاجئ؟
- هل الكسر آمن أم خطير؟

ولهذا فإن نتيجة اختبار الصدم تُقرأ دائماً بالاقتران مع نمط الكسر، لا بالقيمة الرقمية وحدها.

– مبدأ اختبار الصدم

يعتمد اختبار الصدم على:

- إسقاط طاقة معروفة
- خلال زمن قصير جداً
- على عيّنة مثبتة
- وقياس مقدار الطاقة الممتصة قبل الكسر

و يُقاس ذلك عادة باستخدام مطرقة بندولية تضرب العيّنة بسرعة عالية.

– أشهر طرق اختبار الصدم

– اختبار شاربي (Charpy Impact Test)

- تُثَبَّت العَيِّنة أفقيًا على دعامتین
- تُضْرَب في منتصفها
- يُقَاس مقدار الطاقة الممتصة

– اختبار إيزود (Izod Impact Test)

- تُثَبَّت العَيِّنة عموديًا من طرف واحد
- تُضْرَب من الطرف الحر
- يُقَاس امتصاص الطاقة

الاختلاف بين الطريقتين ليس شكليًا، بل يؤثر على:

- توزيع الإجهاد
- موضع الكسر
- تفسير النتائج

– العَيِّنة المستخدمة في اختبار الصدم

تكون العينة عادة:

- على شكل قضيب مستطيل
- بأبعاد محددة
- وقد تحتوي على شق (Notch)

– لماذا الشق؟

الشق يُستخدم لمحاكاة:

- تركّز الإجهاد
- الحواف الحادة
- العيوب التصنيعية

وهو يجعل الاختبار:

- أكثر تكرارية
- وأكثر حساسية للفروق البنوية

- جهاز اختبار الصدم

يتكوّن الجهاز من:

- بندول ذو كتلة وطاقة محددة
- نظام تثبيت العينة
- مؤشر لقياس الطاقة قبل وبعد الضربة
- نظام أمان لضمان ثبات الشروط

ويُضبط الجهاز بحيث:

- تكون سرعة الضربة معروفة
- تكون زاوية السقوط محددة
- تُجرى الاختبارات في ظروف حرارية مضبوطة
-

- طريقة إجراء اختبار الصدم

- تُثبّت العينة في وضعها الصحيح
- يُرفع البندول إلى ارتفاع محدد
- يُطلق البندول ليصدم العينة
- تُسجّل الطاقة الممتصة
- يُلاحظ:

■ هل انكسرت العينة؟

■ كيف كان نمط الكسر؟

- قراءة نتائج اختبار الصدم

- نتيجة اختبار الصدم لا تُقرأ كرقم مجرد، بل من خلال:

- مقدار الطاقة الممتصة
- وجود أو عدم وجود كسر كامل
- شكل الكسر (هش، مطيلي، مختلط)
- تكرارية النتائج

ومن الأسئلة التحليلية المهمة:

- هل المنتج يمتص الطاقة أم ينهار فجأة؟
- هل الكسر حاد أم متدرج؟
- هل الفشل مقبول وظيفيًا؟

– العوامل المؤثرة في مقاومة الصدم

طبيعة البوليمر

- البوليمرات غير المتبلورة غالبًا أكثر مقاومة للصدم
- البوليمرات شبه المتبلورة قد تكون أكثر هشاشة

التركيب والإضافات

- بعض الملدنات تزيد مقاومة الصدم
- مواد التدعيم قد ترفع الصلابة وتخفف الصدم
- سوء توزيع الإضافات قد يسبب فشلًا هشًا

درجة الحرارة مقاومة الصدم تتأثر بشدة بدرجة الحرارة:

- مادة مطيلية عند درجة معينة
- قد تصبح هشة عند درجة أقل

ولهذا تُجرى اختبارات الصدم أحيانًا عند درجات حرارة مختلفة.

اتجاه الجريان

اتجاه الجريان أثناء التشكيل يؤثر على:

- مسار الكسر
- طاقة الامتصاص
- تكرارية النتائج

– ربط اختبار الصدم بما قبله

- نتائج الشد تفسّر المطيلية
- نتائج الانحناء تفسّر توزيع الإجهاد
- الاستقرار البُعدي يفسّر وجود إجهادات داخلية
- اختبار الصدم يكشف النتيجة النهائية لكل ما سبق

ولهذا فإن اختبار الصدم لا يُفسّر أبدًا بمعزل عن سلسلة الاختبارات السابقة.

– القرار الناتج عن اختبار الصدم بناءً على النتائج:

- قد يُعتمد المنتج للتطبيق
- أو يُعدّل التركيب
- أو يُغيّر التصميم
- أو يُستبعد التطبيق بالكامل

خاصة في التطبيقات التي يكون فيها الفشل المفاجئ غير مقبول.

6.1.2.1 اختبار الصدم المشقوق

Notched Impact Test

عند تحول العيب الصغير إلى عامل حاسم في الفشل

على الرغم من أن اختبار الصدم العام يقيّم قدرة المنتج على امتصاص الطاقة عند التعرّض لقوة مفاجئة، إلا أن كثيرًا من حالات الفشل الواقعية لا تبدأ من مادة “مثالية”، بل من عيب صغير، أو حافة حادة، أو تركّز إجهاد موضعي. وهنا يأتي دور اختبار الصدم المشقوق، الذي يُعد من أكثر اختبارات الصدم حساسية ودقة في كشف السلوك الحقيقي للمادة تحت ظروف غير مثالية.

يمثل هذا الاختبار سيناريو واقعيًا للفشل، إذ يُجبر الكسر على البدء من نقطة محددة ومتحكم بها، بدل تركه يحدث عشوائيًا. وبهذا لا يختبر قدرة المادة على امتصاص الطاقة فحسب، بل يختبر قدرتها على مقاومة بدء الكسر وانتشاره.

– لماذا يعد اختبار الصدم المشقوق فحصًا مستقلًا؟

لا يمكن اعتبار اختبار الصدم المشقوق مجرد “نسخة أكثر صعوبة” من اختبار الصدم غير المشقوق، لأن:

- الشق يغيّر توزيع الإجهاد جذريًا
- نمط الفشل يصبح أكثر تكرارية
- الحساسية للفروق البنيوية تزداد بشكل كبير
- دور المطيلية والتبلور والإضافات يصبح أوضح

ولهذا يستخدم هذا الاختبار عندما يكون السؤال الحقيقي:

– ماذا يحدث للمادة عندما تبدأ الشقوق بالفعل؟

– مفهوم الشق (Notch) ودوره في الاختبار

الشق هو تركيز إجهاد مصطنع يُضاف إلى العينة بهدف:

- محاكاة العيوب الواقعية (خواف، خدوش، ثقوب)
- توحيد موضع بدء الكسر
- زيادة حساسية الاختبار للفروق الدقيقة بين المواد

ولا يمثل الشق ضعفًا في الاختبار، بل هو:

أداة كشف، لا أداة تعذيب للمادة

فالمادة التي تفشل مباشرة عند وجود شق صغير هي مادة ذات تحمل منخفض للعيوب، حتى وإن أظهرت نتائج جيدة في الصدم غير المشقوق.

– فلسفة اختبار الصدم المشقوق

– لا يسأل هذا الاختبار:

كم طاقة يمكن للمادة امتصاصها في حالة مثالية؟

بل يسأل:

○ هل تستطيع المادة إيقاف نمو الشق؟

- هل الفشل هش أم مطيلي؟
- ما مقدار الطاقة التي تُمتص بعد بدء الكسر؟
- هل الفشل تدريجي أم كارثي؟

وبذلك فهو اختبار مقاومة بدء وانتشار الكسر ، لا مجرد اختبار طاقة صدم.

– مبدأ اختبار الصدم المشقوق

– يعتمد المبدأ على:

- تطبيق صدمة مفاجئة بطاقة معلومة
- على عيّنة تحتوي شقًا بأبعاد وزاوية محددة
- وقياس الطاقة الممتصة حتى الكسر

وغالبًا ما يُجرى الاختبار باستخدام:

- طريقة شاربي المشقوق
- أو
- طريقة إيزود المشقوق

مع اختلاف في وضعية التثبيت وتوزيع الإجهاد.

– العيّنة المستخدمة في اختبار الصدم المشقوق

– تُستخدم عيّنات:

- ذات أبعاد قياسية
- تحتوي شقًا بعمق وزاوية محددين بدقة
- يُحضّر الشق بأداة خاصة لضمان التكرارية

ويُشترط أن:

- يكون الشق نظيفًا وخاليًا من تشققات جانبية
- يُنفذ في اتجاه معروف بالنسبة لاتجاه الجريان
- يُوثّق نوع الشق وموقعه بدقة

لأن أي اختلاف بسيط في الشق قد يؤدي إلى اختلاف كبير في النتيجة.

– جهاز اختبار الصدم المشقوق

الجهاز هو نفسه جهاز الصدم العام، ويتكوّن من:

- بندول بطاقة وسرعة معلومتين
- نظام تثبيت دقيق للعينة
- مؤشر لقياس الطاقة الممتصة
- نظام ضبط لوضعية الشق واتجاه الضربة

لكن حساسية الاختبار تفرض:

- دقة أعلى في تثبيت العينة
- تحكماً أفضل في موضع الضربة
- ثباتاً صارماً في شروط الاختبار

– طريقة إجراء اختبار الصدم المشقوق

- تحضير العينة وتنفيذ الشق وفق المواصفات
- تثبيت العينة بحيث يكون الشق في موضع الصدمة الصحيح
- ضبط طاقة البندول بما يناسب المادة
- إطلاق البندول وإحداث الصدمة

تسجيل:

a. الطاقة الممتصة

b. حدوث الكسر أو عدمه

c. نمط الكسر وشكله

وغالباً ما يُجرى الاختبار على عدة عينات لضمان التكرارية.

– قراءة نتائج اختبار الصدم المشقوق تُقرأ النتائج من خلال:

- قيمة الطاقة الممتصة

- نمط الكسر (هش / مطيلي / مختلط)
- انتظام النتائج بين العينات

لكن الأهم من الرقم هو:

- سرعة انتشار الكسر
- قدرة المادة على امتصاص الطاقة بعد بدء الشق
- مدى حساسية المادة للعيوب

وقد تُظهر مادة ما:

- نتائج ممتازة في الصدم غير المشقوق
- ونتائج ضعيفة جدًا في الصدم المشقوق

وهذا فرق جوهري لا يجوز تجاهله.

– العوامل المؤثرة في نتائج الصدم المشقوق

طبيعة البوليمر

- البوليمرات المطيلية تتحمل الشقوق بشكل أفضل
- البوليمرات الهشة تفشل بسرعة عند وجود شق

التركيب والإضافات

- معذلات الصدم قد تحسّن الأداء بشكل ملحوظ
- مواد التدعيم قد تخفّض مقاومة الشق رغم زيادة الصلابة
- سوء توزيع الإضافات يؤدي إلى نتائج غير مستقرة

درجة الحرارة قد تتحوّل مادة:

- مطيلية عند درجة حرارة معينة
- إلى مادة هشة عند درجة أقل

ويظهر هذا التحول بوضوح أكبر في الصدم المشقوق.

اتجاه الجريان قد:

- يسهل أو يعيق انتشار الكسر
- يؤثر بشدة على الطاقة الممتصة
- يفسر التباين بين العينات

– ربط اختبار الصدم المشقوق بالاختبارات السابقة

- نتائج الشد تفسر المطيلية الأساسية
- نتائج الصدم غير المشقوق تبين قدرة الامتصاص العامة
- الصدم المشقوق يكشف هشاشة المادة تجاه العيوب
- الاستقرار البعدي والإجهادات المتبقية تؤثر مباشرة على النتائج

ولهذا فإن الصدم المشقوق:

لا يُستخدم بمفرده، ولا يُفسر خارج السياق العام للاختبارات.

– القرار الناتج عن اختبار الصدم المشقوق

بناءً على النتائج، يمكن:

- اعتماد المادة لتطبيقات تحتوي تركّز إجهادات
- رفض مادة “قوية ظاهرياً” لكنها حساسة للعيوب
- تعديل التركيبية بإضافة معذلات صدم
- تعديل التصميم لتقليل تركّز الإجهاد
- تحديد شروط تشغيل أو استخدام أكثر أماناً
-

وفي كثير من الحالات، يكون قرار الصدم المشقوق أكثر حساسية وأهمية من قرار الصدم غير المشقوق، خصوصاً في التطبيقات الحرجة.

بعد تقييم سلوك المادة عند وجود عيوب مصطنعة ومواقع بدء كسر واضحة، يصبح من الضروري معرفة كيف تتصرف المادة في الحالة المثالية نسبياً، أي دون شق متعمد، وهو ما تتناوله اختبارات الصدم غير المشقوق.

6.1.2.2 اختبار الصدم غير المشقوق

Unnotched Impact Test

عندما تُختبر متانة المادة في حالتها البنيوية الكاملة يمثل اختبار الصدم غير المشقوق الحالة الأقرب لاختبار المتانة البنيوية الكلية للمادة أو المنتج، إذ تُجرى الصدمة على عينة خالية من أي شقوق أو تركيزات إجهاد مصطنعة. وعلى عكس اختبار الصدم المشقوق، الذي يفرض بدء الكسر من موضع محدد، يترك هذا الاختبار للمادة حرية توزيع الإجهاد وبدء الفشل وفق بنيتها الداخلية واتجاه الجريان وجودة التشكيل.

ويُستخدم هذا الاختبار للإجابة عن سؤال مختلف جوهرياً:

كيف يتصرف المنتج عند التعرض لصدمة مفاجئة في حالته المثالية نسبياً، دون عيوب متعددة؟

— لماذا يُعد اختبار الصدم غير المشقوق فحصاً مستقلاً؟

لا يُعد هذا الاختبار نسخة "أسهل" من الصدم المشقوق، بل فحصاً ذا هدف مختلف، لأنه:

- يقيّم قدرة المادة على توزيع الإجهاد بدل تركيزه
- يكشف المتانة العامة والبنية المتجانسة
- يتأثر بقوة بجودة التشكيل والتبريد
- يبرز دور المطيلية والتشوه قبل الكسر

ولهذا فإن نتائجه لا تُقارن مباشرة بنتائج الصدم المشقوق، بل تُقرأ بالتوازي معها.

— فلسفة اختبار الصدم غير المشقوق

لا يسأل هذا الاختبار:

هل تستطيع المادة إيقاف شق موجود؟

بل يسأل:

- هل تمتص المادة طاقة الصدمة بالتشوه؟
- هل يحدث الكسر بعد تشوه واضح أم دون إنذار؟
- ما مقدار الطاقة التي يمكن امتصاصها قبل بدء الفشل؟
- هل الفشل بنيوي عام أم موضعي؟

وبذلك فهو اختبار متانة شاملة لا اختبار حساسية للعيوب.

– مبدأ اختبار الصدم غير المشقوق

يعتمد الاختبار على:

- تطبيق صدمة مفاجئة بطاقة معلومة
- على عينة خالية من الشقوق
- مع قياس الطاقة الممتصة قبل الكسر أو الفشل

ويُنفَّذ باستخدام:

- طريقة شاربي غير المشقوق
- أو
- طريقة إيزود غير المشقوق

بحسب وضعية التثبيت المطلوبة.

– العينة المستخدمة في اختبار الصدم غير المشقوق

تُستخدم عينات:

- ذات أبعاد قياسية
- بسطوح ملساء وخالية من الخدوش
- تمثل اتجاه الجريان الحقيقي للمنتج

ويُشترط:

- عدم وجود عيوب سطحية أو زوايا حادة
- توثيق ظروف التشكيل والتبريد
- توحيد اتجاه القياس بين العينات

لأن أي خدش بسيط قد يحوّل الاختبار عمليًا إلى صدم “شبه مشقوق

– جهاز اختبار الصدم غير المشقوق

الجهاز هو نفسه المستخدم في اختبارات الصدم الأخرى، ويتكوّن من:

- بندول بطاقة وسرعة محدّتين

- نظام تثبيت للعيّنة
- مؤشر لقياس الطاقة الممتصة
- نظام أمان لضمان تكرارية الشروط

غير أن هذا الاختبار يتطلب عناية خاصة بـ:

- نعومة سطح العيّنة
- دقة التثبيت
- ثبات الظروف الحرارية

– طريقة إجراء اختبار الصدم غير المشقوق

- فحص العيّنة والتأكد من خلوها من العيوب
- تثبيت العيّنة في وضعية الاختبار المحددة
- ضبط طاقة البندول بما يناسب المادة
- إطلاق البندول لإحداث الصدمة

تسجيل:

- الطاقة الممتصة
- حدوث الكسر أو عدمه
- نمط التشوّه أو الكسر

وقد لا تنكسر بعض المواد عالية المطيلية، وهو بحد ذاته نتيجة ذات دلالة.

– قراءة نتائج اختبار الصدم غير المشقوق

لا تُقرأ النتائج كقيمة رقمية فقط، بل من خلال:

- مقدار الطاقة الممتصة
- حدوث تشوّه كبير قبل الكسر
- غياب أو وجود كسر كامل
- تكرارية السلوك بين العينات

ومن الأسئلة التحليلية المهمة:

- هل تمتص المادة الطاقة بالتشوه أم بالكسر؟
- هل الفشل موضعي أم عام؟
- هل السلوك متجانس بين العينات؟

وقد تُظهر مادة ما:

- قدرة عالية على الامتصاص دون كسر
- لكنها تفشل فوراً عند وجود شق (كما في الصدم المشقوق)

وهذا الفرق جوهري في القرار الصناعي.

– العوامل المؤثرة في مقاومة الصدم غير المشقوق

– طبيعة البوليمر

- البوليمرات المطيلية غالباً تُظهر امتصاص طاقة عالي
- البوليمرات الهشة تفشل دون تشوه يُذكر

جودة التشكيل

- التبريد غير المتوازن
 - الإجهادات المتبقية
 - التفاوت في السماكة
- كلها تقلل المتانة العامة وتظهر بوضوح في هذا الاختبار.

التركيب والإضافات

- معذلات الصدم تحسّن الامتصاص
- التدعيم قد يرفع الصلابة ويقلل المتانة
- سوء توزيع الإضافات يسبب تبايناً في النتائج

درجة الحرارة

قد تكون المادة:

- مطيلية عند درجة معينة
- وهشة عند درجة أقل

ويُستحسن إجراء الاختبار عند درجات تمثل ظروف الاستخدام.

اتجاه الجريان

اتجاه الجريان يؤثر على:

- مسار التشوّه
- نمط الكسر
- الطاقة الممتصة

— ربط اختبار الصدم غير المشقوق بالاختبارات الأخرى

- الصدم العام يحدّد القدرة الكلية على الامتصاص
- الصدم المشقوق يكشف حساسية العيوب
- الصدم غير المشقوق يقيّم المتانة البنيوية العامة
- نتائج الشد والانحناء تفسّر المطيلية
- الاستقرار البُعدي يفسّر الإجهادات المتبقية

ولهذا لا يُستخدم هذا الاختبار للحكم منفردًا، بل ضمن منظومة متكاملة.

— القرار الناتج عن اختبار الصدم غير المشقوق

بناءً على النتائج يمكن:

- اعتماد المادة لتطبيقات تتعرض لصدمات غير متوقعة
- تمييز المواد المتينة بنيويًا عن المواد الهشة
- دعم قرار استخدام معدّلات صدم أو تعديل التصميم
- تحديد مدى أمان المنتج في ظروف الخدمة الواقعية

وفي كثير من الحالات، يكون التباين بين الصدم المشقوق وغير المشقوق هو المفتاح الحقيقي لفهم سلوك المنتج واتخاذ القرار الصحيح.

بعد تقييم سلوك المنتج تحت الصدمات المفاجئة في حالتي وجود العيوب وعدمها، يصبح من المنطقي الانتقال إلى اختبارات التحميل الساكن المباشر، وأولها اختبار الضغط، حيث يُقيّم سلوك المنتج تحت حمل ثابت دون عنصر الصدمة.

6.1.3 اختبار الضغط (Compression Test)

عندما لا ينكسر المنتج... بل ينهار أو يتشوه

يمثل اختبار الضغط أحد أكثر الاختبارات الميكانيكية إهمالاً أو سوء تفسير في صناعة البلاستيك، رغم أن عددًا كبيرًا من المنتجات البلاستيكية تعرّض في الاستخدام الفعلي إلى أحمال ضغط مباشرة أو غير مباشرة. والسبب في هذا الإهمال يعود غالبًا إلى الاعتقاد الخاطئ بأن البلاستيك “ضعيف في الشد” فقط، بينما الواقع أن سلوك البلاستيك تحت الضغط مختلف جذريًا عن سلوكه تحت الشد أو الصدم.

– اختبار الضغط لا يهدف إلى معرفة متى “ينكسر” المنتج، بل يهدف إلى فهم:

- 6 متى يبدأ التشوه الدائم
- 7 كيف يتطور الانهيار
- 8 هل التشوه قابل للتحكم أم تراكمي
- 9 وهل الفشل وظيفي أم شكلي

– لماذا اختبار الضغط ضروري؟

تظهر أهمية اختبار الضغط في التطبيقات التي يكون فيها المنتج:

- 10 محمّلًا رأسيًا (حاويات، عبوات، منصات)
- 11 محصورًا بين سطوح (عوازل، فواصل)
- 12 داعمًا لأحمال ثابتة أو شبه ثابتة
- 13 جزءًا من نظام يتحمل وزنًا ذاتيًا أو وزنًا خارجيًا

وقد يكون المنتج:

- 14 ناجحًا في الشد
- 15 مقبولاً في الصدم

لكنه يفشل تحت الضغط نتيجة انبعاج، أو زحف، أو انهيار تدريجي.

– فلسفة اختبار الضغط في البلاستيك

اختبار الضغط في البلاستيك يختلف عن المعادن.

ففي حين يُركّز اختبار الضغط في المعادن على الانهيار أو الخضوع، فإن التركيز في البلاستيك يكون على:

- التشوه
- الاستقرار
- الاستمرارية تحت الحمل

ولهذا فإن السؤال المركزي في اختبار الضغط ليس:

كم قوة يتحمل المنتج؟ بل: هل يحتفظ بوظيفته وشكله تحت الحمل، وكم من الوقت؟

– مبدأ اختبار الضغط

يقوم اختبار الضغط على:

- تطبيق قوة ضغط محورية
- بمعدل منتظم
- على عينة ذات أبعاد معروفة
- مع قياس القوة والتشوه
- ويستمر الاختبار حتى:
- الوصول إلى تشوه محدد
- أو حدوث انهيار
- أو فقدان الاستقرار الهندسي

– العينة المستخدمة في اختبار الضغط

شكل العينة

تكون العينة غالبًا:

- أسطوانة
- أو منشورًا مستطيلًا قصير الطول

ويُشترط أن:

- تكون الأسطح مستوية ومتوازية
- يكون الطول مناسبًا لتجنّب الانبعاج المبكر
- تمثل سماكة المنتج الحقيقي
- طول العينة عامل حاسم حيث أن زيادة الطول تؤدي إلى انبعاج بدل ضغط حقيقي، مما يغيّر تفسير النتائج.

– جهاز اختبار الضغط

يُستخدم في اختبار الضغط:

- جهاز اختبار ميكانيكي مشابه لاختبار الشد
- لكن مع فكّين مسطحين بدل الفكوك القابضة
- خلية تحميل لقياس القوة
- نظام لقياس الإزاحة أو التشوه

ويُضبط الجهاز بحيث:

- يكون التحميل محوريًا
- يكون معدل التحميل ثابتًا
- تُسجّل البيانات بشكل مستمر

– طريقة إجراء الاختبار

- توضع العينة بين لوحى الضغط
- يُضبط التمرکز لمنع التحميل غير المتناظر
- يبدأ التحميل بمعدل محدد
- يُسجّل:

○ مقدار القوة

○ مقدار التشوه

يُلاحظ:

- بداية التشوه الدائم
- حدوث الانبعاج أو الانهيار
- سلوك العينة بعد إزالة الحمل

– قراءة منحنى الضغط يمثل منحنى الضغط العلاقة بين:

- الإجهاد الضاغط
- والانفعال الضاغط

ومن خلاله يمكن تحديد:

- معامل المرونة تحت الضغط
- حد التشوه الدائم
- سلوك الانهيار
- قابلية الاسترداد بعد إزالة الحمل

وفي البلاستيك، كثيرًا ما يكون:

- الفشل تدريجيًا
- وغير مصحوب بكسر واضح

وهذا ما يجعل الاختبار صعب القراءة دون خبرة.

العوامل المؤثرة في نتائج اختبار الضغط

نوع البوليمر

- البوليمرات المرنة قد تتحمل تشوهًا كبيرًا
- البوليمرات الصلبة قد تنهار فجأة أو تنبعج

التركيب والإضافات

- مواد الملء قد ترفع مقاومة الضغط
- لكنها قد تقلل قدرة الاسترداد
- سوء توزيع الإضافات قد يسبب انهياراً غير منتظم

درجة الحرارة والزمن

البلاستيك حساس للزمن تحت الضغط:

- حمل قصير = سلوك مختلف
- حمل طويل = زحف (Creep)

ولهذا لا يُفهم اختبار الضغط دون ربطه بزمان التحميل.

- ربط اختبار الضغط بالاختبارات السابقة واللاحقة

- الشد يشرح المطيلية
- الانحناء يشرح توزيع الإجهاد
- الصدم يشرح امتصاص الطاقة
- الضغط يكشف السلوك الصامت تحت الحمل

وقد ينجح المنتج في كل الاختبارات السابقة، لكنه يفشل تحت ضغط مستمر.

- القرار الناتج عن اختبار الضغط

بناءً على نتائج الاختبار:

- يُعتمد المنتج للأحمال الضاغطة
- أو يُعدّل التصميم (سماكة، أضلاع تقوية)
- أو تُعدّل التركيبة
- أو يُستبعد التطبيق

وهنا يتضح أن اختبار الضغط: لا يقيّم المادة فقط، بل يختبر الملاءمة الوظيفية للتصميم.

بعد تقييم السلوك تحت الشد والانحناء والصدم والضغط، يبقى سؤال جوهري:

ماذا يحدث عند تكرار الحمل آلاف أو ملايين المرات؟

6.2 الفصل الثاني اختبارات السلوك الزمني والبُعدي للمنتج البلاستيكي

6.2 اختبارات السلوك الزمني والبُعدي للمنتج البلاستيكي

6.2.1 اختبارات الانكماش Shrinkage Tests

6.2.2 اختبارات الاستقرار البُعدي Dimensional Stability

6.2.3 اختبار الزحف Creep Test

6.2.4 اختبار التعب Fatigue Test

6.2.5 اختبار الاسترخاء Stress Relaxation Test

بعد استكمال توصيف المادة الخام، ودراسة خصائصها الفيزيائية والحرارية، ثم المرور بمرحلة الفحص الأولي والاختبارات الفيزيائية للمنتج النهائي، ينتقل التقييم في هذا الجزء إلى مستوى أعمق وأكثر ارتباطاً بواقع الاستخدام الفعلي. ففي هذه المرحلة لا يُنظر إلى البوليمر بوصفه مادة مجردة، ولا إلى المنتج بوصفه شكلاً هندسياً فقط، بل يُقِيم بوصفه عنصراً سيعمل تحت تأثير الزمن، والحمل، والبيئة، والتشغيل المستمر.

ويمثل هذا الجزء حلقة الوصل بين المختبر والقرار الصناعي، إذ تُدرس فيه الظواهر التي لا تظهر في الاختبارات اللحظية، مثل تغير الأبعاد مع الزمن، والتشوه التدريجي تحت الحمل، وفقدان الإجهاد عند تشوه ثابت، والفشل الناتج عن تكرار التحميل. كما تُستكمل الصورة من خلال الاختبارات الميكانيكية التي تُقِيم استجابة المنتج للأحمال المباشرة والمفاجئة.

6.2.1 إختبارات الانكماش (Shrinkage Tests)

من توصيف المادة إلى تقييم الشكل واستقرار الأبعاد :

تمثل اختبارات الانكماش أولى الاختبارات التي تُجرى على ناتج التشكيل الفعلي، وليس على المادة في حالتها الخام. وهي بذلك تشكل نقطة التحول الحقيقية من توصيف البوليمر بوصفه مادة، إلى تقييم المنتج بوصفه شكلاً هندسياً قابلاً أو غير قابل للاعتماد. فالانكماش ظاهرة ملازمة لمعظم البوليمرات، ولا يُعد بحد ذاته عيباً، وإنما يصبح مشكلة فقط عندما يكون غير متوقع أو غير قابل للضبط.

بعد استكمال اختبارات بوابة القرار، المتمثلة في الكثافة والسيولة والخصائص الحرارية، تتوفر لدينا صورة واضحة عن هوية المادة وبنيتها وسلوكها أثناء التسخين والتبريد. غير أن هذه الصورة تبقى ناقصة ما لم تنتقل إلى اختبار يبين كيف ينعكس هذا السلوك البنوي والحراري على أبعاد المنتج وشكله بعد التشكيل. وهنا يأتي دور اختبار الانكماش.

– مفهوم الانكماش في البوليمرات:

الانكماش هو التغير في أبعاد المنتج البلاستيكي الناتج عن انتقال البوليمر من الحالة المصهورة إلى الحالة الصلبة، وما يصاحب ذلك من فقدان للطاقة الحرارية، وإعادة ترتيب للسلاسل الجزيئية، وحدوث تبلور كلي أو جزئي في البوليمرات شبه المتبلورة.

ولا يحدث الانكماش في لحظة واحدة، بل يمر بمراحل متعددة، قد تبدأ داخل القالب أو خط التشكيل، وتستمر بعد خروج المنتج وخلال فترة زمنية قد تمتد من ساعات إلى أيام، تبعاً لطبيعة البوليمر وشروط المعالجة.

– أهمية اختبار الانكماش:

تكمن أهمية اختبار الانكماش في كونه:

- يحدد مدى دقة الأبعاد وإمكانية الالتزام بالمواصفات الهندسية
- يكشف عن عدم تجانس البنية أو التبريد
- يفسر ظواهر مثل الالتواء أو التقوس
- يربط نتائج المختبر مباشرة بأداء المنتج في الواقع الصناعي

فالمنتج الذي يمتلك خواصاً جيدة من حيث السيولة أو التركيب الكيميائي، لكنه غير مستقر أبعادياً، هو منتج غير صالح للاعتماد الصناعي

– أنواع الانكماش

– الانكماش الفوري (Primary Shrinkage) :

وهو الانكماش الذي يحدث مباشرة أثناء التبريد الأولي، أي خلال وجود المنتج داخل القالب أو فور خروجه من خط التشكيل. ويتأثر هذا النوع بعوامل مثل:

- درجة حرارة المصهور
- درجة حرارة القالب أو وسط التبريد
- سرعة التبريد
- الضغط أثناء التشكيل

وغالباً ما يُؤخذ هذا الانكماش في الاعتبار عند تصميم القوالب.

– الانكماش اللاحق (Secondary Shrinkage) :

يحدث بعد خروج المنتج من القالب وخلال فترة الاستقرار، نتيجة استمرار إعادة ترتيب السلاسل الجزيئية أو حدوث تبلور متأخر. ويُعد هذا النوع أكثر خطورة، لأنه قد يؤدي إلى تغيير أبعاد المنتج بعد التخزين أو الاستخدام.

– الانكماش الحراري (Thermal Shrinkage) :

يظهر عند تعريض المنتج لاحقاً لدرجات حرارة أعلى من ظروف التخزين العادية دون الوصول إلى الانصهار، ويعكس مدى استقرار البنية البوليمرية تحت التأثير الحراري.

– منهجية اختبار الانكماش :

– العينة المستخدمة

يُجرى اختبار الانكماش على قطعة اختبار مصممة لهذا الغرض أو على منتج تجريبي يمثل الشكل الحقيقي للمنتج النهائي. ويُستلزم أن:

- تُشكّل العينة تحت شروط تشغيل مستقرة
- تمثل اتجاه الجريان الحقيقي
- تحتوي على أبعاد قابلة للقياس بدقة

ومن المهم الانتباه إلى أن الانكماش قد يكون اتجاهياً، لذلك لا يجوز الاكتفاء بقياس بُعد واحد فقط.

– الأدوات المستخدمة في القياس

تعتمد دقة اختبار الانكماش على أدوات قياس دقيقة، من أبرزها:

- القدمة ذات الورنية أو الرقمية
- الميكرومتر لقياس السماكات الدقيقة
- أجهزة القياس ثلاثية الأبعاد في التطبيقات عالية الدقة

ويُستلزم ثبات المعايرة ودرجة الحرارة أثناء القياس.

– توقيت القياس

يُعد توقيت القياس عنصرًا حاسمًا في اختبار الانكماش. وغالبًا ما يُجرى القياس على مراحل:

- بعد الخروج المباشر من القالب أو خط التشكيل
- بعد فترة زمنية محددة (مثلًا 24 ساعة)
- بعد الاستقرار الكامل

ويسمح ذلك بتمييز الانكماش الفوري عن اللاحق.

- **حساب الانكماش** يُحسب الانكماش كنسبة مئوية وفق العلاقة:

$$(\text{البُعد المرجعي} - \text{البُعد النهائي}) \div \text{البُعد المرجعي} \times 100$$

لكن الأهم من المعادلة هو:

- تحديد المرجع المستخدم (قالب أو نموذج)
 - اتجاه القياس
 - زمن القياس
- **تفسير نتائج الاختبار** لا تُفسر نتائج الانكماش بمعزل عن الاختبارات السابقة، بل تُربط بـ:
- الكثافة (درجة التراص والتبلور)
 - الخصائص الحرارية (سلوك التبلور والانتقالات)
 - السيولة (توزيع المصهور أثناء التشكيل)
 - التركيب والإضافات

ويجب طرح أسئلة تحليلية مثل:

- هل الانكماش متجانس أم اتجاهي؟
- هل القيم ضمن النطاق المتوقع للمادة؟
- هل التغير ناتج عن المادة أم عن شروط التشغيل؟

- **الانكماش: عيب أم خاصية؟**

من المهم التأكيد على أن الانكماش ليس دائمًا ظاهرة سلبية. ففي بعض التطبيقات، مثل أفلام الشرنك، يُستفاد من الانكماش بوصفه خاصية وظيفية مقصودة. غير أن الفرق الجوهرى يكمن في السيطرة على الانكماش لا في حدوثه.

– القرار الناتج عن اختبار الانكماش

بناءً على نتائج الاختبار، يكون القرار أحد الخيارات التالية:

- الانكماش ضمن النطاق المقبول = الانتقال للاختبار التالي
- الانكماش مرتفع لكنه قابل للتعديل = تعديل الشروط أو التركيب
- الانكماش غير قابل للضبط = إعادة تصميم المادة أو المنتج

وهنا يتأكد مرة أخرى أن المختبر هو مركز القرار الحقيقي في عملية التصنيع.

- بعد تحديد مقدار الانكماش، يصبح السؤال المنطقي التالي: هل تتوقف الأبعاد عند هذا الحد، أم تستمر في التغير مع الزمن والحرارة؟

- وهذا يقود مباشرة إلى اختبارات الاستقرار البُعدي، التي تُعد الامتداد الطبيعي لاختبار الانكماش

6.2.2 اختبارات الاستقرار البُعدي (Dimensional Stability)

- هل تتوقف الأبعاد عند الانكماش أم تستمر في التغير؟

بعد قياس الانكماش وتحديد مقداره واتجاهه، يظهر سؤال أكثر حساسية: هل تستقر أبعاد المنتج بعد ذلك، أم تستمر في التغير مع الزمن أو تحت تأثير الظروف المحيطة؟
هنا يبدأ اختبار الاستقرار البُعدي، وهو اختبار لا يقيّم (كم تغيّرت الأبعاد) فحسب، بل يقيّم (قدرة المنتج على الحفاظ على أبعاده خلال فترة استخدامه المتوقعة)

يمثل الاستقرار البُعدي الامتداد الطبيعي لاختبارات الانكماش؛ فالانكماش يصف التغير الأولي الناتج عن التبريد، أما الاستقرار البُعدي فيصف السلوك طويل الأمد للشكل بعد أن يفترض أن المنتج أصبح في حالته النهائية.

- مفهوم الاستقرار البُعدي :

الاستقرار البُعدي هو قدرة المنتج البلاستيكي على الاحتفاظ بأبعاده الهندسية ضمن حدود مقبولة عند تعرّضه لعوامل مثل:

- الزمن
- تتغير درجات الحرارة
- الرطوبة
- الأحمال الميكانيكية الخفيفة
- ظروف التخزين أو التشغيل

والمنتج المستقر بُعدياً ليس بالضرورة منتجاً لا يتغير إطلاقاً، بل منتجاً يمكن التنبؤ بتغيره والسيطرة عليه.

— لماذا يُعد الاستقرار البُعدي اختباراً حاسماً؟

تكمّن أهمية هذا الاختبار في أنه:

- يكشف التغيرات التي لا تظهر مباشرة بعد التشكيل
- يفسّر فشل منتجات “نجحت” في اختبارات الانكماش
- يحدّد مدى ملاءمة المنتج للاستخدام طويل الأمد
- يميّز بين منتج صالح للاعتماد وآخر صالح للتجربة فقط

فالمنتج الذي يتغير شكله أو أبعاده بعد أيام أو أسابيع من التصنيع هو منتج غير موثوق، مهما كانت خواصه الأولية جيدة.

— العلاقة بين الانكماش والاستقرار البُعدي

رغم الترابط الوثيق بين الاختبارين، إلا أنهما ليسا متطابقين:

- الانكماش يركّز على التغير الناتج عن التبريد
- الاستقرار البُعدي يركّز على التغير المستمر بعد الاستقرار الظاهري

وقد يكون الانكماش ضمن الحدود المقبولة، بينما يفشل المنتج في اختبار الاستقرار البُعدي نتيجة

- إجهادات داخلية غير متوازنة
- تبلور متأخر
- امتصاص رطوبة
- تأثير إضافات غير متجانس

- العوامل المؤثرة في الاستقرار البُعدي

طبيعة البوليمر

- البوليمرات غير المتبلورة غالبًا أكثر استقرارًا بُعديًا
- البوليمرات شبه المتبلورة أكثر عرضة لتغيرات لاحقة

التاريخ الحراري للمادة

- سرعة التبريد
- عدد دورات التسخين والتبريد
- ظروف المعالجة السابقة

كلها عوامل تؤثر على توازن البنية الداخلية.

الإضافات

- بعض مواد الملء تحسّن الاستقرار البُعدي
- بعض الملدنات قد تزيد الحساسية للتغير مع الزمن
- سوء توزيع الإضافات يؤدي إلى عدم تجانس الأبعاد

الرطوبة والبيئة

بعض البوليمرات تمتص الرطوبة، ما يؤدي إلى:

- تمدد بُعدي
- تغيّر في السماكة
- فقدان الدقة الهندسية

وفي بعض التطبيقات، قد يُستفاد من هذا السلوك، لكنه غالبًا يُعد عاملاً يجب ضبطه.

- منهجية اختبار الاستقرار البُعدي

العينة المستخدمة

يُجرى الاختبار على:

- منتج مُشكّل يمثل الشكل النهائي
- أو عيّنة تجريبية تحاكي أبعاد المنتج الحقيقي

ويُشترط توثيق:

- أبعاد العينة الابتدائية
- ظروف التشكيل
- زمن القياس المرجعي

شروط الاختبار تُعرّض العينات لظروف محددة مثل:

- درجات حرارة أعلى أو أقل من ظروف التخزين
- بيئات رطبة أو جافة
- فترات زمنية محددة

ويجب أن تكون هذه الشروط قابلة للتكرار.

أدوات القياس :

تُستخدم نفس أدوات القياس الدقيقة المستخدمة في اختبار الانكماش، مع التركيز على:

- ثبات أداة القياس
- ثبات درجة الحرارة أثناء القياس
- توحيد نقاط القياس

– **كيفية تقييم النتائج :** لا يُقَيَّم الاستقرار البُعدي بقيمة واحدة، بل من خلال:

- مقارنة الأبعاد عبر الزمن
- تحليل معدل التغيّر
- تحديد ما إذا كان التغيّر يتباطأ أو يستمر

والسؤال الأساسي هنا: هل تصل الأبعاد إلى حالة توازن، أم تستمر في الانحراف؟

- القرار الناتج عن اختبار الاستقرار البُعدي :

بناءً على النتائج، يكون القرار:

- المنتج مستقر بُعدياً = الانتقال لاختبارات الأداء
- المنتج غير مستقر لكن قابل للمعالجة = تعديل التركيبة أو الشروط
- المنتج غير مستقر = إعادة تصميم المادة أو التطبيق

- الاستقرار البُعدي بوصفه اختبار اعتماد :

يمكن اعتبار اختبار الاستقرار البُعدي أول اختبار اعتماد حقيقي للشكل، لأنه:

- يختبر المنتج كما سيستخدم
- يربط المختبر بالزمن الحقيقي
- يمنع اعتماد منتجات (ناجحة لحظياً)

- الخلاصة :

وبعد التأكد من استقرار الأبعاد، يصبح من المنطقي الانتقال إلى اختبارات تقيّم قدرة المنتج على أداء وظيفته تحت الحمل والاستخدام، مثل الاختبارات الميكانيكية والحرارية الوظيفية

من المهم التوقف عند هذه المرحلة لتوضيح الفرق المفاهيمي بين الانكماش والاستقرار البُعدي، إذ إن الخلط بينهما شائع حتى بين الممارسين ذوي الخبرة، ويعود ذلك إلى كونهما ظاهرتين مترابطتين زمنياً وبنوياً، لكنهما غير متطابقتين وظيفياً.

فالانكماش يصف التغير البُعدي المرتبط بمرحلة التبريد والتحول من المصهور إلى الحالة الصلبة، وهو يحدث نتيجة فقدان الطاقة الحرارية وإعادة ترتيب السلاسل الجزيئية، وغالباً ما يكون واضحاً ومباشراً ويمكن قياسه خلال فترة قصيرة بعد التشكيل. وبعبارة أدق، فإن الانكماش يجيب عن سؤال: كم تغيّرت الأبعاد نتيجة التشكيل والتبريد؟

أما الاستقرار البُعدي، فيتناول ما يحدث بعد أن يُفترض أن الانكماش قد انتهى. فهو يقيّم قدرة المنتج على الحفاظ على أبعاده مع الزمن وتحت تأثير الظروف البيئية المختلفة مثل الحرارة والرطوبة والتخزين والاستخدام. أي أنه يجيب عن سؤال مختلف تماماً: هل توقّف التغير البُعدي فعلاً، أم أنه مستمر بصورة بطيئة وغير ظاهرة؟

وقد يكون المنتج مقبولاً من حيث الانكماش، لكنه يفشل في اختبار الاستقرار البُعدي نتيجة إجهادات داخلية غير متوازنة، أو تبلور متأخر، أو تفاعل المادة مع البيئة المحيطة. ولهذا لا يمكن اعتبار أحد الاختبارين بديلاً عن الآخر، كما لا يجوز دمجهما في اختبار واحد، رغم اعتمادهما على أدوات قياس متشابهة.

ويمكن تلخيص الفرق الجوهرى بينهما بالقاعدة التالية:

الانكماش يقيس مقدار التغير، أما الاستقرار البُعدي فيقيس استمرارية هذا التغير.

بهذا التمييز، يكتمل تقييم الشكل الهندسي للمنتج، ويصبح من الممكن الانتقال بثقة إلى المرحلة التالية من الاختبارات، التي لا تركز على الأبعاد فقط، بل على قدرة المنتج على أداء وظيفته تحت الحمل والاستخدام الفعلي.

6.2.3 اختبار الزحف (Creep Test)

– **فشل البلاستيك الحقيقي: التشوّه مع الزمن لا الكسر المفاجئ**

يُعد اختبار الزحف من أهم الاختبارات الميكانيكية في صناعة البلاستيك، ومن أكثرها إهمالاً في الوقت نفسه. ويرجع ذلك إلى أن الزحف لا يؤدي إلى كسر فوري أو انهيار واضح، بل يظهر على شكل تشوّه بطيء وتراكمي قد يستمر لفترات طويلة قبل أن يُلاحظ، وغالبًا ما يؤدي إلى فشل وظيفي صامت لا يرتبط بانكسار المادة.

يمثل اختبار الزحف انتقالاً جوهرياً من تقييم استجابة المنتج للحمل اللحظي، كما في اختبارات الشد أو الضغط، إلى تقييم سلوكه تحت تأثير الحمل والزمن معاً. ولهذا يُعد اختباراً زمنياً بامتياز، لا يمكن فهمه أو تفسير نتائجه بمعزل عن الزمن ودرجة الحرارة.

– **مفهوم الزحف في البوليمرات**

الزحف هو التشوّه التدريجي المستمر الذي يحدث في المادة البلاستيكية عند تعرّضها إلى حمل ثابت أو شبه ثابت لفترة زمنية طويلة، حتى وإن كان هذا الحمل أقل بكثير من حد الخضوع أو الكسر المقاس في اختبارات الشد أو الضغط.

ويُعد الزحف سلوكاً طبيعياً في البوليمرات، ناتجاً عن:

- الطبيعة اللزجة-المرنة للمادة
- الحركة البطيئة للسلاسل البوليمرية
- قابلية إعادة ترتيب البنية الداخلية مع الزمن

ولهذا فإن غياب الكسر لا يعني بالضرورة نجاح المنتج، إذ قد يفشل وظيفيًا نتيجة فقدان الأبعاد أو الصلابة أو القدرة على أداء وظيفته.

– لماذا الزحف أكثر أهمية في البلاستيك من المعادن؟

في المعادن، لا يظهر الزحف عادة إلا عند درجات حرارة مرتفعة جدًا مقارنة بدرجة الانصهار. أما في البلاستيك، فقد يحدث الزحف:

- عند درجات حرارة التشغيل العادية
- تحت أحمال تبدو آمنة ظاهريًا
- خلال فترات استخدام طويلة

وهذا يجعل تجاهل الزحف في التصميم البلاستيكي خطأ جوهريًا، حتى في التطبيقات البسيطة.

– فلسفة اختبار الزحف

اختبار الزحف لا يهدف إلى معرفة:

متى ينكسر المنتج؟

بل يهدف إلى الإجابة عن أسئلة أدق، مثل:

- هل يتغير شكل المنتج مع الزمن؟
- ما معدل التشوه؟
- هل يصل التشوه إلى حالة استقرار؟
- هل يظل المنتج ضمن حدود الأداء الوظيفي؟

وبذلك فإن اختبار الزحف هو اختبار عمر تشغيلي، لا اختبار قوة آنية.

– مراحل الزحف بثلاث مراحل رئيسية:

– مرحلة الزحف الابتدائي :

تحدث مباشرة بعد تطبيق الحمل، ويكون التشوه فيها سريعاً نسبياً، نتيجة إعادة ترتيب أولية للسلاسل البوليمرية.

– مرحلة الزحف الثانوي المستقر :

يحدث التشوه بمعدل شبه ثابت، وتعد هذه المرحلة الأكثر أهمية عملياً، لأنها قد تمتد لفترة طويلة دون ملاحظة واضحة للفشل.

– مرحلة الزحف النهائي:

يبدأ فيها معدل التشوه بالازدياد بشكل ملحوظ، وغالباً ما تسبق الفشل الوظيفي أو الانهيار الكامل للمنتج.

– مبدأ اختبار الزحف

يقوم اختبار الزحف على:

- تطبيق حمل ثابت معلوم
- على عينة ذات أبعاد محددة
- عند درجة حرارة مضبوطة
- مع تسجيل التشوه بدلالة الزمن

وقد يُجرى الاختبار:

عند درجة حرارة واحدة لمحاكاة الاستخدام أو عند درجات مختلفة لتقييم حساسية المادة للحرارة

– العينة المستخدمة في اختبار الزحف

يمكن أن تكون العينة:

- نموذج شد
- نموذج ضغط

- أو جزءًا مصغَّرًا يمثل المنتج الحقيقي

ويُشترط أن:

- تمثل اتجاه الجريان أثناء التشكيل
- تكون خالية من العيوب الظاهرة
- تكون أبعادها دقيقة وثابتة

ويُعد اتجاه الجريان والإجهادات المتبقية من التشكيل من أكثر العوامل تأثيرًا على نتائج الزحف.

– أجهزة اختبار الزحف تتراوح أجهزة بين:

- أنظمة بسيطة تعتمد على أوزان ثابتة
- أجهزة ميكانيكية مزودة بحساسات دقيقة
- أنظمة متقدمة مع تحكم حراري وزمني

ويُقاس عادة:

- الاستطالة أو التشوّه
- بدلالة الزمن
- تحت حمل ثابت

– طريقة إجراء اختبار الزحف

- تثبيت العيّنة تحت حمل ثابت محدد
- تسجيل التشوّه الابتدائي مباشرة بعد التحميل
- متابعة التغيّر في التشوّه مع الزمن
- تسجيل معدل الزحف وأي تسارع غير طبيعي

إنهاء الاختبار عند:

- الوصول إلى زمن محدد
- أو تشوّه غير مقبول وظيفيًا

– قراءة نتائج اختبار الزحف

تُعرض نتائج الزحف عادة على شكل:

○ منحنى تشوّه مقابل الزمن

ولا تُفسّر النتائج بقيمة واحدة، بل من خلال:

- ميل المنحنى
- استقرار أو عدم استقرار التشوّه
- مقارنة السلوك عند أحمال أو درجات حرارة مختلفة

والسؤال الحاسم هنا:

هل يصل التشوّه إلى حد ثابت، أم يستمر في التزايد؟

– العوامل المؤثرة في الزحف

درجة الحرارة

○ حتى ارتفاع بسيط في درجة الحرارة قد يؤدي إلى:

- زيادة كبيرة في معدل الزحف
- تقليص العمر التشغيلي للمنتج

مستوى الحمل

العلاقة بين الحمل والزحف غالبًا غير خطية؛ زيادة بسيطة في الحمل قد تؤدي إلى زيادة كبيرة في التشوّه مع الزمن.

التركيب والإضافات

- مواد الملء غالبًا تقلل الزحف
- الملدنات قد تزيده
- سوء توزيع الإضافات يؤدي إلى عدم قابلية التنبؤ

- عوامل جميعها تؤثر مباشرة على سلوك الزحف :

- سرعة التبريد
- التبلور
- الإجهادات المتبقية

- ربط اختبار الزحف بالاختبارات السابقة و اللاحقة

- اختبار الضغط يقيم السلوك اللحظي تحت الحمل
- اختبار الاستقرار البُعدي يقيم السلوك دون حمل
- اختبار الزحف يقيم السلوك تحت حمل وزمن

وبذلك يُعد الزحف حلقة الربط بين السلوك الميكانيكي والسلوك الزمني للمنتج.

- القرار الناتج عن اختبار الزحف :

- اعتماد المنتج للاستخدام طويل الأمد
- تحديد حدود حمولة وزمن آمنين
- تعديل التركيبة أو التصميم
- استبعاد التطبيق بالكامل

وهنا نتجلى حقيقة أساسية في البلاستيك: كثير من المنتجات لا تفشل لأنها ضعيفة، بل لأنها استُخدمت خارج نطاق الزمن الآمن. بعد فهم سلوك المنتج تحت الأحمال التدريجية من حيث المرونة والتشوه والفشل اللحظي، لا يكفي هذا التقييم وحده للحكم على الأداء طويل الأمد، إذ يصبح من الضروري دراسة تأثير تكرار الحمل مع الزمن بوصفه آلية فشل مستقلة، وهو ما تتناوله اختبارات التعب.

6.2.4 اختبار التعب Fatigue Test

عندما لا يفشل المنتج بالحمل... بل بتكراره

يُعد اختبار التعب، المعروف أيضاً بالكلال، من الاختبارات الميكانيكية المتقدمة في تقييم المنتجات البلاستيكية، ويُستخدم عندما يكون الفشل المتوقع مرتبطاً بتكرار الحمل لا بقيمته اللحظية. فالمنتج قد يتحمل حملاً معيناً مرة واحدة دون مشكلة، لكنه قد يفشل بعد آلاف أو ملايين الدورات نتيجة تراكم الضرر الداخلي.

ويمثل هذا الاختبار انتقالاً من تقييم الاستجابة الميكانيكية اللحظية، كما في اختباري الشد والانحناء، إلى تقييم السلوك تحت تأثير الحمل والزمن معاً بصورة دورية. وفي البوليمرات، يتداخل سلوك التعب مع الطبيعة اللزجة المرنة للمادة ومع سلوك الزحف، ما يجعل تفسير نتائجه أكثر تعقيداً مقارنة بالمواد المعدنية.

لا يهدف اختبار التعب إلى معرفة أقصى حمل يمكن للمنتج تحمله، بل إلى الإجابة عن أسئلة من نوع: هل يستطيع المنتج الاستمرار في أداء وظيفته تحت تحميل متكرر؟ كم عدد الدورات التي يمكن تحملها قبل الفشل؟ وهل يكون الفشل تدريجياً أم مفاجئاً؟

يقوم الاختبار على تعريض العينة إلى حمل متكرر أو متناوب بسعة وتردد محددين، مع تسجيل عدد الدورات حتى الفشل أو حتى بلوغ تشوّه غير مقبول وظيفياً. وقد يكون الحمل شديداً متكرراً، أو انحناءً دورياً، أو مزيجاً من الإجهادات، بحسب التطبيق المراد محاكاته.

وتتأثر نتائج اختبار التعب بعدة عوامل، من أهمها نوع البوليمر وبنية الجزيئية، درجة الحرارة، سعة الحمل والتردد، اتجاه الجريان أثناء التشكيل ووجود عيوب سطحية أو إجهادات متبقية. ولا يُستخدم هذا الاختبار لاتخاذ قرار اعتماد عام للمادة، بل لتحديد مدى ملائمتها للتطبيقات التي تتعرض لتحميل دوري، والحاجة إلى تعديل التصميم أو التركيب، أو استبعاد المنتج من هذا النوع من الخدمة.

- مفهوم التعب في البوليمرات :

التعب هو الفشل الناتج عن تراكم الضرر الميكانيكي داخل المادة بسبب التحميل المتكرر، وليس بسبب حمل واحد مرتفع. ويحدث هذا الفشل نتيجة:

- تشكّل شقوق دقيقة غير مرئية
- نمو هذه الشقوق تدريجياً مع كل دورة تحميل
- فقدان تدريجي للقدرة على تحمل الإجهاد

وفي البلاستيك، يتداخل سلوك التعب غالباً مع السلوك اللزج المرن والزحف، مما يجعل تفسيره أكثر تعقيداً من المعادن.

- لماذا يعد اختبار التعب اختبارًا انتقائيًا؟

من المهم التأكيد على أن اختبار التعب ليس اختبارا عامًا يجرى لكل منتج بلاستيكي .فالكثير من المنتجات البلاستيكية لا تتعرض في الاستخدام الفعلي إلى أحمال متكررة ذات معنى هندسي.

يُجرى اختبار التعب أساسًا عندما يكون المنتج:

- جزءًا متحركًا
- خاضعًا لفتح وإغلاق متكرر
- معرضًا للاهتزاز
- يعمل ضمن نظام ميكانيكي دوري

أما المنتجات التي تعمل تحت حمل ثابت أو شبه ثابت، فإن اختبار الزحف يكون غالبًا أكثر أهمية من اختبار التعب.

- فلسفة اختبار التعب

اختبار التعب لا يسأل:

ما أقصى حمل يمكن للمنتج تحمله؟

بل يسأل:

- كم مرة يمكن تطبيق هذا الحمل قبل الفشل؟
- هل الفشل تدريجي أم مفاجئ؟
- هل يمكن التنبؤ بعمر المنتج؟
- ما هو نمط الفشل؟

وبذلك فهو اختبار عمر تشغيلي ديناميكي، لا اختبار قوة أنية.

- مبدأ اختبار التعب

يقوم اختبار التعب على:

- تطبيق حمل متكرر أو متناوب
- بسعة محددة
- وتردد معلوم
- حتى حدوث الفشل أو الوصول إلى عدد دورات محدد

وقد يكون الحمل:

- شداً متناوباً
- انحناءً متكرراً
- أو مزيجاً من الإجهادات

– العينة المستخدمة في اختبار التعب

تكون العينة عادة:

- مشابهة لعينات الشد أو الانحناء
- أو مصممة خصيصاً لمحاكاة حركة المنتج الفعلية

ويُشترط أن:

- تمثل اتجاه الجريان أثناء التشكيل
- تكون خالية من العيوب السطحية
- تكون أبعادها دقيقة

العيوب السطحية الصغيرة قد تقلل عمر التعب بشكل كبير.

– أجهزة اختبار التعب

تتعدد أجهزة اختبار التعب، منها:

- أجهزة تحميل ترددي
- أجهزة انحناء متكرر
- أنظمة اهتزاز

- أجهزة مخصصة لمحاكاة حركة فعلية

وتُضبط الأجهزة بحيث:

- يكون التردد ثابتاً
- تكون سعة الحمل مضبوطة
- تُسجّل عدد الدورات حتى الفشل

– طريقة إجراء اختبار التعب

- تثبيت العينة في الجهاز
- تحديد نوع الحمل وسعته
- تحديد التردد
- بدء التحميل المتكرر

تسجيل:

- عدد الدورات
- نمط الفشل
- أي تغيير في السلوك قبل الفشل

وقد يُوقف الاختبار عند:

- حدوث الفشل
- أو الوصول إلى عدد دورات يُعد كافياً للتطبيق

– قراءة نتائج اختبار التعب

تُعرض نتائج التعب عادة على شكل:

- عدد الدورات حتى الفشل
- أو منحنيات علاقة بين سعة الحمل وعدد الدورات

لكن الأهم من الرقم هو:

- شكل الفشل
- موقع بدء الشق
- سرعة تطور الضرر

وقد يفشل المنتج فجأة دون إنذار، وهو ما يجعل التعب من أخطر أنماط الفشل.

– العوامل المؤثرة في مقاومة التعب

طبيعة البوليمر

- البوليمرات المطيلية تتحمل دورات أكثر
- البوليمرات الهشة تفشل بسرعة

التركيب والإضافات

- بعض الإضافات تحسّن مقاومة التعب
- مواد التدعيم قد ترفع الصلابة لكنها تخفّض العمر التعبي

درجة الحرارة

- ارتفاع الحرارة يزيد من سرعة تراكم الضرر ويقلل عمر التعب.

اتجاه الجريان يؤثر على:

- مسار الشق
- عدد الدورات حتى الفشل
- تكرارية النتائج

ربط اختبار التعب بالزحف والاختبارات السابقة

في البلاستيك، لا يمكن فصل التعب عن الزحف تمامًا فقد يحدث زحف بين الدورات وقد تتسارع الشقوق بسبب السلوك اللزج المرن ولهذا فإن اختبار التعب: لا يُفسّر دون فهم الزحف والانحناء.

القرار الناتج عن اختبار التعب

- اعتماد المنتج للحركة المتكررة
- تحديد حد دورات آمن
- تعديل التصميم أو التركيبة

6.2.5 اختبار الاسترخاء

Stress Relaxation Test

حيث لا يزداد التشوه... بل ينخفض الإجهاد مع الزمن

يُعد اختبار الاسترخاء (Stress Relaxation) من الاختبارات الزمنية الأساسية لفهم السلوك الحقيقي للبوليمرات، خصوصاً في التطبيقات التي يُفرض فيها على المنتج تشوه ثابت (إزاحة أو انحناء أو تمدد محدد)، ثم يُتوقع منه أن يحافظ على قوة الإحكام أو الضغط أو الشد مع مرور الزمن. ففي كثير من المنتجات البلاستيكية لا يحدث الفشل على شكل كسر أو تشوه واضح، بل يحدث بصمت عندما تضعف القوة تدريجياً رغم ثبات الشكل الخارجي.

ويمثل اختبار الاسترخاء الوجه الآخر لاختبار الزحف:

في الزحف يكون الحمل ثابتاً والتشوه يزداد مع الزمن.

في الاسترخاء يكون التشوه ثابتاً والإجهاد (أو القوة) ينخفض مع الزمن.

ولهذا لا يُفهم أحد الاختبارين على نحو صحيح دون الآخر، إذ إن كليهما يكشف الطبيعة اللزجة-المرنة للبوليمرات وكيف تتوزع الطاقة داخل المادة مع الزمن.

— مفهوم الاسترخاء في البوليمرات :

الاسترخاء هو الانخفاض التدريجي في الإجهاد الداخلي للمادة عندما تُحفظ عند تشوه ثابت لفترة زمنية. ويحدث ذلك لأن السلاسل البوليمرية تمتلك القدرة على الحركة البطيئة وإعادة الترتيب، ما يسمح للمادة بتخفيف الإجهاد الداخلي تدريجياً حتى دون حدوث تغير ملحوظ في الأبعاد.

ويظهر الاسترخاء بوضوح في البوليمرات بسبب:

○ الطبيعة اللزجة-المرنة (Viscoelasticity)

- قابلية السلاسل على إعادة الترتيب بمرور الزمن
- وجود مناطق غير متبلورة تتيح حركة جزيئية تدريجية
- تأثير الحرارة الذي يسرع هذه الحركة حتى عند ارتفاع بسيط في درجة التشغيل

وبذلك فإن المنتج قد يبدو ثابتاً في شكله، لكنه يفقد تدريجياً قدرته على ممارسة القوة التي يعتمد عليها في وظيفته.

— لماذا يُعد اختبار الاسترخاء مهماً صناعياً؟

تكمُن أهمية اختبار الاسترخاء في أنه يقيّم فشلاً وظيفياً شائعاً في البلاستيك، مثل:

- فقدان قوة الإحكام في الأغشية والربط والـ clips
- ضعف ضغط الجلدة أو الحلقة (sealing) بمرور الوقت
- انخفاض قوة التثبيت في المشابك والمفصلات البلاستيكية
- فقدان الشد في الأربطة والأحزمة والأجزاء المرنة
- تراجع ضغط التلامس في الأجزاء التي تعتمد على “مرونة” البلاستيك للحفاظ على وظيفة ثابتة

ولهذا يُستخدم الاسترخاء عندما تكون المشكلة الأساسية ليست “هل ينكسر المنتج؟” بل:

هل يحتفظ المنتج بقوة كافية لأداء وظيفته بعد أيام أو أسابيع أو أشهر؟

— فلسفة اختبار الاسترخاء لا يسأل عن :

- ما أقصى إجهاد يمكن للمادة تحمله؟

بل يسأل:

- ما مقدار انخفاض الإجهاد مع الزمن عند تشوّه ثابت؟
- هل الانخفاض سريع في البداية ثم يستقر؟ أم يستمر في الانخفاض؟
- ما الزمن الذي تصبح عنده القوة غير كافية وظيفياً؟
- كيف يتأثر ذلك بدرجة الحرارة؟
- هل التغير ناتج عن طبيعة المادة أم عن ظروف التشكيل والإجهادات المتبقية؟

وبذلك فهو اختبار أداء زمني لا اختبار مقاومة لحظية.

- مبدأ اختبار الاسترخاء

يقوم اختبار الاسترخاء على:

- فرض تشوه ثابت معلوم على العينة (إزاحة أو استطالة أو انحناء محدد).
- تثبيت هذا التشوه دون تغيير طوال مدة الاختبار.
- قياس الإجهاد أو القوة اللازمة للحفاظ على هذا التشوه مع الزمن.
- تسجيل تناقص الإجهاد بدلالة الزمن، وبناء منحني الاسترخاء.

وقد يُجرى الاختبار:

- عند درجة حرارة واحدة تمثل ظروف الخدمة
- أو عند درجات متعددة لتقييم حساسية المادة للحرارة وتقدير الأداء الزمني تحت ظروف مختلفة

- العينة المستخدمة في اختبار الاسترخاء

يمكن إجراء اختبار الاسترخاء على:

- عينة شد قياسية تُثبت عند استطالة ثابتة
- عينة انحناء تُثبت عند انحراف ثابت
- أو عينة مصممة لمحاكاة شكل المنتج الحقيقي (مشبك، حلقة إحكام، لسان تثبيت...)

ويُشترط أن:

- تمثل اتجاه الجريان أثناء التشكيل (لأن الاتجاهية تؤثر على الاسترخاء)
- تكون خالية من الشقوق والعيوب السطحية
- تكون أبعادها مضبوطة لأن أي تفاوت يؤثر على الإجهاد المقاس
- تُوثق ظروف تشكيلها لأن الإجهادات المتبقية قد تغير النتائج بشكل كبير

- أجهزة اختبار الاسترخاء

- تتدرج الأجهزة المستخدمة من:

أنظمة بسيطة تقوم بتثبيت إزاحة وقياس القوة بشكل دوري

أجهزة اختبار عالمية (UTM) تعمل بوضع التحكم في الإزاحة (Displacement Control)

- أجهزة متخصصة بقياس الاسترخاء مع تحكم حراري دقيق وتسجيل مستمر

ويُفضّل في الاختبارات الصناعية توقّر:

- حساسات قوة دقيقة
- ثبات في الإزاحة (عدم الانزلاق)
- تحكم حراري جيد لأن الحرارة عامل بالغ الحساسية في نتائج الاسترخاء

طريقة إجراء اختبار الاسترخاء

يمكن تلخيص خطوات الاختبار على النحو التالي:

- **تحضير العينة وتوثيقها**
توثيق المادة، طريقة التشكيل، اتجاه الجريان، الأبعاد، ووقت التحضير.
- **تحديد التشوّه المستهدف**
اختيار استطالة أو انحناء يماثل ظروف الخدمة الفعلية للمنتج أو جزء منه.
- **تثبيت التشوّه**
تثبيت العينة عند الإزاحة المطلوبة بدقة ومنع أي انزلاق أو ارتداد غير مقصود.
- **تسجيل القوة/الإجهاد الابتدائي**
قراءة الإجهاد أو القوة مباشرة بعد التثبيت (قيمة البداية).
- **متابعة التغير مع الزمن**
تسجيل الانخفاض عند أزمنة محددة (دقائق/ساعات/أيام) أو تسجيل مستمر حسب الهدف.
- **إنهاء الاختبار**
ينتهي الاختبار عند:

- زمن محدد مسبقاً يمثل هدف الدراسة
- أو عندما تنخفض القوة تحت حد وظيفي غير مقبول

- قراءة نتائج اختبار الاسترخاء فقد تُعرض النتائج غالباً على شكل:

- منحنى الإجهاد (أو القوة) مقابل الزمن
- أو

○ نسبة الاحتفاظ بالإجهاد/القوة مقابل الزمن

ولا تُفسَّر النتيجة بقيمة واحدة، بل من خلال:

- سرعة الانخفاض في البداية (مرحلة الاسترخاء السريع)
- استمرار الانخفاض أو وصوله إلى حالة شبه مستقرة
- مقارنة المنحنيات عند درجات حرارة مختلفة
- تحديد الزمن الذي تهبط عنده القوة دون الحد المطلوب وظيفيًا

والسؤال الحاسم هنا ليس:

هل الاسترخاء موجود؟

بل:

هل يصل الاسترخاء إلى نقطة تجعل المنتج غير قادر على أداء وظيفته؟

– العوامل المؤثرة في الاسترخاء

درجة الحرارة

هي العامل الأكثر تأثيرًا. فارتفاع بسيط في الحرارة قد يؤدي إلى:

- تسارع كبير في الاسترخاء
- انخفاض أسرع في القوة
- تقليل الزمن الذي تبقى فيه القوة ضمن الحدود المقبولة

مستوى التشوه المفروض

كلما زاد التشوه الثابت:

- زاد الإجهاد الابتدائي
- وقد يتسارع الاسترخاء
- وقد تظهر ظواهر مثل التدهور الموضعي أو بدء تشققات دقيقة في بعض المواد الهشة

طبيعة البوليمر والبنية

- المواد الأكثر مطيلية أو ذات حركة جزيئية أعلى تُظهر استرخاء أكبر
- المواد الأعلى تبلورًا غالبًا تُظهر استرخاء أقل نسبيًا (مع اختلافات حسب التركيبة والتشكيل)
- المواد المقواة أو المحشوة قد تقلل الاسترخاء لكن قد ترفع الهشاشة

الإضافات والتركيبية

- الملدنات تزيد الاسترخاء عادةً
- المالئات والتدعيم قد يخفضان الاسترخاء
- سوء توزيع الإضافات يجعل النتائج غير قابلة للتنبؤ

التاريخ التصنيعي والإجهادات المتبقية

التبريد السريع، وعدم توازن التبريد، أو وجود إجهادات داخلية متبقية قد يؤدي إلى:

- استرخاء غير نمطي
- تباين كبير بين العينات
- فشل وظيفي مبكر في بعض الاتجاهات دون غيرها

— ربط اختبار الاسترخاء بالاختبارات السابقة

يأتي اختبار الاسترخاء طبعياً بعد:

- الاستقرار البُعدي هل تتغير الأبعاد مع الزمن
- الزحف كيف يتغير التشوه تحت حمل ثابت
- التعب كيف تتراكم الأضرار تحت حمل متكرر

ويمثل الاسترخاء الحالة الثالثة في منظومة الزمن:

- الزحف: حمل ثابت = تشوه متزايد
- الاسترخاء: تشوه ثابت = إجهاد متناقص
- التعب: حمل متكرر = ضرر تراكمي

وبذلك تكتمل الصورة الزمنية لسلوك البوليمرات قبل الانتقال إلى اختبارات القوة اللحظية أو الاختبارات الوظيفية الخاصة بالتطبيق.

— القرار الناتج عن اختبار الاسترخاء

بناءً على نتائج اختبار الاسترخاء يمكن اتخاذ قرارات عملية مثل:

- اعتماد المادة لتطبيقات تعتمد على إحكام أو ضغط ثابت مع الزمن
- تحديد زمن خدمة آمن قبل فقدان القوة

- تعديل التصميم لزيادة الاحتفاظ بالقوة (زيادة السماكة، تغيير شكل التثبيت...)
- تعديل التركيبة بإضافة تدعيم أو تغيير نوع البوليمر أو نظام الإضافات
- استبعاد المادة من التطبيقات التي تتطلب احتفاظاً عالياً بالقوة
-

— وهنا تظهر حقيقة أساسية في البلاستيك:

قد تكون المادة قوية في اختبار الشد، لكن تفشل وظيفيًا لأن قوتها “تتلاشى” مع الزمن عند تشوّه ثابت.

بعد فهم سلوك البوليمر تحت الزمن بثلاث صور رئيسية:

- الزحف (حمل ثابت)
- الاسترخاء (تشوّه ثابت)
- التعب (حمل متكرر)

يصبح من الممكن الانتقال إلى اختبارات أخرى تُعنى بالخواص الميكانيكية الأساسية أو بالاختبارات الوظيفية الخاصة بالتطبيق

الباب السابع اختبارات الإضافات

(Testing & Evaluation)

7.1 الفصل الأول اختبارات المواد الخام للموالى عبر سلسلة القيمة – من المصدر إلى المنتج النهائي

- الاختبار (1): توزيع الحجم الحبيبي للمالئات
- (Particle Size Distribution – PSD)
- الاختبار (2): الرطوبة والمواد المتطايرة في المالئات
- (Moisture & Volatile Content)
- الاختبار (3): التركيب الكيميائي والنقاء للمالئات
- (Chemical Composition & Purity)
- الاختبار (4): اللون والبياض والانحراف اللوني للمالئات
- (Color, Whiteness & Color Difference – ΔE)
- الاختبار (5): الشوائب الخشنة والجسيمات الغريبة في المالئات
- (Oversize Particles & Foreign Contamination)
- الاختبار (6): المعالجة السطحية للمالئات ونجاحها
- (Surface Treatment / Coating & Its Consistency)
- الاختبار (7): الكثافة والوزن النوعي للمالى
- (Density / Specific Gravity)
- الاختبار (8): اختبار الرماد لتثبيت نسبة المالى الفعلية
- (Ash Content – Filler Verification Test)
- الاختبار (9): اختبار التشتت داخل البوليمر
- (Dispersion Test)
- الاختبار (10): مؤشر تدفق الذوبان للمركب بعد إضافة المالى (MFI/MFR)
- الاختبار (11): الغازات والانبعاثات والرائحة أثناء التحضير التركيبي (Compounding)
- الاختبار (12): اختبار الفلترة وانسداد الشبك في مركبات الموالى
- (Filtration / Screen Pack Clogging Behavior Test)

- لماذا تُختبر الموائى على مراحل متعددة؟

المالى مادة واحدة، لكن سلوكه يتغير جذريًا بتغير المرحلة الصناعية التي يمر بها. فالمسحوق الذي يبدو متجانسًا في المنجم قد يصبح مصدر تكتل في التحضير التركيبي (Compounding) ، وقد يتحول إلى عيب بصري أو تشغيلي في المنتج النهائي. لذلك يعتمد هذا الفصل منهج الاختبار المرحلي الذي يربط كل اختبار بقرار محدد، ويمنع القفز مباشرة إلى الإنتاج.

الاختبار (1): توزيع الحجم الحبيبي للمائات (Particle Size Distribution – PSD)

المرحلة التي يُجرى فيها

- مصنع الاستخراج والمعالجة (مصدر المالى)
- اختبارات الاستلام – مصنع الماستريباتش
- مرجع أساسي لما سيحدث لاحقًا في التشتت، التشغيل، والمظهر

هذا الاختبار هو الأساس الذي تُبنى عليه معظم الاختبارات اللاحقة.

- لماذا يُعد اختبار الحجم الحبيبي حاسمًا؟

الخطأ الأكثر شيوعًا في الصناعة هو التعامل مع المالى على أنه مالى 1 ميكرون أو 2 ميكرون بينما الواقع أن :

- المالى ليس رقمًا واحدًا
- بل منحني توزيع كامل
- وقد يكون المالى بنفس d50 لكن بسلوك صناعي مختلف تمامًا

- الذيل الخشن أخطر من المتوسط

وهذه حقيقة لا تُذكر في نشرة البيانات التجارية.

- ما الذي نقيس فعليًا؟

لا نقيس الحجم، بل:

• كيف تتوزع الأحجام

• وما نسبة:

- الجسيمات الدقيقة جدًا
- والجسيمات الخشنة
- واتساق المنحنى بين الدفعات

– الجهاز الرئيسي للاختبار :

• Laser Diffraction Particle Size Analyzer

لماذا هذا الجهاز؟

- يعطي منحنى توزيع كامل
- أسرع
- أدق
- قابل للتكرار الصناعي

أجهزة بديلة (أقل دقة)

- Sieving غير مناسب للدرجات الناعمة
- Sedimentation أبطأ، حساس للتحضير

– تحضير العينة (خطوة حاسمة)

70% من أخطاء اختبار PSD سببها تحضير خاطئ.

الخطوات الصحيحة

1. أخذ عينة ممثلة (لا من السطح فقط)
2. تجفيف العينة إذا كانت رطبة
3. تفكيك التكتلات:

○ جافاً (هواء/اهتزاز)

○ أو رطباً مذيّب مناسب + Ultrasound

4. منع تكسير الجسيمات أثناء التحضير

خطأ شائع

- كسر الجسيمات أثناء التحضير
يعطي نتائج (جميلة) لكنها كاذبة صناعيًا

– قراءة النتائج – كيف نقرأ المنحنى؟

المؤشرات الأساسية

- d10 الجسيمات الدقيقة جدًا
- d50 المتوسط الحجمي
- d90 الجسيمات الخشنة (الأهم صناعيًا)

القراءة الصحيحة

- لا تُقرأ d50 وحدها
- بل:

- شكل المنحنى
- عرض التوزيع
- وجود ذيل خشن

d90 هو إنذار التشغيل

d10 هو إنذار الريولوجيا

- ماذا تعني النتائج صناعيًا؟

d50 منخفض - d90 مرتفع

- مالى “مخادع”
- يبدو ناعمًا

• لكنه يسبب:

- عيوب سطح
- تآكل
- انسداد فلاتر

d10 منخفض جداً

- زيادة مساحة سطح
- مشاكل لزوجة
- حاجة لإضافات

توزيع ضيق

- تشغيل مستقر
- تشتت أفضل
- نتائج قابلة للتكرار

– قرارات تُتخذ بناءً على PSD

في مصدر المالى

- قبول المنجم/الخام
- رفض دفعة غير متسقة
- تحديد حدود مواصفة داخلية

في مصنع الماسترباتش

- تحديد الحد الأعلى للنسبة
- اختيار نوع الإضافات المساندة
- منع المالى من تطبيقات رقيقة

في المصنع التحويلي

- قبول أو رفض مركب

- تفسير عيوب السطح
- ربط العيب بالمالي لا بالماكينة

– أخطاء شائعة في السوق

- الاعتماد على رقم واحد فقط
- مقارنة موردين بناءً على d50
- تجاهل d90
- تغيير مورد دون إعادة اختبار PSD
- الاعتقاد أن “أنعم = أفضل” دائماً

وبناء على ذلك فإن اختبار توزيع الحجم الحبيبي ليس اختبار جودة شكلي، بل اختبار سلوك مستقبلي. ومن دون قراءة صحيحة للمنحنى، يصبح أي قرار لاحق بشأن المالي مخاطرة غير محسوبة.

الاختبار (2): الرطوبة والمواد المتطايرة في المالنات

(Moisture & Volatile Content)

– المرحلة التي يُجرى فيها

- مصنع الاستخراج والمعالجة (المصدر)
- اختبارات الاستلام – مصنع الماسترباتش
- اختبارات ما بعد Compounding – للتحقق
- اختبارات الاستلام – المصنع التحويلي (عند الشك)

– هذا الاختبار هو ثاني أكثر سبب لفشل المالنات عملياً بعد PSD، وغالباً يُستهان به.

– لماذا الرطوبة اختبار حاسم للمالنات؟

الرطوبة في المالنات:

- لا تظهر دائماً كعيب في المسحوق

• لكنها تتحول أثناء البثق إلى:

- فقاعات
- ثقب
- خطوط
- ضعف لحام
- روائح
- عدم استقرار في الفقاعة (الفيلم)

والأخطر: بعض المائنات “تمتص” الرطوبة بعد التعبئة، حتى لو خرجت جافة من المصنع.

— ما الذي نقيس فعلياً؟

نقيس:

- الماء الحر
- الماء المرتبط
- المواد المتطايرة الأخرى عند الحاجة

وليس مجرد هل هي جافة أم لا

— أجهزة الاختبار

1- فرن التجفيف (Oven Method)

- الأكثر شيوعاً
- مناسب لغالبية المائنات

2- Karl Fischer

- أدق
- للدرجات الحساسة أو الرطوبة المنخفضة جداً

3- التحليل الحراري الوزني (TGA)

• عند الشك بوجود:

- ماء تبلور
- مواد عضوية
- معالجة سطحية غير مستقرة

- الخطوات الصحيحة لـ تحضير العينة

1. أخذ عينة ممثلة (لا من السطح)
2. غلق العينة فوراً لمنع امتصاص رطوبة الجو
3. وزن دقيق قبل الاختبار
4. تجفيف وفق درجة حرارة مناسبة لنوع المالى

خطأ شائع

• استخدام حرارة عالية:

- تُخرج ماء التبلور
- تُفقد مواد معالجة سطحية

- طريقة الاختبار (Oven Method)

1. وزن العينة (W1)
2. تجفيف عند درجة محددة) عادة 105–120°C
3. التبريد في Desiccator
4. إعادة الوزن (W2)

$$\text{الرطوبة (\%)} = (W1 - W2) / W1 \times 100$$

– قراءة النتائج صناعيًا

رطوبة منخفضة جدًا

- آمنة للتشغيل
- لا حاجة لتجفيف إضافي

رطوبة متوسطة

- خطر محتمل
- يعتمد على:
 - نوع المالى
 - نوع البوليمر
 - التطبيق

رطوبة مرتفعة

- خطر مؤكد
- تؤدي إلى:
 - فقاعات
 - ضعف لحام
 - عدم ثبات جودة

الرطوبة لا تُعْتَقَر في الأفلام.

قرارات تُتخذ بناءً على الاختبار

في مصدر المالى

- تحسين التعبئة
- تغيير التخزين
- تعديل المواصفة

في مصنع الماستريباتش

- إلزام تجفيف
- تعديل شروط التخزين
- رفض دفعة عالية الرطوبة

في المصنع التحويلي

- منع إدخال المركب دون تجفيف
- تفسير مشاكل الفقاعات واللحام
- إيقاف التشغيل قبل خسائر

– أخطاء شائعة في السوق

- الاعتماد على شهادة المورد فقط
- قياس الرطوبة مرة واحدة
- تجاهل الرطوبة في الشتاء/الرطوبة العالية
- الاعتقاد أن المالى “لا يمتص ماء”

ويتضح من ذلك أن الرطوبة في المائنات عدو صامت. قد لا تظهر في المستودع، لكنها تظهر بقوة في الآلات. واختبار الرطوبة ليس إجراءً شكلياً، بل شرطاً أساسياً لأي مالى يدخل ال **Compounding** أو التشغيل المباشر.

الاختبار (3): التركيب الكيميائي والنقاء للمائنات

(Chemical Composition & Purity)

المرحلة التي يُجرى فيها

- مصنع الاستخراج والمعالجة (المصدر)
- اختبارات الاستلام – مصنع الماستريباتش

- هذا الاختبار يجيب عن سؤال جوهري:

لماذا يتصرف مالن متشابهان ظاهريًا بسلوك صناعي مختلف ؟
هذا الاختبار اختبارا مرجعيا تفسيريا لكل ما سيحدث لاحقًا في التشتت، اللون، التآكل، والاستقرار

– لماذا التركيب الكيميائي أهم مما يعتقده السوق؟

الخطأ الشائع هو افتراض أن:

- كربونات كالسيوم هي كربونات كالسيوم
- تالك هو تالك

بينما الواقع أن:

- المالنات الطبيعية ليست مواد نقية
- بل خليط من أطوار معدنية
- تختلف حسب:
 - المنجم
 - طبقة الاستخراج
 - طريقة المعالجة

الشوائب لا تكون دائمًا عيبًا بصريًا، لكنها عيب سلوكي وقد تختلف الدفعات في المنجم الواحد والموقع الواحد

– ما الذي نقيس فعليًا؟

- نسبة المكون الأساسي
- نوع ونسبة الشوائب
- تكرار التركيب بين الدفعات

أمثلة من الشوائب و تأثيراتها الشائعة :

- الحديد : لون، أكسدة، نقاط سوداء
- الدولوميت : اختلاف صلابة وسلوك حراري
- السيليكا الحرة : تآكل معدات

- الألومينا : تغير ريولوجي غير متوقع

- أجهزة الاختبار

1- التحليل بالأشعة السينية (XRF)

- الأكثر شيوعًا صناعيًا
- سريع
- مناسب لتحديد الأكاسيد والعناصر

2- التحليل الكيميائي الرطب

- أدق في بعض الحالات
- أبطأ
- يُستخدم للتحقق أو النزاعات

3- عند الحاجة (XRD)

- لتحديد الأطوار المعدنية
- مهم عندما:
 - يتشابه التركيب الكيميائي
 - لكن يختلف السلوك الصناعي

- تحضير العينة

1. تجفيف العينة
2. طحن متجانس
3. أخذ عينة ممثلة
4. منع تلوث العينة أثناء التحضير

أي خطأ في تحضير العينة قد يسبب نتائج مضللة، مهما كان الجهاز دقيقًا.

– قراءة النتائج من الجوانب الصناعية

نقاء مرتفع مع شوائب منخفضة يؤدي الى

- ثبات في السلوك
- تكرارية جيدة
- قابلية تحكم أعلى

شوائب حديدية مرتفعة تؤدي الى :

- خطر تغير لون
- نقاط داكنة في المنتج
- تدهور حراري محتمل

شوائب سليكا حرة او شوائب رملية تؤدي الى

- خطر تآكل
- انسداد فلاتر
- تلف قوالب

- قرارات تُتخذ بناءً على هذا الاختبار

في مصدر المالى

- قبول أو رفض منجم معين او طبقة معينة
- فصل درجات حسب التطبيق
- تعديل مواصفة داخلية

في مصنع الماسترباتش

- تحديد نوع البوليمر الحامل
- اختيار إضافات تعويضية
- منع المالى من تطبيقات حساسة
- قبول او رفض الاستلام

في المصنع التحويلي

- تفسير عيوب غير مفسرة
- ربط مشاكل التآكل أو اللون بالمالي
- إيقاف مورد غير مستقر

– أخطاء شائعة

- الاعتماد على اسم المالي فقط
- تجاهل XRD والاكتفاء بـXRF
- مقارنة موردين دون مقارنة شوائبهم
- قبول دفعة مختلفة “لأن السعر جيد”

الاختبار (4): اللون والبياض والانحراف اللوني للمالئات

(Color, Whiteness & Color Difference – ΔE)

– أين يجري الاختبار :

- مصنع الاستخراج والمعالجة (المصدر)
- اختبارات الاستلام – مصنع الماسترباتش
- اختبارات ما بعد ال Compounding – مصنع الماسترباتش
- اختبارات الاستلام – المصنع التحويلي
- اختبارات المنتج النهائي – المصنع التحويلي

هذا الاختبار يبدو شكليا للبعض، لكنه في الواقع اختبار قرار تسويقي وتشغيلي، لأن الانحرافات الصغيرة في الموالى قد تتحول إلى انحرافات كبيرة بعد التركيب والإنتاج.

– لماذا اللون والبياض اختبار حاسم للموالى؟

لان المالي قد يكون:

- أبيض في الظاهر
- مقبولا ببشكله الخام (مسحوق)

لكن عند استخدامه مع البوليمر قد تظهر علية التغيرات التالية :

- رمادية
- اصفرار
- ميل للأخضر/البنفسجي
- تفاوت بين دفعات المنتج النهائي

وذلك يعود الى ان لون المسحوق ليس هو لون المالى داخل البوليمر بسبب تعرضه لظروف تشغيلية وكيميائية .

كما ان المستخدم النهائي(السوق) لا ينظر الى لون المالى او المادة الخام ولكنة ينظر الى :

- لون المنتج سواء ا:
- بين الشحنات
- تطابق الالوان في نفس الطلب

— ما الذي نقيس واقعيا؟

نقيس واحد أو أكثر من المؤشرات التالية:

$$L^* a^* b^* - \text{نظام قياس اللون}$$

- L^* الفاتحية/السطوع
- a^* ميل للأحمر (+) أو الأخضر(-)
- b^* ميل للأصفر (+) أو الأزرق(-)

-2Whiteness Index (WI)

- مؤشر البياض

3- ΔE (Color Difference)

- الفرق اللوني بين:

- دفعة وأخرى
- أو مورد وآخر
- أو عينة مرجعية

الأهم هو ΔE : لأنه يمثل "الفرق الذي تراه العين في المنتج النهائي"

– أجهزة الاختبار

1- جهاز قياس اللون (Colorimeter)

- سريع
- مناسب للفحص الروتيني
- جيد للمقارنة بين دفعات

2- جهاز المطياف (Spectrophotometer)

- أدق
- يعطي منحنى انعكاس
- مناسب للتحليل العميق والتوثيق

– تحضير العينة

لماذا تحضير العينة حساس؟

لأن المالنات عبارة عن مسحوق، والقراءة تتأثر بـ:

- كثافة التعبئة في طبق القياس
- نعومة السطح
- طريقة التسوية

- وجود تكتلات

أي اختلاف بسيط في التحضير قد يعطي فرق ΔE غير حقيقي.

– طرق تحضير العينة (حسب المرحلة)

(A) قياس المالى كمسحوق

1. تجفيف العينة إن كانت رطبة
2. تعبئة كوب القياس بنفس الطريقة كل مرة
3. تسوية السطح دون ضغط مبالغ
4. تكرار القراءة 3 مرات وأخذ المتوسط

ميزة هذه الطريقة :سريعة عيبها :لا تمثل السلوك داخل البوليمر

(B) القياس وهو الأهم: لانه يختبر المالى داخل البوليمر (Masterbatch Compound)

وهذه هي القراءة التي يعتمدها هذا الكتاب بوصفها الأكثر واقعية.

– الطريقة القياسية:

1. تركيب المالى في بوليمر حامل بنسبة ثابتة
2. إنتاج عينة موحدة Film أو قطعة (قياسية)
3. قياس اللون على العينة البلاستيكية وليس على المسحوق

لأن ما يهم المصنع التحويلي هو لون المنتج، لا لون المسحوق.

– طريقة الاختبار (بشكل عملي)

1. تحديد مرجع ثابت (Standard Sample)
2. قياس العينة الجديدة
3. يحسب :

$$L^* a^* b^*$$

$$\Delta E \text{ مقارنة بالمرجع}$$

4- توثيق النتائج مع رقم الدفعة والمورد

– قراءة النتائج

(انخفاض) L^* السطوع يعني:

- مالى أقل بياضا
- أو يميل للرمادية
- ويظهر أكثر في:
- منتجات ببيضاء
- أفلام رقيقة

(سالب) a^* : ميل للأخضر و قد يظهر في بعض المائنات داخل البوليمر حتى لو لم يظهر في المسحوق ولكنه يظهر في المسحوق أحيانا .

(موجب) b^* (مرتفع) : اصفرار

يُعد من أكثر المشاكل حساسية لأنه:

- يقتل نظافة المنتج
- ويظهر بوضوح في الأبيض والشفاف و الألوان الفاتحة

يعتبر ΔE هو الحكم النهائي

- ΔE منخفض = ثبات جيد
- ΔE مرتفع = عدم استقرار دفعات

يتخذ بناءا عليّة عادة قرار القبول او الرفض

– قرارات تُتخذ بناءً على هذا الاختبار

في مصدر المالى

- تصنيف درجات المالى حسب البياض
- تخصيص خامات لتطبيقات معينة

في مصنع الماسترباتش

- قبول او رفض حسب المنتج

في المصنع التحويلي

- قبول/رفض دفعة
- منع خلط دفعات مختلفة في نفس الطلب

– أخطاء شائعة

- قياس لون المسحوق فقط
- تجاهل ΔE والاكتفاء ب أبيض أو لا
- عدم وجود عينة مرجعية ثابتة
- خلط دفعات مختلفة داخل نفس الإنتاج
- الاعتماد على نظر العين فقط

وبالتالي فان اللون والبياض في المائنات ليسا تفاصيل شكلية او جمالية، بل معيار ثبات صناعي وتسويقي. والقراءة الأكثر واقعية ليست للمسحوق، بل للمالى بعد تركيبه داخل البوليمر، لأن أي انحراف بسيط في المالى قد يتضخم في المنتج النهائي ويظهر على شكل اختلاف بين الدفعات مما يؤدي الى مشكلة تسويقية بالحد الأدنى .

الاختبار (5) : الشوائب الخشنة والجسيمات الغريبة في المائات

(Oversize Particles & Foreign Contamination)

– المرحلة التي يجرى فيها

- مصنع الاستخراج والمعالجة (المصدر)
- اختبارات الاستلام – مصنع الماسترباتش
- اختبارات ما بعد ال Compounding – مصنع الماسترباتش
- اختبارات الاستلام – المصنع التحويلي خاصة في المنتجات الحساسة

ولا يعد هذا الاختبار اختبار جودة بقدر ما يعد اختبار وقائي لحماية الآلات وهذا ما يبرز أهميته حتى لو كان المالى:

- ناعماً في d50
- جافاً
- ناصع البياض

فإن وجود نسبة صغيرة ولو كانت ضئيلة من:

- جسيمات خشنة
- رمل
- شوائب معدنية
- حبيبات صلبة

ربما يؤدي إلى:

- خدوش في أجزاء حساسة مثل رأس الآلات الفلم
- تاكل او خدوش في ال screw
- اغلاق متكرر للفلاتر او أحيانا ثقب الفلتر

والى جانب المخاطر على الآلات فقط يظهر عيوب واضحة وأحيانا لا تعالج بسهولة في المنتج النهائي مهما كانت نسبة الشوائب فقد تكون صغيرة جداً، لكن أثرها كبير للغاية

– ما الذي علينا قياسه ؟

1. نسبة الجسيمات الأكبر من الحد المسموح
2. نوع الشوائب ومدى صلابتها
3. هل هي معدنية؟
4. تكرار وجودها بين الدفعات

– أجهزة الاختبار

الغربلة (Sieving Analysis)

- الأكثر شيوعاً
- مناسب لاكتشاف:
 - جسيمات خشنة
 - تكتلات كبيرة
 - شوائب غير مطحونة

الفحص المجهرى (Microscopy)

- لتحديد طبيعة الجسيمات
- مفيد في النزاعات مع المورد

اختبار الرماد/الحرق (عند الحاجة)

- ليس للكشف عن الخشونة مباشرة
- لكن للكشف عن شوائب عضوية ومعدنية

– تحضير العينة

1. أخذ عينة ممثلة من عدة نقاط في الكيس/الجامبو
2. تجفيف إن كانت رطبة
3. تفكيك التكتلات الكبيرة دون سحق الجسيمات الأصلية

4. وزن كمية اختبار ثابتة

– طريقة اختبار الغربلة

الخطوات العملية

1. اختيار شبكة غربلة مناسبة (Mesh/ μm) حسب حساسية التطبيق

2. وضع وزن ثابت من المالى على الشبكة

3. اهتزاز لفترة محددة

4. وزن المتبقي على الشبكة

معادلة حساب النتيجة :

$$\text{Oversize} \% = (\text{وزن المتبقي} / \text{وزن العينة}) \times 100$$

– قراءة النتائج

وجود Oversize منخفض جداً

• قد يكون مقبولاً في:

- منتجات سميكة
- تطبيقات غير حساسة بصرياً
- الآلات معدة خصيصاً للتعامل مع اب الصلبة و المعدنية

وجود Oversize متوسط أو مرتفع

• خطر مؤكد في على الآلات

• سيظهر عيوب مؤكدة في :

- الأفلام
- الأكياس
- المنتجات التي تحتاج سطح نظيف

نوع الجسيمات أهم من نسبتها

- جسيمات ناعمة متكثلة (Soft Agglomerates)

- قد تُحل بالمعالجة: التثنت أو إعادة الغريلة

- جسيمات صلبة قاسية (Sand/Quartz/Metal)

- خطر تآكل وخدوش

- لا تُحل بإضافات

لذلك لا يكفي معرفة كم بل يجب معرفة نوع الشوائب

– قرارات تُتخذ بناء على ذلك

في مصدر المالى

- تحسين الطحن

- تحسين الغريلة النهائية

- إزالة الشوائب قبل التعبئة

في مصنع الماسترباتش : رفض دفعة

في المصنع التحويلي : رفض دفعه حتى لو أدى ذلك الى إيقاف التشغيل

– أخطاء شائعة

- التركيز على d50 وتجاهل الشوائب الخشنة

- الاعتقاد أن الشوائب تختفي مع التشغيل

- رفع الفلتره كحل دائم بدل معالجة السبب

- عدم ربط العيوب السطحية بالمالى

الاختبار (6): المعالجة السطحية للمائنات ونجاحها

(Surface Treatment / Coating & Its Consistency)

– المرحلة التي يُجرى فيها

- مصنع الاستخراج والمعالجة (المصدر) ← أساسي
- اختبارات الاستلام – مصنع الماسترباتش
- اختبارات ما بعد ال Compounding – مصنع الماسترباتش (
- يظهر أثره مباشرة في المصنع التحويلي من خلال التشغيل والمظهر

نعالج الموالي سطحيًا لان نعظم الموالي المعدنية بطبيعتها:

- قطبية
- سطحها نشط
- تميل إلى التكتل
- لا تتوافق كيميائيًا بشكل طبيعي مع اللدائن مثل PE و PP

في حين معظم اللدائن مثل (PE/PP)

- غير قطبية
- لا تميل إلى السطوح القطبية

فتحدث المشكلة التالية:

- تشتت ضعيف
- ضعف في الالتصاق البيئي
- انخفاض في المتانة
- عيوب سطحية
- زيادة في استهلاك الطاقة

– ولهذا تستخدم المعالجة السطحية لتحويل سطح المالى من سطح قطبي صعب التوافق إلى سطح أكثر توافقًا مع البوليمر.

– ما هي المعالجة السطحية ؟

هي إضافة طبقة رقيقة جدا على سطح جسيمات المالى، مثل:

- Stearic Acid Coating شائع جدًا في CaCO_3
- Silane Treatment شائع في السيليكا وبعض المالنات الخاصة
- يوجد طرق معالجة أخرى ولكنها خاصة جدا وغير شائعة والمهم ليس اسم المادة المعالجة فقط ، بل : هل تم تطبيقها بشكل صحيح ومستقر ام لا

– ما الذي نقيسه في هذا الاختبار؟

1. هل المالى معالج سطحيًا بالفعل أم لا؟
2. نسبة المعالجة
3. هل المعالجة متجانسة على كامل الدفعة
4. هل المعالجة ثابتة بين الدفعات

– أجهزة الاختبار

FTIR التحليل الطيفي

- يكشف وجود مجموعات عضوية على سطح المالى
- مناسب للتحقق من وجود المعالجة ولكن لا يقيس كميتها الدقيقة

Loss on Ignition (LOI) فقدان الكتلة بالحرق

- يعطي مؤشر على نسبة مواد المعالجة السطحية

TGA تحليل حراري وزني

- أدق من LOI

- يميز بين:

○ رطوبة

○ مواد عضوية

○ تحليل تدريجي

اختبار وظيفي وهو الاختبار الأهم : لأن بعض المعالجات تظهر على الورق لكنها تفشل وظيفيًا.

● لا يتم الاختبار على جهاز أو أسلوب واحد ولكن يتم الاختبار من خلال

○ التشتت داخل البوليمر

○ استقرار التشغيل

○ تأثيره على MFI

○ مظهر المنتج

– تحضير العينة

للتحليل الكيميائي/الحراري

1. تجفيف العينة

2. طحن بسيط لتجانسها (إن لزم)

3. أخذ عينة ممثلة

4. التأكد من خلو العينة من التلوث بالزيوت أو الغبار

للتحقق

1. تركيب المالى داخل بوليمر حامل بنسبة ثابتة

2. إنتاج عينة Masterbatch أو Compound

3. قياس التشتت والسلوك على المنتج

– طريقة الاختبار

(A)التحقق من وجود المعالجة

● FTIR أو LOI/TGA

● الهدف: هل هناك طبقة عضوية فعلاً؟

(B) قياس اتساق المعالجة

- تكرار القياس على عينات متعددة من نفس الشحنة
- الهدف: هل المعالجة موزعة بالتساوي؟

(C) اختبار نجاح المعالجة صناعيا

- اختبار التشتت بعد ال Compounding ويعتبر هو الحكم النهائي:

المعالجة الناجحة = تشتت أفضل + تشغيل أكثر ثباتا

– قراءة النتائج

إذا كان المالى غير معالج

يؤدي غالبا إلى:

- تكتل أعلى
- تشتت أضعف
- انخفاض في الاستطالة والمتانة
- سطح خشن
- مشاكل في الفيلم

اما اذا كان المالى معالج معالجة ضعيفة أو غير متجانسة

- يعطي نتائج متذبذبة
- دفعة ممتازة ودفعة سيئة
- صعوبة ضبط العملية

مالئ معالج معالجة زائدة

قد يؤدي إلى:

- مشاكل انزلاق غير مرغوبة
- ضعف لحام في بعض التطبيقات
- تأثيرات على الطباعة
- تغيرات في الريولوجيا

وهذا يدل على ان النقص في المعالجة يشبه الزيادة ففي العلوم الصناعية و التطبيقاتية تحسب النسب بشكل دقيق وليست بشكل عشوائي الزيادة خطأ كما ان النقص خطأ

– قرارات قد تؤخذ بناء على هذا الاختبار

في مصدر المالى

- تثبيت نسبة المعالجة
- ضبط جودة المعالجة
- فصل درجات حسب التطبيق

في مصنع الماستريباتش

- اختيار المالى المعالج للبوليمر
- رفض الاستلام او قبول الاستلام بشرط تحويل الدفعه الى صناعات لا تتطلب معالجة سطحية
- تقليل الحاجة لإضافات تشتت إضافية

في المصنع التحويلي

- تفسير مشاكل:
 - ضعف اللحام
 - التكتل
 - عدم ثبات التشغيل
- رفض دفعات غير مستقرة

- أخطاء شائعة

- شراء مالى معالج دون إثبات
- الاعتماد على كلام المورد واهمال الاختبار
- خلط موردين بمعالجات مختلفة
- اعتبار المعالجة حلاً لكل شيء

ونستنتج ان المعالجة السطحية ليست ميزة تسويقية، بل عامل اساسي يحدد نجاح المالى داخل البوليمر. ونتيجة الاختبار لا تُقرأ فقط عبر جهاز، بل تُقرأ عبر أثرها على التشتت، التشغيل، والمظهر. وأي تذبذب فيها يعني تذبذباً في جودة المنتج النهائي.

الاختبار (7): الكثافة والوزن النوعي للمالى

(Density / Specific Gravity)

قد هذا الاختبار يبدو بسيطاً، لكنه يدخل مباشرة في الحساب الاقتصادي الحقيقي وفي تفسير اختلافات الوزن بين المنتجات فهو اختبار مهم اقتصادياً ومهم كذلك في التطبيقات التي تتطلب استقرار اوزان القطع و المنتجات .

- يجرى الاختبار في كل من :

- مصنع الاستخراج والمعالجة (المصدر)
- اختبارات الاستلام – مصنع الماستر باتش
- اختبارات ما بعد التركيب – مصنع الماستر باتش
- اختبارات المنتج النهائي – المصنع التحويلي

- المالئات باتواعها تختلف كلياً في الكثافة.

وهذا يؤثر على:

1- التكلفة الحقيقية فالكثافة تؤثر بشكل مباشر في :

- وزن المنتج النهائي
- كمية المادة المستخدمة لكل قطعه او وحدة قياس

2- سلوك المنتج : فزيادة الكثافة قد تعطي:

- إحساس وزن أعلى
- صلابة أعلى أحياناً
- وقد تؤدي أيضاً إلى:
- هشاشة
- تغير في التوازن الميكانيكي

3- حساب نسبة المالى الفعلية في الماسترباتش، الكثافة تساعد في:

- كشف اختلافات التحميل
- أو تغيرات في التركيبية

– ما الذي يخبرنا به اختبار الكثافة :

نقيس واحداً أو أكثر من التالي:

1. True Density الكثافة الحقيقية للمعدن

2. Bulk Density الكثافة الظاهرية للمسحوق

3. Specific Gravity الوزن النوعي

يجب اجراء اختبارات الكثافة جميعها او على الأقل الكثافة الحقيقية و الكثافة الظاهرية لأن المالى مسحوق وقد يحبس هواء بين الجسيمات و الفرق بينهما يظهر ذلك بوضوح .

– أجهزة الاختبار

Pycnometer True Density يعتبر الأكثر دقة لقياس الكثافة الحقيقية

Bulk Density Tester Bulk Density

وهو اختبار بسيط عبارة عن : أسطوانة قياس + طريقة تعبئة ثابتة

– اختبار الكثافة للمركب/الماسترباتش

• Hydrostatic Method (Archimedes)

• Density Gradient Column

– طريقة تحضير العينة

للمالى كمسحوق

1. تجفيف العينة إن كانت رطبة

2. تفكيك التكتلات

3. أخذ عينة تمثل كامل الدفعة

4. اتباع نفس طريقة التعبئة كل مرة لـ Bulk Density

للماسترباتش أو المركب

1. أخذ حبيبات تمثل دفعه كاملة

2. التأكد من عدم وجود فقاعات داخل العينة او احتباس ابخرة

3. القياس على أكثر من عينة للحصول على متوسط

– طريقة الاختبار

(A) الكثافة الحقيقية للمالى (True Density)

• تُقاس باستخدام Pycnometer

• تُستخدم للمقارنة بين:

○ نوع المالى

○ ومصدره

○ ومدى وجود شوائب

(B) الكثافة الظاهرية (Bulk Density)

• تعبئة أسطوانة بحجم معروف

- وزنها
- حساب كثافة المسحوق

Bulk Density مهم في التخزين والتغذية والوزن الحجمي داخل الهوب .

(C) كثافة المركب بعد التحضير التركيبي (Compounding)

- تُقاس على الحبيبات أو عينة بلاستيكية
- تُستخدم للتأكد من:
 - أن نسبة المالى في الماسترباتش ضمن المتوقع
 - وأن الدفعة ليست مخففة أو مختلفة

– قراءة النتائج عمليا

إذا كانت كثافة المالى أعلى من المتوقع

قد تعني:

- اختلاف في نوع الخام
- شوائب ثقيلة
- تغير في المصدر
- إذا كان ال Bulk Density متذبذب او غير مستقر

يعني غالبًا:

- تكتلات
- رطوبة
- اختلاف في الطحن
- وهذا يؤثر بشكل مباشر على كل من
- ثبات التغذية
- دقة الجرعات

كثافة الماسترباتش أقل/أعلى من المتوقع

يعلما بان هناك :

- خطأ في نسبة التحميل
- اختلاف في البوليمر الحامل
- تذبذب في الخلط

تعتبر اختبارات الكثافة اهم اختبارات كشف الغش التجاري للموائى وخاصة لمنتج ماسترباتش الموائى وليس كما هو شائع الفحص بطريقة (ضغط الحبيبات تحت الاسنان)

– قرارات تؤخذ بناءً على اختبار الكثافة :

في المصدر

- تثبيت نوع الخام
- فصل درجات المالى حسب الكثافة

في مصنع الماسترباتش

- ضبط التغذية والجرعات
- توثيق ثبات التحميل
- كشف اختلاف دفعات مبكراً

في المصنع التحويلي

- حساب وزن المنتج النهائي بدقة
- فهم سبب تغير وزن المنتج أو القطعة
- ضبط استراتيجية التسعير

– أخطاء شائعة في السوق

- الخلط بين Bulk Density و True Density
- اعتبار الكثافة رقم ثانوي
- عدم ربطها بالتكلفة الحقيقية

تذكر بأن الكثافة ليست مجرد رقم في نشرة البيانات ، بل عامل اقتصادي وتشغيلي مباشر. فهي تؤثر على وزن المنتج، التكلفة الفعلية، وثبات الجرعات. وقراءتها الصحيحة تمنع قرارات خاطئة مثل مقارنة موردين على سعر الطن فقط دون فهم أثر الكثافة على تكلفة المنتج النهائي كما انها وسيلة مهمة لكشف الغش التجاري

الاختبار (8): اختبار الرماد لتثبيت نسبة المالى الفعلية

(Ash Content – Filler Verification Test)

- **يعد اختبار الرماد من أكثر الاختبارات العملية أهمية في عالم المائات، لأنه لا يتعامل مع المالى بوصفه مادة خام فقط، بل يتعامل معه بوصفه “حقيقة رقمية” داخل المركب النهائي.** ففي كثير من الحالات تكون نسبة المالى محسوبة نظرياً على الورق، لكن الواقع بعد الخلط التحضير التركيبي (Compounding) قد يختلف بسبب أخطاء تغذية، أو تذبذب كثافة التغذية، أو ضعف التجانس، أو اختلافات غير مرئية بين الدفعات. وهنا يأتي اختبار الرماد بوصفه أداة تحقق لا يمكن تجاوزها، لأنه يكشف ببساطة: كم نسبة المادة غير العضوية المتبقية بعد احتراق البوليمر؟
- **يُجرى هذا الاختبار عادة بعد التركيب في مصنع الماسترباتش، ويمكن اعتباره اختبار الزامي لكل ماسترباتش مالى، كما يُستخدم أحياناً في المصنع التحويلي عند الشك في ثبات الدفعات أو عند ظهور انحراف في الوزن أو المتانة أو المظهر دون تفسير واضح.** والميزة الأهم لهذا الاختبار أنه لا يعتمد على “ما قاله المورد” أو “ما افترضه قسم الإنتاج”، بل يعتمد على نتيجة قابلة للقياس والتوثيق والمقارنة.
- **تقوم فكرة الاختبار على مبدأ مباشر:** البوليمر مادة عضوية قابلة للاحتراق، بينما المالى مادة معدنية غير عضوية لا تحترق وتبقى على هيئة رماد. لذلك، عند تسخين عينة من المركب تحت ظروف محددة، يتبخر البوليمر ويحترق، ويبقى المالى على شكل كتلة رمادية أو بيضاء أو مائلة للون معين حسب نوعه وشوائبه. ويُقاس وزن هذا المتبقي ويُحوّل إلى نسبة مئوية تمثل محتوى الرماد، وهو ما يرتبط ارتباطاً مباشراً بنسبة المالى الفعلية داخل المركب.
- **يُستخدم لهذا الاختبار جهاز الفرن الحراري عالي الحرارة المعروف باسم فرن المفل (Muffle Furnace) ، إلى جانب بوتقات خزفية أو بلاستيكية تتحمل درجات حرارة مرتفعة.** ويبدأ التحضير الصحيح للعينة بأخذ كمية ممثلة من الحبيبات أو من قطعة بلاستيكية مصبوبة من نفس الدفعة، لأن العينة غير الممثلة قد تعطي نتيجة مضللة حتى لو كانت

الطريقة صحيحة. تُوزن البوتقة فارغة أولاً ثم تُوزن بعد إضافة العينة. بعد ذلك تُدخل إلى الفرن وتُرفع درجة الحرارة تدريجياً لتجنب التطاير المفاجئ أو التناثر، ثم تُترك فترة كافية حتى يكتمل احتراق البوليمر وتثبت الكتلة المتبقية. بعد انتهاء الحرق تُبرد البوتقة في وعاء جاف مغلق (Desiccator) حتى لا تمتص الرطوبة من الجو، ثم تُوزن مرة أخرى للحصول على وزن الرماد النهائي.

- **قراءة النتيجة ليست مجرد رقم ؟ بل هي خطوة تفسير صناعي.** فإذا كانت نسبة الرماد أقل من المتوقع، فهذا يعني أن نسبة المالى الفعلية أقل من النسبة المصممة، وقد يكون السبب خطأ في الجرعات، أو ضعف في التغذية، أو عدم تجانس، أو حتى اختلاف في الكثافة الظاهرية أدى إلى تغذية غير دقيقة رغم أن الإعدادات ثابتة. أما إذا كانت نسبة الرماد أعلى من المتوقع، فهذا يشير إلى زيادة تحميل المالى عن المخطط، وهو ما قد يفسر انخفاض الاستطالة، أو زيادة الهشاشة، أو تدهور المظهر البصري، أو ظهور مشاكل تشغيلية مثل انسداد الفلاتر أو ارتفاع عزم المحرك أثناء البثق.

- **وتظهر قوة هذا الاختبار عندما يُستخدم كأداة قرار:**

- فإذا كانت نسبة الرماد ضمن نطاق ثابت بين الدفعات، فإن المصنع يستطيع بناء ثقة في ثبات التحميل، ويمكن عندها تفسير أي مشكلة تظهر لاحقاً بأنها مرتبطة بعامل آخر مثل جودة التشتت أو الرطوبة أو المعالجة السطحية. أما إذا كانت نسبة الرماد متذبذبة، فإن هذا وحده كافٍ لاعتبار المادة غير مستقرة إنتاجياً، لأن المنتج النهائي سيصبح غير قابل للتكرار، وهو أسوأ ما يمكن أن تواجهه أي منشأة تسعى لبناء سمعة جودة ثابتة.

- **ومن الأخطاء الشائعة في السوق اعتبار اختبار الرماد اختباراً “خاصاً بالمعمل” لا علاقة له بالإنتاج :**

بينما الحقيقة أنه اختبار يُغلق فجوة كبيرة بين الحساب النظري والواقع. كما يقع بعضهم في خطأ آخر وهو تفسير الرماد على أنه “نسبة المالى بدقة مطلقة” دون النظر إلى أن بعض التركيبات قد تحتوي أيضاً على إضافات غير عضوية أخرى، أو قد يختلف سلوك بعض المالنات عند الحرق. ولهذا، ينبغي اعتماد هذا الاختبار ضمن نظام ضبط الجودة مع توثيق نوع المالى المستخدم، ومقارنة النتائج بمرجع ثابت لنفس المادة ونفس التركيبة.

الاختبار (9): اختبار التشتت داخل البوليمر

(Dispersion Test)

- يُعد اختبار التشتت الاختبار الأكثر حساسية في المالئات، لأنه يمثل "الحكم النهائي" على نجاح المالى داخل البوليمر. فقد تكون نسبة الرطوبة ممتازة، وتوزيع الحجم الحبيبي ضمن الحدود، ومحتوى الرمد مطابقاً للنسبة المصممة، ومع ذلك يفشل المنتج في التشغيل أو المظهر أو الخواص الميكانيكية. السبب في هذه الحالة غالباً ليس المالى كنسبة، بل المالى كتوزيع داخل المصفوفة البوليمرية.

- فالمشكلة ليست في وجود المالى :

- بل في شكل وجوده. المالى المتشتت جيداً يصبح جزءاً من النظام، بينما المالى المتكتل يتحول إلى نقاط ضعف، وعيوب سطح، ومصدر كسر مبكر، وسبب مباشر لعدم استقرار الجودة بين الدفعات.

- الهدف من الاختبار

الهدف من اختبار التشتت هو التأكد من أن المالى داخل المركب ليس موجوداً على شكل تجمعات كبيرة، بل موزع على هيئة جسيمات منفصلة قدر الإمكان. وهذا الاختبار لا يُقرأ بوصفه جيد أو سيئ فقط، بل يُستخدم للإجابة عن أسئلة تشغيلية ذات أهمية كبرى مثل: هل يمكن رفع نسبة المالى؟ هل نحتاج إضافة مساعد تشتت؟ هل نغير طريقة الخلط، او هل لدينا خلل في نظام الخلط ؟ هل تنفصل المكونات بعد الخلط واثناء الانتقال الى التركيب ؟ وهل هذا المالى يصلح لمنتج دون غيره ؟

المرحلة	ماذا يثبت؟	لماذا يُجرى ؟
بعد التحضير التركيبي في مصنع الماسترباتش	جودة توزيع المالى داخل البوليمر	قرار اعتماد الدفعة
أثناء التشغيل في المصنع التحويلي	هل العيب من التشتت أم من عامل آخر	تفسير العيوب

– أجهزة اختبار التشتت

اختبار التشتت لا يعتمد على جهاز واحد فقط، بل على مستوى الفحص المطلوب:

- مجهر ضوئي (Optical Microscope) الخيار الأكثر شيوعاً في مصانع الماسترباتش.
- مجهر إلكتروني (SEM) يُستخدم عند التحقيقات أو التطوير المتقدم، لكنه ليس شرطاً لكل مصنع.
- فحص بصري على فيلم رقيق (Film Drawdown / Thin Film) طريقة عملية سريعة جداً تكشف التكتلات الكبيرة فوراً

– تحضير العينة

نجاح الاختبار يعتمد على تحضير عينة تمثل الواقع. أكثر الطرق العملية هي تحضير العينة على شكل فيلم رقيق أو شريحة أو سطح مقطوع عرضياً بطريقة تظهر التكتلات بوضوح.

– الطرق الشائعة لتحضير العينة:

1. تحضير فيلم رقيق من المركب (أكثر تمثيلاً للفيلم والأكياس).
2. تحضير شريحة رقيقة من حبيبات المركب أو من عينة مصبوبة.
3. تحضير كسر مبرد (Cryo-fracture) لعينة سميكة عند الحاجة.

في التطبيقات الرقيقة، الفيلم الرقيق هو الطريقة الأكثر استعمالاً، لأن أي تكتل سيظهر فوراً كعييب بصري وتشغيلي.

– طريقة القياس العملية

تُفحص العينة تحت المجهر أو على الفيلم الرقيق، ويُبحث عن مؤشرات واضحة مثل:

- عدد التكتلات
- حجم التكتلات
- توزيعها (هل هي منتشرة أم مركزة في مناطق؟)

ولتجنب الحكم الانطباعي، يمكن اعتماد تصنيف بسيط للتوثيق الداخلي مثل:

مستوى التشتت	الوصف	الحكم الصناعي
ممتاز	لا توجد تكتلات ظاهرة أو نادرة جدًا	صالح للتطبيقات الحساسة
جيد	تكتلات قليلة صغيرة	صالح لمعظم التطبيقات
متوسط	تكتلات واضحة لكن محدودة	صالح بشروط ونسب أقل
ضعيف	تكتلات كثيرة أو كبيرة	مرفوض أو يحتاج إعادة معالجة

– قراءة النتائج: او ماذا تعني التكتلات؟

وجود التكتلات لا يعني فقط مظهر سيئ بل له تأثيرات مباشرة يمكن توقعها:

- ميكانيكا: التكتل يعمل كنقطة كسر، فيقلل الاستطالة ومقاومة التمزق.
- بصريا: تظهر عكورة، خطوط، أو نقاط رمادية حتى لو كان المالى أبيض.
- تشغيليا: قد يزيد انسداد الفلاتر، ويؤدي إلى عدم استقرار في التشغيل.
- تسويقيا: اختلاف دفعة عن أخرى بسبب اختلاف التشتت يقتل ثبات الجودة.

ولهذا، قد تكون نسبة الرماد صحيحة تماما، لكن المنتج يفشل لأن المالى لم يتحول إلى توزيع منتظم بل جزء منه تجمع على شكل تكتلات .

– قرارات قد نأخذها بعد اختبار التشتت

عند ظهور تشتت ضعيف، لا يكون القرار مجرد رفض الدفعة دائماً، بل هناك خيارات بحسب السبب:

- خفض نسبة المالى في هذه الدرجة
- إضافة مساعد تشتت أو توافق
- تعديل حرارة البثق أو القص
- تغيير شبكة الفلتر أو نظام الخلط

– قرارات شائعة في المصنع التحويلي:

- منع استخدام هذه الدفعة في بعض التطبيقات وتحويلها إلى تطبيقات أقل حساسية
- رفع مستوى الفلتره وهو مالا نعتبره دائما خيارا حكيما

– أخطاء شائعة في المصانع

- الحكم على التشتت من شكل الحبيبات فقط، بينما التشتت يُقرأ داخل البوليمر.
 - الاعتماد على نتيجة واحدة دون أخذ عينات متعددة من نفس الدفعة.
 - الخلط بين “مالى ناعم” و”مالى متشتت”؛ فهما ليسا الشيء نفسه.
 - اعتبار التشتت مشكلة تشغيل فقط، بينما هو في الأصل مشكلة تصميم تركيبة ومعالجة.
- نستطيع ان نوجز بما يلي : اختبار التشتت هو الاختبار الذي يحوّل المالى من رقم في المواصفة إلى واقع داخل المنتج. ومن دونه لا يمكن ضمان ثبات الخواص، ولا يمكن تفسير كثير من العيوب التي تظهر فجأة رغم أن كل الاختبارات الأخرى تبدو مثالية. لذلك يُعد التشتت أحد أهم اختبارات المائنات بعد التحضير التركيبي أو التركيب ، وهو معيار اعتماد لا يقل أهمية عن محتوى الرماد أو الرطوبة.

الاختبار (10): مؤشر تدفق الذوبان للمركب بعد إضافة المالى

(MFI/MFR)

- يُستخدم اختبار مؤشر تدفق الذوبان بوصفه أداة سريعة لفهم التأثير المباشر للمالى على ريولوجيا المركب وقابلية تشغيله. إضافة المالنات لا تغيّر الخواص الميكانيكية والبصرية فقط، بل قد تغيّر سلوك التدفق داخل الماكينة، وهو ما ينعكس على استقرار الإنتاج، وتذبذب السماكة في الفيلم، ومشاكل التشكيل أو الانسداد في بعض التطبيقات.
- يُجرى هذا الاختبار عادة بعد التركيب في مصنع الماسترباتش، ويعاد عند الاستلام في المصنع التحويلي عند الحاجة. ويُعد مهمًا لأن المركب قد يبدو جيدًا بصريًا، لكن سلوكه أثناء التشغيل يكشف أن المالى أو توزيعه أو نسبته أحدثت تغييرًا في اللزوجة لا يتوافق مع التطبيق.
- الجهاز وطريقة القياس وتحضير العينة وقراءة النتائج :
- تم شرحها سابقًا بالتفصيل ضمن اختبارات توصيف البوليمرات، ويُكتفى هنا بالتأكيد على أن قراءة MFI/MFR في سياق الموائى لا تكون بهدف رقم أعلى أو أقل، بل بهدف الإجابة عن سؤال واضح: هل التغير في التدفق ما يزال ضمن نطاق يسمح بتشغيل مستقر، أم أنه يستدعي تعديل نسبة المالى أو إضافة مساعدات تشغيل أو تقييد التطبيق؟
- قرار المختبر هنا يكون عادة أحد الخيارات التالية:
- اعتماد المركب للتطبيق المستهدف إذا كان التدفق ضمن الحدود المقبولة
- أو تقييد استخدامه لتطبيقات أقل حساسية
- أو تعديل التركيبة/التشغيل إذا ظهر انحراف كبير غير مبرر

الاختبار (11): الغازات والانبعاثات والرائحة أثناء التحضير التركيبي (Compounding) وعلاقتها بسلوك المائات

- يُعد ظهور الغازات أو الأبخرة أو الروائح أثناء التحضير التركيبي (Compounding) من أهم المؤشرات العملية التي تكشف سلوك المائي الحقيقي داخل البوليمر، حتى قبل الوصول إلى اختبارات المنتج النهائي. فبعض المائات قد تبدو مستقرة عند اختبارها كمسحوق من حيث اللون أو الحجم الحبيبي، إلا أن دخولها إلى بيئة البثق الحرارية والقسية يحولها إلى عامل مؤثر على استقرار العملية الإنتاجية، وقد يظهر ذلك على شكل فقاعات دقيقة في الشريط الخارج من القالب، أو تنفيس متكرر من فتحات التهوية، أو روائح غير معتادة، واحيانا عدم استقرار في ضغط الذوبان وتذبذب واضح في تشغيل الخط. وتكمن أهمية هذا الاختبار في أنه لا يكفي بتحديد وجود مشكلة، بل يساعد على تحديد مصدرها المحتمل: هل هي رطوبة؟ هل هي مواد متطايرة؟ هل هي بقايا معالجة سطحية غير مستقرة؟ أم تفاعل غير مرغوب بين المائي وبعض الإضافات؟

- يُجرى هذا الاختبار أساساً في مرحلة ما بعد الاستلام داخل مصنع الماسترباتش، ويُعتبر جزءاً من مراقبة جودة التشغيل أثناء إنتاج الماسترباتش المائي أو المركبات المحملة، كما قد يُعاد في المصنع التحويلي عند ملاحظة ظواهر مشابهة في التشغيل مثل ثقب الفيلم، أو فقاعات اعين السمكة، أو ضعف لحام، أو ظهور عيوب سطحية غير مفسرة. والقاعدة هنا أن الغازات ليست ظاهرة ثانوية يمكن تجاهلها، لأنها غالباً تتحول لاحقاً إلى عيوب جودة واضحة، خصوصاً في المنتجات الرقيقة مثل الأفلام والأكياس، وكما مناطق ضعف حتى في المنتجات السميكة مثل القطع المحقونه حيث تصبح أي كمية بسيطة من الغاز سبباً مباشراً لثقب دقيقة، أو تباين سماكة، أو عدم انتظام في الفقاعة، أو ضعف في مناطق اللحام... الخ

- تبدأ طريقة الاختبار عملياً من خلال مراقبة العملية أثناء البثق في المصنع المصغر أو خط التحضير المخبري، مع التركيز على مؤشرات محددة مثل استقرار ضغط الذوبان، واستقرار سحب الشريط، ووجود فقاعات مرئية أو رغو في الذوبان، وطبيعة التنفيس من مناطق التهوية، إضافة إلى ملاحظة الرائحة إن ظهرت. وفي كثير من المصانع المتقدمة يُربط هذا الاختبار بمؤشرات كمية مساعدة مثل قياس الرطوبة قبل التشغيل، أو استخدام تحليل حراري مثل TGA عند الحاجة لفهم ما إذا كان هناك فقد وزني تدريجي يشير إلى مواد متطايرة أو تحلل حراري لطبقة معالجة سطحية أو شوائب عضوية. كما أن توثيق ظروف التشغيل أثناء ظهور المشكلة يعد جزءاً من الاختبار نفسه، لأن نفس المائي قد يتصرف بشكل مقبول عند درجة حرارة معينة، ثم يبدأ بإطلاق الغازات عند رفع الحرارة أو زيادة القص، ما يعني أن المشكلة قد تكون في نافذة التشغيل وليس في المادة وحدها.

- عند قراءة نتائج هذا الاختبار، ينبغي عدم الاكتفاء بتشخيص ان هناك غازات بل يجب ربطها بمصدر محتمل. فإذا كان السبب هو الرطوبة، فإن العلامات عادة تكون واضحة في التطبيقات الحساسة، حيث تظهر الفقاعات بشكل متكرر ويزداد أثرها عند ارتفاع سرعة الخط أو عند ضعف التهوية، ويكون القرار الصحيح هنا هو فرض التجفيف الإلزامي للمائي أو تعديل التخزين أو رفض الدفعة إذا كانت الرطوبة خارج حدود القبول. أما إذا كانت الغازات ناتجة عن مواد

متطابرة أو بقايا معالجة سطحية غير مستقرة، فقد تظهر الرائحة بشكل أوضح، وقد يترافق ذلك مع تغير طفيف في اللون أو عدم ثبات في المظهر، وهنا يكون القرار غالبًا تقييد المالى لتطبيقات أقل حساسية، أو تعديل نوع المعالجة السطحية، أو تغيير المورد إذا تكرر السلوك بين الدفعات. وفي حالات أخرى قد يكون السبب وجود شوائب عضوية أو تلوث خلال النقل والتعبئة، وهي حالات لا تعالج عادة بالضبط التشغيلي، بل تتطلب إجراء جذريًا يتمثل في رفض المادة أو إعادة تقييم سلسلة التوريد.

ولا تقل أهمية هذا الاختبار من ناحية اتخاذ القرار الصناعي عن اختبارات مثل الرماد أو النشتت، لأن أي مالى يسبب غازات أثناء التشغيل يمثل مخاطرة مباشرة على جودة المنتج النهائي. لذلك فإن النهج الصحيح في هذا الكتاب هو اعتبار الغازات مؤشرًا مبكرًا للفشل المحتمل، لا مجرد ظاهرة تشغيلية عابرة، وإدراج هذا الاختبار ضمن معايير قبول المالى أو تقييد استخدامه أو فرض إجراءات إضافية مثل التجفيف أو تعديل نافذة التشغيل قبل اعتمادها للإنتاج المستمر.

الاختبار (12) : اختبار الفلترة وانسداد الشبك في مركبات الموالى

(Filtration / Screen Pack Clogging Behavior Test)

يُعد اختبار الفلترة أحد أهم الاختبارات بعد التحضير التركيبي (Compounding)، لأنه يترجم جودة المالى إلى سلوك واقعي داخل خطوط الإنتاج. فالمشكلة في المواد المائلة لا تكون دائمًا في نسبة التحميل أو الرطوبة فقط، بل كثيرًا ما تكون في وجود جسيمات خشنة، أو شوائب صلبة، أو تكتلات غير متشتتة، أو حتى بقايا معالجة سطحية تؤثر على استقرار الذوبان. وكل هذه العوامل تظهر سريعًا عند المرور عبر شبك الفلترة (Screen Pack) أو الفلاتر المستمرة، فتبدأ ظاهرة انسداد تدريجي، أو ارتفاع الضغط، أو تذبذب التدفق، وقد يصل الأمر إلى توقف الخط أو تلف الشبك أو هبوط مفاجئ في الجودة وقد اتينا على هذا سابقا ولكن رأينا انه بحاجة الى تفصيل أكثر.

هذا الاختبار مهم جدا لأن بعض المالنات قد تعطي نتائج جيدة على الورق في PSD والرطوبة واللون، لكن عند التشغيل الفعلي تتسبب في انسداد متكرر يرفع كلفة التشغيل ويزيد الهدر ويؤثر على استقرار المنتج النهائي. لذلك يُعتبر اختبار الفلترة اختبارًا "تشغيليًا اقتصاديًا" بامتياز، لأنه يقيس قابلية المادة للعمل دون تعطيل الخط، وليس فقط قابليتها للاختبار في المختبر.

- هدف الاختبار

يركز هذا الاختبار على قياس ثلاثة أمور رئيسية:

- قدرة المركب المحمل بالمالي على المرور عبر الشبك بشكل مستقر
- مقدار الشوائب/التكتلات التي يتم احتجازها على الشبك
- سرعة ارتفاع الضغط أو فقدان التدفق أثناء التشغيل

ويُطبق في أكثر من مرحلة، لكن أهم مرحلتين هما:

المرحلة	الهدف
بعد التحضير التركيبي (Compounding) في مصنع الماسترباتش	اعتماد الدفعة قبل بيعها للمصنع التحويلي
أثناء التشغيل في المصنع التحويلي (عند المشاكل)	تفسير الانسداد والعيوب السطحية وارتفاع الضغط

- ما الذي يكشفه اختبار الفلترة فعلياً؟

هذا الاختبار يكشف مشاكل لا تظهر في اختبارات المسحوق بسهولة، مثل:

- وجود جسيمات هاربه رغم أن d50 جيد
- تكتلات ناتجة عن تشتت ضعيف
- شوائب معدنية أو سيليسية قاسية تسبب انسداد وتآكل
- عدم تجانس بين الدفعات يؤدي إلى اختلاف مفاجئ في التشغيل

– الأجهزة والوسائل المستخدمة

يختلف حسب نوع الخط، لكن الفكرة واحدة:

- Screen Pack داخل خط التحضير التركيبي أو البثق
- مقياس ضغط الذوبان (Melt Pressure Gauge)
- في بعض الخطوط Continuous Screen Changer :
- ميزان ومعدات توثيق للتسجيل:
 - زمن التشغيل
 - الضغط
 - كمية الإنتاج قبل التغيير

– طريقة الاختبار (بشكل عملي وواضح)

يُجرى الاختبار عادة أثناء تشغيل المركب المحمل بالماء، مع تثبيت ظروف التشغيل قدر الإمكان، ثم مراقبة المؤشرات التالية:

1. اختيار شبكة فلتر مناسبة للتطبيق (Mesh)
2. تشغيل المركب ومراقبة الضغط عند بداية التشغيل (Baseline)
3. تسجيل تغير الضغط مع الزمن أو مع كمية الإنتاج
4. مراقبة أي علامات عدم استقرار مثل:
 - تذبذب الضغط
 - تذبذب سماكة
 - نقاط/عيوب على المنتج
5. بعد فترة محددة يتم فحص الشبك بصرياً وتقييم كمية الرواسب المحتجزة

– كيف نقرأ النتائج؟

القراءة الصناعية لا تعتمد فقط على هل انسد الشبك أم لا، بل على نمط الانسداد وسرعته:

فانسداد سريع وارتفاع ضغط حاد

يشير في الغالب الاعم إلى:

• جسيمات خشنة (Oversize)

• شوائب صلبة

• تكتلات كبيرة

• تشتت ضعيف

– ويكون قرار المصنع السليم عند حدوث ذلك:

• رفض الدفعة للتطبيقات الحساسة

• أو خفض نسبة المالى

• أو رفع جودة الطحن/الغربلة في المصدر

انسداد تدريجي طبيعي ضمن زمن تشغيل مقبول

هذا يعني عموماً:

• المالى مقبول

• التشتت جيد

• الشوائب ضمن الحدود

قرار المصنع الطبيعي هو:

• اعتماد الدفعة

• اعتماد نفس شروط التشغيل

ضغط مستقر لكن عيوب سطحية تظهر على المنتج

قد يدل على:

- شوائب دقيقة ليست كثيرة لكنها مؤثرة بصرياً
- تلوث لوني أو بقع
- مشاكل تشتت موضعية

القرار الحكيم:

- فحص التشتت + اختبار اللون داخل البوليمر
- تقييد الاستخدام لبعض المنتجات

– نفحص على الشبك بعد التشغيل؟

بعد نزع الشبك، يتم تقييم الرواسب من حيث:

- كمية الرواسب (قليلة/متوسطة/كبيرة)
- طبيعتها:
 - بودة ناعمة متماسكة (تكتلات)
 - حبيبات صلبة خشنة (شوائب)
 - نقاط داكنة (تلوث/احتراق/شوائب معدنية)

– ويمكن توثيق ذلك بنظام تصنيف داخلي بسيط:

حالة الشبك بعد التشغيل	الحكم	التفسير
نظيف تقريباً	ممتاز	مالئ متوافق ومشتت
رواسب خفيفة ناعمة	جيد	تكتلات بسيطة
رواسب كثيرة/خشنة	ضعيف	شوائب أو Oversize
انسداد سريع + رواسب قاسية	مرفوض	خطر على التشغيل

– القرارات بناء على الاختبار

اختبار الفلترة يحدد قرارات مباشرة تؤثر على المال والوقت، مثل:

- هل نستخدم المالى في فيلم شفاف أم نمنعه؟
- هل نحتاج إلى رفع الفلترة مؤقتاً؟
- هل نغير المورد؟
- هل نطلب درجة أدق Micron أقل
- هل نعيد ضبط نسبة التحميل؟

– أخطاء شائعة : من أكثر الأخطاء التي تسبب خسائر:

- التعامل مع الفلترة كحل دائم بدل اعتبارها اختبار كشف
- رفع الفلترة دون فهم السبب، ثم خسارة إنتاجية أعلى
- لوم الماكينة أو العامل بينما السبب مالى غير مناسب
- خلط دفعات مختلفة ثم ظهور انسداد مفاجئ

الباب السابع اختبارات الإضافات

(Testing & Evaluation)

7.2 الفصل الثاني اختبارات المنتج النهائي بعد استخدام موالئ

بعد اعتماد المالى في مرحلة الاستلام التحضير التركيبى (Compounding) والتأكد من ثباته من حيث الرطوبة، الحجم الحبيبي، النقاء، التشتت، وسلوك الفلتر، تأتي المرحلة التي تُعد الحكم النهائي في المصانع التحويلية، وهي تقييم المنتج النهائي نفسه بعد إدخال المالى ضمن التركيبة الفعلية للإنتاج. في هذه المرحلة لا يعود السؤال: (هل المالى جيد؟) بل يصبح السؤال الأدق: (هل المالى مناسب لهذا التطبيق تحديداً) لأن بعض المالنات قد تنجح في تطبيق وتفشل في آخر رغم أنها نفس المادة ونفس المورد، والسبب يعود لطبيعة المنتج وسماكته وظروف تشغيله ومتطلبات السوق.

ولهذا يتم إجراء مجموعة من الاختبارات الأساسية على المنتج النهائي (مثل الفيلم أو الأكياس أو الحقن أو الأنابيب) للتحقق من أن المالى لم يسبب فقداً غير مقبول في الخواص، ولم يحدث انحرافاً بصرياً أو ميكانيكياً أو تشغيلياً يضر بالجودة. وتشمل هذه الاختبارات بصورة مختصرة ما يلي:

- اختبارات الشد والاستطالة ومقاومة الكسر (Tensile Properties)
- مقاومة التمزق للأفلام (Tear Resistance)
- مقاومة الثقب والصدم حسب نوع المنتج (Impact / Dart Drop / Puncture)
- العكورة والشفافية واللمعان عند الحاجة (Haze / Clarity / Gloss)
- ثبات الأبعاد والانكماش أو التثوه في بعض التطبيقات (Dimensional Stability)

وتجدر الإشارة إلى أن الأجهزة وطريقة تحضير العينات وقراءة النتائج واتخاذ القرار لكل اختبار تم تناولها سابقاً بالتفصيل ضمن فصل اختبارات البوليمرات والمنتج النهائي، ويكتفى هنا بذكرها ضمن سياق اختبارات مواد الملى للتأكيد على أن نجاح المالى لا يُقاس بخصائصه كمسحوق فقط، بل يُقاس بمدى حفاظه على الحد المقبول من خواص المنتج النهائي بعد دخوله في الإنتاج الفعلي.

7.3 الفصل الثالث : اختبار قابلية التشغيل ونافذة المعالجة للمركب المحمل بالمالي

(Processing Window & Run-ability Test)

قد يجتاز المالى اختبارات كثيرة بنجاح مثل الرطوبة، الحجم الحبيبي، النقاء، اللون، التشتت، محتوى الرماد، وسلوك الفلترة، ومع ذلك يفشل عند التشغيل الفعلي. والسبب أن هذه الاختبارات، رغم أهميتها، تقيّم المالى من زاوية “المادة”، بينما التشغيل يقيّم المالى من زاوية “السلوك داخل الماكينة”. لهذا يُعد اختبار قابلية التشغيل هو الاختبار الذي يترجم كل ما سبق إلى نتيجة واحدة بسيطة لكنها حاسمة: هل هذا المركب المحمل بالمالي يعمل بثبات ضمن ظروف إنتاج واقعية أم أنه سيُدخل المصنع في دوامة تذبذب وجودة غير قابلة للتكرار؟

هذا الاختبار لا يهدف إلى البحث عن رقم ثابت مثل اختبار MFI ، بل يهدف إلى تحديد نافذة تشغيل آمنة للمركب، أي تحديد الحدود التي إذا عمل المصنع داخلها حصل على إنتاج مستقر، وإذا خرج عنها بدأت المشكلات. وهنا تظهر أهمية هذا الاختبار في المصانع الصغيرة والمتوسطة تحديداً، لأن كثيراً من المشاكل التي تُنسب إلى “ضعف الماكينة” أو “خطأ العامل” تكون في حقيقتها نتيجة استخدام مالى أو مركب لا يملك نافذة تشغيل مستقرة، أو تمت معاملته وكأنه مادة خام قياسية بينما هو يحتاج إلى شروط تشغيل خاصة.

يُجرى هذا الاختبار بعد التحضير التركيبي (Compounding) في مصنع الماسترباتش بوصفه اختبار اعتماد للدفع، كما يمكن أن يُجرى في المصنع التحويلي عند إدخال مالى جديد أو مورد جديد أو نسبة تحميل جديدة. ويُفضل أن يُنفذ على خط مصغر أو تشغيل تجريبي مضبوط بدل تعميم القرار مباشرة على الإنتاج التجاري، لأن الهدف هنا ليس إنتاج كمية، بل استخراج سلوك المادة تحت ظروف تشغيل مختلفة.

- **فكرة الاختبار** على تشغيل المركب ضمن أكثر من حالة تشغيل، مع تثبيت باقي المتغيرات قدر الإمكان، ثم مراقبة الاستقرار العام. وتشمل المؤشرات التي تُراقب أثناء الاختبار ما يلي:

- استقرار ضغط الذوبان،
- وثبات عزم المحرك،
- واستقرار التغذية دون تكتل أو تقطع،
- وثبات شكل الشريط أو الفقاعة في الفيلم،
- وانتظام السماكة،

إضافة إلى ملاحظة أي تنفيس غير طبيعي أو روائح أو فقاعات أو علامات احتراق.

ويمكن تلخيص نتائج هذا الاختبار عملياً في ثلاثة سيناريوهات واضحة:

السيناريو الأول هو تشغيل مستقر ضمن نطاق واسع، وهو أفضل الحالات لأنه يعني أن المركب متسامح مع تغيرات التشغيل اليومية.

السيناريو الثاني هو تشغيل مستقر لكن ضمن نطاق ضيق، أي أن المركب حساس ويحتاج إلى التزام صارم بدرجة الحرارة والقص والسرعة.

أما السيناريو الثالث فهو تشغيل غير مستقر حتى ضمن ظروف معتدلة، وهنا يصبح المركب غير مناسب للتطبيق المستهدف أو يحتاج إلى تعديل جوهري في التشنت أو المعالجة السطحية أو نسبة التحميل.

ولتسهيل اتخاذ القرار داخل المصنع، يمكن اعتماد جدول تقييم سريع يُسجل أثناء الاختبار، بحيث لا يبقى الحكم انطباعياً:

المؤشر أثناء التشغيل	ماذا يعني عند عدم الاستقرار؟	ماذا يعني عند الاستقرار؟
ضغط الذوبان	انسداد/تكتلات/فلتر سينة	تدفق ثابت وتجانس جيد
عزم المحرك	قص زائد أو لزوجة غير متوقعة	حمل طبيعي ومتوازن
ثبات الفقاعة/الشريط	غازات/رطوبة/تذبذب تغذية	توزيع جيد وتشغيل سليم
ثبات السماكة	تشنت ضعيف أو نافذة تشغيل ضيقة	جودة قابلة للتكرار
مظهر السطح	شوائب/تكتلات/عيوب بصرية	مالئ متوافق ومشتت
الاستمرارية دون توقف	خسائر توقف وهدر إنتاج	كفاءة تشغيلية عالية

وفي ضوء هذه القراءة، لا يكون القرار النهائي مجرد قبول أو رفض فقط، بل قد يكون أحد القرارات الصناعية الواقعية التالية: اعتماد المركب كما هو للتطبيق المقصود إذا كانت نافذة التشغيل واسعة ومستقرة، أو اعتماد المركب مع تقييد نسبة المالى إذا كانت نافذة التشغيل ضيقة، أو تقييد المركب لتطبيقات أقل حساسية إذا كان التشغيل ممكناً لكن الجودة البصرية أو الميكانيكية لا تناسب التطبيقات الشفافة، أو إعادة تطوير التركيبة بالكامل إذا ظهر أن المشكلة ناتجة عن تشنت ضعيف أو فلتر سيئة أو تفاعل غير مرغوب لا يمكن ضبطه تشغيلياً.

وتكمن قيمة هذا الاختبار في أنه يمنع أكثر أسلوب مكلف منتشر في السوق، وهو أسلوب “تشتري وننتج ثم ننتظر رأي العميل”. فالتشغيل التجريبي المنظم يعطي المصنع قرارًا مسبقًا، ويمنحه القدرة على تحديد نسبة الاستخدام الآمنة وشروط التشغيل الصحيحة قبل الدخول في إنتاج تجاري قد ينتج عنه مرتجعات أو شكاوى أو خسائر تشغيلية. وبذلك يصبح المختبر هو البداية الصحيحة للقرار الصناعي كما اعتمدنا في فلسفة هذا الكتاب، وتصبح المالفات مادة يمكن التحكم بها علميًا بدل أن تكون سببًا دائمًا للتجارب العشوائية

الباب الثامن

اختبارات الأصباغ خطوة بخطوة

8.1 الفصل الأول اختبارات الأصباغ خطوة بخطوة

1. اختبارات الاستلام (هوية – شكل – تكتل – رطوبة – وثائق)
2. اختبار اللون داخل البوليمر ΔE و Lab^*
3. اختبار التشتت والنقاط (Dispersion)
4. اختبار الثبات الحراري (Heat Stability)
5. اختبار الثبات الضوئي (Light Fastness)
6. اختبار النزف والهجرة (Migration / Bleeding)
7. اختبار الرائحة/ الطعم عند تطبيقات الغذاء
8. اختبار تأثيرها على اللحم والطباعة والخواص النهائية

8.2 الفصل الثاني اختبار مقاومة المواد الكيميائية

1. اختبار الغمر (Immersion Test)
2. اختبار المسح (Wipe / Rub Test)

8.3 الفصل الثالث اختبار الهجرة (Migration Testing)

1. اختبارات التطبيقات الغذائية (Food Simulants)
2. اختبارات التطبيقات الدوائية (Pharma Suitability)

8.4 الفصل الرابع اختبارات المصنع التحويلي للأصباغ

1. اختبارات الاستلام (Incoming QC)
2. اختبارات أثناء التشغيل (In-Process Monitoring)
3. اختبارات المنتج النهائي (Final Product Tests)
4. اختبارات الاعتماد الخاصة بحسب العميل أو القطاع (Customer/Regulatory Approval)

8.1 : اختبارات مصنع إنتاج الأصباغ والألوان الذاتية (Pigment/Dye Manufacturer Tests)

قبل أن تصل الأصباغ أو الألوان الذاتية إلى مصنع الماستر باتش أو المصنع التحويلي، فإنها تمر داخل مصنع إنتاجها بسلسلة اختبارات أساسية تهدف إلى إثبات أن المادة المنتجة مطابقة للمواصفة الداخلية للمصنع، وأنها مستقرة من دفعة إلى أخرى، وأنها تمتلك قوة تلوين وثباتاً مناسبين للاستخدام الصناعي. هذه الاختبارات لا تهدف إلى إثبات صلاحية الصبغة لتطبيق واحد بعينه داخل مصنع العميل، لأن ذلك يعتمد على البوليمر وظروف التشغيل والتطبيق النهائي، لكنها تمثل الحد الأدنى الذي يضمن أن المادة خرجت من المصنع بشكل صحيح ومتحكم به .

وتنقسم اختبارات مصنع الأصباغ/ال قالب (Die) إلى أربع مجموعات رئيسية: اختبارات الهوية والتركيب، اختبارات الأداء اللوني، اختبارات الثبات، واختبارات السلامة والنقاء حسب متطلبات الاستخدام. في مصانع إنتاج الأصباغ والقالب (Die) لا يتم تقييم المادة بشكل انطباعي، بل يتم تقييمها وفق نظام ضبط جودة (QC) يهدف إلى تثبيت ثلاثة أمور: هوية المادة، قوة اللون، وثباتها واستقرارها. وهذه الاختبارات تُجرى على عينات من كل دفعة إنتاج، وغالباً تُقارن بعينة مرجعية قياسية (Standard) معتمدة داخل المصنع. ويجب أن يفهم القارئ أن مصنع الصبغة لا يختبرها داخل كل بوليمر ، بل يختبرها داخل نظام مرجعي ثابت يسمح له بتكرار الجودة وإصدار شهادة مطابقة.

- المجموعة (1) اختبارات الهوية والتركيب (Identity & Composition)

هذه الاختبارات تؤكد أن المادة المنتجة هي الصبغة الصحيحة بالفعل، وليست خليطاً غير مضبوط أو منتجاً متذبذباً.

- تأكيد الهوية الكيميائية للصبغة (Chemical Identity)
- التحقق من النقاء ونسبة المادة الفعالة (Purity / Active Content)
- التحقق من وجود شوائب أو أملاح أو بقايا تفاعل غير مرغوبة

- قياس الرطوبة أو المواد المتطايرة حسب نوع الصبغة
- التحقق من ثبات التركيب بين الدفعات (Batch Consistency)

- المجموعة (2) اختبارات الأداء اللوني (Color Performance Tests)

هنا يتم قياس قوة اللون ودرجة اللون المرجعية ضمن نظام قياس ثابت داخل المصنع، لأن اللون لا يدار بالعين فقط.

- درجة اللون (Shade / Hue) تتم المقارنه على عينة قياسية او مرجعية
- قوة التلوين (Tinting Strength)
- قياس اللون بنظام $L^*a^*b^*$ وحساب فرق اللون ΔE
- قابلية التغطية/العتامة للأصباغ المناسبة لذلك (Opacity / Hiding Power)
- قابلية التشتت الأولية (Dispersibility) ضمن وسط معياري

- المجموعة (3) اختبارات الحجم الحبيبي والتكتل وقابلية التشتت

لأن حجم الجسيمات يتحكم في التشتت، اللعان، العكورة، والنقاط ويؤثر على الفلاتر

- المجموعة (4) اختبارات الثبات (Stability & Durability)

- الثبات الحراري (Heat Stability)
- الثبات الضوئي (Light Fastness)
- مقاومة العوامل الجوية عند الحاجة (Weathering Resistance)
- مقاومة الهجرة أو النزف (Migration / Bleeding) خصوصًا في بعض الأنظمة
- مقاومة المواد الكيميائية (Chemical Resistance) حسب التطبيق

- المجموعة (5) اختبارات السلامة والنقاء للتطبيقات الحساسة (Safety & Suitability)

هذه الاختبارات لا تكون مطلوبة لكل الأصباغ في السوق، لكنها تصبح إلزامية عندما يكون الاستخدام غذائيًا أو طبيًا أو دوائيًا أو في منتجات أطفال.

- حدود المعادن الثقيلة (Heavy Metals)
- الشوائب الخطرة أو غير المسموح بها حسب التشريعات

- المواد القابلة للاستخلاص (Extractables) عند التطبيقات الطبية/الدوائية
- اختبارات الهجرة (Migration) عند تلامس الغذاء
- تقييم الرائحة/الطعم عند تطبيقات التغليف الغذائي الحساسة
- شهادات المطابقة والتوثيق (Compliance Documentation)

ومن المهم ان نوضح أنه حتى لو كانت الصبغة ناجحة في اختبارات مصنع إنتاجها، فهذا لا يعني أنها ستنتج تلقائيًا داخل كل بوليمر وكل آلة وكل تطبيق. لذلك لا تعتبر هذه الاختبارات نهاية التقييم، بل هي بداية السلسلة، ثم تأتي بعدها اختبارات مصنع الماستريباتش، ثم اختبارات المصنع التحويلي، ثم اختبارات المنتج النهائي في التطبيقات الحساسة مثل الأدوية.

- المجموعة (1) : اختبارات الهوية والتركيب الكيميائي (Identity & Composition)

1.1 اختبار تأكيد الهوية الكيميائية (Chemical Identification)

الهدف: التأكد أن المادة المنتجة هي الصبغة الصحيحة وليست خليطًا خاطئًا أو مادة متأكسدة أو منتج منحرف أجهزة التي يجرى عليها الاختبار:

Fourier Transform Infrared Spectroscopy:FTIR

UV-Vis Spectrophotometer خصوصًا للـDyes

أحيانًا Raman Spectroscopy في بعض المصانع المتقدمة

بشكل عمي كيف يتم الاختبار ؟

- تُؤخذ عينة ممثلة من الدفعة
- تُجهز حسب نوع الاختبار بدرجة مباشرة للـ FTIR أو محلول للـ UV-Vis
- تُقارن البصمة الطيفية مع بصمة مرجعية محفوظة للمادة القياسية

قراءة النتائج والقرار:

- تطابق الطيف ضمن حدود المصنع يعني ان الدفعة صحيحة

- اختلاف واضح يعني انه يجب إيقاف الدفعة وإعادة التحقيق (تحليل سبب الانحراف)

1.2 اختبار نسبة المادة الفعالة/النقاء (Assay / Purity / Active Content)

الهدف : معرفة تركيز المادة الفعالة لأن قوة اللون لا تأتي من الاسم بل من النسبة الفعلية للمادة الملونة.

الأجهزة الشائعة:

- HPLC للأصباغ العضوية والـ Dyes
- UV-Vis مع منحنيات معايرة (في بعض القالب (Die) ز)
- طرق وزن/ترسيب في بعض الأنظمة غير العضوية

طريقة الاختبار:

- إذابة/استخلاص العينة في مذيب مناسب
- تمريرها في جهاز التحليل
- مقارنة التركيز بمنحنى معايرة قياسي

بناء على الاختبار:

- اذا كانت النتيجة ضمن حدود فسيتم قبول الدفعة
- اذا كانت أقل من الحد فستسبب ضعف قوة اللون وارتفاع الاستهلاك وبالتالي رفض الدفعة أو تصنفها كدرجة ثانية

1.3 اختبار الرطوبة والمواد المتطايرة (Moisture & Volatiles)

الهدف : الرطوبة قد تسبب تكتل، فقاعات، أو مشاكل تشتت لاحقاً عند التركيب.

الأجهزة التي يتم عليها الاختبار:

- Moisture Analyzer (Halogen)

• Oven Drying Method

• Karl Fischer للدقة العالية

كيف يتم الاختبار؟

- وزن العينة
- تعريضها للحرارة وفق بروتوكول
- حساب نسبة الفقد

القرار بناء على الاختبار

- اذا كانت الرطوبة ضمن المسموح يتم قبول الدفعه
- رطوبة مرتفعة يجب تجفيف/إعادة معالجة أو رفض

1.4 اختبار الرماد وبقايا الاحتراق Ash Content / LOI

الهدف: مهم جدًا لتمييز العضوي من غير العضوي، وكشف شوائب معدنية أو مواد مالئة غير معلنه.

الأجهزة:

- Muffle Furnace
- ميزان تحليلي

طريقة الاختبار:

- وزن العينة قبل الاحتراق
- حرقها عند درجة محددة
- وزن البقايا(Ash)

القرار:

- اذا كان الرماد ضمن مواصفة الصبغة فيتم قبول الدفعه

- إذا كان ارتفاع غير مبرر فيكون احتمال تلوث/غش/شوائب فيتم رفض الدفعة

- المجموعة (2) : اختبارات اللون والأداء البصري (Color Performance)

2.1 اختبار درجة اللون وفرق اللون (ΔE (Shade & Color Difference)

الهدف : تثبيت أن اللون مطابق للمرجع وأن الدفعات متكررة.

الأجهزة:

- Spectrophotometer / Colorimeter

كيف يتم داخل المصنع؟

- تحضير عينة قياسية وفق نظام المصنع
 - Dyes: محلول بتركيز ثابت
 - Pigments: تشتت في وسط معياري أو لوحة اختبار
- قياس Lab^*
- حساب ΔE مقابل المرجع

القرار الناتج عن الاختبار

- ΔE ضمن حد القبول فيتم اعتماد الدفعة
- ΔE خارج الحد فيتم تعديل أو عادة مزج أو رفضها كلياً وذلك ضمن بروتوكول معتمد

2-2 اختبار قوة التلوين (Tinting Strength)

الهدف : قياس قوة اللون وليس فقط درجته.

الأجهزة:

- Spectrophotometer

- خلط ومطحنة مختبرية لتحضير خليط مرجعي

طريقة الاختبار:

- خلط الصبغة مع قاعدة بيضاء قياسية أو وسط قياسي
- نسبة ثابتة
- مقارنة شدة اللون الناتجة بعينة معيارية

القرار الذي يتخذ بناء على نتيجة الاختبار

- اذا كانت قوة اللون ضمن الحدود فيتم قبول الدفعة
- اذا كانت قوة اللون أقل وستؤدي الى زيادة استهلاك عند العميل فيتم رفض الدفعة ويتخذ بناء على ذلك قرار اما بتصنيفها كدرجة ثانية او تقرير مصيرها بإعادة المزج او إعادة التصميم

2-3 اختبار العتامة/التغطية (Opacity / Hiding Power)

الهدف: قياس درجة عتامة اللون

الأجهزة:

- meter Opacity أو قياس انعكاس/نفذية
- ألواح اختبار سوداء/بيضاء

القرار:

- اذا كانت التغطية كافية فيتم قبول الدفعة
- اذا كانت التغطية ضعيفة وستؤدي الى ان المنتج النهائي سيظهر شفاف او سيميل الى اللون الرمادي فيتم رفض الدفعة أو تقييد استخدامها

- المجموعة (3): الحجم الحبيبي والتكتل والتشتت (Particle & Dispersion)

3-1 اختبار توزيع الحجم الحبيبي (PSD)

أهمية الاختبار : لأن حجم الجسيمات يتحكم في التشتت، اللمعان، العكورة، والنقاط ويؤثر على الفلاتر الأجهزة:

- Laser Diffraction Particle Size Analyzer
- Sedimentation Methods في بعض المصانع

طريقة الاختبار:

- تفريق العينة في وسط مناسب
- تشغيل جهاز القياس
- استخراج / D90 / D50 / D10

القرار المبني على الاختبار:

- إذا كان ال PSD مطابق للمواصفة فتقبل الدفعة
- إذا تبين وجود ذيل خشن (Coarse tail) يعد خطر تشكل نقاط وتخريب فلتر فإجراء الطبيعي رفض الدفعة وغالبا ما يتم إعادة طحن الدفعة

3-2 اختبار التكتل والجسيمات الخشنة (Agglomerates / Grit)

الهدف :كشف الجسيمات الكبيرة التي تسبب نقاط واضحة.

الأجهزة المستخدمة :

- Wet Sieve Test مناخل دقيقة
- Grind Gauge / Hegman Gauge
- Microscopy

القرار الذي يبنى على الاختبار

- اذا كانت الدفعه خالية من grit فيتم قبولها
- اذا كانت الدفعه تحتوي على grit فيتم رفضها ولقرار الصحيح و إعادة معالجتها

3-3 اختبار قابلية التشتت (Dispersibility Test)

الهدف : معرفة مدى سهولة توزيع الصبغة دون جهد قص كبير.
الأجهزة المستخدمة في الاختبار

- High Speed Disperser
- Three-Roll Mill في بعض الصناعات
- فحص بصري/مجهرى لنتيجة التشتت

القرار المبني على الاختبار

- تشتت سريع ومتجانس ممتاز
- تشتت صعب سيظهر نقاط عند العميل = تقييد أو رفض

- المجموعة (4) : اختبارات الثبات (Stability)

4-1 اختبار الثبات الحراري (Heat Stability)

الهدف : التأكد أن اللون لا يتغير مع الحرارة أثناء التصنيع.
الأجهزة:

- Oven Aging
- Hot Plate Tests
- قياس ΔE بعد التعريض

القرار المبني على الاختبار

- اذا ان التغير ضمن الحدود الطبيعية و الأمنه فيتم قبول الدفعه
- اذا كان التغير كبير او أدى الى تغيرات واضحة في اللون فيتم رفض الدفعه او إعادة تصنيفها

4-2 اختبار الثبات الضوئي (Light Fastness)

الأجهزة

- Xenon Arc Weatherometer
- UV Chamber
- Blue Wool Scale في بعض الأنظمة

قراء النتيجة و القرار المتخذ

- اذا كانت درجة الثبات مطابقة للمواصفات التصميمية يتم قبول الدفعه
- اذا كانت درجة منخفضة فبتم تقييد الدفعه للتطبيقات الداخلية

4-3 اختبار مقاومة المواد الكيميائية ؟

يهدف الاختبار إلى معرفة مدى تحمل المنتج النهائي عند تعرضه لمواد كيميائية قد يواجهها أثناء الاستخدام،

الهدف ليس فقط هل يذوب أم لا ... بل هل يحصل:

- تغير لون واضح
- بهتان أو اصفرار
- تشقق إجهادي (Stress Cracking)
- فقدان لمعان
- انتفاخ أو ليونة؟
- تآكل أو تخشين للسطح؟
- نقص وزن أو زيادة وزن؟

أين يُستخدم هذا الاختبار

يُستخدم في عدة أماكن حسب نوع المصنع:

أ) في مصنع الماستريباتش

لفحص تأثير الإضافات والملونات على:

- ثبات اللون عند التعرض للكواد الكيميائية
- ثبات السطح وعدم “نزف اللون”(Bleeding) ”
- مقاومة الهجرة أو التفاعل مع المواد الملامسة

ب) في مصنع التحويل (Film / Injection / Blow / Extrusion)

لفحص المنتج النهائي مثل:

- عبوات المنظفات والشامبو
- جالونات كيماويات
- عبوات زيوت سيارات
- أنابيب وقطع معرضة لمواد تنظيف
- أكياس أو أغلفة معرضة لمسح بالكحول أو مواد تنظيف

8.2 الفصل الثاني اختبار مقاومة المواد الكيميائية

أشهر طريقتين عمليتين هما:

8.2.1 اختبار الغمر (Immersion Test)

العينة تغمر بالكامل في مادة كيميائية لمدة محددة.

وهو مناسب لـ:

- العبوات والقطع البلاستيكية
- الأفلام
- عينات البلاستيك الخام أو الألواح

8.2.2 اختبار المسح/التلامس السطحي (Wipe / Spot Test)

المادة الكيميائية تُوضع على السطح أو يتم المسح بها بشكل متكرر.

مناسب لـ:

- المنتجات التي تتعرض لمسح متكرر مثل:
 - أغطية وطاولات
 - أسطح لامعة
 - منتجات مطبوعة
 - منتجات فيها ألوان حساسة أو طباعة

- أنواع المواد الكيميائية القياسية (Standard Chemicals) المستخدمة للاختبار

تختلف حسب السوق والتطبيق، لكن هذه قائمة شائعة:

- منظفات وكحولات

- ماء مقطر — (DI Water) كنقطة مرجعية
- صابون/منظف عام (Detergent Solution)
- كحول إيثانول 70%
- أيزوبروبانول 70% IPA
- كلور مخفف (Bleach / NaOCl)

زيوت ووقود

- زيت محركات (Engine Oil)
- شحم Grease
- ديزل / بنزين (يجب توخي الحذر عن اجراء الاختبار)

أحماض وقواعد مخففة

- حمض الخليك (Acetic Acid) مخفف
- حمض HCl مخفف
- هيدروكسيد الصوديوم NaOH مخفف
- أمونيا مخففة

مذيبات أسيتون (Acetone)

- MEK
- تولوين / زيلين

- تجهيز العينات (Specimens Preparation)

أشكال العينات الممكنة

حسب نوع المنتج:

- **Film** قص شرائح 100×10 مم أو مربعات 50×50 مم
- **Injection/Blow** قطع من المنتج نفسه أو لوح مُشكّل
- ألواح اختبار 3–2: مم سماكة (للمقارنة)

عدد العينات

- لكل مادة كيميائية 3: عينات على الأقل
- عينة مرجعية (Control) لم تتعرض لأي شيء

تنظيف العينات قبل الاختبار

- مسح خفيف بقطعة قماش نظيفة
- تجفيف جيد
- عدم لمس سطح العينة بالأصابع قدر الإمكان

8.2.1 اختبار الغمر — (Immersion Test) خطوة بخطوة

— الأدوات المطلوبة

- أوعية PP/مقاومة للكيمياويات
- ملصقات تعريف لكل وعاء
- ميزان حساس 0.001 g
- مؤقت (Timer)
- فرن/حاضنة
- جهاز قياس اللون (Spectrophotometer) أو Colorimeter
- عدسة مكبرة / كاميرا توثيق

– ظروف الاختبار (Conditions)

ظروف عادية

- درجة حرارة $23^{\circ}\text{C} \pm 2$:
- زمن 24 ساعة

ظروف متوسطة

- 48 ساعة الى 7 أيام

ظروف قاسية : للتسريع

- 40°C أو 50°C لمدة 24-72 ساعة
- حسب تحمل المادة وعدم التبخر الكيميائي

– خطوات التنفيذ :

القياسات قبل الغمر (Baseline)

يسجل لكل عينة:

- الوزن (W0)
- اللون Lab*
- اللمعان Gloss
- صورة للسطح
- ملاحظة ملمس السطح

الغمر

- تغمر العينة بالكامل في المادة الكيميائية

- يغلق الوعاء لتقليل التبخر (خاصة للكحول والوقود)

إخراج العينة بعد الزمن المحدد

- تخرج العينة
- تشطف سريعاً بماء مقطر
- تجفف بمناديل بدون فرك عنيف
- تترك لتستقر 30 دقيقة (أو 24 ساعة إذا كان المطلوب تقييم بعد الاستقرار)

القياسات بعد الغمر يسجل :

- الوزن بعد الغمر (W1)
- اللون بعد الغمر (Lab*)
- المظهر السطحي جود:
 - تشقق
 - انتفاخ
 - ليونة
 - فقدان لمعان
 - طبقة بيضاء / تعكير

— مؤشرات الحكم في الغمر

أ) تغير الوزن

زيادة الوزن يفهم على انه امتصاص/انتفاخ (Swelling)

نقص الوزن يفهم على انه ذوبان مكونات/استخلاص إضافات (Extraction)

8.2.2 اختبار المسح — (Wipe / Rub Test) خطوة بخطوة

— الأدوات المطلوبة

- قماش قطني أبيض أو منديل مختبر
- مادة كيميائية قياسية

- وزن ثابت أو جهاز مسح (إن توفر)
- عدد عدد مرات المسح (Cycles)
- جهاز قياس اللون ΔE

– طرق شائعته :

الطريقة 1: مسح يدوي مضبوط (لابد من التأكد من قابلية المادة لاجراء الفحص بامان)

- ضع 1-2 مل من المادة على القماش
- امسح سطح العينة 20 مرة ذهاب + 20 مرة إياب
- بنفس القوة قدر الإمكان
- ثم اتركها تجف
- قيم اللون والسطح

– الطريقة 2 Spot Test :بقعة ثابتة

- ضع نقطة من المادة الكيميائية على السطح
- غطها بغطاء زجاجي لمنع التبخر
- اتركها 30 دقيقة / 1 ساعة / 24 ساعة
- ثم نظف السطح وقارن

– ماذا نراقب في اختبار المسح؟

- هل حصل بهتان لون؟
- هل حصل انتقال لون للقماش؟ (Staining)
- هل تغير اللمعان؟
- هل ظهرت خدوش أو طبقة مطفية؟
- هل حدث تشقق سطحي؟

- قياس ΔE تغير اللون

ما هو ΔE ؟

ΔE هو رقم يعبر عن الفرق بين اللون قبل وبعد التعرض.

يُحسب من نظام: Lab^*

حيث:

- ΔL = الفرق في الإضاءة/السطوع
- Δa = الفرق في الاتجاه الأحمر/الأخضر
- Δb = الفرق في الاتجاه الأصفر/الأزرق

- أجهزة القياس

- Spectrophotometer وهو الأدق
- Colorimeter
- بعض المصانع تستخدم كاميرا + برنامج... لكنه أقل دقة

- تقييم تغير السطح — (Surface Change) بدل أو مع ΔE

أحياناً اللون لا يتغير كثيراً لكن السطح يتغير، مثل:

- يصبح مطفي (Loss of Gloss)
- يصبح خشن
- يظهر تعكير/ضبابية
- تظهر تشققات دقيقة (Microcracks)

- طرق القياس

(أ) فحص بصري + تصوير

قبل وبعد تحت نفس الإضاءة

(ب) قياس اللمعان (Gloss Meter)

قراءات 60°

(ج) فحص ميكروسكوبي

للتشققات الدقيقة أو تأثير المذيب ويتبع اجراءه او عدم اجراءه حسب البرتوكول المتبع وحساسية المادة

- أسباب فشل مقاومة الكيميائيات

إذا فشل المنتج، غالبًا يكون بسبب:

- اختيار بوليمر غير مناسب للتطبيق
- وجود إجهادات داخلية من التشكيل
- ملونات أو إضافات تتفاعل مع المادة الكيميائية
- طباعة سطحية ضعيفة أو حبر غير مقاوم للكحول
- نسبة مواد مالئة تقلل التماسك السطحي
- وجود شمع أو مزلاقات تسبب نزف أو بقع

عند استخدام العبوات لتعبئة أحماض أو مواد كيميائية قد تتفاعل مع مواد الملء (Fillers) خصوصًا المالئات الفلورية مثل كربونات الكالسيوم—(CaCO₃) قد يحدث تفاعل كيميائي يؤدي إلى تكوّن غاز (مثل CO₂) أو تغيير في خواص العبوة، لذلك يجب التأكد من التوافق الكيميائي قبل الاستخدام.

8.3 اختبار الهجرة (Migration Testing)

- يهدف الاختبار الى التأكد أن مكونات اللون/الماسترباتش (Pigments, Dyes, Additives, Residuals) لا تنتقل (تهاجر) من المنتج إلى:

- الغذاء
 - الدواء
 - محتوى العبوات بشكل عام مثل الزيوت، العصائر، منتجات الأطفال
- بما قد يسبب تلوث، تغيير طعم أو رائحة، أو يؤدي الى مخاطر صحية.

يتم تعريض العينة البلاستيكية (Film / Bottle / Cap) إلى وسط محاكي (Food Simulant) تحت زمن وحرارة محددتين تمثل ظروف الاستخدام الحقيقي، ثم يتم قياس:

- كمية المواد المهاجرة
- أو تركيز مكونات محددة قد تكون خطرة أو غير مسموح بها

-أنواع الهجرة

1. الهجرة الكلية (Overall Migration - OML)
تقيس إجمالي المواد المنقولة من البلاستيك إلى الوسط (كمية عامة).
2. الهجرة النوعية (Specific Migration - SML)
تقيس مادة محددة بعينها (مثل مكون لون/مذيب/مُلدن/أمين عطري...).

8.3.1 اختبارات التطبيقات الغذائية (Food Simulants)

حسب نوع المحتوى:

- ماء / وسط مائي
- وسط حمضي مثل محاكاة العصائر والخل
- وسط دهني محاكاة الزيوت والدهون
- كحوليات/إيثانول بنسب محاكاة بعض الأغذية

اختيار الوسط يعتمد على: هل العبوة غذائية او دوائية او غير ذلك وهل المحتوى دهني أو مائي أو حمضي

- معدات الاختبار

• Migration Cells (خلايا هجرة) لضبط:

- مساحة التلامس
- حجم الوسط
- الإغلاق لمنع التسرب/التبخر
- حمام مائي أو فرن حراري لضبط الحرارة والزمن

- أجهزة التحليل

GC-MS : مناسب للمواد المتطايرة وشبه المتطايرة (مثل بقايا مذيبات، مركبات عضوية معينة)

LC-MS : مناسب للمواد الأقل تطايرًا والأكثر قطبية (بعض الإضافات، نواتج التحلل، مكونات عضوية معقدة)

وأحيانًا حسب المطلوب **UV-Vis** أو **ICP** لبعض العناصر المعدنية

- طريقة التنفيذ

1. تجهيز عينة من المنتج النهائي أو الفيلم
2. تركيبها في **Migration Cell**
3. إضافة الوسط المحاكي المناسب
4. تعريضها لزمن/حرارة محددين (حسب معيار التطبيق)
5. جمع الوسط بعد الاختبار
6. تحليل النتائج وتحديد مقدار الهجرة

- يبني على نتيجة الاختبار :

- هجرة ضمن الحدود المسموح بها او ضمن حد مقبول للتلامس الغذائي/الدوائي
- اذا كانت الهجرة مرتفعة ترفض أو يلزم:

○ تغيير نظام اللون (Pigment System)

- تغيير الماسترباتش او الراتنج الحامل
- تقليل الجرعة (Let-down ratio)
- اختيار مادة مطابقة Food Grade

• الهجرة تزيد غالباً مع:

- الحرارة + طول زمن التخزين + الدهون + سماكة أقل + مساحة تلامس أكبر
- بعض الألوان ثابتة لونياً لكنها قد تهجر كمكونات عضوية و شوائب لذلك التحليل ضروري.

8.3.2 اختبارات التطبيقات الدوائية (Pharma Suitability)

في تطبيقات الأدوية قد تُطلب اختبارات إضافية مثل:

- Extractables & Leachables
- تقييم الرائحة/التطاير
- توثيق كامل للمواد الداخلة (Traceability)

8.4 الفصل الرابع اختبارات المصنع التحويلي للأصباغ والقالب (Die) و ماسترباتش اللون

(Converter / End-Product Manufacturer Tests)

بعد أن تُعتمد الصبغة في مصنع إنتاجها، ثم تُحوّل إلى ماسترباتش في مصنع الماسترباتش وتخرج بنتائج تشتت و فلترية وثبات لون جيدة، يبقى الاختبار الأهم في سلسلة القرار .

اختبار اللون داخل المنتج النهائي الحقيقي في المصنع التحويلي لا يهم أن اللون جميل بل يهم أن اللون يُنتج بثبات على خط الإنتاج، وأنه لا يسبب مشاكل تشغيلية، وأن المنتج يحقق مواصفات العميل في اللون والمظهر والخواص النهائية.

وتتميز اختبارات المصنع التحويلي بأنها تُبنى على اسئلة أساسية: هل هذا اللون صالح لهذا التطبيق وهذه السماكة وهذه ظروف التشغيل وهذه متطلبات السوق؟

ولذلك سنقسم اختبارات المصنع التحويلي إلى أربع مجموعات عملية:

1. اختبارات الاستلام (Incoming QC)
2. اختبارات أثناء التشغيل (In-Process Monitoring)
3. اختبارات المنتج النهائي (Final Product Tests)
4. اختبارات الاعتماد الخاصة حسب العميل أو القطاع (Customer/Regulatory Approval)

(1) اختبارات الاستلام في المصنع التحويلي (Incoming QC)

- اختبار مطابقة الهوية والدفعة (Material Identity & Batch Consistency)

- مطابقة اسم الماستريباتش/اللون ورقم الدفعة
- مطابقة COA وبيانات المورد
- فحص الشكل الفيزيائي

قد يبنى على الاختبار

- قبول للدخول للإنتاج أو رفض الدخول للإنتاج
- أو تعليق الدفعة لحين اختبار لون قياسي

- اختبار الرطوبة والتكتل (Moisture & Agglomeration Check)

الرطوبة أو التكتل في ماستريباتش اللون قد تسبب:

- نقاط في الفيلم
- تنفيس/فقاعات
- تذبذب لون
- ضعف لحام
-

الأجهزة:

• Moisture Analyzer

- فحص بصري + غربلة
- وأحياناً اختبار تجفيف التشغيل إذا حسب البروتوكول المتبع

- اختبار اللون بعينة مرجعية (Quick Let-down Color Check)

هذا الاختبار هو أفضل خطوة تمنع تجربة اللون على العميل

الهدف: التأكد أن اللون مطابق قبل بدء الإنتاج التجاري.
الأجهزة :

- Mini Extruder / Mini Injection
- Spectrophotometer للمقارنة المرجعية

طريقة العمل:

- تثبيت نسبة إضافة اللون (Let-down ratio)
- إنتاج عينة قصيرة (فيلم أو قطعة حقن)
- مقارنة اللون مع عينة مرجعية معتمدة

القرار المتخذ بناء على الاختبار:

- إذا كان اللون مطابق فتثبت المعادلة و يبدأ الإنتاج
- إذا كان اللون غير مطابق يعاد النظر في المعادلة وتجرب عينات أخرى الى حين المطابقة المقبولة

(2) اختبارات أثناء التشغيل (In-Process Monitoring)

- اختبار ثبات اللون أثناء التشغيل (Color Stability During Run)

في المصنع التحويلي قد يظهر اللون صحيحاً في أول ساعة ثم ينحرف لاحقاً بسبب:

- تغير حرارة
- تغير سرعة الخط
- اختلاف التغذية

- اختلاف قص الذوبان
- أو تراكمات داخل القالب
- أخطاء في الخلط و النسب

ما الذي يجب مراقبته ؟

- مقارنة لون المنتجات او الدفعات كل فترة
- مراقبة أي انحراف بصري تدريجي
- أخذ عينات متباعدة وقياس ΔE

قرار المصنع:

- إذا كان الانحراف واضح يجب تعديل التشغيل أو إيقاف الإنتاج قبل تضخم الخسارة والبحث عن الأسباب ومعالجتها

- اختبار النقاط والخطوط والعيوب البصرية (Specks / Streaks / Gels)

الأسباب المحتملة:

- تكتلات صبغة
- فلتر غير كافية
- شوائب في الماسنرباتش
- حرارة غير مناسبة تسبب تحلل/احتراق نقاط
- تراكمات Die Build-up

كيف يتم تقييمه

- فحص المنتج تحت إضاءة قوية
- فحص على سطح أسود/أبيض
- تحديد نوع العيب: نقاط ثابتة- خطوط طولية- بقع

- اختبار تأثير اللون على التشغيل (Processing Behavior)

بعض أنظمة اللون تؤثر على:

- ضغط الذوبان
- عزم المحرك
- استقرار الفقاعة
- جودة السطح

المراقبة تكون عبر:

- تسجيل ضغط الذوبان مقارنة بمنتج بدون لون أو بلون آخر
- ملاحظة تغيرات غير مبررة في استقرار التشغيل
- ربط ذلك بنسبة الإضافة والحرارة والسرعة

(3) اختبارات المنتج النهائي (Final Product Tests)

- اختبار اللون النهائي وفرق اللون (ΔE Final Color Measurement)

هذا هو الاختبار الأكثر حساسية في المنتجات ذات متطلبات لون صارمة.

الأجهزة:

- Spectrophotometer الأفضل
- مقارنة بصرية تحت إضاءة قياسية D65 مثلاً مع مرجع معتمد

طريقة القياس:

- قياس Lab^*
- حساب ΔE
- مقارنة بحد قبول العميل

- اختبار العكورة والشفافية واللمعان – (Haze / Clarity / Gloss) للأفلام

الألوان قد ترفع العكورة أو تقلل اللمعان حسب نوع الصبغة وحجمها.

الأجهزة:

• Haze Meter

• Gloss Meter

القرار المتخذ:

- قبول للتطبيقات الملونة العادية
- أو رفض للتطبيقات التي تتطلب مظهرًا عالي الجودة أو ثبات لوني محدد

- اختبار قوة اللحام في الأفلام (Seal Strength)

بعض الألوان أو إضافاتها المساعدة قد تؤثر على:

- حرارة اللحام المثلى
- قوة اللحام
- شكل اللحام (حرق/ضعف)

- الأجهزة اللازمة لإجراء الاختبار:

- جهاز شد (UTM) لقياس قوة اللحام
- معدات قص عينات لحام

القرار المتخذ

- إذا انخفضت قوة اللحام وتبين أنها نتيجة لنسب أو نوع اللون يتم تعديل نسبة اللون أو نوعه أو تعديل شروط اللحام

- اختبار الطباعة والتصاق الحبر(Printability & Ink Adhesion)

اللون قد يعطي سطحًا:

- مناسب للطباعة
أو
- طارد للحبر بسبب إضافات سطحية ضمن نظام اللون

اختبارات شائعة : هذه اختبارات بصرية يدوية ولكنها فعالة جدا

• Tape Test

• Rub Test

• Tape Test

يلصق شريط لاصق قوي على الطباعة ثم يسحب بسرعة فإذا تقشر اللون فهذا يعني فشل الثبات

• Rub Test:

تفرك الطباعة بقطعة قماش (جافة أو مبللة) عدة مرات فإذا بهت أو انتقل اللون للقماش فهذا يعني فشل في الثبات

مع العلم ان أي من الاختارين لا يجري بدون عينه مرجعية للمقارنة

- اختبار الخواص الميكانيكية

في بعض المنتجات لا يُقبل أي تأثير على:

- الشد والاستطالة
 - التمزق
 - الصدم
- خصوصًا إذا كان اللون بنسبة عالية أو المنتج حساس.

(4) اختبارات الاعتماد الخاصة حسب العميل أو القطاع (Customer / Regulatory Approval)

بعض الصناعات لا تكتفي باختبارات المصنع التحويلي، بل تتطلب اختبارًا خارجيًا أو توثيقًا إضافيًا.

- تطبيقات الغذاء (Food Contact)

قد يُطلب:

• إثبات مطابقة المواد (Declarations)

• اختبارات هجرة (Migration)

• تقييم رائحة وطعم

- تطبيقات الدواء والطب (Pharma / Medical)

قد يُطلب:

• Extractables & Leachables

• توثيق تتبع كامل (Traceability)

• فحص صلاحية المنتج بمكوناته بما فيها الأصباغ

لأن المنتج هنا لا يُقَيَّم على اللون فقط، بل على السلامة.

اذن فالمصنع التحويلي لا يختبر للون كمادة، بل يختبر اللون كأداء داخل المنتج النهائي ولهذا فإن نجاح نظام اللون لا يُحسم إلا هنا، لأن السوق لا يشتري شهادة المورد، بل يشتري منتجًا متكرر الجودة. وهذه الاختبارات كما سبق واكدنا (اختبارات المنتج النهائي) هي ليست حكرًا على المصنع التحويلي بل هي ضرورية في سلسلة الاختبارات وقد تجرى نفسها على منتج نهائي في كل مراحل التصنيع .

الباب التاسع

اختبارات مساعدات التشغيل

9.1 الفصل الاول اختبارات مساعدات التشغيل الفلورية ومكان كل اختبار

9.1.1 اختبارات مصنع الإضافة

- اختبار الهوية والتركيب (FTIR)
- اختبار الرطوبة والمتطايرات
- اختبار الثبات الحراري

9.1.2 اختبارات مصنع الماستريباتش

- اختبار الاستلام
- اختبار التشتت داخل الحامل
- اختبار الفلترية وارتفاع الضغط
- مراقبة الاستقرار أثناء التصنيع

9.1.3 اختبارات المصنع التحويلي

- تشغيل تجريبي قبل/بعد
- تقييم العيوب السطحية
- مراقبة تراكمات القالب بزمان تشغيل ثابت
- اختبار COF واللحام والطباعة حسب المنتج

ونعود لنكرر بان كامل السلسلة التصنيعية يجب ان تجري اختبارات المنتج النهائي وليس فقط المصنع التحويلي

9.1.4 قرار الاعتماد النهائي

تُعتمد مساعدات التشغيل الفلورية عندما تُحقق تحسناً واضحاً ومستقراً في نعومة وجودة السطح، وتُقلل أو تُؤخر تراكمات القالب، وتسمح برفع الإنتاجية دون التأثير السلبي على وظيفة المنتج النهائية. أما فيرفض استخدامها إذا لم

يظهر فرق حقيقي في الأداء، أو ظهرت لها آثار جانبية غير مرغوبة، أو تبين أن المشكلة الأساسية خارج نطاق عمل هذه الإضافات.

ويجدر بنا ان نعلم ان الفرق بين البوليمرات الفلورية وغير الفلورية هو ان البوليمر الفلوري يحتوي في تركيبه على الفلور مثل PTFE و PFA و PVDF ويتميز عادة بمقاومة كيميائية وحرارية عالية جدا و سطح منخفض الاحتكاك، بينما البوليمرات غير الفلورية لا تحتوي على فلور وهي الاكثر شيوعا في الصناعة مثل PE و PP و PVC و PET و PA وغيرها. اما عند الحديث عن مساعدات التشغيل الفلورية وغير الفلورية فالمقصود ليس تصنيف البوليمر الاساسي نفسه، بل نوع الاضافة المستخدمة لتحسين التشغيل داخل الماكينة؛ فمساعدات التشغيل الفلورية هي اضافات تعتمد على بوليمرات فلورية وتستخدم بجرعات صغيرة جدا لتحسين انزلاق المصهور عند سطح القالب (Die) وتقليل عيوب التدفق المرتبطة بالقص العالي مثل خشونة السطح والميلت فراكشر وقد تساعد في تقليل تراكمات القالب (Die) بحسب التركيبة، بينما مساعدات التشغيل غير الفلورية هي اضافات لا تحتوي على فلور وقد تكون مشتقة من مواد بوليمرية غير فلورية او مركبات عضوية ومعدنية مثل الشموع البوليمرية و EBS والاستياريات والمواد المنزلفة ومضادات الالتصاق، وتستخدم ايضا بجرعات صغيرة لانها تضيف وظيفة تشغيلية محددة مثل تقليل الاحتكاك او الالتصاق او تحسين الفتح والتوزيع ولا تهدف الى زيادة نسبة البوليمر الاساسي، وغالبا تقدم على شكل ماسترباتش بحامل من PE او PP لتسهيل الجرعات وضمان التجانس.

- اختبارات هذا النوع ومكان كل اختبار (Test Map)

الاختبارات الواردة في هذا الفصل سبق ان تم شرحها ضمن اكثر من موضوع في اجزاء مختلفة من هذا الكتاب، ومع ذلك سنعيد الإشارة إليها هنا بشكل منظم مع توضيح النقاط التي تقتضيها الحاجة، بهدف ربطها بسياق هذا الفصل وتسهيل الرجوع إليها عند التطبيق.

9.1 الفصل الثاني اختبارات مصنع إنتاج الإضافة (Additive Manufacturer)

(P2-A1) اختبار الهوية والتركيب

- المكان :مصنع الإضافة
- الهدف :ثبات المادة الفعالة ومطابقتها للمواصفة
- الأجهزة :أنظمة تحليل داخلية FTIR/حسب المصنع

(P2-A2) اختبار الرطوبة والامتطائرات

- المكان :مصنع الإضافة
- الأجهزة :Moisture Analyzer / Oven
- الهدف :منع تكثف ومشاكل تصنيع لاحقة

- ثانيًا: اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

(P2-MB1) اختبار الاستلام

- المكان :مصنع الماسترباتش
- يشمل :مطابقة دفعات + فحص تكثف

(P2-MB2) اختبار التشتت داخل الحامل

- المكان :مصنع الماسترباتش
- الأجهزة :Microscopy + Film/Plate sample
- الهدف :التأكد من عدم وجود نقاط أو جسيمات كبيرة

(P2-MB3) اختبار الفترة وارتفاع الضغط

- المكان :مصنع الماسترباتش
- الهدف :كشف أي شوائب أو تكتلات تؤثر على التشغيل

(P2-MB4) اختبار الثبات الحراري أثناء تصنيع الماسترباتش

- المكان :مصنع الماسترباتش
- الهدف :التأكد أن النظام لا يتحلل ويخلق رواسب أو رائحة

- ثالثاً: اختبارات المصنع التحويلي(Converter / Production Line)

(P2-C1) اختبار تشغيل تجريبي(Trial Run)

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :مقارنة الأداء قبل الاضافة وبعدها
- المراقبة :سطح المنتج + استقرار التشغيل

(P2-C2) اختبار العيوب السطحية

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد من تحسن المظهر فعلياً

(P2-C3) اختبار تراكمات القالب

- المكان :المصنع التحويلي
- الطريقة :تشغيل بزمان ثابت + مراقبة التراكمات

(P2-C4) اختبار COF والطباعة واللحام حسب المنتج

• المكان: المصنع التحويلي

• الهدف: منع أي آثار جانبية على الوظيفة النهائية

- رابعًا: اختبارات اعتماد خاصة

إذا كان المنتج غذائيًا أو دوائيًا أو حساسًا، فقد يُطلب توثيق أو اختبارات هجرة للمنتج النهائي ككل.

- قرار الاعتماد النهائي للمساعد غير الفلوري

يعتمد مساعد التشغيل غير الفلوري عندما يحقق:

- تحسن واضح في السطح أو الاستقرار
- تقليل مشاكل التشغيل أو التراكمات
- دون تأثير سلبي على COF أو اللحام أو الطباعة

وبذلك يصبح هذا النوع خيارًا عمليًا للمصانع التي تبحث عن تحسين تشغيل “ذكي ومتوازن”، بشرط أن يتم تقييمه بالاختبارات الصحيحة وفي المكان الصحيح.

وهذا يتم في كامل السلسلة التصنيعية على الآلات التصنيع المخبرية، ولن نكرر طريقة اجراء الاختبارات و التي تم تفصيلها في فصول سابقة وسنكتفي بذكر الاختبار و التوضيح عندما تقتضي الحاجة

- 9.2.1 اختبارات المزلقات ومكان كل اختبار :

9.2.1: اختبارات مصنع إنتاج المزلق (Additive Manufacturer)

(P3-A1) اختبار الهوية والتركيب

• المكان: مصنع الإضافة

• الهدف: ثبات المادة ونقاؤها

(P3-A2) اختبار نقطة الانصهار/الخواص الحرارية (حسب النوع)

- المكان :مصنع الإضافة
- الهدف :التأكد أن المادة مناسبة لحرارة التشغيل

9.2.2 اختبارات مصنع الماسترباتش

(P3-MB1) اختبار الاستلام

- المكان :مصنع الماسترباتش
- يشمل :مطابقة دفعات + فحص تكتل/رطوبة

(P3-MB2) اختبار التشتت داخل الحامل

- المكان :مصنع الماسترباتش
- الهدف :منع تكتلات تسبب نقاطاً أو ضعف توزيع

(P3-MB3) اختبار الفلتر وارتفاع الضغط

- المكان :مصنع الماسترباتش
- الهدف :التأكد من عدم وجود شوائب صلبة

9.2.3 : اختبارات المصنع التحويلي (Converter Tests)

(P3-C1) اختبار ضغط الذوبان وعزم المحرك

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :إثبات أن المزلق خفف العزم والضغط بشكل منطقي دون آثار جانبية

(P3-C2) اختبار سطح المنتج وظهور الانفصال (Blooming / Surface Slip)

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد أن السطح لم يتغير بشكل يضر الطباعة أو الالتصاق

(P3-C3) اختبار معامل الاحتكاك COF للأفلام

- المكان :المصنع التحويلي
- الأجهزة COF Tester
- الهدف :ضبط الانزلاق ضمن حدود المنتج

- اختبار معامل الاحتكاك COF للأفلام يتم باستخدام جهاز مخصص يسمى COF Tester أو Friction Tester وهو جهاز يقيس قوة السحب المطلوبة لتحريك سطح فيلم فوق سطح اخر بسرعة ثابتة. يتكون الجهاز عادة من منصة اختبار مستوية توضع عليها العينة، وعربة سحب او كتلة قياسية Sled بوزن محدد (غالبا 200 غرام حسب بعض المواصفات)، ونظام سحب بمحرك يحرك الكتلة بسرعة ثابتة، وحساس قوة Load Cell يقيس قوة الشد لحظة بلحظة، وشاشة او برنامج يعرض النتائج ويحسب تلقائيا معامل الاحتكاك الساكن والحركي. في بعض الاجهزة تكون الكتلة مغطاة بمطاط قياسي او بلباد، وفي اختبارات الافلام غالبا يتم تغطية سطح الكتلة بقطعة من نفس الفيلم لكي يكون القياس فيلم مع فيلم، او يتم القياس فيلم مع سطح معدني اذا كان الهدف محاكاة احتكاك الفيلم مع اجزاء الماكينة.

- طريقة الاختبار بشكل عملي تكون كالتالي: يتم قص عينات من الفيلم بمقاس محدد حسب المواصفة (مثلا شرائط بطول وعرض معين)، ثم يتم تثبيت العينة الاولى على منصة الجهاز بحيث تكون مفرودة بدون تجاعيد، وبعدها يتم تثبيت العينة الثانية على اسفل الكتلة القياسية Sled بحيث يكون السطح المراد اختباره هو الذي سيتلامس مع العينة المثبتة على المنصة. بعد ذلك توضع الكتلة فوق العينة على المنصة، ويبدأ الجهاز بسحب الكتلة لمسافة محددة وبسرعة ثابتة (مثل 100 او 150 مم في الدقيقة حسب الاعدادات القياسية). خلال بداية الحركة يسجل الجهاز اعلى قوة مطلوبة لكسر السكون وبدء الانزلاق وهذه تستخدم لحساب معامل الاحتكاك الساكن Static COF ، ثم بعد ان تبدأ الكتلة بالحركة يستقر منحنى القوة على قيمة متوسطة تقريبا وهذه تستخدم لحساب معامل الاحتكاك الحركي Kinetic COF. يقوم الجهاز بحساب COF تلقائيا من العلاقة $COF = \text{قوة الاحتكاك المقاسة} \div \text{الوزن}$.

العمودي (وزن الكتلة)، ويعرض النتيجة عادة كقيمتين منفصلتين S-COF و K-COF مع منحني القوة مقابل الزمن او المسافة.

ولضمان نتائج صحيحة يجب الانتباه الى عدة نقاط اثناء الاختبار: تنظيف المنصة والكتلة من اي زيوت او غبار، تثبيت العينة بدون شد زائد او طيات، تحديد نوع القياس هل هو فيلم مع فيلم او فيلم مع معدن، تحديد الوجه المراد اختباره (الوجه الداخلي او الخارجي)، وتوحيد ظروف القياس مثل درجة الحرارة والرطوبة وزمن الاختبار بعد الانتاج لان افلام تحتوي Slip Additive قد تتغير قيمتها بعد 24 الى 72 ساعة بسبب هجرة مادة الانزلاق الى السطح. كما يفضل تكرار القياس اكثر من مرة (مثلا 3 الى 5 مرات) واخذ المتوسط لتقليل تذبذب النتائج. اذا تحب اكتب لك نفس الكلام لكن بصيغة كتابية رسمية بعنوان: الهدف، الجهاز، العينة، خطوات الاختبار، قراءة النتائج، اسباب الرفض.

اختبار معامل الاحتكاك COF للأفلام (Coefficient of Friction) هو اختبار يهدف الى قياس قابلية سطح الفيلم للانزلاق او مقاومة الانزلاق عند ملاسته لسطح اخر، وهو مؤشر مهم لتقييم سهولة تشغيل الافلام على خطوط الانتاج مثل السحب واللف والتقطيع وصناعة الاكياس، كما يساعد في تقدير احتمالية حدوث الالتصاق بين الطبقات او صعوبة فتح الاكياس. يعتمد الاختبار على قياس القوة اللازمة لتحريك كتلة قياسية فوق سطح الفيلم بسرعة ثابتة، ومن ثم حساب معامل الاحتكاك كنسبة بين قوة الاحتكاك والوزن العمودي المؤثر على السطح.

- **الهدف من الاختبار هو تحديد قيمتين رئيسيتين:** معامل الاحتكاك الساكن وهو القوة المطلوبة لبدء الحركة من حالة السكون بين سطحين متلامسين، ومعامل الاحتكاك الحركي وهو القوة المطلوبة لاستمرار الحركة بعد ان تبدأ عملية الانزلاق. ارتفاع قيمة COF يدل عادة على سطح اكثر خشونة او التصاقا مما قد يسبب مشاكل في فتح الاكياس او زيادة مقاومة السحب على الرولات، بينما انخفاض COF بشكل كبير يدل على سطح شديد الانزلاق قد يسبب مشاكل في التحكم بالشد او عدم استقرار التغذية والتكديس.

- **الجهاز المستخدم يسمى COF Tester او Friction Tester** ويتكون عادة من منصة اختبار مستوية توضع عليها عينة الفيلم، وكتلة قياسية تسمى Sled بوزن محدد، ونظام سحب بمحرك يتحكم في سرعة الحركة ومسافة السحب، وحساس قياس قوة (Load Cell) يسجل قوة الشد اثناء الاختبار، ووحدة عرض او برنامج يقوم بحساب النتائج تلقائيا. في كثير من التطبيقات الخاصة بالافلام يتم تغطية سطح الكتلة بقطعة من نفس الفيلم لاجراء القياس مع فيلم، كما يمكن اجراء القياس فيلم مع سطح معدني او سطح قياسي لمحاكاة احتكاك الفيلم مع اجزاء الماكينة حسب الهدف من الاختبار.

تجهيز العينة يتم بقص شرائط او قطع من الفيلم بمقاسات مناسبة للمواصفة المعتمدة، مع التأكد من ان السطح نظيف وخال من الاتربة والزيوت، ثم يتم تثبيت العينة الاولى على منصة الجهاز بحيث تكون مفرودة بدون طيات او تجايعد. بعد ذلك تثبت عينة ثانية على اسفل الكتلة القياسية بحيث يكون الوجه المراد اختباره هو الذي سيلامس العينة المثبتة على المنصة. توضع الكتلة فوق العينة على المنصة ثم يبدأ الجهاز بسحب الكتلة لمسافة محددة ويسرعة ثابتة. خلال لحظة بداية الحركة يسجل الجهاز اعلى قوة لازمة لكسر السكون وبدء الانزلاق، وهذه القيمة تستخدم لحساب معامل الاحتكاك الساكن. بعد ان تتحرك الكتلة يستمر الجهاز في القياس وتسجل قوة السحب المتوسطة او المستقرة اثناء الانزلاق، وهذه تستخدم لحساب معامل الاحتكاك الحركي. يقوم الجهاز بحساب COF تلقائياً وفق العلاقة $COF = \text{قوة الاحتكاك المقاسة} \div \text{الوزن العمودي الناتج عن وزن الكتلة}$ ، وتعرض النتائج عادة كقيمتين منفصلتين للساكن والحركي وقد يظهر معها منحني القوة مقابل الزمن او المسافة.

- **قراءة النتائج وتفسيرها يعتمد على التطبيق المطلوب**، فاذا كانت قيمة COF مرتفعة فقد يدل ذلك على وجود خشونة سطحية او نقص في مواد الانزلاق او زيادة في ظاهرة الالتصاق Blocking مما يسبب صعوبة في فتح الاكياس وبطء التشغيل وزيادة مقاومة السحب، بينما اذا كانت قيمة COF منخفضة جدا فقد يدل ذلك على زيادة تأثير مواد الانزلاق Slip مما قد يؤدي الى انزلاق غير مرغوب على السيور والرولات وصعوبة التحكم في شد الفيلم او عدم استقرار التكديس. من المهم ملاحظة ان قيم COF تتأثر بعوامل مثل نوع البوليمر ووجود اضافات Anti-block وSlip وظروف التشغيل مثل التبريد والسماكة ومعالجة السطح مثل Corona، كما تتغير النتائج مع الزمن بعد الانتاج في الافلام التي تحتوي مواد انزلاق بسبب هجرة هذه المواد الى سطح الفيلم واستقرارها، لذلك يفضل توحيد زمن القياس بعد التصنيع وتثبيت ظروف الاختبار من درجة حرارة ورطوبة وتحديد نوع القياس فيلم مع فيلم او فيلم مع معدن، مع تكرار القياس عدة مرات واخذ المتوسط لضمان دقة القرار.

(P3-C4) اختبار اللحام والطباعة والتصاق الطبقات

- **المكان:** المصنع التحويلي
- **الهدف:** التأكد أن تحسين التشغيل لم يُضعف وظيفة المنتج

(P3-C5) اختبار خروج القطعة من القالب (الحقن)

- **المكان:** المصنع التحويلي

• الهدف: تقييم تحرير القلب وتقليل العيوب

- اختبار (P3-C5) خروج القطعة من القلب للحقن فكرته ببساطة انه اختبار عملي يثبت هل القطعة تفك من تجويف القلب وتخرج مع نظام القذف بشكل مستقر بدون تعليق او تشوه او زيادة غير طبيعية في قوة القذف وزمن الدورة. هذا الاختبار مهم لانه قد يكون كل شيء ممتاز في الشكل والابعاد لكن الانتاج يتعطل بسبب التصاق القطعة في القلب او تعلقها على الكور او حدوث شفط Vacuum او تشوه اثناء القذف.
- الهدف من الاختبار هو قياس ثلاث نقاط: اولا سهولة الانفصال من سطح القلب (Release) ثانيا استقرار القذف (Ejection Stability) وثالثا اثر القذف على جودة القطعة (تشوهات، خدوش، علامات قذف). ويخرج منه قرار واضح: هل القلب قابل للتشغيل المستمر على اعدادات انتاجية بدون توقفات بسبب الالتصاق ام يحتاج تعديل تصميم او ظروف التشغيل.

- الاجهزة والادوات المستخدمة تكون حسب مستوى المصنع، وابسطها ما يلي:

ماكينة حقن تعمل بشكل طبيعي بالقلب المقصود، مع امكانية مراقبة بيانات الدورة من شاشة الماكينة (ضغط الحقن، ضغط وزمن الحفظ، درجة حرارة الاسطوانة، درجة حرارة القلب، زمن التبريد، سرعة فتح القلب، وتوقيت سرعة القذف). اذا توفر يكون افضل وجود حساس لقراءة قوة القذف Ejector Force او منحني حمل نظام القذف (بعض الماكينات تعطي مراقبة لحمل القذف او تيار محرك القذف كبديل تقريبي). كما تحتاج عداد دورات وسجل ملاحظات، وادوات فحص بصري للقطعة (اضاءة جيدة، عدسة مكبرة عند الحاجة)، وميزان حرارة/جهاز قياس حرارة سطح القلب عند الحاجة. في بعض المصانع يستخدم ايضا مقياس قوة يدوي او جهاز Pull gauge فقط كتشخيص، لكن الاختبار الاساسي يتم داخل الماكينة اثناء التشغيل.

- طريقة الاختبار

1. تثبيت ظروف التشغيل: يشغل القلب على اعدادات انتاج مستقرة تمثل الواقع مادة، لون الماسترباتش، درجة حرارة اسطوانة، درجة حرارة القلب، سرعة ومرحلة الحقن، ضغط وزمن الحفظ، زمن التبريد
2. تشغيل تمهيدي: شغل 20-30 دورة لتثبيت حرارة القلب واستقرار الانكماش، ثم ابدأ العد الرسمي للاختبار.
3. مراقبة الخروج في كل دورة: يراقب هل القطعة تخرج كاملة مع القذف؟ هل تعلق في القلب او على الكور؟ هل تحتاج هواء مساعد؟ هل يحدث سحب/شفط؟ هل تبقى القطعة "معلقة" فتسقط لاحقا

4. تسجيل مؤشرات كمية (قدر الامكان):

- عدد مرات التعليق Sticking خلال عدد محدد من الدورات (مثلا 100 دورة).
- اذا كانت الماكينة تعطي قيمة/منحنى قوة القذف او حمل القذف فسجل المتوسط والقمم، وهل ترتفع مع الوقت.
- تسجل اي زيادة في زمن الدورة بسبب تردد القذف او الحاجة لتدخل عامل.

5. فحص القطع الخارجية: تفحص كل 10 قطع مثلا بحثا عن:

- علامات قذف عميقة او تشوه عند نقاط القذف
 - خدوش/سحجات نتيجة جرّ القطعة على سطح القالب
 - اجهاد عند مناطق الالتصاق
 - انبعاج او التواء بسبب قذف مبكر قبل اكتمال التبريد
6. اختبار حساسية : يتم تغيير متغير واحد بشكل محدود لمراقبة السبب، مثل زيادة بسيطة في زمن التبريد او تقليل ضغط او زمن الحفظ او تعديل سرعة فتح القالب او توقيت القذف. اذا تحسن الخروج مباشرة فهذا يدل ان المشكلة تشغيلية، اما اذا لم يتغير فغالبا المشكلة تصميمية

- كيف تقرأ النتائج وتفسرها:

- اذا كانت القطعة تخرج بسلاسة في كل الدورات بدون تعليق ومع علامات قذف مقبولة فهذا نجاح.
- اذا ظهر تعليق متكرر او احتاج اخراج القطعة هواء اضافي فهذا فشل تشغيلي حتى لو كانت الابعاد ممتازة.
- اذا كانت قوة وحمل القذف يرتفع تدريجيا مع استمرار التشغيل فهذا مؤشر على سخونة موضعية، خشونة سطح، تلوث/ترسبات، او سوء تهوية Venting يؤدي لشفت.
- اذا خرجت القطعة لكن فيها تشوه او خدوش فالمشكلة غالبا في توقيت القذف (تبريد غير كاف) او تصميم نظام القذف

- اكثر اسباب فشل خروج القطعة من القالب

- زوايا السحب Draft angle غير كافية او ملمس سطح خشن/محبب يزيد التمسك
- تركيز انكماش على الكور او مناطق undercut او حواف حادة
- ضغط/زمن الحفظ عالي يزيد الالتصاق او يسبب "قف" على الكور
- تبريد غير كاف يؤدي لقذف والقطعة لينة فتتشوه وتعلق
- تهوية Venting ضعيفة تؤدي لشفت Vacuum خصوصا في الاجزاء العميقة

- عدم توازن توزيع بنات القذف او قذف على نقاط ضعيفة يسبب تشوه
- تلوث سطح القالب او تراكمات او صدأ خفيف
- مادة ذات التصاق/سطح عالي (او تركيبة فيها اضافات تزيد الالتصاق) بدون معالجة مناسبة

– معيار القبول او الرفض

يعتبر القالب مقبولا من ناحية خروج القطعة اذا امكن تشغيله على اعدادات انتاج واقعية لعدد دورات متفق عليه دون تعليق او تدخل يدوي، مع ثبات في سلوك القذف وعدم ظهور تشوهات او خدوش غير مقبولة على القطعة. ويرفض او يعاد تقييمه اذا تكرر التعليق، او ارتفعت قوة او حمل القذف بشكل ملحوظ، او ظهرت عيوب ناتجة عن القذف مثل تشوه، تبييض اجهاد، او علامات قذف مؤثرة على الوظيفة او المظهر.

رابعاً: اختبارات اعتماد خاصة اذا اقضت الحاجة

إذا كان المنتج غذائياً أو طبياً، فقد تُطلب:

- وثائق مطابقة
- اختبارات هجرة للمنتج النهائي

القرار بناء على ما سبق من اختبارات

تُعتمد المزلاقات عندما تحقق:

- تشغيل أسهل واستقرار أعلى
- انخفاض العزم او الضغط
- تحسن سطح المنتج دون آثار جانبية
- عدم إضعاف الطباعة/اللحام/COF/التصاق الطبقات

وبذلك تصبح المزلاقات من أقوى أدوات تحسين الإنتاج، بشرط أن تُستخدم بوعي وباختبارات واضحة، لا بالتجربة العشوائية.

الفصل الثالث

اختبارات الشمعيات ومكان كل اختبار

3.1.9- اختبارات مصنع إنتاج الشمع (Wax Manufacturer)

(P4-A1) اختبار الهوية والتركيب

- المكان :مصنع الشمع
- الهدف :ثبات المنتج بين الدفعات

(P4-A2) اختبار نقطة الانصهار والخواص الحرارية

- المكان :مصنع الشمع
- الأجهزة DSC :أو طرق قياس داخلية
- الهدف :التأكد من ملائمة الشمع لحرارة التشغيل

(P4-A3) اختبار اللزوجة/السلوك الشمعي

- المكان :مصنع الشمع
- الهدف :تصنيف الشمع حسب الاستخدام

3.2.9 : اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

(P4-MB1) اختبار الاستلام

- المكان :مصنع الماسترباتش
- يشمل :مطابقة دفعات + تكتل + رطوبة

(P4-MB2) اختبار التشقق داخل الماستريباتش

- المكان :مصنع الماستريباتش
- الهدف :قياس مدى تحسن توزيع المالى/اللون
- الأدوات + Microscopy :فيلم اختبار

(P4-MB3) اختبار الفلتر وارتفاع الضغط

- المكان :مصنع الماستريباتش
- الهدف :هل قلت مشاكل انسداد الفلاتر؟
- المعيار :ضغط ثابت = تحسن

(P4-MB4) اختبار ثبات الماستريباتش أثناء التشغيل

- المكان :مصنع الماستريباتش
- الهدف :التأكد من عدم تكوّن رواسب أو تدهور

- 3.9.3 : اختبارات المصنع التحويلي (Converter / End Product)

(P4-C1) اختبار COF ومعامل الانزلاق (للأفلام)

- المكان :المصنع التحويلي
- الأجهزة COF Tester :
- الهدف :التأكد أن الشمع لم يغيّر الانزلاق خارج المطلوب

(P4-C2) اختبار اللحام والطباعة

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد أن الشمع لم يضعف اللحام أو التصاق الحبر

(P4-C3) اختبار السطح والانفصال (Blooming)

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد أن السطح لم يصبح “دهنيًا” مع الزمن
- الطريقة :فحص بصري + اختبار بعد تخزين قصير

(P4-C4) اختبار الخواص الميكانيكية عند الحاجة

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد أن الجرات لم تؤثر على المتانة

- 3.4.9 اختبارات اعتماد خاصة

إذا كان المنتج حساسا مثل المنتجات الغذائية و الدوائية

- وثائق مطابقة
- اختبارات هجرة للمنتج النهائي

- قرار الاعتماد النهائي للشمعيات عندما تحقق:

- تحسين تشتت المالنات والألوان تحسين التشغيل
- تقليل العزم/الضغط
- تقليل مشاكل الفلترة
-

الفصل الرابع

- اختبارات اختبارات مساعدات التشييت ومكان كل اختبار
- 9.4 اختبارات مصنع إنتاج مساعد التشييت (Additive Manufacturer)
- (P5-A1) اختبار الهوية والتركيب
 - المكان :مصنع الإضافة
 - الهدف :ثبات المادة الفعالة
- (P5-A2)اختبار الخواص الحرارية (عند الحاجة)
 - المكان :مصنع الإضافة
 - الهدف :التأكد من ملائمة المادة لحرارة التشغيل
- 2.9 : اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

وهنا تكون الاختبارات الأهم لأن مساعد التشييت يُستخدم غالبًا في الماسترباتش.
- (P5-MB1)اختبار التشييت (Dispersion Test)
 - المكان :مصنع الماسترباتش
 - الهدف :قياس تحسن توزيع المالى/اللون
 - الأدوات + Microscopy :فيلم اختبار + فحص نقاط
- (P5-MB2)اختبار الفلتر وارتفاع الضغط
 - المكان :مصنع الماسترباتش
 - الهدف :هل قلّ انسداد الفلاتر؟

- المعيار :ضغط ثابت وزمن أطول قبل الانسداد

(P5-MB3) اختبار العيوب البصرية (Specks / Streaks)

- المكان :مصنع الماسترباتش
- الهدف :تقليل النقاط والخطوط في العينات

(P5-MB4) اختبار ثبات المنتج بين الدفعات

- المكان :مصنع الماسترباتش
- الهدف :التأكد أن التحسن ثابت وليس مؤقتاً

- 3.9: اختبارات المصنع التحويلي (Converter / End Product)

(P5-C1) اختبار المنتج النهائي (Surface Quality)

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :قياس الفرق الحقيقي في المنتج النهائي

(P5-C2) اختبار الشفافية والعكورة (لأفلام)

- المكان :المصنع التحويلي
- الأجهزة Haze Meter
- الهدف :هل تحسنت الشفافية بسبب تشتت أفضل

(P5-C3) اختبار COF والطباعة واللحام عند الحاجة

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد من عدم ظهور آثار جانبية

- 9.4: اختبارات اعتماد خاصة (عند الحاجة)

في التطبيقات الغذائية أو الطبية:

- وثائق مطابقة
- اختبارات هجرة للمنتج النهائي

- القرار النهائي لاعتماد مساعد التشييت

يُعتمد مساعد التشييت عندما يحقق:

- تشييت أفضل
- نقاط أقل
- فلتر أسهل
- شفافية أفضل (عند الأفلام)
- دون التأثير سلبيًا على السطح أو الطباعة أو اللحم

وبذلك يصبح مساعد التشييت أحد أهم الأسرار الصناعية التي تميز مصنعًا ناجحًا في المائات والألوان عن مصنع آخر يعتمد فقط على التجربة

الفصل الخامس

اختبارات مضادات الأكسدة ومكان كل اختبار

- 9.5.1 : اختبارات مصنع إنتاج مضاد الأكسدة (Additive Manufacturer)

(P7-A1) اختبار الهوية والتركيب والنقاء

- المكان :مصنع الإضافة
- الهدف :ثبات المادة ونقاؤها بين الدفعات

(P7-A2) اختبار الخواص الحرارية والثبات

- المكان: مصنع الإضافة
- الهدف: التأكد أن المادة تتحمل ظروف التخزين والتصنيع

9.5.2 اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

إذا كانت مضادات الأكسدة ضمن ماسترباتش أو ضمن تركيبة كومباوند:

(P7-MB1) اختبار الاستلام

- المكان: مصنع الماسترباتش
- يشمل: مطابقة دفعات + تكتل + رطوبة

(P7-MB2) اختبار الثبات الحراري أثناء التصنيع

- المكان: مصنع الماسترباتش
- الهدف: التأكد أن النظام لا يتحلل ويخلق تغير لون أو رائحة أثناء البثق

(P7-MB3) اختبار اللون والرائحة لعينة قياسية

- المكان: مصنع الماسترباتش
- الهدف: مقارنة عينات قبل/بعد

9.5.3 اختبارات المصنع التحويلي (Converter / End Product Factory)

وهنا يتم الحكم الحقيقي لأن الهدف النهائي هو حماية المنتج أثناء التصنيع.

(P7-C1) اختبار تغير اللون أثناء التشغيل (Color Stability During Processing)

- المكان: المصنع التحويلي

- الطريقة :إنتاج عينات على فترات + مقارنة اللون
- الأجهزة :مقارنة مرجعية أو جهاز قياس لون

(P7-C2)اختبار مؤشر الأكسدة(OIT – Oxidation Induction Time)

- المكان :مختبر المصنع التحويلي أو مختبر خارجي
- الأجهزة : DSC
- الهدف :قياس مقاومة المادة للأكسدة بعد إضافة النظام

هذا الاختبار من أهم الاختبارات لأنه يعطي رقمًا واضحًا يقارن بين تركيبتين.

(P7-C3)اختبار الرائحة والمواد المتطايرة(Odor / VOC)

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد أن المنتج لا يخرج برائحة غير مقبولة
- الطريقة :تقييم حسي أو اختبارات متقدمة حسب الإمكانيات

(P7-C4)اختبار الخواص الميكانيكية بعد المعالجة

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد أن الخواص لم تتدهور بسبب الحرارة/القص
- الأجهزة : UTM (شد/استطالة) حسب المنتج

(P7-C5)اختبار ثبات اللحام في الأفلام(Seal Stability)

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد أن التدهور لم يؤثر على اللحام

9.5.4 : اختبارات اعتماد خاصة (عند الحاجة) -

في المنتجات الغذائية/الدوائية:

- وثائق مطابقة
- اختبارات هجرة للمنتج النهائي

- قرار الاعتماد النهائي لمثبتات المعالجة

تُعتمد عندما تحقق:

- تقليل الاصفرار والتغير اللوني
- تقليل الرائحة غير المرغوبة
- تحسين ثبات الخواص بعد التصنيع
- رفع مؤشر OIT عند قياسه
- دون آثار جانبية أو تكلفة مبالغ فيها

وبذلك نفهم أن مضادات الأكسدة ليست مادة تحسن المنتج، بل مادة تمنع المنتج من أن يتدهور أثناء التصنيع، وهي أساس في إعادة التدوير وفي خطوط الإنتاج عالية الإجهاد

الفصل السادس

اختبارات اختبارات إزالة الروائح ومكان كل اختبار

9.6.1 : اختبارات مصنع إنتاج الإضافة (Additive Manufacturer)

(P8-A1) اختبار الهوية والتركيب

- المكان :مصنع الإضافة
- الهدف :ثبات المادة الفعالة

(P8-A2) اختبار قدرة الامتصاص/الفعالية المبدئية

- المكان :مصنع الإضافة
- الهدف :إثبات أن الإضافة تعمل ضمن نطاق محدد

- اختبار قدرة الامتصاص او الفعالية المبدئية هو اختبار سريع يهدف الى معرفة مدى قدرة المادة المضافة داخل البلاستيك على بدء اداء وظيفتها منذ الدقائق او الساعات الاولى بعد التصنيع، وليس بعد مرور ايام. يستخدم هذا الاختبار خصوصا مع الاضافات التي تعتمد على الهجرة الى السطح او التفاعل السطحي لكي تظهر فعاليتها، مثل مواد الانزلاق Slip ومواد منع الالتصاق Anti-block ومواد مضادة للكهرباء الساكنة Antistatic وبعض مواد مقاومة الضباب Anti-fog او مواد تثبيت الاشعة UV. الفكرة الاساسية ان كثير من هذه الاضافات تكون موجودة داخل كتلة البوليمر بعد البثق او الحقن، لكنها تحتاج وقتا لتنتقل الى السطح او تتوزع بطريقة صحيحة، لذلك نحتاج اختبارا يقيس هل الاداء بدأ فعليا ام لا.
- الهدف من الاختبار هو قياس ثلاث نقاط محددة: اولا سرعة ظهور التأثير على سطح المنتج بعد التصنيع مباشرة، ثانيا قوة التأثير في المرحلة الاولى وهل هي كافية للتشغيل او الاستخدام، وثالثا مقارنة هذه البداية بين تركيبات مختلفة او بين دفعات انتاج مختلفة للتأكد من ثبات الاداء. لذلك يسمى احيانا اختبار الفعالية المبدئية لانه لا ينتظر الاستقرار النهائي للخواص بل يركز على المرحلة الحرجة في بداية الاستخدام او بداية التشغيل على الماكينة.

- طريقة الاختبار تعتمد على نوع الاضافة والخاصية المراد قياسها
- لكن المبدأ ثابت وهو اننا نختبر المنتج مباشرة بعد الانتاج ثم نعيد الاختبار بعد فترة قصيرة لنرى كيف تتطور الفعالية.
- يتم اخذ عينات ممثلة من المنتج النهائي (فيلم او اكياس او صفائح او قطع) فور خروجها من خط الانتاج مع تسجيل ظروف التشغيل مثل درجة حرارة المصهور وسرعة السحب ودرجة التبريد ونوع المادة ونسبة الاضافة. بعد ذلك يتم ترك العينة في ظروف ثابتة من درجة حرارة ورطوبة لمدة زمنية قصيرة محددة مسبقا مثل 30 دقيقة او ساعتين او 24 ساعة حسب النظام المتبع، ثم تقاس الخاصية المستهدفة في كل نقطة زمنية. الفكرة هنا انك تقيس اداء الاضافة في بداية عمر المنتج وليس بعد استقراره الكامل.

- أمثلة تطبيقية عملية حسب نوع الاضافة:

- اذا كان الهدف تقييم مادة الانزلاق Slip في افلام PE او PP فان الفعالية المبدئية تقاس عادة بقياس معامل الاحتكاك COF مباشرة بعد الانتاج ثم بعد 2 ساعة ثم بعد 24 ساعة. في بعض التركيبات قد يكون COF مرتفعا في البداية ثم ينخفض تدريجيا عندما تهاجر مادة الانزلاق الى السطح، وهنا تكون النتيجة الجيدة هي ان يصل COF الى نطاق تشغيل مناسب بسرعة كافية بدون انتظار طويل، لان المصنع يحتاج تشغيل فوري وتعبئة وتقطيع.
- اذا كان الهدف تقييم مضاد الالتصاق Anti-block فان الفعالية المبدئية تقاس غالبا باختبار التصاق الطبقات او سهولة فصل الطبقتين بعد ضغط خفيف ووقت قصير، او باختبار قوة الفصل بين طبقتين من الفيلم. النتيجة الجيدة هي ان لا يحدث التصاق قوي بعد فترة قصيرة من اللف او التخزين المؤقت، لان مشاكل البلوك تظهر مباشرة عند لف الرولات او عند فتح الاكياس في نفس اليوم.
- اذا كان الهدف تقييم مضاد الكهرباء الساكنة Antistatic فان الفعالية المبدئية تقاس بقياس مقاومة السطح او زمن تفريغ الشحنة او ملاحظة جذب الغبار خلال اول ساعات. بعض مضادات الاستاتيكت تحتاج وقتا لتكوين طبقة رقيقة على السطح، لذلك اختبار الفعالية المبدئية يحدد هل المنتج سيكون مزعجا في التعبئة والقص والتغليف خلال اول يوم ام لا.
- اذا كان الهدف تقييم مقاومة الضباب Anti-fog في افلام التغليف فان الفعالية المبدئية تقاس بتعريض الفيلم لبينة رطبة او بخار ماء ومراقبة سرعة تشكل قطرات الضباب او تشكل طبقة مائية مستمرة. النتيجة الجيدة هي ان يعمل الفيلم ضد الضباب مباشرة او خلال وقت قصير حسب مواصفة العميل.
- ما الذي يجعل الاختبار حساسا ومهما؟ لان الفعالية المبدئية تتأثر بعوامل كثيرة قد تسبب اختلافا كبيرا بين دفعة واخرى حتى لو كانت النسبة ثابتة، مثل درجة حرارة المصهور التي قد تسبب تحلل جزئي لبعض الاضافات، سرعة التبريد التي تؤثر على هجرة الاضافة الى السطح، نوع البوليمر نفسه ودرجة تبلوره، وجود فيلرز مثل كربونات

الكالسيوم التي قد تمتص بعض الإضافات او تقلل من وصولها للسطح، ونسبة الاضافة وتوزيعها وجودة الخلط. لذلك هذا الاختبار يكشف مشاكل عملية مثل سوء التشتت او عدم كفاية الجرعة او تأثير الفيلر او اختلاف ظروف التشغيل.

– **شكل النتائج والقرار:** النتائج تسجل عادة كقيم مقابل الزمن مثل COF عند 0 ساعة و 2 ساعة و 24 ساعة، او قوة فصل عند نفس الاوقات، او مقاومة سطحية عند نفس الاوقات. ويكون قرار القبول مرتبطا بوجود حد ادنى من الاداء خلال وقت محدد. مثال عملي: اذا كان خط الاكياس يحتاج COF ضمن نطاق معين خلال اول ساعتين لتجنب توقفات التشغيل، فان المنتج الذي لا يصل لهذا النطاق الا بعد يوم يعتبر غير مناسب تشغيليا حتى لو كان ممتازا بعد 48 ساعة. لذلك معيار القبول في الفعالية المبدئية لا يعتمد على القيمة النهائية فقط بل يعتمد على سرعة الوصول للقيمة المطلوبة.

الخلاصة:

اختبار قدرة الامتصاص او الفعالية المبدئية هو اختبار زمني قصير يقيس مدى سرعة بدء الاضافة في اداء وظيفتها بعد التصنيع مباشرة، ويستخدم للتأكد من ان المنتج سيكون قابلا للتشغيل او الاستخدام في الساعات الاولى دون انتظار طويل، ويتم عبر قياس الخاصية المستهدفة فور الانتاج ثم بعد فترات زمنية قصيرة ومقارنة النتائج بحدود قبول مرتبطة بزمن محدد.

9.6.2: اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

إذا كانت الإضافة ضمن ماسترباتش:

(P8-MB1) اختبار الاستلام

- المكان: مصنع الماسترباتش
- يشمل: مطابقة دفعات + رطوبة + تكتل

(P8-MB2) اختبار التشتت داخل الحامل

- المكان: مصنع الماسترباتش
- الهدف: ضمان توزيع متجانس لأن التوزيع السيئ يعطي مناطق رائحتها أقل وأخرى رائحتها أعلى

(P8-MB3) اختبار الرائحة لعينة قياسية

- المكان :مصنع الماستريباتش
- الهدف :تقييم أولي قبل إرسال المنتج للعميل

9.6.3 : اختبارات المصنع التحويلي (Converter / Recycling Plant)

وهنا يتم اعتمادها فعليًا لأنها مرتبطة بقبول السوق.

(P8-C1) اختبار الرائحة الحسي (Sensory Odor Test)

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :تقييم الرائحة بشكل عملي
- الطريقة :لجنة بسيطة أو تقييم داخلي وفق معيار ثابت

شرط مهم: يجب توحيد ظروف الاختبار (نفس العينة، نفس وقت التبريد، نفس العبوة).

(P8-C2) اختبار الرائحة بعد التخزين (Aging Odor Test)

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد أن الرائحة لا تعود بعد فترة
- الطريقة :تخزين العينة في كيس/علبة مغلقة ثم تقييم بعد 24-72 ساعة

(P8-C3) اختبار الرائحة عند التسخين (Hot Odor Test)

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :بعض الروائح تظهر عند الحرارة فقط
- الطريقة :تسخين عينة ضمن ظروف محددة ثم تقييم الرائحة

VOC (P8-C4) اختبار المتطايريات

- المكان: مختبر متقدم أو خارجي

- الأجهزة: GC-MS

- الهدف: قياس المتطايريات

- اختبار المتطايريات (Volatile Organic Compounds) VOC هو اختبار يهدف الى قياس كمية ونوع المركبات العضوية المتطايرة التي قد تنبعث من المادة البلاستيكية او المنتج النهائي على شكل روائح او غازات خفيفة، وهو مهم خصوصا في منتجات التغليف والغذاء والدواء وعبوات العناية الشخصية وكذلك في المنتجات التي تتطلب رائحة منخفضة مثل الاجزاء الداخلية للسيارات والمنتجات المنزلية. وجود VOC مرتفع قد يسبب رائحة غير مقبولة، وقد يدل على بقايا مونومرات او مذبذبات او زيوت او شوائب عضوية او تحلل حراري لبعض الاضافات اثناء التصنيع.
- هدف الاختبار هو التحقق من ان المنتج ضمن حدود مقبولة من الانبعاثات، وتحديد مصدر المشكلة عند وجود رائحة او شكاوى من العميل، ومقارنة دفعات الانتاج او الخامات لمعرفة ايها اقل تطايرا. عادة يتم تقييم VOC بطريقتين: اما قياس كمي للانبعاثات بوحدة مثل mg/kg او $\mu\text{g/g}$ ، او تحليل نوعي لتحديد المركبات المسؤولة عن الرائحة مثل الالدهيدات والكيتونات والهيدروكربونات الخفيفة وبعض بقايا المذبذبات.
- الاجهزة المستخدمة تعتمد على مستوى الدقة المطلوب. اكثر نظام شائع في المختبرات هو وضع العينة داخل حاوية محكمة تسمى Headspace Vial او Emission Chamber ثم تسخينها لدرجة محددة ومدة محددة لتحفيز خروج المتطايريات، وبعدها يتم سحب جزء من الهواء الموجود فوق العينة وتحليله بجهاز GC-MS وهو كروماتوغرافيا الغاز مع مطياف الكتلة لتحديد المركبات وقياسها. في بعض المختبرات يستخدم جهاز Headspace Sampler تلقائي متصل مباشرة بال GC-MS لضمان ثبات ظروف السحب. وقد تستخدم ايضا تقنيات مثل TD-GC-MS (Thermal Desorption) حيث يتم تجميع المتطايريات على انبوب امتزاز ثم تحريرها حراريا وتحليلها، وهذه الطريقة مفيدة عندما تكون التراكيز منخفضة جدا.
- طريقة الاختبار بشكل عملي تكون كالتالي: يتم اخذ عينة ممثلة من المنتج (حبيبات، فيلم، قطع حقن، غطاء، عبوة) مع تجنب تلوثها بالزيوت او الروائح الخارجية، ثم توزن كمية محددة وتوضع في قارورة محكمة الاغلاق. بعد ذلك يتم وضع القارورة في حمام حراري او فرن صغير عند درجة محددة (مثلا 60 الى 120

درجة مئوية حسب نوع المادة والموصفة) لمدة زمنية ثابتة (مثلا 30 الى 60 دقيقة) للسماح بتجمع المركبات المتطايرة في الفراغ العلوي. ثم يتم سحب عينة من هذا الفراغ العلوي وتحليلها بواسطة GC-MS لتحديد المركبات وقياس تركيزها. وفي حال كان المطلوب قياس اجمالي المتطايرات فقط وليس تحديدها، يمكن استخدام طرق ايسط مثل قياس الوزن المفقود عند التسخين ضمن شروط محددة، لكن هذه الطريقة اقل دقة ولا تعطي هوية المركبات.

– **قراءة النتائج وتفسيرها تعتمد على التطبيق.** ارتفاع VOC قد يكون بسبب خامة معاد تدويرها تحتوي بقايا زيوت او منظفات او مواد عضوية، او بسبب تحلل حراري اثناء البثق نتيجة حرارة عالية او زمن مكوث طويل، او بسبب اضافات معينة مثل بعض الزيوت والشموع والمواد المنزلة او بقايا مذيبيات من احبار او مواد تنظيف. كما قد يرتفع VOC في المنتجات الملونة اذا كان هناك حامل عضوي او مواد مساعدة ذات رائحة، وقد يرتفع ايضا في بعض انواع PE او PP اذا كانت تحتوي بقايا منخفضة الوزن الجزيئي او مواد انزلاق تهاجر للسطح. لذلك نتيجة الاختبار ليست فقط قبول او رفض بل اداة تشخيص لتحديد سبب الرائحة.

– **قرار القبول عادة يكون مرتبطا بموصفة العميل او مواصفات خاصة بالصناعة مثل التغليف الغذائي او صناعة السيارات.** اذا كانت القيم ضمن الحدود يعتبر المنتج مقبولا، اما اذا كانت مرتفعة فيتم اتخاذ اجراءات تصحيحية مثل تحسين الغسيل في خط التدوير، رفع كفاءة التجفيف، تقليل درجة حرارة البثق وزمن المكوث، استخدام خامات اقل رائحة، تغيير نوع الاضافات ذات الرائحة، او اضافة مرحلة تفريغ Vacuum Venting في (Injection Mould) لتقليل المتطايرات.

(P8-C5) اختبار تأثير الإضافة على اللون والشفافية والخواص

• المكان :المصنع التحويلي

• الهدف :التأكد أن تحسين الرائحة لم يسبب:

○ عكورة أعلى

○ تغيير لون

○ ضعف خواص

- 9.6.4 : اختبارات اعتماد خاصة (عند الحاجة)

في التطبيقات الغذائية والدوائية:

غالبًا لا تُستخدم هذه الإضافات إلا بشروط صارمة جدًا، وقد تتطلب:

• وثائق مطابقة

• اختبارات هجرة

• إثبات عدم تأثيرها على سلامة المنتج

- قرار الاعتماد النهائي لإضافات إزالة الروائح

تُعتمد عندما تحقق:

• انخفاض واضح ومستقر في الرائحة

• ثبات بعد التخزين

• عدم تأثير سلبي على اللون أو الشفافية أو الخواص

• تكلفة منطقية مقابل التحسن

وبذلك تصبح هذه الإضافات أداة تسويقية وجودة للمصانع، لأنها قد ترفع المنتج المعاد تدويره درجة أو درجتين في السوق بمجرد حل مشكلة الرائحة.

الفصل السابع

اختبارات اختبارات إزالة الرطوبة

9.7.1 : اختبارات مصنع إنتاج الإضافة (Additive Manufacturer)

(P9-A1) اختبار الهوية والتركيب

- المكان :مصنع الإضافة
- الهدف :ثبات المادة الفعالة

(P9-A2) اختبار قدرة الامتصاص/الفعالية المبدئية

- المكان :مصنع الإضافة
- الهدف :إثبات أن الإضافة تعمل ضمن نطاق محدد

9.7.2: اختبارات مصنع الماسترباتش (Masterbatch Plant)

إذا كانت ضمن ماسترباتش:

(P9-MB1) اختبار الاستلام

- المكان :مصنع الماسترباتش
- يشمل :مطابقة دفعات + تكتل + رطوبة

(P9-MB2) اختبار التشتت داخل الحامل

- المكان :مصنع الماسترباتش

- الهدف :توزيع متجانس لأن التوزيع السيئ يعطي مناطق “جافة” وأخرى “رطبة”

(P9-MB3) اختبار الفلتر وارتفاع الضغط

- المكان :مصنع الماسترباتش
- الهدف :التأكد أن الإضافة لا تسبب تكتلات أو انسداد

- 9.7.3: اختبارات المصنع التحويلي (Converter / Recycling Plant)

(P9-C1) اختبار الرطوبة قبل التشغيل (Moisture Content)

- المكان :المصنع التحويلي
- الأجهزة : Moisture Analyzer / Loss on Drying
- الهدف :معرفة حجم المشكلة من البداية

(P9-C2) اختبار الفقاعات والسطح أثناء الإنتاج

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :تقييم فوري للنتيجة
- المعيار :انخفاض الفقاعات وتحسن السطح

(P9-C3) اختبار ثبات الضغط والعزم

- المكان :المصنع التحويلي
- الهدف :التأكد أن التشغيل أصبح أكثر استقرارًا

(P9-C4) اختبار الخواص الميكانيكية عند الحاجة

- المكان :المصنع التحويلي

- الهدف: التأكد أن العيوب الداخلية قلت وأن الخواص تحسنت

(P9-C5) اختبار المنتج بعد التخزين (إن لزم)

- المكان: المصنع التحويلي
- الهدف: التأكد أن العيوب لم تكن مؤقتة

- 9.7.4 اختبارات اعتماد خاصة (عند الحاجة)

في التطبيقات الحساسة (غذائي/طبي):

- وثائق مطابقة
- اختبارات هجرة
- والتحقق من عدم تأثير الإضافة على سلامة المنتج

- قرار الاعتماد النهائي لمزيلات الرطوبة

تُعتمد عندما تحقق:

- انخفاض الفقاعات والعيوب السطحية
- ثبات تشغيل أفضل
- تحسن خواص المنتج
- تكلفة منطقية
- دون أن تكون بديلاً عن التجفيف الحقيقي

وبذلك نفهم أن مزيلات الرطوبة هي أداة إنقاذ صناعي في بعض الحالات ان جاز التعبير، لكنها لا تعوض غياب نظام تجفيف وغسيل وفرز جيد.

الفصل الثامن الاختبارات ومكان كل اختبار

من مصنع الإضافة الى الماسترباتش/ التحضير التركيبي (Compounding) الى المصنع التحويلي مما يؤدي الى اعتماد المنتج النهائي

● 9.8.1 اختبارات مصنع إنتاج محسن الصدم (Additive Manufacturer Tests)

● 9.8.2 اختبارات مصنع التحضير التركيبي أو الماسترباتش (Compounding / Masterbatch Plant)

● 9.8.3 اختبارات المصنع التحويلي (Converter Tests)

● 9.8.4 اختبارات اعتماد المنتج النهائي حسب التطبيق

هدفها ضمان الثبات وليس الحكم على المنتج النهائي.

● 9.8.1 اختبارات مصنع إنتاج محسن الصدم (Additive Manufacturer Tests)

– (S1-A1) اختبار الهوية والتركيب

- المكان :مصنع الإضافة
- الأجهزة FTIR / DSC :حسب النظام
- الهدف :ثبات المادة بين الدفعات

– (S1-A2) اختبار الخواص الحرارية (Melting/Softening Range)

- المكان :مصنع الإضافة
- الأجهزة : DSC
- الهدف :معرفة سلوك الإضافة عند حرارة التشغيل

– (S1-A3) مؤشر التدفق/اللزوجة

- المكان :مصنع الإضافة
- الأجهزة MFI tester :
- الهدف :التأكد من ثبات قابلية المعالجة

– (II) اختبارات مصنع التحضير التركيبي أو الماسترباتش (Compounding / Masterbatch Plant)

هنا نثبت أن الإضافة توزعت وأن المنتج الوسيط قابل للتصنيع بثبات.

– (S1-MB1) اختبار الاستلام(Incoming QC)

- المكان :مصنع الماسترباتش/التحضير التركيبي (Compounding)
- يشمل :مطابقة دفعة + رطوبة + كتل + مظهر الحبيبات

– (S1-MB2) اختبار التجانس/التوزيع(Dispersion / Morphology Check)

- المكان :مصنع التحضير التركيبي (Compounding)
- الأجهزة Microscopy :أو فحص مقطع
- الهدف :التأكد أن الطور المرن موزع وليس كتلاً

– تحضير العينة:

إنتاج شريط أو لوح رقيق من التحضير التركيبي (Compounding) ثم فحصه بصرياً/ميكروسكوبياً.

– (S1-MB3) اختبار الثبات أثناء التشغيل(Melt Pressure / Torque)

- المكان :مصنع التحضير التركيبي (Compounding)
- الهدف :التأكد أن الإضافة لم تسبب عدم استقرار أو تذبذب

– (S1-MB4) اختبار الخواص الأساسية للكومباوند (MFI / Density) عند الحاجة)

- المكان :مصنع التحضير التركيبي (Compounding)
- الهدف :تثبيت مواصفة المنتج الوسيط قبل تسليمه

(III) اختبارات المصنع التحويلي (Converter Tests)

وهنا يتم الحكم الحقيقي: هل تحسنت المتانة بالفعل في المنتج النهائي؟

(S1-C1) اختبار الصدم القياسي (Impact Test)

- المكان :المصنع التحويلي أو مختبره
- الأجهزة Izod/Charpy: (حسب المنتج) أو Dart Drop للأفلام
- الهدف :قياس الطاقة التي يتحملها المنتج قبل الكسر

تحضير العينة:

- حقن عينات معيارية (Bars) من نفس الخلطة
- أو قص عينات من المنتج النهائي إذا سمح الشكل

قراءة النتائج: لا يكفي رقم واحد؛ يجب مقارنة:

- خامة بدون الإضافة
- خامة مع الإضافة بنسبة
- خامة مع الإضافة بنسبة
- لاختيار أفضل توازن.

(S1-C2) اختبار الشد والاستطالة (Tensile & Elongation)

- المكان :المصنع التحويلي
- الأجهزة : UTM

- الهدف: التأكد أن زيادة الصدم لم تضعف القوة أكثر من المقبول

(S1-C3) اختبار الصلابة/المرونة (Flexural Modulus / Stiffness)

- المكان: المصنع التحويلي
- الهدف: لأن بعض المصانع تتفاجأ أن المنتج صار “مرنًا أكثر من اللازم”

(S1-C4) اختبار الأداء عند الحرارة المنخفضة (Low-Temp Impact) عند الحاجة

- المكان: المصنع التحويلي أو مختبر خارجي
- الهدف: إذا كان المنتج يُستخدم في البرد أو التخزين البارد

(S1-C5) اختبار اللحام/الشقوق (للأفلام أو اللحامات)

- المكان: المصنع التحويلي
- الهدف: لأن بعض المنتجات تفشل عند خط اللحام لا في الجسم نفسه

(IV) اختبارات اعتماد المنتج النهائي (Application / Regulatory Tests) عند الحاجة

في التطبيقات الغذائية/الطبية/الدوائية قد يلزم:

- وثائق مطابقة
- هجرة للمنتج النهائي
- اختبارات سقوط أو تعبئة حسب التطبيق

- كيف نقرر قبول الإضافة

يُعتبر محسن الصدم ناجحاً إذا:

- رفع الصدم بشكل واضح ومكرر

- حافظ على الصلابة ضمن حدود المنتج
- لم يسبب مشاكل سطح/طباعة/لحام
- لم يخلق تدبذبا في التشغيل
- وكانت التكلفة مقابل الأداء مبررة

والفشل يحدث غالباً عندما:

- تكون الإضافة غير متوافقة أو توزيعها سيئ
- أو عندما تكون المشكلة أساساً في تصميم المنتج أو زواياه وليس في المادة
- أو عندما يحاول المصنع تعويض مشاكل شوائب/رطوبة بمحسن صدم

- اختبارات مواد التوافق ومكان كل اختبار

9.8.1 : اختبارات مصدر الإضافة (مصنع مواد التوافق)

هدفها ضمان ثبات المنتج وليس تقييم الخلطة النهائية.

(S2-A1) اختبار الهوية والتركيب

- المكان :مصنع الإضافة
- الأجهزة FTIR / DSC :
- الهدف :التأكد أن المادة هي نفس التركيبة في كل دفعة

(S2-A2) مؤشر التدفق (MFI) إن كانت بوليمرية

- المكان :مصنع الإضافة
- الأجهزة : MFI Tester
- الهدف :ثبات سلوك المعالجة

9.8.2: اختبارات مصنع التحضير التركيبي (Compounding) أو الماسترباتش (قبل وصولها للمصنع التحويلي)

هنا يتم التأكد من أن الإضافة امتزجت بشكل صحيح ولم تسبب مشاكل تصنيع.

(S2-MB1) اختبار الاستلام (Incoming QC)

- المكان: مصنع التحضير التركيبي (Compounding)
- يشمل: رطوبة + تكتل + مظهر الحبيبات + رقم الدفعة

(S2-MB2) اختبار التجانس البنيوي (Morphology / Dispersion)

- المكان: مصنع التحضير التركيبي (Compounding)
- الأجهزة : Microscopy أو فحص مقطع
- الهدف : رؤية هل الأطوار أصبحت أدق توزيعًا وأقل انفصالًا

تحضير العينة:

يتم إنتاج شريط/لوح من التحضير التركيبي (Compounding) ثم فحصه، أو حقن عينة صغيرة للفحص.

(S2-MB3) اختبار ثبات التشغيل (Melt Pressure / Torque)

- المكان: مصنع التحضير التركيبي (Compounding)
- الهدف: التأكد من عدم حدوث تذبذب غير طبيعي

(S2-MB4) اختبار مؤشر التدفق للخلطة (MFI)

- المكان: مصنع التحضير التركيبي (Compounding)
- الهدف: توثيق تأثير الإضافة على التدفق لضبط التشغيل لاحقًا

•

9.8.2 : اختبارات المصنع التحويلي (الحكم النهائي)

هنا يتم تقييم التحسن الحقيقي في المنتج النهائي.

(S2-C1) اختبار الشد والاستطالة (Tensile & Elongation)

- المكان : المصنع التحويلي
- الأجهزة : UTM
- الهدف : الاستطالة هي المؤشر الأوضح لنجاح التوافق في كثير من الخلطات

تحضير العينة:

- عينات حقن معيارية (Dog-bone)
- أو عينات مقصوفة من المنتج النهائي إن أمكن.

قراءة النتائج:

تحسن الاستطالة بشكل واضح = تحسن التوافق غالباً.

(S2-C2) اختبار الصدم (Impact)

- المكان : المصنع التحويلي
- الأجهزة : Izod / Charpy أو حسب المنتج
- الهدف : التأكد أن نقاط الضعف الداخلية قلت

(S2-C3) اختبار الانحناء/الصلابة (Flexural)

- المكان : المصنع التحويلي
- الهدف : مراقبة أي انخفاض كبير في الصلابة نتيجة الإضافة

(S2-C4) اختبار اللحام أو مناطق الضعف (للأفلام)

- المكان: مصنع الفيلم
- الهدف: لأن الخلطات غير المتوافقة غالبًا تفشل عند اللحام

(S2-C5) اختبار ثبات الخواص بين الدفعات

- المكان: المصنع التحويلي
- الهدف: لأن إعادة التدوير تتغير، وهدف التوافق هو تثبيت النتائج

9.8.4 : اختبارات اعتماد المنتج النهائي حسب التطبيق

قد تشمل:

- Drop Test
- اختبار تحمل تحميل متكرر
- اختبار استخدام فعلي حسب السوق

اتخاذ القرار الصناعي (Acceptance Criteria)

تُعتمد مادة التوافق عندما تحقق:

- تحسن واضح ومكرر في الاستطالة والصدم
- ثبات أعلى بين الدفعات
- عدم ظهور مشاكل تشغيل جديدة
- تكلفة مقبولة مقابل العائد

ويُرفض استخدامها أو تُستبدل عندما:

- لا يظهر تحسن ملموس

- أو تظهر آثار جانبية غير مقبولة
- أو تكون المشكلة أصلاً في الشوائب والرطوبة وليس في عدم التوافق

– أولاً اختبارات مصنع إنتاج الإضافة

اختبار الهوية والتركيب

المكان مصنع الإضافة

الهدف التأكد من ثبات المادة الفعالة وعدم وجود اختلاف بين الدفعات

طريقة الإجراء يتم التحقق من هوية المادة ومطابقة مواصفاتها الداخلية ومقارنتها بعينة مرجعية معتمدة

– اختبار الثبات الحراري عند الحاجة

المكان مصنع الإضافة

الهدف التأكد أن الإضافة تتحمل درجات حرارة التشغيل دون تحلل أو فقدان فعالية

طريقة الإجراء تعريض العينة لدرجات حرارة محددة ثم فحص أي تغير في اللون أو الرائحة أو الخواص الحرارية

الأساسية

– اختبار الذوبانية أو قابلية الامتزاج داخل البوليمر عند الحاجة

المكان مصنع الإضافة

الهدف التأكد أن الإضافة قابلة للتوزع داخل النظام الذي ستستخدم فيه

طريقة الإجراء اختبار اندماج الإضافة داخل حامل مناسب ومراقبة أي انفصال أو ترسب

– ثانياً اختبارات مصنع الماسترباتش

اختبار التشتت داخل الحامل

المكان مصنع الماسترباتش

الهدف التأكد أن الإضافة موزعة بشكل متجانس لأن عدم التجانس يعني حماية غير متساوية داخل المنتج

طريقة الإجراء تصنيع عينة ماسترباتش تجريبية ثم فحص التوزيع بصرياً وفحص نقاط وعدم انتظام داخل شريط

اختبار أو فيلم اختبار

– اختبار ثبات الإضافة أثناء التحبيب

المكان مصنع الماسترباتش

الهدف التأكد أن حرارة التحبيب وزمن المكوث لم يقللا فعالية الإضافة

طريقة الإجراء مقارنة عينة قبل التحبيب وبعده من حيث اللون والمظهر وقياس أي تغير غير طبيعي في خواص

المادة

– اختبار ثبات المنتج بين الدفعات

المكان مصنع الماسترباتش

الهدف التأكد أن الأداء ثابت وليس تحسناً مؤقتاً مرتبطاً بدفعة واحدة

طريقة الإجراء تكرار تصنيع عينات من دفعات مختلفة ومقارنة النتائج تحت نفس ظروف الاختبار

- ثالثا اختبارات المصنع التحويلي
- اختبار اللون والمظهر بعد التشغيل
- المكان المصنع التحويلي
- الهدف التأكد أن الإضافة لم تسبب تغير لون غير مرغوب أو انخفاض لمعان أو آثار سطحية
- طريقة الإجراء إنتاج عينات بنفس ظروف التشغيل ثم فحص اللون والمظهر ومقارنة العينة المرجعية بعينة تحتوي الإضافة
- اختبار الخواص الميكانيكية الأساسية عند الحاجة
- المكان المصنع التحويلي
- الهدف التأكد أن نظام التثبيت لم يؤثر سلبا على الخواص الأساسية
- طريقة الإجراء قياس الخواص الأساسية قبل التعرض ومقارنتها بعينة مرجعية
- اختبار التعرض المتسارع للضوء والطقس
- المكان مختبر داخلي أو جهة اختبار خارجية
- الهدف محاكاة التعرض الطويل خلال زمن قصير لتقييم ثبات اللون والخواص
- طريقة الإجراء تعريض العينات لدورات ضوء وحرارة ورطوبة وفق برنامج محدد ثم قياس التغير في اللون والمظهر والخواص
- اختبار التغير اللوني
- المكان مختبر الجودة أو المختبر الخارجي
- الهدف قياس مقدار تغير اللون بعد التعرض بدقة
- طريقة الإجراء قياس اللون قبل التعرض وبعده بجهاز قياس اللون وتحديد مقدار التغير ضمن حدود قبول محددة
- اختبار التشقق والتقصف بعد التعرض
- المكان المصنع التحويلي أو المختبر
- الهدف التأكد أن المنتج لم يفقد مرونته ولم تظهر تشققات ميكروية
- طريقة الإجراء فحص سطحي للعينة بعد التعرض ثم إجراء ثني أو إجهاد بسيط ومراقبة ظهور كسر أو تشقق
- رابعا اختبارات اعتماد خاصة عند الحاجة
- في التطبيقات الحساسة أو ذات عمر طويل
- المكان جهة اختبار متخصصة
- الهدف تأكيد الأداء ضمن معايير سوقية أو اشتراطات عميل
- طريقة الإجراء اعتماد برنامج تقادم معتمد وإصدار تقرير رسمي
- جدول مرجعي لاختبارات مثبتات الضوء والطقس
- الاختبار مكانه الهدف القرار
- هوية المادة مصنع الإضافة ثبات المادة الفعالة قبول عند التوافق
- ثبات حراري مصنع الإضافة تحمل حرارة التشغيل قبول عند عدم التحلل

تشنت داخل الحامل مصنع الماسترباتش تجانس الحماية قبول عند تجانس واضح
ثبات أثناء التحبيب مصنع الماسترباتش عدم فقد الفعالية قبول عند ثبات السلوك
مظهر بعد التشغيل المصنع التحويلي عدم آثار جانبية قبول عند ثبات اللون والسطح
تعرض متسارع مختبر محاكاة العمر الخارجي قبول عند تحسن واضح
تغير لوني مختبر قياس التغير بدقة قبول ضمن الحدود
تقص وتشق بعد التعرض مصنع أو مختبر منع الفشل الميكانيكي قبول عند عدم ظهور تشقق

– حدود الاستخدام الصناعي

لا توجد جرة واحدة مناسبة لكل المنتجات لأن شدة التعرض وسماكة المنتج ونوع اللون وطبيعة البوليمر تختلف.
لذلك لا يتم اعتماد الجرة بناء على توصية عامة فقط بل عبر اختبار متدرج يبدأ بجرة مرجعية ثم يتم رفعها أو
خفضها بناء على نتائج التعرض المتسارع وعلى متطلبات السوق.

– أخطاء صناعية شائعة في مثبتات الضوء والطقس

الاعتماد على خام جيد دون نظام تثبيت
اختيار الإضافة بناء على السعر فقط
عدم اختبار التعرض المتسارع والاكتفاء بالمظهر عند الإنتاج
تغيير المورد دون مقارنة بين الدفعات
اعتبار ثبات اللون وحده كافي وإهمال الخواص الميكانيكية
عدم مراقبة التشنت داخل الماسترباتش مما يؤدي إلى حماية غير متجانسة

– القرار النهائي لاعتماد مثبتات الضوء والطقس

يتم اعتماد نظام التثبيت الضوئي عندما يحقق

– تغير لوني أقل بعد التعرض

سطح أكثر ثباتاً دون طباشيرية أو تشقق
احتفاظ أعلى بالخواص بعد التعرض
ثبات جودة بين الدفعات

عدم ظهور آثار جانبية تشغيلية أو بصرية غير مقبولة

– اختبارات سلامة الوظيفة والمناطق الحرجة

لا تفشل معظم المنتجات البوليمرية في كتلتها الرئيسية، بل تفشل في مناطق محددة تمثل نقاط ضعف وظيفية أو
هندسية. هذه المناطق قد تكون لحاماً، أو خط التقاء طبقات، أو منطقة قص، أو زاوية حادة، أو منطقة تعرضت لإجهاد
حراري مختلف أثناء التصنيع. لذلك فإن الحكم على جودة المادة أو التركيب من خلال الخواص العامة فقط يعد حكماً
ناقصاً إذا لم يستكمل بتقييم هذه المناطق الحرجة.

الهدف من هذا القسم هو التأكد أن المادة أو الخلطة التي أظهرت أداء جيدا في الاختبارات العامة لا تخفي ضعفا موضعيا يؤدي إلى فشل فعلي أثناء الاستخدام. هذه الاختبارات تعد اختبارات وظيفية بامتياز، لأنها تقيس سلوك المنتج كما يستخدم فعلا، لا كما يقاس في المختبر.

اختبار اللحام والشرح في الأفلام واللحامات

يطبق هذا الاختبار بشكل رئيسي في منتجات الأفلام المرنة، الأكياس، العبوات الملحومة حراريا، وكذلك في أي منتج يعتمد على اللحام طبقتين أو جزأين لتأدية وظيفته النهائية. اللحام هنا لا يعد مجرد وسيلة تجميع، بل جزءا أساسيا من بنية المنتج وتحمله للأحمال.

يجرى الاختبار في المصنع التحويلي أو مختبره، لأن ظروف اللحام نفسها جزء من نتيجة الاختبار. لا يمكن الحكم على لحام ماستريباتش أو مادة خام دون تنفيذ عملية لحام فعلية تحت شروط تشغيل تمثل الواقع الصناعي.

الأدوات المستخدمة تشمل معدات اللحام الحراري المستخدمة في الإنتاج، وأجهزة اختبار الشد أو التقشير عند الحاجة، إضافة إلى أدوات فحص بصري وعدسات مكبرة لتقييم منطقة اللحام.

تحضير العينة يبدأ بإنتاج لحامات تحت ظروف تشغيل ثابتة ومعلومة من حيث درجة الحرارة، الضغط، وزمن التلامس. من الضروري توثيق هذه الشروط، لأن تغييرها البسيط قد يحسن أو يسيء نتيجة اللحام دون أن يكون للمادة نفسها دور في ذلك.

بعد التحضير، يتم تقييم اللحام من جانبين. الجانب الأول بصري، حيث يفحص انتظام خط اللحام، غياب الفراغات، وعدم وجود مناطق محترقة أو ضعيفة. الجانب الثاني ميكانيكي، حيث يتم إخضاع منطقة اللحام لإجهاد شد أو تقشير لمعرفة أين يحدث الفشل.

النتيجة السليمة هي أن يحدث الفشل في جسم المادة خارج منطقة اللحام، وليس داخلها. هذا يدل على أن اللحام أقوى أو على الأقل مساو لقوة المادة نفسها. أما إذا حدث الفشل داخل خط اللحام، أو على حدوده مباشرة، فهذا يشير إلى ضعف وظيفي قد يكون ناتجا عن سوء توزيع، أو تلوث سطحي، أو تأثير سلبي لإضافة ما.

الشرح في اللحامات يعد ظاهرة خطيرة لأنه غالبا لا يظهر مباشرة بعد الإنتاج، بل بعد فترة استخدام أو تعرض لإجهاد متكرر. لذلك يجب فحص اللحام ليس فقط بعد الإنتاج مباشرة، بل أيضا بعد ثني أو شد متكرر بسيط يحاكي ظروف الاستخدام.

من المهم الربط بين نتائج هذا الاختبار ونتائج اختبارات التوزيع والخواص الميكانيكية. توزيع سيئ أو بنية غير متجانسة غالبا ما يظهر أثره بوضوح في منطقة اللحام، لأنها منطقة إعادة انصهار وتماسك حساسة لأي خلل.

من الأخطاء الشائعة اعتبار تحسن الصدم أو الشد كافيا لضمان جودة اللحم، في حين أن بعض الإضافات تحسن المتانة العامة لكنها تضعف قابلية اللحم أو تخلق طبقة فاصلة دقيقة تؤدي إلى فشل موضعي.

اختبارات الاستقرار مع الزمن والتخزين

الاختبارات التي تجرى مباشرة بعد الإنتاج تعطي صورة لحظية عن سلوك المادة، لكنها لا تكشف بالضرورة عن مصير المنتج بعد خروجه من خط التصنيع. كثير من المواد تبدو مستقرة ومقبولة عند الفحص الأولي، ثم تبدأ في إظهار عيوب بعد أيام أو أسابيع أو أشهر من التخزين. لهذا السبب يعد الاستقرار مع الزمن أحد أكثر المحاور إهمالا في التقييم الصناعي، رغم أنه من أكثرها ارتباطا بالفشل الحقيقي في السوق.

اختبارات التخزين لا تهدف إلى إثبات أن المنتج لم يتغير، بل إلى فهم كيف ولماذا يتغير، وهل هذا التغير يقع ضمن حدود مقبولة وظيفيا وتسويقيا وصحيا أم لا. وهي اختبارات كاشفة للفشل المتأخر الذي لا يظهر في اختبارات التشغيل أو الخواص الميكانيكية المباشرة.

اختبار المنتج بعد التخزين

يطبق هذا الاختبار على المنتج النهائي أو على عينة تمثل المنتج النهائي تمثيلا صادقا، وليس على المادة الخام فقط. الهدف هو محاكاة ما يحدث للمنتج خلال فترة وجوده في المخازن أو أثناء النقل أو قبل وصوله إلى المستخدم النهائي. يجرى الاختبار في المصنع التحويلي أو مختبر الجودة، لأن ظروف التخزين نفسها جزء من نتيجة الاختبار. لا يمكن فصل المادة عن بيئتها، فالرطوبة ودرجة الحرارة ونوع التغليف وزمن التخزين كلها عوامل مؤثرة.

الأدوات المستخدمة في هذا الاختبار بسيطة في ظاهرها لكنها حساسة في نتائجها. تشمل وحدات تخزين مضبوطة أو بيئات تخزين واقعية، أدوات فحص بصري، أجهزة قياس الخواص الميكانيكية عند الحاجة، وأحيانا أدوات تقييم الرائحة أو السطح أو اللون حسب نوع المنتج.

تحضير العينة يبدأ باختيار عينات ممثلة للإنتاج الفعلي، مع توثيق تاريخ الإنتاج وظروف التشغيل. من المهم عدم اختيار عينات مثالية فقط، بل عينات عادية تمثل المتوسط الحقيقي للدفعة. توضع العينات في ظروف تخزين محددة، قد تكون ظروفًا قياسية أو ظروفًا متسارعة حسب الهدف من الاختبار.

خلال فترة التخزين، لا يكتفى بإجراء فحص واحد في النهاية، بل يفضل إجراء فحوص دورية لرصد تطور أي تغير تدريجي. التغيرات التي تحدث ببطء قد تكون أكثر خطورة من التغيرات المفاجئة، لأنها تمر دون ملاحظة حتى يصل المنتج إلى السوق.

العناصر التي تراقب أثناء هذا الاختبار تشمل المظهر العام، ظهور تشقق أو تقصف، تغير اللون، انفصال سطحي، عودة الرائحة، أو تغير في الخواص الميكانيكية. كل عنصر من هذه العناصر يشير إلى آلية تدهور مختلفة، مثل تحلل أكسدي، هجرة إضافات، فقدان رطوبة أو امتصاصها، أو إعادة ترتيب بنيوي داخل المادة.

تفسير النتائج يجب أن يتم بحذر. ليس كل تغير دليلاً على فشل، فبعض المواد تتغير بشكل طبيعي مع الزمن دون أن يؤثر ذلك على وظيفتها. المهم هو تحديد ما إذا كان التغير يؤثر على أداء المنتج في الاستخدام الفعلي، أو على قبوله من قبل السوق.

من الأخطاء الشائعة اعتبار نجاح المادة في اختبارات اليوم الأول دليلاً كافياً على نجاحها التجاري، أو الاكتفاء بتجربة تخزين قصيرة لا تعكس الواقع. كما أن بعض المصانع تتجاهل هذا الاختبار تماماً بسبب ضيق الوقت، ثم تفاجأ بشكاوى العملاء بعد فترة.

القيمة الحقيقية لهذا الاختبار تكمن في كونه اختباراً وقائياً، يسمح بتصحيح المسار قبل وصول المنتج إلى المستخدم النهائي. كما أنه يساعد على مقارنة التركيبات المختلفة ليس فقط من حيث الأداء الفوري، بل من حيث الاستدامة مع الزمن.

– خلاصة هذا القسم

اختبارات الاستقرار مع الزمن والتخزين تمثل المرحلة الأخيرة في رحلة التقييم، لكنها ليست الأقل أهمية. نجاح المنتج في هذه المرحلة يعني أن كل ما قبله من تركيب وتشغيل وتوزيع قد أدى وظيفته بشكل متكامل. الفشل هنا لا يعني بالضرورة أن المادة سيئة، بل يعني أن هناك عاملاً لم يؤخذ في الحسبان عند التقييم الأولي.

بهذا القسم يكتمل تسلسل الاختبارات من المصهور أثناء التشغيل، إلى البنية الداخلية، إلى الخواص الميكانيكية، إلى سلامة الوظيفة، وصولاً إلى الاستقرار مع الزمن. هذا التسلسل هو ما يحول الاختبارات من أرقام متفرقة إلى منظومة فهم صناعي متكاملة.

– منهج اتخاذ قرار الاعتماد الصناعي من نتائج الاختبارات إلى قرار مسؤول :

الاختبارات في ذاتها لا تنتج قراراً، بل تنتج معرفة. القرار الصناعي لا يصدر من رقم واحد ولا من اختبار منفرد، بل من قراءة منهجية متكاملة لسلوك المادة عبر الزمن، وعبر الماكينة، وعبر المنتج النهائي. لهذا السبب فإن الفصل الختامي لا يعيد شرح الاختبارات، بل يضع إطاراً فكرياً لكيفية تحويل نتائجها إلى قرار اعتماد مسؤول.

قرار الاعتماد ليس لحظة، بل عملية. وهو لا يعني فقط قبول مادة أو رفضها، بل تحديد كيف تستخدم، وبأي حدود، وفي أي تطبيق، وتحت أي شروط تشغيل. كثير من المواد تفشل لأن قرار اعتمادها اتخذ بطريقة مبسطة، لا لأنها غير صالحة بطبيعتها.

- القاعدة الأساسية في اتخاذ القرار

لا يجوز اتخاذ قرار اعتماد صناعي اعتمادا على اختبار واحد، مهما كانت أهميته.
ولا يجوز تجاهل اختبار فشل فقط لأن بقية الاختبارات نجحت.

المنهج الصحيح يقوم على مبدأ التوازن بين خمسة محاور، كل محور يمثل بعدا مختلفا من سلوك المادة:

- سلوك المصهور أثناء التشغيل

- البنية الداخلية والتوزيع

- الخواص الميكانيكية وتوازنها

- سلامة الوظيفة والمناطق الحرجة

- الاستقرار مع الزمن والتخزين

كل محور يجيب عن سؤال مختلف، وغياب الإجابة عن أي سؤال منها يجعل القرار ناقصا.

- المرحلة الأولى من القرار القبول التشغيلي

هذه المرحلة تجيب عن سؤال بسيط لكنه حاسم:

هل يمكن تشغيل المادة بثبات دون خلق مشاكل تشغيلية غير مقبولة؟

إذا فشلت المادة في اختبارات استقرار التشغيل وسلوك المصهور، فلا معنى للانتقال إلى مراحل لاحقة. مادة غير مستقرة تشغيليا قد تعطي نتائج جيدة في عينات محدودة، لكنها ستفشل عند الإنتاج المستمر.

القبول التشغيلي لا يعني أن المادة ممتازة، بل يعني أنها صالحة للدخول إلى مراحل تقييم أعمق.

- المرحلة الثانية من القرار الفهم البنيوي

بعد إثبات القابلية التشغيلية، يجب فهم لماذا تتصرف المادة كما تتصرف. هنا يأتي دور اختبارات البنية الداخلية والتوزيع.

التوزيع الجيد لا يضمن النجاح وحده، لكنه شرط أساسي للاستقرار طويل الأمد. توزيع سيئ مع نتائج ميكانيكية جيدة مؤقتا يعد إنذارا مبكرا لفشل متأخر.

في هذه المرحلة لا يصدر قرار قبول أو رفض نهائي، بل قرار فهم. أي خلل بنيوي يجب تفسيره وربطه ببقية النتائج قبل الاستمرار.

المرحلة الثالثة من القرار الملاءمة الميكانيكية

الخواص الميكانيكية لا تقاس بهدف الوصول إلى أعلى قيمة، بل بهدف الوصول إلى التوازن المناسب للتطبيق. المادة المقبولة ميكانيكيا ليست الأقوى ولا الأكثر مرونة، بل الأكثر ملاءمة لوظيفتها.

في هذه المرحلة يطرح السؤال:

هل تحقق المادة المتطلبات الميكانيكية للتطبيق دون خلق ضعف جديد؟

القرار هنا يكون غالبا قرار تقييد، أي قبول المادة ضمن حدود معينة من السماكة أو الشكل أو ظروف الاستخدام، وليس قبولا مطلقا.

المرحلة الرابعة من القرار سلامة الوظيفة

حتى لو نجحت المادة في كل ما سبق، فإن فشلها في مناطق حرجية مثل اللحام أو نقاط الإجهاد يلغي كل النتائج السابقة. المنتج لا يستخدم في المختبر، بل في الواقع، والواقع يكشف نقاط الضعف الوظيفية قبل أي شيء آخر.

القرار في هذه المرحلة يكون حاسما. فشل وظيفي يعني إما تعديل التركيبة أو تغيير التطبيق أو رفض المادة لهذا الاستخدام تحديدا.

المرحلة الخامسة من القرار الاستدامة مع الزمن

المنتج الذي لا يحافظ على أدائه مع الزمن هو منتج غير معتمد، مهما بدا ناجحا في اليوم الأول. الاستقرار مع الزمن ليس رفاهية، بل جزء من المسؤولية الصناعية تجاه العميل والسوق.

القرار هنا لا يكون فقط قبول أو رفض، بل تحديد عمر المنتج المتوقع، وشروط التخزين، وحدود الاستخدام الآمن.

أنواع قرارات الاعتماد

بناء على قراءة المحاور الخمسة، يمكن أن يصدر القرار بأحد الأشكال التالية:

- اعتماد كامل للتطبيق المحدد
- اعتماد مشروط بقيود تشغيل أو استخدام
- اعتماد تجريبي لفترة زمنية محددة
- رفض للتطبيق مع توصية باستخدام بديل
- رفض مؤقت لحين تعديل التركيبة أو العملية

أخطر قرار هو القبول غير المشروط دون فهم الحدود، لأنه ينقل المخاطر من المصنع إلى السوق.

- الأخطاء الشائعة في اتخاذ القرار

- الاعتماد على اختبار واحد مشهور وإهمال البقية
 - تجاهل نتائج التخزين بحجة ضغط الوقت
 - الخلط بين نجاح تشغيلي ونجاح وظيفي
 - تفسير الأرقام دون فهم بنيتها
 - نقل قرار الاعتماد من المختبر إلى الإنتاج دون مراجعة
- هذه الأخطاء لا تؤدي فقط إلى فشل تقني، بل إلى فشل تجاري وسمعي.

الهندسة الصناعية للبوليمرات الحرارية

بعد أن تناولنا في الأجزاء السابقة رحلة البوليمر من المصدر الطبيعي إلى مرحلة البلمرة، ثم ناقشنا خصائصه الأساسية وسلوكه الجزيئي وتأثير الإضافات عليه، ننتقل في هذا الجزء إلى المرحلة التي تتحول فيها المعرفة النظرية إلى ممارسة صناعية فعلية.

فالبوليمر، مهما بلغت دقة تصميمه على مستوى البنية الجزيئية، لا يقاس نجاحه الحقيقي إلا عندما يدخل بيئة تشغيل واقعية: حرارة، قص، ضغط، زمن، وتبريد. عند هذه النقطة تبدأ مرحلة مختلفة تماماً من التحديات، حيث تتفاعل خصائص المادة مع تصميم الآلة، ومع نظام التغذية، ومع شروط التشغيل، لتنتج منتجاً مستقراً... أو مشكلة تشغيلية معقدة.

يركز هذا الجزء على عمليات تشكيل البوليمرات الحرارية (Thermoplastics Processing)، وهي

العمليات التي تعتمد على صهر المادة وإعادة تشكيلها دون تغيير بنيتها الكيميائية الأساسية. ويشمل ذلك

compounding كمرحلة لإعادة التصميم الصناعي للبوليمر، ثم عمليات التحويل المختلفة مثل الحقن والبتق والنفخ وتصنيع الأفلام والتشكيل الحراري وغيرها.

وطرحنا هنا ليس عرضا نظريا للآلات، ولا دليل تشغيل مبسط، بل تحليل صناعي عميق يربط بين:

سلوك السلاسل الجزيئية تحت تأثير القص والحرارة

هندسة البراغي والقوالب وأنظمة التغذية

المتغيرات الحرجة داخل خط الإنتاج

والأعطال التشغيلية وأسبابها الفيزيائية

وسيعالج كل نظام تصنيعي من زاويتين متلازميتين:

زاوية تشغيلية عملية تشرح ما يحدث داخل المصنع، وزاوية هندسية تفسر لماذا يحدث ذلك على مستوى المادة.

كما سيتم تناول أنظمة التشكيل متعددة الطبقات (Multilayer Systems) ضمن كل عملية في موضعها الطبيعي، مع التركيز على تصميم الـ Die وتوزيع الطبقات والتحكم في التوافق والانكماش، من منظور صناعي تطبيقي.

هذا الجزء يمثل قلب الكتاب من الناحية الصناعية، إذ ينتقل بالقارئ من فهم البوليمر كمادة، إلى التعامل معه كنظام ديناميكي داخل آلة إنتاج حقيقية.

الباب العاشر

الشكل التجاري للبوليمر وعلاقته بأنظمة التغذية

- مقدمة :

لا يدخل البوليمر إلى خطوط الإنتاج بوصفه مادة كيميائية مجردة، بل يصل في صورة فيزيائية محددة تصمم صناعيا لتناسب أنظمة النقل والتغذية والتشغيل. وهذه الصورة لا تختار بشكل عشوائي، بل تمثل جزءا من هندسة العملية نفسها، لأن سلوك المادة داخل الآلة يتأثر مباشرة بشكلها الفيزيائي قبل الانصهار، من حيث الكثافة الظاهرية، وقابلية الانسياب، وانتظام التغذية، واحتجاز الهواء، واستقرار معدل التدفق.

ولهذا السبب، فإن فهم الشكل التجاري للبوليمر ليس مسألة لوجستية أو شكلية، بل خطوة أساسية في تفسير استقرار العملية الإنتاجية. فكثير من مشاكل التشغيل التي تنسب ظاهريا إلى الآلة أو إعداداتها يكون مصدرها الحقيقي طريقة دخول المادة إلى البرغي أو القالب أو نظام القياس.

ولا تتعامل معدات التشكيل مع نوع البوليمر بقدر ما تتعامل مع خصائصه الفيزيائية المرتبطة بالتغذية، ولهذا صممت بعض الأنظمة لتعمل بكفاءة مع الحبيبات، بينما تصمم أنظمة أخرى لاستقبال المساحيق أو الخلطات الخاصة. ويؤدي استخدام شكل غير مناسب من المادة في نظام غير مهيا له إلى اضطراب في التغذية، وتذبذب في العزم، واختلال في الانصهار، حتى لو كانت المادة صحيحة كيميائيا.

- 1.10 الفصل الأول الحبيبات – الشكل القياسي للصناعة الحرارية

تعد الحبيبات الشكل الفيزيائي القياسي لتوريد معظم البوليمرات الحرارية المستخدمة في عمليات التحويل الصناعي، وليس ذلك لمجرد سهولة النقل أو التخزين، بل لأن هذا الشكل يحقق توازنا تشغيليا دقيقا بين متطلبات التغذية والانصهار والاستقرار داخل الآلة.

تتميز الحبيبات بكثافة ظاهرية شبه ثابتة، وزاوية انسياب منتظمة، ومقاومة منخفضة لتكوين الجسور داخل القادوس، وهي خصائص تجعل تدفقها نحو البرغي أو وحدة القياس قابلا للتنبؤ والتحكم. هذا الانتظام في التغذية ينعكس مباشرة على استقرار معدل القص، وثبات العزم، وانتظام درجة حرارة المصهور، وهي عوامل أساسية للحصول على عملية مستقرة ومنتج متجانس.

كما أن الشكل الحبيبي يقلل من احتجاز الهواء بين الجسيمات مقارنة بالمساحيق أو الرقائق، مما يحسن من كفاءة الانصهار ويقلل من احتمالية تكون الفقاعات أو عدم التجانس في المصهور. ولهذا صممت معظم البراغي القياسية في آلات الحقن والبتق بحيث تعتمد في منطقة التغذية على خصائص تدفق الحبيبات تحديداً، من حيث معامل الاحتكاك، ونسبة الانضغاط، وسلوك الانزلاق على جدار الأسطوانة.

ومع ذلك، فإن استخدام الحبيبات لا يضمن تلقائياً استقرار العملية، إذ قد تظهر مشاكل تشغيلية إذا لم تكن خصائصها الفيزيائية متجانسة. فاختلاف أحجام الحبيبات أو أشكالها، أو وجود نسبة من الحبيبات المكسورة، قد يؤدي إلى عدم انتظام التغذية أو إلى انفصال مكونات الخلطة عند استخدام الماسترباتش أو المواد المضافة، وهو ما ينعكس في صورة تذبذب في اللون أو الخواص أو العزم أثناء التشغيل. ومن هنا يتضح أن الحبيبات ليست مجرد شكل مريح للتداول، بل عنصر هندسي مؤثر في سلوك العملية، وأن تصميم هذا الشكل تم عبر خبرة صناعية بهدف تحقيق أعلى استقرار ممكن أثناء التشغيل.

الفصل الثاني

2.10 المساحيق – متى تكون الخيار الصحيح؟

على الرغم من أن الحبيبات تمثل الشكل القياسي لمعظم البوليمرات الحرارية، فإن بعض المواد تورد صناعياً في صورة مسحوق، ليس كخيار ثانوي، بل لأن هذا الشكل يحقق متطلبات تشغيلية لا يمكن الوصول إليها بالحبيبات. ويظهر ذلك بوضوح في مواد مثل PVC وبعض مركبات الـ Rotomoulding، حيث يعتمد نجاح العملية أساساً على خصائص الانسياب والالتحام الحراري للجسيمات الدقيقة.

تتميز المساحيق بمساحة سطحية عالية مقارنة بالحبيبات، وهو ما يجعل انتقال الحرارة إليها أسرع ويعزز من سرعة تليينها أو تماسكها عند التسخين. وهذه الخاصية مطلوبة في العمليات التي لا تعتمد على صهر كامل داخل برغي ضاغط، بل على التحام تدريجي للجزيئات تحت تأثير الحرارة والضغط أو الدوران. ولهذا السبب تستخدم المساحيق في تطبيقات يكون فيها التحكم في توزيع المادة داخل القالب أو القشرة أهم من سرعة الانصهار.

لكن هذا الشكل الفيزيائي يحمل تحديات تشغيلية خاصة، لأن سلوك المساحيق داخل أنظمة التغذية يختلف جذرياً عن سلوك الحبيبات. فهي أكثر عرضة لتكوين الجسور داخل القادوس، وأكثر حساسية للرطوبة، وقد تحتجز الهواء بين الجزيئات، مما يؤدي إلى عدم انتظام التغذية أو إلى تذبذب الكثافة الحجمية الداخلة إلى البرغي. كما أن انخفاض الكثافة الظاهرية قد يسبب تفاوتاً في معدل السحب إذا لم يكن نظام التغذية مصمماً خصيصاً للتعامل مع هذا النوع من المواد.

ومن المخاطر الصناعية المرتبطة بالمساحيق أيضا قابلية تكون سحب غبارية قابلة للاشتعال في ظروف معينة، وهو عامل لا يرتبط بخصائص البوليمر الكيميائية بقدر ما يرتبط بحجم الجسيمات وطبيعة المناولة. ولهذا تجهز خطوط إنتاج المساحيق عادة بأنظمة تحكم في الغبار وتهوية مناسبة، إضافة إلى تصميمات قوادر وزوايا تفرغ تمنع الانضغاط أو الانحباس.

بناء على ذلك، فإن استخدام المسحوق في نظام مصمم أساسا للحبيبات لا يعد مجرد اختلاف في شكل المادة، بل تغييرا في سلوك التغذية بالكامل، وقد يؤدي إلى عدم استقرار العملية حتى لو كانت المادة صحيحة من حيث التركيب. ولهذا تصمم المعدات المخصصة للمساحيق عادة بآليات تغذية مختلفة، مثل أنظمة القياس الوزني أو اللولبي، لضمان دخول المادة بمعدل منتظم ومستقر.

يتضح من ذلك أن المسحوق ليس بديلا للحبيبات، بل خيار صناعي له بيئة تشغيل مناسبة، ويعتمد نجاحه على توافق شكل المادة مع تصميم نظام التغذية.

3.10 الفصل الثالث أنظمة التخزين الصناعية للبوليمرات

لا يهدف التخزين الصناعي إلى حفظ المادة فقط، بل إلى الحفاظ على ثبات خصائصها الفيزيائية منذ لحظة استلامها وحتى لحظة تغذيتها في خط الإنتاج. فالتغير الذي يحدث للمادة في هذه المرحلة لا يكون تغيرا كيميائيا، بل تغيرا في حالتها الحرارية أو في محتواها الرطوبي أو في تجانسها الحبيبي، وهي عوامل كافية لإحداث اضطراب واضح في استقرار العملية لاحقا.

ولهذا فإن تصميم نظام التخزين لا يبنى على السعة فقط، بل على قدرته على عزل المادة عن المتغيرات البيئية ومنع حدوث:

- التكاثر
- التلوث
- الانفصال الحبيبي
- الانضغاط

3.1.10- الصوامع (Silos)

تستخدم الصوامع في المصانع ذات الاستهلاك المرتفع، وهي تمثل أكثر أنظمة التخزين استقرارا عندما تصمم بطريقة صحيحة. فهي تقلل المناولة، وتحد من تعرض المادة للهواء المحيط، وتوفر تغذية مستمرة للخطوط.

لكن نجاحها يعتمد على مجموعة عناصر تصميمية:

- العزل الحراري لمنع فرق درجات الحرارة الذي يؤدي إلى تكاثف الرطوبة داخل الصومعة
- زاوية القاع بحيث تضمن التدفق الكتلي (Mass Flow) وتمنع بقاء المادة لفترات طويلة
- تنفيس الهواء بطريقة تمنع دخول الرطوبة أثناء التفريغ أو التعبئة
- تجنب الأسطح الداخلية الخشنة التي قد تسبب تراكم المادة

فالصومعة غير المعزولة في بيئة ذات تذبذب حراري يومي قد تتحول إلى مصدر رطوبة للمادة حتى لو كانت المادة جافة عند الاستلام.

- 3.2.10 التخزين داخل المستودعات (Indoor Storage)

يستخدم مع الأكياس أو الحاويات الصندوقية، ويعتمد نجاحه على التحكم في بيئة المكان أكثر من شكل التخزين نفسه.

- العوامل الحاسمة هنا:

- ثبات درجة الحرارة
- انخفاض الرطوبة النسبية
- منع التخزين المباشر على الأرض
- تقليل زمن التخزين

فالمادة المخزنة في مستودع غير مكف قد تمر بدورات حرارية يومية تؤدي إلى تكاثف داخلي داخل الأكياس، وهو ما لا يظهر ظاهرياً لكنه يظهر لاحقاً أثناء التشغيل.

- 3.2.10 محطات التخزين الوسيطة (Day Bins / Machine Hoppers)

وهي المرحلة الأقرب إلى الآلة، وخطورتها أنها غالباً تهمل رغم تأثيرها المباشر على استقرار التغذية.

إذا لم تكن هذه الخزانات:

- مغلقة
- معزولة
- مهياة لمنع امتصاص الرطوبة

فإن المادة التي تم تجفيفها أو حفظها جيدا قد تعود وتفقد استقرارها قبل دخولها مباشرة إلى البرغي.

مبدأ التدفق داخل أنظمة التخزين

لا يكفي أن تنزل المادة من الخزان، بل يجب أن تنزل بطريقة منتظمة.
وهنا يظهر الفرق بين:

التدفق الكتلي (Mass Flow)

تنزل كل المادة بنفس المعدل فتؤدي الى تجانس زمني في التشغيل

التدفق القمعي (Funnel Flow)

- تنزل المادة من المنتصف فقط
- بقاء مادة قديمة على الجوانب
- اختلاف زمن الإقامة
- تذبذب في الخواص أثناء التشغيل

وهذا أحد الأسباب غير المرئية لعدم استقرار اللون أو اللزوجة في بعض الخطوط

الخلاصة التشغيلية

نظام التخزين هو أول نقطة يبدأ عندها فقدان استقرار العملية أو الحفاظ عليه.
فإذا تغيرت درجة حرارة المادة، أو امتصت رطوبة، أو فقدت تجانسها قبل الوصول إلى وحدة التغذية، فإن أي ضبط لاحق للآلة سيكون محاولة لتعويض خلل حدث خارجها.

- 4.10 التخزين والمناولة الصناعية للبوليمرات

لا تبدأ استقرارية عملية التشكيل عند ضبط درجات حرارة الأسطوانة أو سرعة البرغي، بل تبدأ قبل ذلك بكثير، منذ لحظة استلام المادة وتخزينها ثم نقلها إلى نقطة التغذية. ففي هذه المرحلة قد تتغير الخصائص الفيزيائية للمادة — دون أي تغير في تركيبها الكيميائي — وهو ما يكفي لإحداث اضطراب واضح في التغذية والانصهار واستقرار المصهور.

وتزداد حساسية هذه المرحلة عندما لا يتم التعامل مع البوليمر الخام فقط، بل مع خلطات تشغيلية جاهزة تحتوي على عدة مكونات تختلف في خواصها الفيزيائية. عندها لا يعود الهدف مجرد حفظ المادة، بل الحفاظ على تجانس نظام جسيمي متعدد المكونات حتى لحظة دخوله إلى البرغي.

- أولاً: أشكال توريد البوليمرات وعلاقتها بالمناولة

يصل البوليمر إلى المصنع في صور تعبئة مختلفة مثل الأكياس الصغيرة أو الأكياس الضخمة أو الحاويات الصندوقية أو التوريد السائب.

هذا الشكل لا يحدد طريقة التخزين داخل المصنع، لكنه يحدد:

- عدد مرات المناولة
- احتمالية تعرض المادة للهواء
- احتمالية التلوث
- استقرار حالتها الفيزيائية

فكلما زادت مراحل التفريغ والنقل اليدوي، زادت احتمالية إدخال متغيرات تؤثر لاحقاً على استقرار العملية.

- ثانياً: أنظمة التخزين الصناعية

الهدف الحقيقي من التخزين ليس تجميع المادة، بل الحفاظ على ثبات:

- درجة حرارتها
- محتواها الرطوبي
- توزيعها الحبيبي

— تجانسها

-الصوامع :

توفر أعلى درجات العزل وتقليل المناولة، لكن نجاحها يعتمد على:

- منع التكاثر الناتج عن فرق درجات الحرارة
- تحقيق التدفق الكتلي وليس القمعي
- التحكم في الهواء الداخل أثناء التعبئة والتفريغ

فالصومعة غير المعزولة قد تتحول إلى مصدر رطوبة حتى لو كانت المادة جافة عند الاستلام.

- التخزين داخل المستودعات:

يستخدم مع الأكياس أو الحاويات، ويعتمد نجاحه على ثبات الظروف المحيطة.

التغير الحراري اليومي يؤدي إلى تكاثف داخلي داخل العبوة، وهو تغير غير مرئي يظهر لاحقا أثناء التشغيل.

- الخزانات الوسيطة فوق الآلات :

وهي أخطر نقطة في كثير من المصانع، لأن المادة قد:

- تمتص رطوبة من الجو
- تفقد حرارتها المتوازنة
- تنفصل مكوناتها

بعد أن تكون قد خزنت بطريقة صحيحة.

- ثالثا: تخزين الخلطات الجاهزة للتشغيل

في كثير من خطوط الإنتاج يتم تحضير خلطات تشغيلية مسبقة تحتوي على البوليمر مع الماسترباتش أو الفيلر أو المواد المعاد تدويرها أو الإضافات ثم يتم تخزينها لحين التشغيل. هذه الخلطات تختلف جذريا في سلوكها عن البوليمر الخام لأنها:

- نظام جسيمات متعددة الكثافة
- متعددة الأحجام
- متعددة خواص السطح

وهذا يجعلها أكثر عرضة للانفصال أثناء التخزين.

- آلية الانفصال أثناء التخزين

مع الزمن ونتيجة:

- الاهتزازات
- ارتفاع عمود المادة
- اختلاف الكثافة

قد يحدث:

- ترسيب للمكونات الثقيلة إلى الأسفل
- صعود المكونات الأخف إلى الأعلى
- تجمع الماسترباتش في مناطق محددة

وبذلك تصبح أول كمية تغذي الآلة مختلفة عن آخر كمية من نفس الخلطة.

- رابعاً : أنظمة المناولة وتأثيرها على المادة

خلال انتقال المادة من التخزين إلى نقطة التغذية تتعرض إلى:

- احتكاك
- تسارع
- صدمات
- تيارات هوائية

وهذه العوامل قد تؤدي إلى تغيرات تشغيلية مهمة.

تفتت الحبيبات النقل الهوائي بسرعات عالية يولد غبارا ويغير توزيع حجم الجسيمات، مما يؤدي إلى:

- اختلاف في معدل الانصهار
- عدم استقرار التغذية
- تذبذب العزم

الانفصال الحبيبي للخلطات أثناء نقل الخلطات قد يحدث فصل للمكونات بسبب اختلاف:

- الكتلة
- الحجم
- الكثافة

فتصل الخلطة إلى القادوس بتركيب مختلف عن تركيبها عند الخلط. وهذا يظهر في صورة:

- تذبذب اللون
- تغير الخواص
- عدم استقرار الاستهلاك

حتى لو كانت نسب الوزن صحيحة.

الشحنات الساكنة بسبب احتكاك الحبيبات بجدران الأنابيب يسبب التصاقها وتجمع الغبار، مما يخل بانتظام التغذية.

امتصاص الرطوبة أثناء النقل

النقل باستخدام هواء غير مجفف قد يغير حالة المادة خلال زمن قصير.

- خامسا: الخلط المباشر قبل التشغيل

حتى في حالة الخلط اللحظي قبل التغذية، فإن المسافة بين الخلاط والقادوس قد تكون كافية لحدوث انفصال إذا:

- كان السقوط الحر كبيرا
- كانت سرعة النقل عالية
- كان مسار النقل طويلا

الخلاصة التشغيلية :

ثبات نسب الخلطة لا يعتمد على دقة الوزن فقط، بل على قدرة نظام التخزين والمناولة على الحفاظ على تجانسها حتى لحظة دخولها إلى البرغي. واستقرار العملية يبدأ فعليا من هذه المرحلة، لأن أي تغير يحدث هنا لا يمكن تصحيحه بالكامل داخل الآلة.

الباب الحادي عشر**الفصل الأول: التحكم في الرطوبة وسلوك المصهور في البوليمرات الحرارية****- in thermoplastic polymers melt behavior AND moisture**

نادرا ما تظهر الرطوبة في البوليمرات على شكل قطرات ماء أو تغير مرئي في شكل الحبيبات، لكنها من أكثر العوامل تأثيرا على استقرار التشغيل وجودة المنتج النهائي. وغالبا ما يتم التعامل معها على أنها مسألة مرتبطة بنوع المادة فقط، بينما هي في الواقع نتيجة لسلسلة المراحل السابقة من التخزين والمناولة والبيئة المحيطة. ولا تكمن خطورة الرطوبة في وجود الماء بحد ذاته، بل في توقيت تحوله داخل العملية، إذ يتحول إلى بخار عند دخول المادة إلى منطقة الانصهار، فينشأ الضغط داخل المصهور حيث لا يمكن للبخار أن يخرج بسهولة، فتظهر العيوب في المنتج حتى لو كانت إعدادات الآلة صحيحة.

-أولا: كيف تظهر الرطوبة داخل العملية؟

الرطوبة لا تقاس في المصنع عادة كنسبة مئوية، بل ترى على شكل مشاكل تشغيلية. ومن أهم مظاهرها:

الفقاعات والفراغات الداخلية وقد تظهر في:

- القطع المحقونة
- البريفورم
- الأفلام السمكة

سببها تحول الرطوبة إلى بخار داخل المصهور:

- 1 - الخطوط الفضية (Splay) وهي من أوضح العلامات، خصوصا في:

PET -

ABS -

PA -

- وتنتج عن خروج بخار الماء مع جبهة الجريان.

- 2- نقص الخواص الميكانيكية

خصوصا في المواد الحساسة للتحلل المائي مثل:

PET -

PA -

PC -

حيث يؤدي وجود الرطوبة إلى تكسير السلاسل الجزيئية أثناء الانصهار، فينخفض الوزن الجزيئي دون أن يتغير شكل القطعة ظاهريا.

- 3- تغير اللزوجة وعدم استقرار العملية

ويظهر في صورة:

- تغير في زمن الحقن

- عدم ثبات وزن الشوت

- تذبذب العزم في البثق

- ثانيا: المواد الحساسة للرطوبة والمواد غير الحساسة

مواد تمتص الرطوبة ويؤثر ذلك على بنيتها الجزيئية:

PET -

PA -

PC -

PBT -

TPU -

هذه المواد يجب تجفيفها إلى مستويات محددة قبل التشغيل.

مواد لا تمتص الرطوبة بنويوا لكن تتأثر بالماء السطحي:

PE -

PP -

PS -

وجود الماء هنا لا يسبب تحللاً، لكنه يسبب:

- فقاعات

- عيوب سطحية

- عدم تجانس المصهور

- ثالثاً: مصدر الرطوبة الحقيقي

الرطوبة لا تأتي من المادة فقط، بل من:

- هواء التخزين

- النقل الهوائي غير المجفف

- الخزانات الوسيطة فوق الماكينات

- فتح الأكياس في بيئة رطبة

- توقف التجفيف لفترات قصيرة

ولهذا فإن التجفيف ليس مرحلة مستقلة، بل جزء من نظام متكامل للتحكم في الحالة الفيزيائية للمادة.

- رابعا: متى يكون التجفيف ضروريا؟

ليس كل بوليمر يحتاج إلى تجفيف، وليس كل تجفيف ضروريا ويكون عندما:

- تكون المادة Hygroscopic

- أو يكون هناك ماء سطحي ظاهر

- أو يكون المنتج حساسا للنفقات

- أو تكون العملية تعمل عند درجات حرارة عالية وزمن مكوث طويل

- خامسا: هندسة التجفيف

الهدف الحقيقي من التجفيف ليس تسخين المادة تمرير هواء جاف بدرجة كافية ليحمل الرطوبة بعيدا عن سطح المادة.

-العناصر الأساسية لعملية التجفيف

- درجة الحرارة : ترفع من قدرة الرطوبة على الانتقال إلى سطح الحبيبة.

- زمن التجفيف :يحدد وصول الرطوبة من داخل الحبيبة إلى سطحها.

- نقطة الندى للهواء (Dew Point) :هي العامل الحاسم في قدرة الهواء على سحب الرطوبة.

- معدل تدفق الهواء: يضمن إزالة الرطوبة المحمولة وعدم تشبع الوسط.

-

- سادسا: أنواع المجففات

1-المجففات بالهواء الساخن تزيل الرطوبة السطحية فقط، ولا تصلح للمواد الحساسة للتحلل المائي.

2-المجففات بالهواء الجاف (Desiccant Dryers) :وهي المستخدمة للمواد الهندسية، لأنها تحقق نقطة ندى

منخفضة تسمح بسحب الرطوبة من داخل الحبيبة.

- سابعا: أخطاء تشغيلية شائعة

- ضبط درجة الحرارة دون الانتباه لنقطة الندى
- تقليل زمن التجفيف لزيادة الإنتاج
- فتح غطاء المجفف أثناء التشغيل
- نقل المادة المجففة عبر هواء غير جاف
- تخزين المادة المجففة في قادوس غير معزول

وهنا تفقد المادة جفافها قبل أن تدخل الآلة.

: الخلاصة التشغيلية :

التجفيف ليس جهازا، بل نظام يبدأ من لحظة خروج المادة من المجفف وينتهي عند دخولها إلى البرغي. وأي نقطة في هذا المسار غير محكمة قد تعيد الرطوبة إلى المادة مهما كانت شروط التجفيف صحيحة.

الفصل الثاني : أنظمة التغذية والقياس

أنظمة التغذية والقياس (Dosing Systems)

دقة النسب والتحكم في الاستهلاك : بعد أن أصبحت المادة مستقرة من حيث الرطوبة والتجانس، تأتي المرحلة التي تحدد فعليا دقة التركيبة الداخلة إلى العملية. ففي هذه النقطة لا يعود الخطأ مرتبطا بالمادة، بل بطريقة إدخالها إلى الماكينة.

ونظرا لأن معظم عمليات التشكيل تعتمد على خلط مكونات متعددة : بوليمر أساسي، ماسترباتش، مواد مالئة، معاد تدويره، إضافات فإن أي انحراف بسيط في نسب التغذية ينعكس مباشرة على:

- اللون
- الخواص الميكانيكية
- وزن القطعة
- التكلفة الفعلية للمنتج

ولهذا فإن نظام التغذية هو نظام تحكم في الجودة والتكلفة في آن واحد.

- أولا: لماذا لا تكفي دقة الوزن أثناء الخلط؟

الخلطة قد تكون موزونة بدقة، لكن:

- تغير الكثافة الظاهرية
- اختلاف شكل الحبيبات
- الانفصال أثناء النقل

كلها تؤدي إلى أن النسبة التي تدخل البرغي لا تساوي النسبة التي تم وزنها. ولهذا فإن القياس الحقيقي هو: معدل دخول كل مكون إلى الماكينة مع الزمن . وليس وزن الخلطة قبل التشغيل.

- ثانيا: أنظمة التغذية الرئيسية

1 - التغذية الحجمية (Volumetric Feeding)

تعتمد على حجم المادة الداخل لكل وحدة زمن. و مميزاتها:

- بسيطة
- منخفضة التكلفة
- مناسبة للمواد المتجانسة

محدوديتها: أي تغير في الكثافة الظاهرية يؤدي إلى تغير مباشر في النسبة.

وتظهر المشكلة عند:

- تغيير دفعة المادة
- وجود غبار
- استخدام معاد تدويره

2 - التغذية الوزنية (Gravimetric Feeding)

تعتمد على قياس الفقد في الوزن مع الزمن. و مميزاتها:

- ثبات النسب بغض النظر عن تغير الكثافة الظاهرية
- تحكم دقيق في استهلاك الماسترباتش
- استقرار اللون والخواص

وهي النظام القياسي في العمليات التي تتطلب ثباتا عاليا.

- ثالثا: تأثير دقة التغذية على التكلفة

الخطأ في تغذية الماسترباتش بنسبة صغيرة جدا يؤدي إلى:

- زيادة استهلاك سنوية كبيرة
- تغير في اللون
- رفض إنتاج

ولهذا فإن نظام التغذية ليس تحسين جودة فقط، بل أداة تحكم مالي.

- رابعا: التغذية المباشرة مقابل الخلط المركزي

التغذية المباشرة على الماكينة تعطي:

- استجابة سريعة
- مرونة في تغيير التركيبة

لكنها تتطلب: استقرار تدفق كل مكون

الخلط المركزي يوفر:

- تجانسا عاليا
- تقليل الأخطاء البشرية

لكنه يزيد:

- خطر الانفصال أثناء النقل
- زمن الإقامة

- **خامسا: مشاكل تشغيلية مرتبطة بالتغذية :** مشكلة تذبذب اللون

ليس دائما بسبب الماسترباتش، بل بسبب:

- عدم انتظام جرعه
- اختلاف سرعة سحب المادة

تغير وزن القطعة ناتج عن:

تغير معدل دخول المادة إلى البرغي

استهلاك غير ثابت للمواد بسبب:

- اختلاف الكثافة الظاهرية
- انزلاق المادة داخل وحدة القياس

- **سادسا: نقطة تشغيلية حاسمة**

المادة لا تسحب من وحدة التغذية بمعدل ثابت، بل بمعدل يحدده البرغي. ولهذا يجب أن يكون نظام التغذية قادرا على الاستجابة لهذا السحب دون تأخير أو زيادة.

- **الخلاصة التشغيلية**

دقة التركيبة داخل المنتج لا يحددها ميزان الخلط، بل نظام التغذية المتصل بالماكينة. وأي انحراف في هذا النظام يظهر مباشرة في الجودة والتكلفة حتى لو كانت جميع المراحل السابقة مثالية.

الفصل الثالث : منطقة التغذية داخل البرغي

من دخول الحبيبة إلى بداية تكون المصهور

عند هذه النقطة تنتهي جميع المراحل التي كانت المادة فيها منفصلة عن المعدة، وتبدأ المرحلة التي يصبح فيها سلوك البوليمر مرتبطاً مباشرة بتصميم البرغي وظروف التشغيل. وما يحدث داخل منطقة التغذية لا يقتصر على نقل البوليمر إلى الأمام، بل يحدد:

- معدل الانصهار لاحقاً
- استقرار العزم
- تجانس المصهور
- قدرة الخط الإنتاجية

ولهذا فإن فهم هذه المنطقة لا يقوم على معرفة شكل البرغي فقط، بل على تتبع رحلة البوليمر منذ لحظة سقوطه من القادوس حتى تتحول إلى طبقة صلبة مضغوطة على جدار الأسطوانة.

- أولاً بداية الرحلة: سقوط البوليمر من القادوس

عند دخول البوليمر إلى البرغي تكون في حالة:

- كثافة ظاهرية منخفضة
- احتكاك محدود بين الجسيمات
- وجود فراغات هوائية

وهنا يظهر أول دور لتصميم البرغي.

العمق الكبير لقناة البرغي في منطقة التغذية

هذا العمق ليس لنقل كمية أكبر فقط، بل لتمكين:

- استقبال المادة دون اختناق
- تكوين طبقة حبيبية متحركة

لكن إذا كان:

الاحتكاك بين الحبيبات وجدار الأسطوانة منخفضا فإن الحبيبات تدور مع البرغي دون أن تتقدم للأمام، فتتخفف القدرة الإنتاجية ويصبح السحب غير مستقر. ولهذا يتم تبريد منطقة التغذية في كثير من التطبيقات، لأن انخفاض درجة الحرارة يزيد من الاحتكاك بين الحبيبات وجدار الأسطوانة، فيتحقق النقل الأمامي.

- تكون السرير الحبيبي (Solid Bed Formation)

مع تقدم البوليمر يبدأ بالانضغاط تدريجيا نتيجة:

- انخفاض عمق القناة

- زيادة الضغط الأمامي

فتتحول من حالة جسيمات منفصلة إلى طبقة صلبة متماسكة تتحرك كوحدة واحدة.

هذه اللحظة حاسمة لأنها:

- تحدد كمية الهواء المتبقية

- تؤثر على استقرار الانصهار لاحقا

إذا لم يتكون هذا السرير بشكل منتظم يحدث:

- انزلاق

- تنذبذ في التغذية

- مناطق انصهار غير متجانسة

- دور نسبة الانضغاط (Compression Ratio)

انخفاض عمق القناة تدريجيا ليس فقط لزيادة الضغط، بل للتحكم في:

- معدل خروج الهواء

- كثافة المادة قبل الانصهار
- استقرار العزم

النسبة غير المناسبة تؤدي إلى:

- انصهار مبكر جدا
- تأخر في الانصهار

وكلاهما يسبب عدم استقرار في العملية.

تأثير نظام التغذية السابق على هذه المنطقة كل ما تم قبل هذه اللحظة يظهر هنا مباشرة:

- مادة غير متجانسة سرير غير منتظم
- وجود غبار انصهار مبكر موضعي
- رطوبة فقاعات داخل المصهور
- تذبذب التغذية تذبذب العزم
- أي أن منطقة التغذية داخل البرغي هي النقطة التي تكشف جودة جميع المراحل السابقة.

- الخلاصة التشغيلية

النقل في منطقة التغذية لا يعتمد على دوران البرغي فقط، بل على:

الاحتكاك بين الحبيبات والأسطوانة

قدرة المادة على تكوين سرير صلب منتظم

ثبات معدل التغذية

وأي خلل في هذه العناصر يظهر في صورة انخفاض القدرة الإنتاجية أو عدم استقرار العزم قبل أن يبدأ الانصهار فعليا

- ثانياً : منطقة الانضغاط والانصهار

آلية تكون المصهور داخل البرغي

بعد تكون السرير الحبيبي المتماسك في منطقة التغذية، تدخل المادة مرحلة أكثر تعقيداً، حيث لا يعود الهدف نقل الحبيبات فقط، بل تحويلها إلى مصهور متجانس بطاقة حرارية وميكانيكية مضبوطة. وهذه المرحلة لا تعتمد على التسخين الخارجي للأسطوانة كما يعتقد غالباً، بل على توازن دقيق بين انتقال الحرارة من الجدار وتوليد الحرارة داخلياً بفعل القص.

المفهوم الأساسي للانصهار داخل البرغي :

لا تنصهر الحبيبات دفعة واحدة، بل يحدث الانصهار وفق آلية تدريجية يمكن وصفها على النحو التالي:

- تتكون طبقة رقيقة منصهرة على جدار الأسطوانة نتيجة انتقال الحرارة من السخانات.
- تبدأ هذه الطبقة بالتحرك بسبب دوران البرغي.
- تتفصل الحبيبات الصلبة عن الجدار وتدفع داخل المصهور.
- تذوب تدريجياً بفعل القص والحرارة المنقولة من المصهور نفسه.

وهذا ما يعرف بآلية:

Melt Film Formation

أي أن المصهور هو الذي يذيب الحبيبات، وليس السخان مباشرة.

مصادر الطاقة الحرارية داخل البرغي

الطاقة التي تحول البوليمر من الحالة الصلبة إلى المصهور تأتي من مصدرين رئيسيين:

- الطاقة الحرارية المنقولة من جدار الأسطوانة وهي ضرورية لبدء تكون طبقة المصهور وتأثيرها محدود بسبب ضعف التوصيل الحراري للبوليمرات

- الطاقة الميكانيكية الناتجة عن القص وهي المصدر الرئيسي للانصهار في التشغيل المستقر. تتحول الطاقة الميكانيكية إلى حرارة داخل المصهور وفق العلاقة:

كلما زاد :معدل القص ولزوجة المادة زادت الطاقة المتولدة داخليا.

ولهذا يمكن للبرغي أن يذيب المادة حتى عند تخفيض درجات حرارة السخانات.

- دور تصميم البرغي في معدل الانصهار هو انخفاض عمق القناة تدريجيا

يؤدي إلى:

- زيادة الضغط
- زيادة معدل القص
- تقليل سماكة طبقة المصهور

وهذا يرفع كفاءة انتقال الحرارة.

طول منطقة الانضغاط إذا كانت قصيرة يؤدي إلى :

- انصهار سرى
- ارتفاع حراري موضعي
- عدم تجانس

إذا كانت طويلة يؤدي إلى :

- انصهار أكثر استقرارا
- تجانس حراري أفضل
- قدرة إنتاجية أعلى للمواد الحساسة حراريا

نسبة الانضغاط تؤثر مباشرة على:

- كثافة المصهور
- استقرار العزم
- قدرة إزالة الهواء المتبقي

- توازن الانصهار (Melting Balance)

الانصهار المستقر يعني أن:

- السرير الصلب يتناقص تدريجيا
- المصهور يزداد تدريجيا

حتى تختفي المادة الصلبة تماما قبل دخول منطقة القياس.

إذا اختل هذا التوازن يحدث:

انصهار مبكر

- ارتفاع في درجة حرارة المصهور
- فقدان القدرة على الضخ
- تذبذب الضغط

انصهار متأخر

- وجود جسيمات غير منصهرة
- عيوب سطحية
- عدم تجانس الخواص

العلاقة بين معدل التغذية وآلية الانصهار

كلما زاد معدل التغذية:

- زادت سماكة السريير الصلب
- احتاج الانصهار إلى طاقة أكبر
- انخفضت درجة حرارة المصهور عند نفس الإعدادات

ولهذا فإن تغيير الإنتاجية دون تعديل باقي الشروط يؤدي إلى تغير حالة المصهور حتى لو بقيت درجات الحرارة ثابتة.

مؤشرات تشغيلية على استقرار الانصهار

يمكن لمهندس التشغيل معرفة حالة الانصهار من خلال:

- ثبات العزم
- استقرار الضغط
- ثبات درجة حرارة المصهور
- غياب الجسيمات غير المنصهرة

الخلاصة

الانصهار داخل البرغي هو عملية تحويل طاقة ميكانيكية إلى طاقة حرارية داخل وسط عالي اللزوجة، وتحدد كفاءتها:

- لزوجة البوليمر
- معدل القص
- تصميم البرغي
- معدل التغذية

وليس فقط درجات حرارة سخانات.

- منطقة القياس (Metering Zone)

تجانس المصهور وجودة الضخ

بعد اكتمال الانصهار واختفاء السريير الصلب، يدخل البوليمر مرحلة مختلفة تماما في سلوكه داخل البرغي. لم يعد الهدف توليد مصهور، بل تحويل هذا المصهور إلى تدفق:

- متجانس حراريا
- متجانس لزوجيا
- ثابت في معدل الضخ

وهذه المنطقة هي التي تحدد فعليا جودة المصهور قبل دخوله إلى القالب أو الDie، لأن أي عدم تجانس يبقى هنا لا يمكن تصحيحه لاحقا.

الحالة الفيزيائية للمصهور عند بداية منطقة القياس

رغم اكتمال الانصهار ظاهريا، فإن المصهور في هذه النقطة يكون:

- غير متجانس في درجة الحرارة
- غير متجانس في معدل القص
- يحتوي على تاريخ حراري مختلف بين طبقاته

وذلك بسبب:

- اختلاف مسارات الجريان في منطقة الانصهار
- انتقال الحرارة المحدود داخل البوليمر
- تفاوت زمن الإقامة بين الجزيئات

ولهذا فإن منطقة القياس تعمل كـ:

مفاعل تجانس (Homogenization Zone)

وليس مجرد منطقة ضخ.

آلية التجانس داخل منطقة القياس

1- تجانس درجة الحرارة

يحدث نتيجة:

- القص المستمر داخل القناة الضيقة
- إعادة توزيع المصهور بين مركز القناة وجدرانها

كلما كانت القناة أضيق:

- زاد معدل القص
- تحسن الخلط الحراري

لكن مع زيادة استهلاك الطاقة.

2- تجانس اللزوجة

اللزوجة تعتمد على:

- درجة الحرارة
- التاريخ القصي للمادة

وفي هذه المنطقة يتم توحيد هذا التاريخ، فنتحول المادة إلى مصهور بسلوك انسيابي موحد.

3- ازالة بقايا الهواء أو الجسيمات غير المنصهرة

إذا وصل المصهور إلى هذه المنطقة وهو غير مكتمل الانصهار، فإن:

- الجسيمات الصلبة لا تجد طاقة كافية للذوبان
- تنتقل مباشرة إلى قالب

ولهذا فإن وظيفة هذه المنطقة ليست تصحيح الانصهار، بل تثبيته.

- جودة الضخ (Pumping Stability)

البرغي في هذه المنطقة يعمل كمضخة لولبية، وجودة الضخ تعتمد على:

- عمق القناة الثابت
- استقرار اللزوجة
- عدم وجود انزلاق على الجدار

أي تغير في لزوجة المصهور يؤدي إلى:

- تغير معدل الضخ
- تذبذب الضغط
- عدم استقرار الإنتاجية

العلاقة بين اللزوجة وجودة الضخ كلما كان المصهور:

- متجانسا حراريا
- ثابت اللزوجة

أصبح الضخ:

- منتظما
- قابلا للتنبؤ
- غير حساس لتغيرات بسيطة في التشغيل

أما المصهور غير المتجانس فيعطي:

- ضغطا متذبذبا
- تدفقا غير منتظم داخل القالب
- تغيرا في الأبعاد أو السماكة

دور طول منطقة القياس

الطول غير الكافي يؤدي إلى:

- خروج مصهور غير متجانس
- استجابة سريعة لكن غير مستقرة

الطول الزائد يؤدي إلى:

- ارتفاع درجة الحرارة نتيجة القص
- تحلل حراري للمواد الحساسة

ولهذا فإن طول هذه المنطقة هو توازن بين:

- التجانس الحراري والاستقرار الحراري
- مؤشرات تشغيلية على جودة التجانس

يمكن تقييم كفاءة منطقة القياس من خلال:

- ثبات درجة حرارة المصهور
- استقرار الضغط
- انتظام استهلاك المادة
- ثبات أبعاد المنتج

الخلاصة

منطقة القياس ليست منطقة نقل فقط، بل هي المنطقة التي:

- توحد التاريخ الحراري والقصي للمصهور
- تثبت اللزوجة
- تحول البرغي إلى مضخة مستقرة

وجودة المنتج النهائي تبدأ فعلياً من جودة المصهور في هذه النقطة.

- ثالثاً تهيئة المصهور قبل التشكيل

الترشيح وإعادة كتابة التاريخ الحراري والانسيابي

عند خروج المصهور من منطقة القياس يكون قد وصل إلى حالة انسيابية مستقرة نسبياً، لكنه لا يزال يحمل تاريخاً حرارياً وقصياً غير متجانس ناتجاً عن مسارات الجريان المختلفة داخل البرغي. كما قد يحتوي على جسيمات غير منصهرة بالكامل، أو تكتلات من الإضافات، أو شوائب صلبة.

في هذه المرحلة لا يكون الهدف توليد مصهور، بل تهيئة هذا المصهور ليصبح:

- موحد اللزوجة
- موحد درجة الحرارة
- منتظم الجريان
- خالياً من الجسيمات الصلبة

قبل دخوله إلى القالب.

وتتحقق هذه التهيئة من خلال ثلاث عناصر متكاملة:

- Breaker plate
- Screen pack
- Static mixer

وكل عنصر منها لا يعمل كملحق ميكانيكي، بل كعنصر تحكم في طاقة الجريان وبنية المصهور.

أولاً: الحالة القادمة من البرغي

المصهور الخارج من البرغي يتميز بالآتي:

- توزيع غير منتظم لمعدل القص شعاعياً
- فروق موضعية في درجة الحرارة
- اختلاف في زمن الإقامة بين الجزيئات

- جريان حلزوني ناتج عن حركة البرغي

حتى في حالة اكتمال الانصهار.

وهذا يعني أن المصهور ليس متجانسا ريولوجيا بعد وهنا تبدأ وظيفة منظومة التهينة.

أولاً : Breaker Plate

إعادة تنظيم نمط الجريان

الـ Breaker plate هو قرص معدني مثقب يوضع بين البرغي ومنظومة الترشيح.

وظيفته الفيزيائية:

- تحويل الجريان من نمط حلزوني إلى جريان محوري
- توزيع الضغط على كامل مساحة المجرى
- دعم طبقات الشبك ميكانيكيا

بدونه:

- يدخل المصهور إلى القالب (Die) بجريان غير منتظم
- يتكون توزيع سماكة غير متجانس في المنتجات المسطحة

إذن هو عنصر:

تصحيح لنمط الجريان قبل أي عملية ترشيح أو خلط.

ثالثا : Screen Pack

الترشيح كوسيلة تحكم طاقي

التعريف الفيزيائي

هو وسط مسامي يتكون من عدة طبقات شبكية يمر المصهور خلالها تحت الضغط.

وظيفته ليست الحجز الميكانيكي فقط، بل:

- توليد مقاومة محسوبة للجريان
- رفع الضغط الخلفي
- زيادة الطاقة القصية داخل البرغي

تأثيره على عملية الانصهار عند زيادة الضغط الخلفي:

- يزداد زمن الإقامة
- يزداد معدل القص
- يكتمل الانصهار

أي أن الترشيح يغير حالة المصهور قبل وصوله إليه.

تأثيره على المصهور

مرور المصهور عبر الوسط المسامي يؤدي إلى:

- تفقيت التكتلات
- إزالة الجسيمات الصلبة
- توزيع الجريان على كامل المقطع

زيادة كثافة الشبك تؤدي الى العناصر التالية بشكل متتالي :

- تحسن الجودة
- ارتفاع حراري
- انخفاض الإنتاجية
- بداية التحلل

إذن اختيار الشبك هو:

قرار طاقي وجودي، وليس قرار تنقية فقط.

ثالثاً : Static Mixer

إعادة توزيع التاريخ الحراري والانسيابي

التعريف الفيزيائي

عنصر ثابت يحتوي على قنوات أو شفرات داخلية تجبر المصهور على:

- الانقسام إلى عدة تيارات
- تغيير موقعه شعاعيا
- إعادة الاندماج

عدة مرات متتالية.

ماذا يفعل داخل المصهور؟

1 توحيد درجة الحرارة

إجبار المادة الساخنة في المركز على الانتقال نحو الجدار والعكس.

2 توحيد التاريخ القصي

كل جزء من المصهور يمر بمناطق قص مختلفة.

3 إزالة الذاكرة الانسيابية

إلغاء تأثير مسارات الجريان القادمة من البرغي.

التمن الطاقى

لأنه يفرض مسارات معقدة للجريان:

- يرفع الضغط
- يزيد استهلاك الطاقة
- يزيد زمن الإقامة

وهذا يعنى:

تحسن التجانس مقابل ارتفاع خطر التحلل.

رابعاً: زمن الإقامة وتاريخه الحرارى

كل عنصر إضافى بعد البرغى:

- يزيد زمن الإقامة.

زيادة زمن الإقامة تعنى:

- تجانس أفضل
- توزيع حرارى أفضل

لكن أيضاً:

- زيادة احتمال الأكسدة

- زيادة التحلل الحراري
- وهنا تتحدد نافذة التشغيل.

خامساً: متى نستخدم هذه المنظومة؟

تكون ضرورية عندما:

- تكون جودة السطح حرجية
- يوجد ماسترباتش عالي التحميل
- يوجد فيلر
- المنتجات شفافة أو رقيقة

وتكون عبئاً عندما:

- تكون المادة نظيفة ومتجانسة
- يكون البوليمر حساساً حرارياً
- تكون الإنتاجية العالية هي الهدف الأساسي

الخلاصة

منظومة التهينة ليست مرحلة تنقية فقط، بل هي:

مرحلة إعادة ضبط الحالة الريولوجية والحرارية للمصهور قبل تشكيله.

وهي نقطة التوازن بين:

- جودة المصهور
- واستهلاك الطاقة

والقدرة الإنتاجية

والاستقرار الحراري.

وجود عناصر الخلط على مناطق التغذية

في معظم خطوط التشكيل التقليدية يستخدم ما يعرف بالـ **General Purpose Screw**، وهو مكون من مناطق التغذية والانضغاط والقياس فقط، دون عناصر خلط إضافية. وهذا التصميم يحقق توازنا جيدا بين:

- الاستقرار التشغيلي

- القدرة الإنتاجية

- وانخفاض استهلاك الطاقة

ولذلك فهو الأكثر انتشارا في التطبيقات التحويلية العامة.

ومع ذلك، قد تحتوي بعض البراغي خصوصا في التطبيقات التي تتطلب درجة تجانس أعلى على مناطق خلط خاصة في نهايتها، وتكون هذه العناصر جزءا من تصميم البراغي نفسه وتهدف إلى تحسين:

- اكتمال الانصهار

- تجانس درجة الحرارة

- توزيع الإضافات والماستر باتش

وجود هذه العناصر ليس شرطا أساسيا لنجاح العملية، بل هو حل هندسي يستخدم عند الحاجة فقط، مثل:

- التركيبات عالية التحميل بالمواد المائلة

- المنتجات البصرية أو الشفافة

- العمليات التي تتطلب تجانسا لونيا أو سماكة عالية الدقة

أما في التشغيل القياسي، فإن جودة المصهور المطلوبة تتحقق عادة من خلال:

- التصميم المناسب للبراغي

- ومنظومة الترشيح

- واستقرار ظروف التشغيل

دون الحاجة إلى عناصر خلط إضافية.

الباب الثاني عشر التطبيقات الصناعية للبوليمرات

من من المصهور إلى منتج ثابت الأبعاد

- 1.12 البثق للمنتجات الصلبة

في عمليات البثق، يُنظر إلى القالب عادة على أنه العنصر الذي يحدد شكل المنتج، إلا أن هذا الفهم يبقى غير مكتمل إذا لم يُؤخذ في الاعتبار أن المصهور عند خروجه من الـ Die لا يكون قد تحوّل بعد إلى منتج بالمعنى الحقيقي. فعند خروج المصهور من القالب، يكون في حالة انتقالية بين مادة لزجة قابلة للجريان ومادة صلبة ذات شكل هندسي ثابت. وفي هذه المرحلة، لا يكون الشكل قد استقر بعد، بل يظل عرضة للتغير تحت تأثير السحب، والضغط، والتبريد، وسلوك السلاسل الجزيئية داخل المادة. ولهذا، فإن الجزء الحاسم من عملية البثق لا يحدث داخل القالب فقط، بل يمتد إلى المنطقة التي تلي الخروج مباشرة، حيث يتحدد توازن دقيق بين:

— استمرار الجريان،

— وبداية التصلب،

— وموقع تثبيت الأبعاد.

ففي المنتجات الصلبة مثل الأنابيب والبروفيلات والصفائح وتكسية الكوابل والخيوط الأحادية، يتم تثبيت الشكل من خلال أنظمة خارجية مثل المعايرة والتبريد، والتي لا تقل أهمية عن القالب نفسه في تحديد الأبعاد النهائية.

وبالتالي، فإن فهم البثق لا يقتصر على دراسة تدفق المصهور داخل الإكسترودر والقالب، بل يتطلب قراءة المسار الكامل للمادة منذ لحظة خروجها وحتى تثبيت بنيتها، لأن هذا المسار هو الذي يحدد ما إذا كان المنتج سيحافظ على أبعاده واستقراره، أم سيظهر عليه انكماش أو تشوه أو عدم تجانس في الخواص.

ومن هنا، يصبح البثق نموذجًا واضحًا لتطبيق الفكرة العامة لهذا الفصل:

أن المنتج لا يتشكل عند خروجه من القالب، بل عند تثبيت بنيته. قال Die يحدد الشكل الهندسي الابتدائي فقط، أما:

- القطر النهائي
- السماكة
- الاستقامة
- التمرکز
- الاستدارة
- والاستقرار البعدي

فهي جميعها تتحدد في المنطقة الواقعة بعد Die ، حيث يحدث التفاعل بين:

- شد السحب
- التبريد
- والاسترخاء المرن للمصهور

وهذه المرحلة هي جوهر صناعة البثق للمنتجات الصلبة.

- أولاً: الفرق الجوهرى بين البثق للمنتجات الصلبة وباقي عمليات التشكيل

في عمليات مثل الحقن يكون القالب هو الذي يحدد الأبعاد النهائية مباشرة،
أما في البثق فإن المنتج:

- يتكون تدريجيا خارج Die.

وهذا يعني أن:

- التحكم في الأبعاد يتم على طول الخط وليس داخل Die فقط.

- ثانياً: المسار العام لخط البثق

رغم اختلاف المنتجات، فإن جميع خطوط البثق للمنتجات الصلبة تتكون من نفس المنظومة الوظيفية:

- Die

- منطقة التثبيت البعدي Sizing / Calibration

- نظام التبريد

- وحدة السحب Haul-off

- وحدة القطع أو اللف

والاختلاف بين الصناعات ليس في وجود هذه العناصر، بل في:

طريقة عملها وتأثيرها على المنتج.

- ثالثاً: نقطة تثبيت الأبعاد

أهم مفهوم تشغيلي في خطوط البثق هو:

أين تتجمد الأبعاد؟

لأن المنتج قبل هذه النقطة:

- يمكن شده
- يمكن أن ينكمش
- يمكن أن يتشوه

وبعدها:

لا يمكن تغيير أبعاده دون تشويه دائم.

وموقع هذه النقطة يتحدد من خلال:

- شدة التبريد
- سرعة السحب
- سماكة المنتج

- نوع البوليمر

- رابعا: التوازن الحاكم للعملية

المنتج المستقر هو نتيجة توازن بين ثلاثة عوامل:

1- ضغط المصهور الخارج من Die

وهو الذي يحاول:

زيادة الأبعاد بسبب Die swell.

2- قوة السحب

وهي التي تحاول: تقليل الأبعاد.

معدل التبريد وهو الذي: يجمد النتيجة عند لحظة معينة.

- خامسا: دور وحدة السحب

في خطوط البثق للمنتجات الصلبة لا تستخدم وحدة السحب فقط لنقل المنتج، بل هي:

أداة التحكم الأساسية في الأبعاد.

لأن تغيير سرعتها يؤدي مباشرة إلى:

- تغيير السماكة

- تغيير القطر

- تغيير الوزن بالمتري الطولي

دون أي تغيير في وحدة السحب.

- سادسا: التبريد كأداة تثبيت هندسي

التبريد في البثق لا يهدف فقط إلى خفض درجة الحرارة، بل إلى:

- تثبيت الشكل
- منع الانكماش غير المنتظم
- الحفاظ على التمرکز

ولهذا تختلف أنظمة التبريد حسب المنتج:

- أحواض تبريد مائي
- رشاشات ماء
- قوالب معايرة مفرغة (Vacuum calibration)
- رولات مبردة

- سابعاً: المعايرة (Calibration)

في المنتجات المجوفة أو المعقدة هندسيا لا يكفي التبريد وحده، بل يجب فرض الشكل ميكانيكيا باستخدام:

- Vacuum sizing
- Calibrators
- Mandrels

حيث يتم:

تثبيت الأبعاد قبل أن يكتمل التصلب.

- ثامناً : نافذة التشغيل

أي خط بثق مستقر يعمل داخل نافذة توازن بين:

- Output لوحدة السحب

- سرعة السحب

- قدرة التبريد

وأي تغيير في أحدها دون ضبط الآخرين يؤدي إلى:

- تغير الأبعاد

- عدم استقرار الخط

- إجهاد داخلي في المنتج

- تاسعاً: خصوصية خطوط المونوفيلامنت

رغم أنها تعتمد على نفس مبدأ البثق، إلا أنها تختلف في أن:

السحب فيها لا يهدف فقط إلى تثبيت الأبعاد، بل إلى إحداث توجيه جزيئي (Molecular orientation)

مما يؤدي إلى:

- زيادة مقاومة الشد

- تقليل القطر

- تغيير الخواص الميكانيكية

وبذلك تصبح العملية:

Extrusion + Drawing

وليس تثبيت أبعاد فقط.

- الخلاصة

في البثق للمنتجات الصلبة لا يتحدد شكل المنتج عند خروجه من الـ Die ، بل يتحدد عند اللحظة التي يتوازن فيها:

- ضغط المصهور مع قوة السحب مع معدل التبريد

وأي فهم لهذه الصناعة دون فهم هذا التوازن يبقى فهما ناقصا.

بعد تثبيت المفهوم العام، يمكن الانتقال إلى دراسة كل صناعة على حدة ضمن نفس الإطار الهندسي:

- بثق الأنابيب
- بثق البروفائل
- بثق الصفائح
- تكسية الكوابل
- المونوفيلمنت

حيث تختلف طريقة تطبيق نفس المبادئ.

- 13.4.2 بثق الأنابيب (Pipe Extrusion)

تكوين القطر والسماكة خارج الـ Die

في بثق الأنابيب لا يحدد الـ Die الأبعاد النهائية للمنتج، بل يحدد فقط الشكل الابتدائي للمصهور. أما القطر الخارجي،

وسماكة الجدار، والاستدارة، والتمركز، فتتحدد داخل منظومة المعايرة والتبريد الواقعة بعد الـ Die.

ولهذا فإن:

بثق الأنابيب هو عملية تثبيت أبعاد تحت تأثير السحب والتبريد والضغط الخارجي.

وليس مجرد خروج مصهور من قالب.

- أولاً: مكونات منظومة تشكيل الأنبوب

يتكون خط بثق الأنابيب بعد (Injection Mould) من:

- قالب الأنابيب (القالب الحلقي) **Pipe Die (Annular Die)**
- نظام المعايرة **Calibration system**
- خزان التفريغ (خزان الفاكيوم) **Vacuum tank**
- أحواض التبريد **Cooling tanks**
- وحدة السحب **Haul-off unit**
- وحدة القطع أو اللف **Cutting or coiling unit**

وهذه الوحدات تعمل كنظام واحد لضبط الأبعاد.

- ثانياً: الـ **Pipe Die (Annular Die)**

وظيفته:

- تشكيل المصهور على هيئة أنبوب
- توزيع السماكة حول المحيط

لكنه لا يثبت القطر.

السماكة الابتدائية تتحدد بواسطة:

- الفجوة بين الـ **mandrel** والـ **die**
- توزيع الجريان
- لكن القطر النهائي يتحدد لاحقاً داخل المعايرة.

- ثالثا: المعايرة (Calibration)

- الوظيفة الأساسية

هي:

- تثبيت القطر الخارجي للأنبوب قبل أن يتصلب المصهور.

وتتم بواسطة:

Calibration sleeve

التي يكون قطرها الداخلي مساويا للقطر الخارجي المطلوب للأنبوب.

- كيف تتم العملية فيزيائيا؟

بعد خروج المصهور:

- يدخل الأنبوب وهو ما يزال ليناً إلى calibration sleeve
- يتم سحب الهواء بين الأنبوب وجدار المعايرة بواسطة vacuum

فينتج:

- ضغط خارجي يجبر الأنبوب على الالتصاق بجدار المعايرة

وبذلك: يتحدد القطر الخارجي بدقة.

- رابعا: دور الـ Vacuum

الـ Vacuum لا يبرد ولا يسحب المنتج، بل:

- يثبت الأنبوب على جدار المعايرة

- يمنع الانكماش
- يحافظ على الاستدارة

بدونه:

- يصبح القطر غير منتظم
- يحدث ovality
- يفقد الأنبوب تركزه

- خامسا: سماكة الجدار

سماكة الأنبوب لا تتحكم بها المعايير مباشرة، بل تتحدد من خلال التوازن بين:

- (Injection Mould Output) (كمية المصهور الخارجة)

- سرعة السحب (Haul-off speed)

- العلاقة الأساسية:

- زيادة سرعة السحب : تقل السماكة
- تقليل سرعة السحب : تزيد السماكة

- سادسا: التركز (Concentricity)

التركز يعني:

- تساوي سماكة الجدار حول المحيط.

ويتأثر بـ:

- تمركز الـ mandrel داخل الـ die

- توزيع الجريان

- ثبات السحب

وليس بالـ vacuum كما يعتقد.

- سابعا: التبريد

بعد تثبيت القطر تبدأ مرحلة التبريد.

وظيفتها:

- تجميد الأبعاد

- منع الانكماش الطولي

- إعطاء الصلابة الكافية للسحب

معدل التبريد يؤثر على:

- الإجهادات الداخلية

- الاستدارة

- اللمعان السطحي

- ثامنا: وحدة السحب (Haul-off) هي التي:

- تحدد سرعة الخط

- تتحكم في سماكة الجدار

- تثبت الاستقامة

أي تذبذب في سرعتها يؤدي إلى : تغير مباشر في السماكة.

- تاسعا: نافذة التشغيل في بثق الأنابيب

الخط المستقر يتحقق عندما يكون هناك توازن بين:

- (Output (Injection Mould

- قدرة الـ vacuum على تثبيت القطر
- قدرة التبريد على تجميد الأبعاد
- سرعة السحب

أي تغيير في أحدها دون ضبط الباقي يؤدي إلى:

- تغير في القطر
- تغير في السماكة
- ovality
- تموجات

- عاشرًا: نقطة تثبيت الأبعاد في بئق الأنابيب:

- القطر يتثبت داخل المعاييرة والسماكة تتثبت عند اكتمال التبريد وهذا فرق جوهري.

- الخلاصة

الـ Die يشكل المصهور فقط، لكن:

- المعاييرة تحدد القطر
- السحب يحدد السماكة
- التبريد يجمد النتيجة

وأي فهم للعملية خارج هذا التوازن يبقى فهما غير كامل.

- 12.3 مرحلة تصميم Pipe Die

- توزيع الجريان وتحديد سماكة الجدار

الـ Pipe Die لا يحدد القطر الخارجي النهائي للأنبوب، لكنه يحدد:

- توزيع المصهور حول المحيط
- السماكة الابتدائية للجدار
- استقرار الجريان قبل دخول المعالجة

وأي خلل في تصميمه أو ضبطه لا يمكن إصلاحه لاحقاً لا بالـ vacuum ولا بالسحب.

- أولاً: مبدأ تشكيل الأنبوب

- الـ Pipe Die هو:

Annular flow system

أي تحويل الجريان من:

- مجرى دائري صلب إلى

مجرى حلقي حول الـ mandrel

بشكل متوازن تماماً حول 360°

الهدف:

- أن يصل المصهور إلى كل نقطة حول المحيط:

بنفس:

- معدل التدفق
- الضغط
- درجة الحرارة
- التاريخ القصي

- ثانيا: المكونات الرئيسية للـ Pipe Die

Body-1

يحتوي على:

- قنوات توزيع المصهور
- مناطق موازنة الضغط

-2 Mandrel

وظيفته:

- تشكيل القطر الداخلي
- تكوين الجريان الحلقي

وتمركزه هو العامل الأول في:

Concentricity

Die ring

يحدد:

- القطر الخارجي الابتدائي
- الفجوة الحلقية (Annular gap)

- Spider / Support legs

تحمل الـ mandrel داخل الـ die.

ويجب تصميمها بحيث:

- لا تترك خطوط لحام ضعيفة
- تسمح بإعادة اندماج المصهور بشكل متجانس

- ثالثا: توزيع الجريان (Flow Distribution)

التحدي الأساسي:

- المصهور يدخل من نقطة واحدة
- ويجب توزيعه على محيط كامل.

- التصميم الناجح يحقق : Equal Fow Path

أي:

- كل نقطة حول المحيط لها نفس المقاومة للجريان.

أشهر أنظمة التوزيع

Spiral mandrel die

الأكثر استخداما في:

- HDPE

- PP

- multilayer pipes

فكرته:

- قنوات حلزونية

- تقسم الجريان

- تعيد دمجها

فيعطي:

تجانس ممتاز في السماكة.

Spider die

أبسط تصميم.

لكن يسبب:

- Weld lines

- ويحتاج مسافة كافية لإعادة اندماج المصهور.

- رابعا: الفجوة الحلقية (Die gap) هي المسافة بين:

Die ring وMandrel

وهي التي تحدد:

- السماكة الابتدائية للجدار.

لكن السماكة النهائية تتحكم بها : Haul-off speed

- خامسا: علاقة التصميم بالـ Shear rate

إذا كانت الفجوة:

صغيرة جدا:

- يزيد القص
- ترتفع الحرارة
- يتحسن الاندماج
- لكن
- يزداد الهبوط في الضغط

إذا كانت كبيرة:

- يقل القص
- يضعف الاندماج
- تزداد احتمالية تفاوت السماكة

- سادسا: ضبط التمرکز (Centering)

يتم بواسطة:

Die centering bolts

وليس بالـ vacuum.

وظيفته:

تعديل موقع الـ mandrel بالنسبة للـ die ring

للحصول على:

- سماكة متساوية حول المحيط.

- سابعاً: طول منطقة القياس (Land length)

وهي الجزء المستقيم بعد توزيع الجريان.

وظيفتها:

- تثبيت الجريان

- توحيد السرعة

- إزالة التفاوت

Land قصير: تفاوت في السماكة

Land طويل: ضغط أعلى تاريخ حراري أطول

ثامناً: توازن التصميم

التصميم الناجح يحقق توازن بين:

- تجانس الجريان

- الهبوط في الضغط

- التاريخ الحراري

- سهولة التشغيل

الخلاصة

Pipe Die ليس مجرد أداة تشكيل، بل هو: نظام موازنة ضغط وجريان حول محيط كامل.

والهدف منه: أن يدخل المصهور إلى المعاييرة وهو:

- متجانس السماكة
- مستقر الجريان
- متساوي التاريخ الحراري

لأن أي تفاوت عند هذه النقطة سيتحول مباشرة إلى:

- سماكة غير منتظمة في المنتج النهائي.

- 4.5.12 مرحلة تفاوت سماكة الجدار (Wall Thickness Variation)

- التعريف التشغيلي:

- عدم تساوي سماكة الجدار حول محيط الأنبوب أو على طوله.

ويظهر في صورتين:

- تفاوت محيطي (Circumferential) سماكة أكبر في جهة وأقل في جهة أخرى.

- تفاوت طولي (Longitudinal)

- تغير السماكة مع الزمن على نفس النقطة.

- أولاً: القاعدة الهندسية الأساسية

قبل البحث عن السبب يجب تثبيت القاعدة التالية:

- المعايير تحدد القطر الخارجي فقط ولا تصح توزيع السماكة.

أي أن:

- أي تفاوت في السماكة يدخل المعاييرة

سيخرج منها كما هو.

- **ثانيا: التفاوت المحيطي في السماكة**

الأسباب المرتبطة بالـDie

○ عدم تمرکز الـMandrel

أهم سبب على الإطلاق.

- إذا لم يكن الـ mandrel في مركز الـ:die

- تتغير الفجوة الحلقية

يتغير معدل الجريان

تتغير السماكة.

- **المؤشر التشغيلي:**

- سماكة عالية ثابتة في جهة واحدة حول المحيط.

الحل:

- Die centering adjustment

وليس:

- vacuum

- haul-off

○ عدم توازن الجريان داخل الـDie

- بسبب:

- انسداد جزئي في قناة

تلوث

- اختلاف درجات الحرارة حول die

المؤشر:

- التفاوت لا يتغير مع ضبط centering.

○ توزيع حراري غير متجانس

اختلاف حرارة zones يؤدي إلى:

- اختلاف اللزوجة - اختلاف معدل الجريان.

- **ثالثا: التفاوت الطولي في السماكة**

الأسباب المرتبطة بالتنشغيل

■ تذبذب سرعة السحب

أي تغيير بسيط في haul-off speed يؤدي إلى:

- تغيير مباشر في السماكة.

المؤشر:

السماكة تزيد وتنقص مع الزمن.

■ عدم ثبات (Output Injection Mould)

بسبب:

- تذبذب التغذية
- عدم استقرار الانصهار
- back pressure تغير

■ عدم استقرار vacuum

- يؤدي إلى:
- تغير في القطر الخارجي فيظهر كأنه تغير في السماكة.

- رابعا: أسباب مرتبطة بالمعايرة

احتكاك غير متوازن داخل calibration sleeve

بسبب:

تبريد غير متجانس

تآكل

فيؤدي إلى:

سحب جهة أكثر من جهة.

- خامسا: طريقة التشخيص الصحيحة

تحديد نوع التفاوت

هل هو:

محيطي؟

طولي؟

لأن:

1. لكل واحد مصدر مختلف.
2. قاعدة التشخيص
3. التفاوت ثابت في نفس الاتجاه
4. المشكلة في الـ Die.
5. التفاوت يتحرك مع الزمن
6. المشكلة في السحب أو (Injection Mould).

- سادسا: العلاقة بين السماكة ووزن المتر

في بثق الأنابيب:

Weight per meter ثابت لكن السماكة غير متساوية هذا يعني: المشكلة توزيع وليست Output.

- سابعا: تأثير تفاوت السماكة على المنتج

- ضعف ميكانيكي موضعي
- فشل في اختبار الضغط
- ovality لاحقاً
- مشاكل لحام عند الوصل

- الخلاصة

تفاوت السماكة ليس عيبا واحدا، بل نتيجة مباشرة لخلل في:

- تمرکز الـ Die
- توازن الجريان
- استقرار السحب

- أو احتكاك المعايير

وأول خطوة صحيحة في الحل هي :

- تحديد نوع التفاوت قبل أي تعديل.

الفصل الرابع : مشاكل التشغيل والتحليل

- 12.4.1 البيضاوية (Ovality) في بثق الأنابيب

فقدان الاستدارة وتحول المقطع الدائري إلى شكل إهليلجي

الأنبوب المثالي هو الذي يكون قطره الخارجي ثابتاً في جميع الاتجاهات، أي أن مقطعه دائري حقيقي. وعندما يختلف القطر المقاس في اتجاهين متعامدين يتحول المقطع من دائرة إلى شكل إهليلجي .

- البيضاوية (Ovality)

وهي ليست مجرد عيب شكلي، بل مؤشر مباشر على خلل في مرحلة تثبيت الأبعاد بعد Die ، لأن القطر الخارجي في بثق الأنابيب لا يتحدد داخل القالب، بل داخل منظومة المعايير والتبريد.

- التعريف الهندسي

البيضاوية هي الفرق بين: أكبر قطر خارجي للأنبوب وأصغر قطر خارجي له وتعتبر عادة كنسبة إلى القطر الأسمي وهذا يعني أن المشكلة مرتبطة بتوزيع القوى حول محيط الأنبوب أثناء كونه ما يزال ليّناً.

- القاعدة الأساسية

على عكس تفاوت السماكة: البيضاوية لا سبب لها في توزيع الجريان داخل الـ Die بل سببها في مرحلة تثبيت القطر. لأن المعايير هي التي تحدد القطر الخارجي.

- أولاً: دور المعايير في ظهور البيضاوية

داخل Calibration sleeve يتم تثبيت القطر بواسطة:

- ضغط الـ vacuum

- التلامس مع الجدار الداخلي للمعايرة

إذا لم يكن هذا التلامس متجانسا حول المحيط يحدث:

- سحب أكبر في اتجاه

وسحب أقل في الاتجاه الآخر

فينتج الشكل الإهليلجي.

- الأسباب المرتبطة بالمعايرة

- عدم اتزان توزيع الـ vacuum

عندما يكون الشفط:

- أقوى في جهة

- أضعف في جهة

يلتصق الأنبوب بجانب دون الآخر.

-عدم تمرکز الأنبوب داخل المعايير

بسبب:

- عدم محاذاة الـ Die مع المعايير

- دخول الأنبوب بشكل مائل

فتتكون منطقة ضغط أكبر من الأخرى.

- تأكل أو تلف داخل calibration sleeve

يؤدي إلى : فقدان التلامس المتساوي.

- ثانيا: تأثير التبريد

التبريد غير المتجانس حول محيط الأنبوب يؤدي إلى:

- تصلب جهة أسرع من جهة

- انكماش غير متساو

فينتج ختلاف في القطر.

مصادر عدم تجانس التبريد

- توزيع غير متساو للماء

- انسداد بعض الرشاشات

- اختلاف درجات حرارة الماء حول المحيط

- ثالثا: تأثير السحب (Haul-off)

السحب غير المستقيم يؤدي إلى:

- شد الأنبوب في اتجاه واحد

- تشوه المقطع قبل اكتمال التصلب

ويحدث ذلك بسبب:

- عدم محاذاة السير
- اختلاف ضغط الأحزمة

- رابعا: صلابة الأنبوب عند نقطة التثبيت

إذا خرج الأنبوب من المعاييرة وهو ما يزال لدينا:

يمكن أن يتشوه تحت تأثير:

- وزنه
- السحب
- احتكاكه مع الماء

فتظهر البيضاوية بعد المعاييرة رغم أن القطر كان صحيحا داخلها.

- خامسا: الفرق بين البيضاوية وتفاوت السماكة

- تفاوت السماكة

سببه:

Die centering أو توزيع الجريان.

البيضاوية

سببها:

- المعاييرة – التبريد – السحب.
- وهذا فرق تشخيصي أساسي.

- سادسا: المؤشرات التشغيلية

- البيضاوية الثابتة
- مشكلة ميكانيكية في المعايرة أو المحاذاة.
- البيضاوية المتغيرة مع الزمن
- عدم استقرار vacuum أو التبريد.

- سابعا: تأثير البيضاوية على الخواص

- ضعف تحمل الضغط الداخلي
- مشاكل في الوصلات
- تركيز إجهادات
- فشل مبكر في الاختبارات الهيدروستاتيكية

- الخلاصة

البيضاوية هي نتيجة فقدان التوازن في القوى المحيطة بالأنبوب أثناء مرحلة تثبيت القطر.

والتحكم بها يتحقق من خلال:

- معايرة متجانسة
- تبريد متوازن
- سحب بمحاذاة صحيحة
- خروج الأنبوب بدرجة تصلب كافية
- وليس من خلال تعديل Die.

- 2.4.13 الترهل وعدم الاستقامة (Sagging & Lack of Straightness)

فقدان الاستقرار الطولي للأنبوب : الأنبوب بعد خروجه من المعالجة لا يكون قد اكتسب الصلابة الميكانيكية الكافية ليحافظ على شكله تحت تأثير:

- وزنه الذاتي
- قوة السحب
- مقاومة الماء للحركة

وإذا لم يكتمل التصلب في الزمن والمكان المناسبين يظهر ما يعرف بـ:

- الترهل (Sagging) أو عدم الاستقامة (Lack of Straightness)

- التعريف التشغيلي :

الترهل (Sagging) : انحناء الأنبوب بين نقطتي دعم نتيجة عدم كفاية الصلابة أثناء مروره في أحواض التبريد.

ويظهر غالبا كتقوس خفيف أو هبوط في منتصف المسافة.

عدم الاستقامة : هو خروج الأنبوب عن محوره الطولي، بحيث لا يكون خطه مستقيما.

وقد يظهر على شكل:

- انحراف جانبي
- تموج طولي

- القاعدة الأساسية

هذه المشكلة لا علاقة لها بالـ Die ولا بالـ vacuum مباشرة،

بل مرتبطة بـ:

زمن التصلب مقابل المسافة حتى وحدة السحب.

- أولاً: السبب الفيزيائي

صلابة الأنبوب تتناسب مع:

- درجة التبلور (في المواد شبه البلورية)
- درجة انخفاض الحرارة
- سماكة الجدار

إذا كان الأنبوب: ما يزال ساخناً ولينا فإن: وزنه الذاتي يكفي لتشويهه.

- ثانياً: العوامل المؤثرة : ضعف التبريد

بسبب:

- ارتفاع حرارة ماء التبريد
- قصر حوض التبريد
- ضعف معدل تدفق الماء

فيؤدي إلى:

- خروج الأنبوب من الحوض وهو غير متصلب.

- زيادة سرعة السحب

عند رفع سرعة الخط دون زيادة قدرة التبريد:

يقل زمن التبريد - تقل الصلابة - يحدث الترهل.

- سماكة جدار قليلة مع قطر كبير

في هذه الحالة: الوزن كبير والصلابة الحلقية صغيرة فتزداد قابلية الترهل.

- مسافة طويلة بين الدعامات داخل الحوض

إذا لم يكن الأنبوب مدعوما بشكل كاف داخل التانك: ينحني بين نقاط الدعم.

- ثالثا: تأثير السحب

السحب لا يسبب الترهل مباشرة، لكن: إذا كان الأنبوب لدينا عند دخول haul-off فإن قوة السحب: تشوّهه بدل أن تنقله.

- رابعا: المؤشرات التشغيلية

- الترهل داخل التانك

- مشكلة تبريد.

- الأنبوب مستقيم داخل التانك ويتشوّه بعده بسبب ان التصلب لم يكتمل قبل السحب .

- خامسا: تأثير الحرارة على الاستقامة

التبريد غير المتجانس طويلا يؤدي إلى:

- انكماش غير متساو

- انحراف الأنبوب.

- سادسا: العلاقة مع نوع البوليمر

- المواد:

- ذات درجة تبلور عالية HDPE مثلا

- تحتاج: زمن تبريد أطول للوصول إلى الصلابة.

- المواد غير المتبلورة (PVC)

- تصلبها أسرع نسبيا لكنها حساسة للتشوّه الحراري.

- سابعا: الحلول التشغيلية

- زيادة كفاءة التبريد وليس فقط طوله
- خفض سرعة الخط عند الحاجة
- تحسين دعم الأنبوب داخل التانك
- التأكد من وصول الأنبوب إلى درجة صلابة كافية قبل السحب

الخلاصة

الترهل وعدم الاستقامة هما نتيجة مباشرة لعدم تطابق:

- زمن التصلب مع المسافة حتى نقطة السحب.
- زيادة في الإنتاجية دون زيادة مكافئة في قدرة التبريد ستظهر فورا على شكل انحناء في الأنبوب.

- 4.3.13 خشونة سطح الأنبوب وعدم استقرار المصهور

Surface Roughness & Melt Instability

سطح الأنبوب هو أول مؤشر مباشر على استقرار الجريان داخل الـ Die. فالسطح الأملس يعني أن:

- الجريان منتظم
- إجهاد القص ضمن المجال الآمن
- لزوجة المصهور مستقرة

بينما ظهور الخشونة أو التموجات يعني أن المصهور دخل في منطقة:

- عدم الاستقرار الريولوجي وهذه الظاهرة لا تعالج ميكانيكياً فقط، بل ترتبط مباشرة بتركيبية المادة.
- المظهر التشغيلي للخشونة

تظهر بعدة أشكال:

- خشونة دقيقة منتظمة على السطح. Sharkskin
- تموجات عشوائية واضحة. Melt fracture
- سطح يشبه قشرة البرتقال . Orange peel surface

- القاعدة الفيزيائية

السبب الرئيسي هو:

تجاوز إجهاد القص الحرج عند جدار الـ Die عند هذه النقطة يفقد المصهور الانزلاق المنتظم ويبدأ بالتمزق المجهري على السطح.

- العوامل التشغيلية المسببة

- سرعة خط عالية جدا يؤدي إلي : ظهور الخشونة
- درجة حرارة منخفضة للمصهور يؤدي إلى :
- low melt temperature اللزوجة أعلى إجهاد القص أعلى
- Die gap صغير :يزيد القص بشكل كبير.
- سطح Die خشن أو متآكل:يمنع الانزلاق المنتظم للمصهور.

- دور المادة نفسها

بعض المواد Melt elasticity عالية وهذه المواد تكون أكثر عرضة لـ melt fracture مثل :
HDPE عالي الوزن الجزيئي.

- الحلول التشغيلية (الميكانيكية والحرارية) :

- رفع حرارة المصهور ضمن المجال الآمن
- تقليل سرعة الخط
- زيادة حرارة مناطق الـ Die
- تحسين صقل سطح الـ Die
- زيادة الـ Die gap عند التصميم

لكن هذه الحلول تقلل الإنتاجية. هنا يأتي دور الإضافات.

- دور الإضافات في حل الخشونة
- أولا: مساعدات التشغيل (Processing Aids – PPA) وهي الحل الصناعي الأكثر استخداما.
- آلية العمل

تكون طبقة رقيقة جدا على جدار الـ Die تعمل على:

- تقليل الاحتكاك
- تحويل الجريان من Adhesive flow إلى Slip flow

فيؤدي ذلك إلى:

- انخفاض إجهاد القص عند الجدار
- اختفاء sharkskin
- سطح أملس.

المميزات التشغيلية

- تسمح برفع سرعة الخط
- تحسن اللمعان
- تقلل تراكم الرواسب على الـ Die

الملاحظة التشغيلية المهمة

لا تعمل فورا، بل تحتاج:

Build-up time حتى تغطي سطح الـ Die بالكامل.

- ثانيا: الشموع (Waxes)

مثل:

PE wax -

وظيفتها:

- تحسين الانزلاق الداخلي

- تقليل اللزوجة الظاهرية

لكن تأثيرها على السطح: أضعف من PPA.

- ثالثاً : المزلقات الداخلية (Internal lubricants)

تحسن:

- تجانس الجريان

- استقرار الضغط

مما يقلل ظهور التمججات.

- رابعاً: تعديل التوزيع الجزيئي

المواد ذات :

- Molecular weight distribution أوسع تكون : أكثر استقراراً في البثق.

- مقارنة بين الحل التشغيلي والحل التركيبي :

- الحل التشغيلي سريع لكن يقلل الإنتاجية

- الحل بالإضافة

- يحافظ على الإنتاجية

يعطي استقرار طویل المدى

- المؤشرات التشغيلية لنجاح المعالجة

- انخفاض ضغط الرأس

- ثبات الأمبير
- تحسن اللمعان
- اختفاء الصوت الخشن للجريان

- الخلاصة : خشونة السطح ليست عيب تبريد أو معايرة، بل هي ظاهرة ريولوجية تحدث داخل الـ **Die**.

ومعالجتها الحقيقية تكون عبر:

- التحكم الحراري والتشغيلي
أو
- تعديل سلوك الجريان باستخدام مساعدات التشغيل
- والحل الثاني هو الذي يسمح برفع الإنتاجية دون فقدان جودة السطح.

- **13.4.4 تراكم المواد على الـ Die**

Die Build-up / Plate-out

فقدان استقرار السطح مع الزمن في بداية التشغيل يكون سطح الأنبوب أملسا ومستقرا، ثم تبدأ بعد فترة ملاحظة:

- خطوط على السطح
- نقاط لامعة أو مطفأة
- ازدياد الخشونة تدريجيا
- الحاجة المتكررة لتنظيف الـ **Die**

هذه الظاهرة لا ترتبط بلحظة خروج المصهور فقط، بل هي:

- ظاهرة زمنية ناتجة عن هجرة مكونات من المصهور وترسيبها على سطح القالب.

وتعرف صناعيا باسم: Die Build-up أو Plate-out

- الآلية الفيزيائية

أثناء الجريان داخل الـ Die تتعرض بعض المكونات إلى:

- قص مرتفع
- فرق ضغط
- فرق لزوجة بينها وبين البوليمر

فتتحرك نحو الجدار وعندما تصل إلى السطح المعدني:

- تلتصق به
- تتحلل جزئيا
- تتراكم طبقة رقيقة

ومع الزمن تتحول إلى:رواسب صلبة تشوه الجريان.

- النتيجة المباشرة

حتى لو كانت كل ظروف التشغيل ثابتة هذه الطبقة تؤدي إلى:

- زيادة الاحتكاك
- اضطراب الجريان
- ظهور خطوط على المنتج

- المظهر التشغيلي

- تحسن السطح بعد تنظيف الـ Die مباشرة

ثم تدهوره تدريجيا.

- زيادة ضغط الرأس مع الزمن
- الحاجة لرفع الحرارة للحفاظ على الجودة

- المصادر الرئيسية للتراكم

- الإضافات منخفضة الوزن الجزيئي

مثل:

- بعض المزلقات
- الشموع
- مثبتات حرارية غير متوافقة

لأنها: تهاجر بسهولة إلى السطح.

- الحشوات الدقيقة

إذا لم تكن مشتتة جيدا فإنها تتحرك نحو الجدار مع الجريان.

- الأصباغ غير المتوافقة

خاصة ذات: الطاقة السطحية المختلفة عن البوليمر.

- تحلل البوليمر

ناتج عن:

- حرارة زائدة
- زمن مكوث طويل

وينتج عنه مواد منخفضة الوزن الجزيئي تترسب على القالب.

- العوامل التشغيلية التي تسرع الظاهرة

- درجات حرارة عالية جدا

- مناطق ميتة داخل Die

- سطح Die خشن

- قص مرتفع جدا

- التأثير على العملية

- عدم استقرار الأبعاد

- تغير اللمعان

- زيادة الاستهلاك الطاقى

- توقفات متكررة للتنظيف

- دور الإضافات في المعالجة

أولا Processing Aids

إضافة PPA لا تمنع فقط sharkskin ، بل تكون طبقة انزلاق مستقرة على جدار Die

فتمنع التصاق المواد الأخرى به.

أي أنها تحول السطح من:

Surface for deposition إلى Surface for slip

ثانيا: اختيار المزلق المناسب

المزلق السيئ: يسبب plate-out

المزلق المتوافق: يبقى داخل المصهور.

ثالثاً: تحسين التشنت

التشنت الجيد للحشوات والبيجمنت:

يمنع هجرتها نحو الجدار.

رابعا: مضادات الأكسدة تقلل:

- تحلل البوليمر -- تقلل المواد المترسبة.

- الحلول التصميمية والتشغيلية

- صفّل سطح الـ Die

- إزالة المناطق الميتة

- تقليل زمن المكوث

- ضبط درجات الحرارة

لكن بدون ضبط التركيبية : تعود المشكلة.

- الفرق بين Die Build-up و Melt fracture

- Melt fracture

ظاهرة فورية بسبب القص.

- Plate-out

ظاهرة زمنية بسبب الهجرة والترسب.

- المؤشر التشغيلي

إذا كان: السطح ممتاز عند بداية التشغيل ثم يسوء مع الزمن فالمشكلة ليست في درجات الحرارة ولا في السرعة بل في التركيبة أو التوافق.

- الخلاصة

Die build-up هو نتيجة :

- عدم التوازن بين مكونات التركيبة و سطح القالب تحت ظروف الجريان.
- والحل الحقيقي له ليس تنظيف القالب فقط، بل: تصميم تركيبة مستقرة ريولوجيا و سطحيا.

- 5.4.13 الإجهادات الداخلية والانكماش في الأنابيب المبتوقة

Residual Stresses & Shrinkage

الأنبوب الخارج من خط البثق قد يبدو:

- مستديرا
- بسماكة صحيحة
- بسطح ممتاز

لكنه يحتوي داخليا على:

- إجهادات متبقية (Residual stresses)

نشأت أثناء التبريد والتصلب. وهذه الإجهادات لا تظهر مباشرة، لكنها تؤدي لاحقا إلى:

- تقوس الأنبوب بعد القطع
- تشقق بطيء
- فشل في اختبار الضغط
- تغيير الأبعاد مع الزمن

أي أن:

استقرار الأبعاد الظاهري لا يعني استقرارا بنويًا حقيقيًا.

- أولاً: كيف تتكون الإجهادات الداخلية؟

أثناء التبريد لا تتصلب جميع أجزاء الجدار في نفس اللحظة.

يحدث التسلسل التالي:

- الطبقات الداخلية تبقى ساخنة ولينة
- عند تبريد الداخل يحاول الانكماش لكن الخارج أصبح صلباً ويمنعه

فتنشأ إجهادات شد وضغط داخل الجدار.

- ثانياً: التوزيع النموذجي للإجهادات

في الأنابيب المبردة سريعاً:

- السطح الخارجي : إجهاد ضغط
- المنطقة الداخلية: إجهاد شد

وهذا التوزيع هو السبب في:

- ظهور الشقوق من الداخل في اختبارات الضغط.

- ثالثاً: العوامل التي تزيد الإجهادات الداخلية

- التبريد السريع جدا ويؤدي إلى: فرق كبير في درجات الحرارة بين الداخل والخارج.

سماكة جدار كبيرة لأن:

- الحرارة تحتاج زمناً أطول للخروج من الداخل.
- درجات حرارة مصهور منخفضة تقلل زمن الاسترخاء الجزيئي قبل التصلب.
- سرعة خط عالية
- زمن تبريد أقل لإجهادات أعلى.

- رابعاً: دور نوع البوليمر

المواد شبه البلورية: (HDPE – PP)

- يحدث فيها تبلور أثناء التبريد
- يصاحبه انكماش حجمي
- إذا حدث التبلور بسرعة:
- تتجمد البنية قبل أن تسترخي وتتولد إجهادات أعلى.

- خامساً: الانكماش (Shrinkage)

الانكماش في الأنابيب نوعان:

■ انكماش قطري

يظهر عند:

- رفع الأنبوب من المعايير مبكرا
- عدم اكتمال التبريد

■ انكماش طولي

يظهر بعد القطع على شكل:

- قصر في الطول أو تقوس.

- سادسا: المؤشرات التشغيلية

- تقوس الأنبوب بعد القطع مباشرة : إجهادات طولية غير متوازنة.
- تغير القطر بعد التخزين : عدم اكتمال التبريد.
- فشل اختبار الضغط رغم سلامة الأبعاد: إجهادات داخلية مرتفعة.

- سابعا: العلاقة بين التبريد والإجهادات

التبريد المثالي ليس الأسرع، بل: الأكثر تجانسا وتدرجا.

الهدف:

إعطاء وقت كاف لـ:

Molecular relaxation قبل التصلب الكامل.

- ثامنا: الحلول التشغيلية

- تبريد تدريجي بدل صدمة تبريد
- رفع درجة حرارة المصهور ضمن المجال الآمن

- تقليل سرعة الخط عند السماكات الكبيرة
- زيادة طول منطقة التبريد الفعالة

- **تاسعا: الحلول المرتبطة بالتركيبية**

- **توسيع MWD**

يسمح باسترخاء أفضل للإجهادات.

- **استخدام مواد ذات ESCR أعلى**

تتحمل الإجهادات المتبقية دون فشل.

- **التحكم في درجة التبلور**

بواسطة:

nucleating agents أو ظروف التبريد.

عاشرا: المفهوم الأهم ان المنتج الجيد ليس الذي: تتجمد أبعاده بسرعة بل الذي: تسترخي بنيته قبل أن تتجمد.

- **الخلاصة**

الإجهادات الداخلية هي نتيجة مباشرة لعدم التوازن بين:

- زمن التبريد
- زمن الاسترخاء الجزئي.

والتحكم بها هو الفارق الحقيقي بين:

- أنبوب ينجح في الاختبارات
- وأنبوب يفشل بعد فترة من التشغيل.

-

- 6.4.13 خطوط الالتحام في الـ Spider Die

Weld Line / Knit Line

- منطقة الضعف البنيوي الخفية في الأنبوب

- في بعض تصاميم الـ Pipe Die خصوصا Spider die — يتم حمل الـ mandrel بواسطة

أذرع داخل مجرى المصهور. هذه الأذرع تقسم الجريان إلى عدة مسارات، ثم يعود المصهور ليلتقي خلفها.

- نقطة التقاء هذه الجريانات تسمى **Weld line**: خط الالتحام وهي ليست مجرد أثر بصري، بل منطقة اندماج

لجريانين منفصلين يجب أن يتحولا إلى كتلة واحدة متجانسة.

نجاح هذا الاندماج أو فشله يحدد:

- مقاومة الأنبوب للضغط
- سلوكه في الاختبارات طويلة المدى

- أولا: كيف يتكون خط الالتحام؟

داخل الـ Spider die:

- المصهور ينقسم عند أرجل الـ spider
- يتدفق في مسارات منفصلة
- يلتقي مرة أخرى خلف الأرجل

في هذه اللحظة يجب أن يحدث اندماج جزئي كامل. إذا لم يحدث هذا الاندماج تتكون منطقة ضعف دائمة داخل الجدار.

- ثانيا: متى يكون خط الالتحام خطيرا؟ يصبح خط الالتحام نقطة فشل عندما:

- لا يكون الاندماج كاملا
- تبقى واجهة بين الجريانين

وهذا يحدث عندما:

- تكون حرارة المصهور منخفضة
- يكون القص غير كاف
- يكون زمن الالتحام قصيرا

- ثالثا: العوامل المؤثرة في قوة الالتحام

- درجة حرارة المصهور

كلما كانت أعلى ضمن المجال الآمن:

- تحسن الانتشار الجزيئي
- اندماج أفضل.
- الضغط بعد نقطة الالتقاء

- الضغط العالي : يجبر الجريانات على الاندماج.

- طول منطقة الـ **Land** بعد الالتقاء كلما كانت أطول: زاد زمن الاندماج.

- الوزن الجزيئي وتوزيعه المواد ذات : MWD واسع تعطي اندماجا أفضل.

- رابعا: المؤشر التشغيلي لضعف خط الالتحام

في كثير من الحالات الأنبوب يبدو مثاليا لكن: يفشل في اختبار الضغط في نفس الموقع دائما.

وعند فحص الكسر يظهر: خط طولي ثابت.

هذا هو: Weld line failure

- خامسا: الفرق بين Spider die وSpiral mandrel die

Spider die

- أبسط ميكانيكيا
- أسهل تنظيفا
- أقل تكلفة

لكن:

يحتوي على خطوط التحام.

Spiral mandrel die

يقسم الجريان ويعيد توزيعه بشكل حلزوني دون فصل كامل.

النتيجة:

- لا توجد خطوط التحام واضحة
- تجانس أعلى في الجدار
- أداء ضغط أفضل

لذلك يستخدم في:

- أنابيب الضغط عالية المواصفات.

- سادسا: تأثير ظروف التشغيل حتى مع Spider die يمكن تحسين الالتحام عبر:

- رفع حرارة المصهور
- زيادة back pressure
- تقليل سرعة الخط عند الحاجة
- ضبط درجات حرارة die

- سابعاً : دور التركيبة

بعض التركيبات تعطي التحاماً أفضل بسبب:

- سهولة الانتشار الجزيئي

- زمن استرخاء أطول

بينما المواد عالية اللزوجة جداً: تعطي التحاماً أضعف.

- ثامناً : لماذا لا يظهر العيب فوراً ؟

لأن:

- خط الالتحام ليس فراغاً بل منطقة

- تماسكها الجزيئي أقل فتتشقق فقط تحت الإجهاد طويل المدى.

- الخلاصة :

- خط الالتحام هو نتيجة مباشرة لانقسام الجريان داخل الـ Die.

وقوته تعتمد على:

- حرارة المصهور

- الضغط

- زمن الاندماج

- البنية الجزيئية للمادة

- ولهذا فإن اختيار نوع الـ Die في أنابيب الضغط ليس قراراً ميكانيكياً فقط، بل قرار يرتبط بالعمر التشغيلي للمنتج.

الباب الثالث عشر

العمليات المتقدمة للأنابيب متعددة الطبقات

Multilayer Pipe Coextrusion

- 13.1 الفصل الأول : Multilayer Extrusion

- الهدف من تصميم توزيع الطبقات وتماسكها البنيوي في الأنابيب متعددة الطبقات لا يكون الهدف فقط تشكيل أنبوب، بل بناء نظام طبقي متكامل يعمل كوحدة ميكانيكية واحدة.

كل طبقة لها وظيفة:

- طبقة هيكلية
- طبقة لاصقة
- طبقة حاجز
- طبقة حماية

لكن الأداء الحقيقي للأنبوب لا يعتمد على خواص كل طبقة منفردة، بل على: جودة الالتحام بين الطبقات واستقرار

الجريان داخل Die

- أولاً: مبدأ التشكيل في Coextrusion يتم:

دمج مصهورات قادمة من عدة Extruders داخل رأس واحد لتخرج على شكل: جدار متعدد الطبقات متحد المحور.

التحدي الأساسي: أن تصل جميع الطبقات إلى نقطة الخروج:

بنفس:

- السرعة الخطية
- التاريخ الحراري

الضغط

- ثانيا: نوعا توزيع الطبقات

Layered flow through mandrel

كل طبقة تسلك مسارا مستقلا حتى تلتقي قبل الخروج.

Spiral multilayer distribution

يتم توزيع الطبقات حلزونيا لتحقيق تجانس محيطي كامل.

- ثالثا: التوازن الريولوجي بين الطبقات

أخطر نقطة في Coextrusion هي عدم تطابق لزوجة المصهورات.

إذا كانت لزوجة طبقة أقل بكثير من الأخرى:

- يحدث التقاف للطبقات
- تتغير سماكة كل طبقة حول المحيط
- يظهر عدم تمركز للطبقات

وهذا يسمى: Layer distortion

- رابعا: شروط استقرار الطبقات

- تقارب اللزوجة (Viscosity matching) عند نفس Shear rate و درجة الحرارة.

- توازن الضغوط : أي اختلاف في الضغط يؤدي إلى: تحرك الطبقات داخل الرأس.

- تماثل السرعة الخطية : وإلا يحدث انزلاق بين الطبقات. Interfacial shear

- خامسا: تماسك الطبقات (Interlayer adhesion)

ليس كل بوليمرين يلتصقان ببعضهما لذلك تستخدم Tie layers

وهي مواد ذات توافق كيميائي مع الطبقتين بدونها يحدث Delamination

- سادسا: المؤشرات التشغيلية لمشاكل الطبقات

- ظهور طبقة على السطح في جهة دون أخرى

- عدم توازن الجريان.

- انفصال الطبقات عند الثني

- ضعف الالتصاق

- تغير سماكة الطبقات مع الزمن

- عدم استقرار في التغذية أو الضغط.

- سابعا: تأثير السحب والمعايرة

كما في الأنبوب أحادي الطبقة:

- القطر تحدده المعايرة

- السماكة يحددها السحب

لكن هنا:

- السحب يؤثر على جميع الطبقات معا وأي عدم استقرار يؤدي إلى: تفاوت في نسب الطبقات.

- ثامنا: الإجهادات الداخلية في الأنابيب متعددة الطبقات

تزداد خطورتها بسبب:

- اختلاف معامل الانكماش بين الطبقات.

مما يؤدي إلى:

- تقوس الأنبوب

- انفصال طبقي مع الزمن

- تاسعا: التحدي الحراري

- لكل طبقة مجال حراري مختلف.

لكن داخل الرأس: يوجد مجال حراري واحد. وهنا تظهر خبرة التشغيل في إيجاد نافذة حرارية مشتركة.

- عاشرأ : الخلاصة

نجاح Coextrusion لا يعتمد على عدد الطبقات، بل على:

- التوازن الريولوجي

- استقرار الضغط

- توافق المواد

- التصميم الصحيح للرأس

لأن أي خلل داخل الرأس لا يمكن إصلاحه لاحقا في المعالجة أو التبريد.

13.2 - الفصل الثاني بثق الألواح البلاستيكية (Sheet Extrusion)

من توزيع المصهور إلى تثبيت البنية

بثق الألواح البلاستيكية (Sheet Extrusion) لا يمكن التعامل معه على أنه مجرد امتداد مباشر لعمليات بثق الأنابيب أو البروفيل، رغم اشتراكها جميعاً في المبدأ الأساسي لعملية البثق. فالاختلاف هنا لا يرتبط فقط بشكل المنتج، بل بطبيعة السيطرة على المادة أثناء التشكل.

في المنتجات ذات المقطع الهندسي المحدد، مثل الأنابيب والبروفيل، تكون العملية موجهة نحو تثبيت أبعاد حول محور واضح، حيث يتم التحكم في القطر أو الشكل داخل منظومة معايرة، وتكون السماكة نتيجة علاقة مباشرة بين فجوة قالب وسرعة السحب.

أما في بثق الألواح البلاستيكية، فإن المنتج لا يملك هذا المحور المرجعي، بل يمتد عرضياً في اتجاه مفتوح، لتتحول المشكلة من تثبيت شكل هندسي إلى إدارة توزيع المصهور عبر عرض كامل. هنا لا يعود السؤال: ما هو القطر؟ بل يصبح: هل الجريان متوازن عبر كل نقطة على العرض؟

بهذا المعنى، فإن بثق الألواح البلاستيكية ليس عملية تشكيل منتج مسطح بقدر ما هو عملية ضبط حالة فيزيائية للمصهور قبل تجميدها. فالمادة لا تُشكّل فقط، بل تُقاد عبر توازن دقيق بين الجريان، والحرارة، والشد، والتبريد، بحيث يتم تثبيت هذه الحالة في اللحظة المناسبة.

القالب في هذه العملية لا يحدد السماكة النهائية، بل يقوم بدور أكثر حساسية يتمثل في توزيع المصهور بحيث يصل إلى كامل العرض بنفس معدل التدفق، ونفس الضغط، ونفس التاريخ الحراري والانسيابي. وأي اختلال في هذا التوزيع قبل خروج المصهور لا يمكن إلغاؤه لاحقاً، بل يتم تجميده داخل المنتج.

بعد خروج المصهور من القالب، يدخل اللوح في منطقة انتقالية قصيرة لكنها حاسمة، حيث لا يكون المصهور سائلاً بالكامل، ولا صلباً بما يكفي ليحافظ على شكله. وفي هذه المسافة القصيرة تتحدد القابلية الفعلية للمادة للتمدد، ويُحسم جزء كبير من سلوك السماكة النهائي.

ثم تأتي منظومة الرولات، التي لا تعمل كوسيلة تبريد فقط، بل كأداة تثبيت فعلية للسماكة والبنية. فهي تمثل في بثق الألواح ما تمثله المعايرة في بثق الأنابيب، ولكن دون تجويف مغلق، بل من خلال توازن حراري وميكانيكي لحظي.

أما خط السحب، الذي قد يبدو عنصرًا ناقلًا فقط، فهو في الحقيقة المرجع الذي يربط بين جميع أجزاء العملية، لأنه يحدد زمن التبريد، ومستوى الشد، ومعدل الإنتاج، وبالتالي يعيد تشكيل التوازن الكامل للعملية.

ولهذا فإن أي محاولة لفهم بثق الألواح البلاستيكية من خلال متغير واحد — مثل درجة الحرارة، أو فجوة القالب، أو سرعة السحب — تؤدي إلى فهم جزئي، وإلى حلول تشغيلية مؤقتة. فالسماكة، وجودة السطح، والاستقرار البعدي، كلها نتائج لتوازن منظومة كاملة، وليست ناتجة عن عنصر منفرد.

في هذا الفصل سيتم تناول بثق الألواح البلاستيكية من هذا المنظور، ليس كعملية تشكيل هندسي فقط، بل كعملية موازنة جريان وطاقة تبدأ قبل القالب، وتستمر حتى لحظة تجميد البنية، حيث يتحول المصهور من حالة قابلة للتغير إلى منتج يحمل خصائصه النهائية.

موقع عملية بثق الشيت ضمن تقنيات التشكيل-

الفرق الجوهرى بين المنتج المستمر الهندسي (Pipe / Profile) والمنتج المسطح :

- أن التحكم لم يعد شعاعيا... بل عرضيا (Cross-machine direction)

- السماكة لم تعد نتيجة فجوة واحدة... بل نتيجة منظومة كاملة

- **فلسفة تشكيل الشيت**

في الأنابيب:

- القطر يثبت بالمعايرة

- السماكة بالسحب

أما في الشيت:

- القالب (Die) يحدد توزيع المصهور عرضيا

- الفجوة تحدد السماكة الابتدائية

- الرولات تحدد السماكة النهائية

- التبريد يجمد النتيجة

أي أن العملية:

- توازن طاقة وجريان قبل أن تكون تشكيل شكل.

- منظومة الجريان قبل القالب (Die)

وظيفة الملى قبل الدخول للـ: T-die

- تجانس حراري

- تجانس انسيابي

- استقرار الضغط

الربط مع:

- Screen changer

- Static mixer

هنا تستفيد من الفصول السابقة بدون تكرار

- مرحلة الأولى تصميم الـ T-Die

- الهدف الفيزيائي:

تحويل الجريان من مجرى دائري إلى مجرى مستطيل مع

- نفس معدل التدفق

- نفس الضغط

- نفس التاريخ الحرار على كامل العرض.

- التحدي الحقيقي:

المصهور يفضل المنتصف ولذلك يجب تصميم:

- Coat-hanger

- Fish-tail

كأنظمة موازنة طاقة وليس قنوات فقط.

Lip adjustment ودوره الحقيقي

ليس لضبط السماكة فقط — بل:

- تصحيح اختلال الجريان
- ضبط التوزيع العرضي
- الخروج من القالب (Die) — منطقة التحول الحرجة

- مرحلة Die swell

بداية فقدان السيطرة على السماكة وهي أخطر منطقة في العملية كلها.

- مرحلة منظومة Chill Roll

ليست للتبريد فقط وظيفتها:

- تثبيت السماكة
- تحديد نعومة السطح
- تجميد البنية

تحدد السماكة فعلياً بين :

- ضغط الرول
- سرعة السحب
- درجة حرارة المصهور

خط السحب (Haul-off) كعنصر تحكم في السماكة

العلاقة الثلاثية:

- سرعة السحب
- درجة حرارة الرول
- معدل التدفق

نافذة التشغيل في بثق الشيت

التوازن بين:

- جودة السطح
- ثبات السماكة
- الإنتاجية

وليس تحقيق قيمة واحدة.

- العيوب الصناعية وفلسفة تفسيرها

- سماكة غير متجانسة عرضيا
- خطوط جريان
- Orange peel
- Neck-in
- Edge bead

لكن تفسيرها يكون: من أين اختل التوازن؟ وليس: كيف أتحكم في الحرارة فقط.

الخلاصة الصناعية للفصل

بنفس أسلوبك في الأنابيب:

القالب (Die) يوزع الجريان

الرول يثبت السماكة

التبريد يجمد النتيجة

السحب يحدد الإنتاجية

وأي فهم خارج هذا التوازن يبقى فهما ناقصا.

13.3 الفصل الثالث : فلسفة تشكيل الشيت

في عمليات بثق الأنابيب والبروفایل يكون الشكل الهندسي هو نقطة الانطلاق، ويكون الهدف الأساسي هو الوصول إلى أبعاد مستقرة حول محور محدد، حيث يتحدد القطر أو المقطع داخل منظومة معايرة واضحة المعالم. أما في بثق الشيت فإن المسألة تختلف جذريا، لأن المنتج هنا لا يملك محورا هندسيا يقود عملية التثبيت، بل يمتد عرضيا في اتجاه مفتوح، وتصبح السيطرة الحقيقية على توزيع المصهور عبر العرض لا على الشكل فقط. فال قالب (Die) في بثق الشيت لا يصنع السماكة النهائية، ولا يضمن تجانس المنتج بمفرده، بل يقوم بمهمة أكثر حساسية، وهي:

- توزيع المصهور على كامل العرض بنفس:

- معدل التدفق

- الضغط

- درجة الحرارة

- والتاريخ القصي

وأي خلل في هذا التوازن قبل خروج المصهور من القالب (Die) يتحول مباشرة إلى تفاوت في السماكة لا يمكن إلغاؤه لاحقا، بل يمكن فقط التخفيف من أثره.

وعلى خلاف الأنابيب، حيث تثبت الأبعاد داخل المعايرة، فإن الشيت يمر بمرحلة حرجة جدا بين خروجه من القالب (Die) ووصوله إلى أول رول تبريد، وهي المنطقة التي:

- لا يكون فيها المصهور سائلا بالكامل ولا صلبا بما يكفي ليحافظ على شكله وفي هذه المسافة القصيرة يتحدد مصير السماكة فعليا.

- لهذا فإن منظومة الرولات في بثق الشيت لا تؤدي وظيفة تبريد فقط، بل تقوم بالدور الذي كانت تقوم به المعايرة في الأنابيب، ولكن بطريقة مختلفة تماما، إذ يتم فيها:

- تثبيت السماكة
- تحديد نعومة السطح
- وتجميد البنية الداخلية للمادة

أي أن الرول الأول يمثل لحظة الانتقال من مصهور يمكن أن يتغير شكله إلى منتج يحمل أبعاده النهائية.

-العوامل المؤثرة السماكة النهائية للشيت نتيجة توازن ثلاثي بين:

- معدل تدفق المصهور من القالب (Die)-
- سرعة السحب
- وحرارة وضغط الرول

وليست نتيجة فجوة القالب (Die) كما قد يبدو ظاهرياً.

وبهذا المعنى فإن بثق الشيت ليس عملية تشكيل شكل مسطح، بل هو عملية موازنة جريان وطاقة عبر عرض مفتوح، تبدأ داخل القالب (Die)، وتستمر حتى لحظة التجميد على الرول.

وأي محاولة لضبط السماكة أو تجانس المنتج من نقطة واحدة فقط — حرارة، فجوة داي، أو سرعة سحب — دون فهم هذا التوازن، تؤدي إلى استقرار ظاهري قصير الأمد يقابله اضطراب مستمر في التشغيل.

13.4 الفصل الرابع منظومة الـ Chill Roll

- تثبيت السماكة وتجميد البنية

بعد خروج المصهور من القالب (Die) يدخل الشيت إلى المرحلة الأكثر حساسية في العملية كلها، وهي المرحلة التي يتحول فيها من مادة يمكن أن يتغير شكلها في كل لحظة إلى منتج يحمل أبعاده النهائية. وهذه اللحظة لا تحدث داخل القالب (Die)، بل تحدث عند أول نقطة تماس حقيقية مع رول التبريد.

ولهذا فإن منظومة الـ Chill Roll في بثق الشيت لا تؤدي وظيفة التبريد فقط، بل تقوم بالدور الذي كانت تقوم به المعايير في بثق الأنابيب، ولكن بأسلوب مختلف تماما، لأنها لا تحتوي على تجويف مغلق يفرض الأبعاد، بل تعتمد على توازن حراري وميكانيكي لحظي.

- لحظة التثبيت الأولى عند ملامسة المصهور لسطح الرول الأول يحدث في نفس اللحظة:

- انتقال حراري سريع جدا
- تكون طبقة متجمدة رقيقة على السطح
- بقاء القلب الداخلي في حالة لزجة

وفي هذه اللحظة يتحدد:

- السمك الفعلي للشيت
- درجة نعومة السطح
- بداية البنية الداخلية للمادة

لأن المادة تفقد قدرتها على الانسياب الحر بمجرد تكون هذه الطبقة المتجمدة. ولهذا فإن موقع الرول الأول بالنسبة للداي ليس تفصيلا ميكانيكيا، بل هو عنصر تحكم مباشر في السماكة والاستقرار.

- من يحدد السماكة فعليا؟

السماكة النهائية للشيت لا تتحدد عند الفجوة، بل تتحدد عند نقطة السحب بين الرول الأول والثاني نتيجة التوازن بين:

- معدل تدفق المصهور من القالب (Die)

- سرعة دوران الرولات

- ضغط التلامس (Nip force)

- درجة حرارة سطح الرول

فإذا زاد السحب انخفضت السماكة، وإذا انخفض السحب زادت السماكة، لكن ضمن حدود قدرة المصهور على التمدد قبل أن يتجمد. أي أن السماكة هي نتيجة شد المصهور قبل تجميده.

وظيفة الرولات ليست واحدة منظومة الرولات لا تعمل كرول تبريد واحد، بل كمنظومة متكاملة لكل رول فيها وظيفة مختلفة:

الرول الأول

- تثبيت السماكة
- تحديد جودة السطح الملامس له
- بدء تجميد البنية

الرول الثاني

- استكمال التبريد
- تثبيت الاستقرار البعدي
- التحكم في الشد

الرول الثالث

- إنهاء التبريد
- نقل الشيت إلى مرحلة السحب دون تشوه

تأثير درجة حرارة الرول

حرارة الرول لا تتحكم فقط بسرعة التبريد، بل تتحكم في:

- مستوى التبلور (في المواد شبه المتبلورة)

- اللمعان أو المظهر السطحي

- الإجهادات الداخلية

فالتبريد السريع جدا قد يعطي سطحاً لامعاً لكنه يحبس إجهادات داخلية، والتبريد البطيء يعطي استقراراً أعلى لكنه قد يؤثر على الإنتاجية.

ضغط الرولات ودوره الحقيقي

ضغط الرولات لا يستخدم لتقليل السماكة فقط، بل من أجل:

- إجبار المصهور على الالتصاق الكامل بسطح الرول

- منع دخول الهواء

- تحقيق تجانس السماكة عبر العرض

لأن أي منطقة لا تلامس الرول بنفس الضغط ستبرد بطريقة مختلفة، وتتحول مباشرة إلى تفاوت في السماكة أو في المظهر.

أين تتجمد النتيجة فعلياً؟

النتيجة النهائية للشيت تتجمد عند النقطة التي:

- تنخفض فيها درجة حرارة القلب الداخلي إلى ما دون درجة اللزوجة الحرجة

- وليس عند ملامسة السطح للرول فقط.

ولهذا فإن طول منطقة التبريد وزمن البقاء عليها يحددان:

- الاستقرار البعدي

- قابلية اللف لاحقاً

- منع التقوس أو الالتواء

الخلاصة

- الرول الأول لا يبرد فقط... بل يحدد السماكة.
 - الشد لا يقلل السمك فقط... بل يشكل البنية قبل تجميدها.
 - درجة حرارة الرول لا تتحكم في التبريد فقط... بل في البنية الداخلية للمادة.
- وأي خلل في التوازن بين: التدفق و السحب والتبريد لا يمكن تصحيحه لاحقا، بل يتم تجميد أثره داخل الشيت.

- التوازن بين الجودة والإنتاجية

- بعد أن تتحدد السماكة عند منظومة الرولات وتبدأ البنية الداخلية للمادة في التجمد، يدخل الشيت إلى مرحلة تبدو ميكانيكية ظاهريا، لكنها في الحقيقة عنصر التحكم الأهم في استقرار العملية على المدى الطويل، وهي مرحلة السحب.
- فخط السحب في بثق الشيت لا يقتصر دوره على نقل المنتج إلى مرحلة القص أو اللف، بل يمثل المرجع الحقيقي لسرعة الخط بالكامل، وبالتالي فهو الذي يحدد العلاقة بين:
- معدل خروج المصهور من القالب (Die)
 - وزمن بقاء الشيت على الرولات
 - ودرجة التمدد التي يتعرض لها قبل التجميد الكامل.

السحب كعنصر تحكم في التوازن الطافي إذا اعتبرنا أن (Injection Mould) يضخ طاقة في صورة:

- ضغط
- حرارة
- ومعدل تدفق

فإن خط السحب هو العنصر الذي يحول هذه الطاقة إلى:

- سماكة فعلية
- واستقرار أبعادي
- وإنتاجية

فزيادة سرعة السحب لا تعني فقط زيادة الإنتاج، بل تعني:

- زيادة معدل الشد على المصهور
- تقليل زمن التبريد على الرولات
- تغيير مستوى التبلور
- تغيير الإجهادات الداخلية

أي أن كل تغيير في سرعة السحب يعيد تشكيل البنية الداخلية للشيت، وليس فقط أبعاده.

- حدود قدرة المصهور على التمدد

المصهور الخارج من القالب (Die) يملك قدرة محدودة على التمدد قبل أن يفقد تماسكه أو يبدأ في الانكماش غير المنتظم

وهذه القدرة ترتبط بـ:

- الوزن الجزيئي
- درجة الحرارة
- مستوى التجانس
- وجود إضافات

- ولهذا فإن زيادة سرعة السحب فوق حد معين تؤدي إلى:

- عدم ثبات السماكة
- ظهور خطوط شد
- انخفاض في جودة السطح

- حتى لو بدا أن السماكة أصبحت صحيحة رقمياً.

العلاقة بين السحب والتبريد سرعة السحب تحدد الزمن الذي يقضيه الشيت على الرولات.

فإذا زادت السرعة:

- ينخفض زمن التبريد
- يبقى القلب الداخلي أكثر حرارة
- تزداد احتمالية:
- الالتواء
- التقوس
- عدم الاستقرار أثناء القص أو اللف

أما إذا انخفضت السرعة:

- يزداد التبريد
- يتحسن الاستقرار
- لكن على حساب الإنتاجية.

- نافذة التشغيل في بثق الشيت ليست قيمة واحدة مثالية، بل هي المجال الذي يتحقق فيه التوازن بين:

- ثبات السماكة عبر العرض
- جودة السطح
- الاستقرار البعدي
- الإنتاجية المقبولة

وخارج هذه النافذة تبدأ العملية في إظهار أعراض عدم الاستقرار حتى لو استمرت في العمل.

- مظاهر الخروج من نافذة التشغيل

الخروج من نافذة التشغيل لا يظهر دائما في السماكة مباشرة، بل قد يظهر في:

- اهتزاز الشيت قبل الدخول للروات
- تغير اللمعان عبر العرض

- صعوبة اللف
- ظهور إجهادات داخلية عند القص
- تقوس المنتج بعد التخزين

وهذه كلها مؤشرات على اختلال التوازن بين:

- التدفق
- السحب
- التبريد

وليس على خلل في عنصر واحد فقط.

- الإنتاجية ليست سرعة الخط

الإنتاجية الحقيقية في بثق الشيت لا تقاس بأقصى سرعة سحب يمكن الوصول إليها، بل تقاس عند النقطة التي:

- تعمل فيها العملية داخل نافذة التشغيل
- بأقل نسبة هدر
- وبأعلى استقرار زمني

لأن أي زيادة في السرعة خارج هذه النافذة تتحول مباشرة إلى:

- فاقد في الجودة
- فاقد في المادة
- توقفات متكررة

أي انخفاض فعلي في الإنتاجية.

الخلاصة

- السحب لا ينقل الشيت فقط... بل يحدد زمن التبريد والبنية الداخلية.
- وزيادة السرعة لا تعني زيادة الإنتاج... بل تعني تغيير كامل في توازن العملية.
- ونافذة التشغيل ليست رقما... بل حالة استقرار طاقي للعملية كلها.

قراءة العيوب

- أولاً : العيوب الصناعية في بثق الشيت
- تفسيرها من منظور الجريان والطاقة

في بثق الشيت لا تكون العيوب ناتجة عن عنصر منفرد، بل هي النتيجة المباشرة لاختلال التوازن بين الجريان والشد والتبريد. ولهذا فإن قراءة العيب من شكله الخارجي فقط تقود غالبا إلى حلول موضعية مؤقتة، بينما فهم موقع نشوء الاختلال داخل المنظومة هو الطريق الوحيد للوصول إلى استقرار حقيقي. فالعيب في المنتج المسطح ليس مشكلة سطح، بل هو أثر متجمد لحالة انسيابية وحرارية سابقة.

- تفاوت السماكة عرضيا

يعد هذا العيب الأكثر ارتباطا بطبيعة عملية بثق الشيت، وهو لا ينشأ عند الرولات كما قد يبدو، بل يبدأ داخل القالب (Die) نتيجة:

- اختلال توزيع الجريان
- اختلاف درجة الحرارة عبر العرض
- عدم تجانس اللزوجة

ويظهر لاحقا لأن الرولات تقوم بتجميد هذا الاختلال وليس تصحيحه.

- أما التعديلات الموضعية على الـ lip فهي:

تصحيح انحرافات صغيرة وليست علاجا لخلل في تصميم التوزيع أو في التجانس الحراري.

- Edge Bead

زيادة السماكة عند الأطراف هي نتيجة مباشرة لاختلاف ظروف الجريان والشد بين المنتصف والحواف.

فعند الحواف:

يكون الشد أقل ويكون فقدان الحرارة أسرع وتكون مقاومة التمدد أعلى

فيتجمع المصهور مكونا حافة سميكة.

ولهذا فإن معالجة هذه الظاهرة لا تكون بخفض الفجوة فقط، بل بفهم العلاقة بين:

- توزيع الجريان داخل القالب (Die)

- مستوى الشد

- درجة حرارة الرول عند الأطراف.

- خطوط الجريان (Flow Lines)

ظهور خطوط طولية على سطح الشيت يدل على:

- اختلاف في سرعة الجريان داخل القالب

- تفاوت في مستوى الشد قبل التجميد

وهو في الحالتين مؤشر على أن المصهور وصل إلى الرول بتاريخ انسيابي غير متجانس. أي أن المشكلة ليست سطحية، بل هي مشكلة في:

- تجانس المصهور

- استقرار الضغط قبل الفجوة.

- مظهر قشر البرتقال (Orange Peel)

هذا العيب يرتبط مباشرة بحالة سطح المصهور لحظة ملاسته للرول. ويظهر عندما:

- يكون التبريد بطيئا

- أو تكون اللزوجة مرتفعة

- أو يكون الشد غير كافٍ لفرد السطح قبل التجميد.

أي أن السطح يتجمد قبل أن يصل إلى حالة الانسياب الكاملة.

- التقوس أو الالتواء بعد القص

هذا العيب لا ينشأ عند القص، بل يكون موجودا داخل الشيت على شكل:

- إجهادات داخلية غير متوازنة

ناتجة عن:

- اختلاف معدل التبريد بين السطح والقلب

أو بين جانب وآخر من الشيت

أو عن شد غير متجانس عبر العرض.

وعند قص الشيت تتحرر هذه الإجهادات فيظهر التقوس.

- عدم استقرار اللف

- إذا لم يكن التبريد كاملا قبل اللف فإن القلب الداخلي يبقى في حالة لزجة، وعند اللف:

- تحدث إعادة توزيع للإجهادات

يتغير السمك الموضعي

يتشوه السطح

أي أن المشكلة ليست في ماكينة اللف، بل في زمن التبريد قبلها.

- فقاعات أو فراغات داخلية

ترتبط هذه الظاهرة بـ: وجود هواء محبوس بين المصهور والروول

أو رطوبة داخل المادة

أو عدم كفاية الضغط عند نقطة التلامس الأولى.

وهي دليل على أن التثبيت لم يحدث لحظة الملامسة بشكل كامل.

- منهجية قراءة العيب أي عيب في الشيت يجب أن يسأل عنه بالسؤال التالي:

- أين اختل التوازن؟
- هل قبل قالب التشكيل ؟
- داخل قالب التشكيل ؟
- بين قالب التشكيل والروول؟
- أم أثناء التبريد؟

وليس: أي درجة حرارة أرفع أو أخفض؟

- الخلاصة الصناعية للفصل

- القالب (Die) يحدد توزيع الجريان عبر العرض.
 - الفجوة تعطي الحالة الابتدائية للمصهور.
 - الروول الأول يثبت السماكة.
 - السحب يحدد التمدد وزمن التبريد
 - والتبريد يجمد النتيجة.
- وأي عيب في الشيت هو أثر مباشر لاختلال هذا التوازن، وليس خلا في عنصر منفرد.

13.5 القولبة بالحقن

- فلسفة التشكيل داخل قالب مغلق

- في عمليات البثق يكون الجريان مستمرا ويكون تثبيت الشكل نتيجة السحب والتبريد التدريجي خارج القالب (Die)، أما في القولبة بالحقن فإن المصهور ينتقل إلى جريان محكوم داخل تجويف مغلق، وتصبح كل لحظة في الدورة مرتبطة مباشرة بالكثافة النهائية وثبات الأبعاد والإجهادات الداخلية. فالقطعة لا تتشكل عند خروجها من القالب، بل تتشكل وهي في الحالة المنصهرة تحت تأثير ضغط يتناقص مع المسافة عن البوابة، ولهذا فإن عملية الحقن ليست ملء قالب بالشكل المطلوب، بل ملء يتبعه تعويض انكماش ثم تجميد للبوابة ثم تبريد تحت ضغط.
- الجريان داخل القالب جريان ضغطي وليس جريان سحب، ولذلك فإن آخر نقطة تمتلئ هي أول نقطة تتوقف عن استقبال الضغط التعويضي. ومن هذه اللحظة تبدأ الفروق في الكثافة والانكماش والتوجه الجزيئي، ويصبح ترتيب الامتلاء هو الذي يحدد ترتيب التجميد. فجبهة المصهور تتقدم على شكل طبقة تتجمد على الجدار بينما يبقى القلب في حالة جريان، وبذلك يحمل كل جزء من المقطع تاريخا مختلفا من القص والتبريد.

- في مرحلة الملء يكون الهدف إيصال المصهور إلى جميع أجزاء التجويف قبل أن يفقد قابليته للجريان، ولكن الوصول وحده لا يكفي، بل يجب أن يتم بدرجة حرارة متقاربة وسرعة جريان متقاربة، لأن اختلاف سرعة الجريان يؤدي إلى اختلاف في التاريخ القصي ومستوى التوجه الجزيئي، وهذا يظهر لاحقاً على شكل اختلاف في الانكماش وفي الخواص الميكانيكية.
- بعد اكتمال الملء يبدأ الضغط التعويضي، ووظيفته ليست ضغط المادة داخل القالب بل تغذية المناطق التي لا تزال منصهرة لتعويض الفقد الحجمي الناتج عن التبريد. فالمصهور عند انخفاض حرارته يفقد حجمه، وإذا انقطع مسار التغذية قبل اكتمال هذا الفقدان تتكون الفراغات الداخلية ويحدث الهبوط السطحي وتتنخفض الكثافة.
- لحظة تجمد البوابة تمثل نهاية التحكم في القطعة، لأن القالب ينفصل عندها عن وحدة الحقن ويتحول إلى نظام مغلق يبرد وفق توزيع الحرارة داخله. ومن هذه اللحظة لا يمكن إدخال مادة إضافية ولا يمكن تغيير الكثافة الداخلية، ولذلك فإن كل ما يحدث بعد ذلك يكون قد تحدد قبل تجمد البوابة.
- التبريد داخل القالب لا يحدد زمن الدورة فقط، بل يحدد البنية النهائية للمادة. ففي المواد شبه المتبلورة يتحدد مستوى التبلور وحجم الانكماش، وفي المواد غير المتبلورة تتحدد الإجهادات الداخلية وثبات الأبعاد. وأي عدم توازن في التبريد يتحول مباشرة إلى التواء أو اختلاف في الأبعاد أو تغير في الخواص عبر المقطع.
- في البثق يتحدد الشكل عند السحب، أما في الحقن فيحدد الشكل عند تجمد البوابة. فالملء يعطي الشكل الهندسي، والضغط التعويضي يعطي الكثافة، والتبريد يعطي الاستقرار البعدي.
- **دورة الحقن كمنظومة طاقة**
- دورة القولية بالحقن مسار لتحويل الطاقة من حرارة وقص داخل البرغي إلى ضغط تعويضي ثم إلى إجهادات داخلية ثم إلى بنية متجمدة تحدد خواص القطعة النهائية. واستقرار القطعة يبدأ داخل الأسطوانة وليس داخل القالب، لأن تجانس المصهور حرارياً ولزوجياً ووزنياً هو الذي يحدد استقرار الجريان داخل التجويف.
- في مرحلة اللدونة يتحول البوليمر إلى مصهور متجانس قادر على الجريان بكمية ثابتة لكل دورة، وأي تفاوت في هذه المرحلة يظهر داخل القالب على شكل اختلاف في سرعة الجريان والضغط المطلوب للملء والانكماش.
- في مرحلة الحقن يتم التحكم في سرعة الجبهة الأمامية للمصهور، لأن الضغط هو نتيجة لمقاومة الجريان داخل التجويف. وهذه المرحلة هي التي تحدد نمط الجريان ومواقع خطوط الالتحام ومستوى التوجه الجزيئي وتوزيع الحرارة داخل القطعة.
- نقطة التحويل من السرعة إلى الضغط هي اللحظة التي تنتقل فيها السيطرة من تشكيل الشكل إلى تثبيت الكثافة. فالتحويل المبكر يؤدي إلى عدم اكتمال الملء وانخفاض الكثافة، والتحويل المتأخر يؤدي إلى ضغط زائد وتكون إجهادات داخلية وظهور الزوائد.

- في مرحلة الضغط التعويضي ينتقل الضغط من البوابة باتجاه الداخل، وكلما تجمدت منطقة انقطع عنها الضغط، ولهذا فإن زمن هذه المرحلة يتحدد بلحظة تجمد البوابة وليس بزمن ثابت.
- بعد تجمد البوابة تتحول القطعة إلى نظام مغلق يبرد من الخارج إلى الداخل، وفي هذه المرحلة تتحدد الإجهادات الداخلية والانكماش النهائي وثبات الأبعاد. وخلال ذلك يبدأ البرغي في تحضير الجرعة التالية، واستقرار هذه المرحلة يحدد استقرار العملية بالكامل.
- كل مرحلة تؤثر في المرحلة التي تليها، فاللدونة غير المتجانسة تؤدي إلى ملء غير متوازن، والملء غير المتوازن يؤدي إلى ضغط تعويضي غير متجانس، وهذا يتحول بالتبريد إلى تشوه دائم.

- العيوب الصناعية في القولبة بالحقن

- القطعة المحقونة تحمل تاريخها منذ لحظة اللدونة حتى تجمد البوابة، ولذلك فإن أي عيب ظاهر هو نتيجة مباشرة لاختلال حدث في مرحلة محددة من الدورة.
- عدم اكتمال الملء يعني فقدان قابلية الجريان قبل الوصول إلى نهاية التجويف نتيجة انخفاض درجة الحرارة أو تجمد الطبقة الملاصقة للجدار مبكراً أو ارتفاع مقاومة الجريان داخل القالب.
- الزوائد عند خط الفصل تعني وجود طاقة ضغط زائدة بعد اكتمال الملء بسبب تأخر نقطة التحويل أو ارتفاع الضغط التعويضي.
- الهبوط السطحي والفراغات الداخلية يعنيان توقف التعويض الحجمي قبل اكتمال الانكماش نتيجة تجمد البوابة مبكراً.
- آثار الاحتراق تنتج عن انضغاط الهواء في آخر مناطق الامتلاء وعدم وجود مسار لخروجه.
- خطوط الالتحام تتكون عندما تلتقي جبهتان من المصهور في حالة شبه متجمدة فتكون النتيجة ضعفاً ميكانيكياً واختلافاً بصرياً.
- الالتواء هو نتيجة إجهادات داخلية غير متوازنة ناتجة عن اختلاف التبريد أو التوجه الجزيئي أو الكثافة عبر المقطع.
- قراءة العيب تعني تحديد المرحلة التي نشأ فيها الخلل وليس تغيير قيمة بارامتر بشكل منفصل.

- 13.6 القولبة بالحقن متعدد الطبقات

في الحقن متعدد الطبقات يتحول التجويف إلى نظام جريان لعدة مصاهير تتكون منها بنية طبقية داخل المقطع. وترتيب الحقن هو الذي يحدد موقع كل طبقة، بينما يحدد توازن اللزوجة قدرتها على البقاء في هذا الموقع. فالمادة الأقل لزوجة تميل إلى الهجرة نحو الجدران، والمادة الأعلى لزوجة تبقى في القلب، ويحدد تصميم المجرى والبوابة وسرعة الحقن استقرار هذا الترتيب داخل القالب.

عند التبريد تتولد إجهادات بينية نتيجة اختلاف الانكماش ومعامل التمدد الحراري بين المواد، وقد يؤدي ذلك إلى تقوس أو انفصال طبقي أو تشقق داخلي إذا لم يكن التوافق الحراري والانكماشى مدروسا.

في أنظمة التشكيل متعدد المواد يكون الفرق الجوهرى في موقع التفاعل بين المواد. ففي Coinjection و Sandwich يحدث التفاعل داخل الجريان نفسه، أما في Overmolding فيحدث على سطح متجمد جزئيا، ولذلك تختلف أدوات التحكم في كل نظام.

انكشاف مادة القلب على السطح يدل على اختلال توازن اللزوجة أو سرعة الحقن، وانزياح الطبقات يدل على عدم توازن الجريان داخل التجويف، والانفصال الطبقي يدل على اختلاف الانكماش، وضعف الالتصاق في الـ Overmolding يدل على انخفاض طاقة السطح أو برودته أو تلوثه.

متعدد الطبقات في الحقن هو نفس المبدأ الفيزيائي في البثق المشترك والأفلام متعددة الطبقات، فالتبقات تبقى في مواقعها نتيجة توازن اللزوجة وطاقة الجريان والتوافق في الانكماش، ويختلف فقط شكل مجال الجريان بين عملية مستمرة في البثق وجريان زمني متناقص الضغط في الحقن.

الخلاصة الصناعية

- اللدونة تحدد استقرار الجريان
- الملء يحدد تاريخ التوجه
- نقطة التحويل تحدد الكثافة
- الضغط التعويضي يعوض الانكماش
- تجمد البوابة ينهي التحكم
- التبريد يجمد الإجهادات

ودورة الحقن مسار طاقي يبدأ في الأسطوانة وينتهي في أبعاد المنتج، وأي عيب يظهر بعد الإنتاج يكون قد نشأ قبل لحظة تجمد البوابة.

13.7 التشكيل بالنفخ

- فلسفة إعادة توزيع المادة داخل قالب مغلق بالتمدد

- في التشكيل بالنفخ لا يتحدد شكل المنتج بملء تجويف تحت ضغط كما في القولبة بالحقن، ولا بالسحب المستمر كما في البثق، بل بإعادة توزيع مخزون محدد من المادة على مساحة أكبر تحت تأثير ضغط داخلي يحول المصهور إلى غشاء يمتد حتى يلامس جدار القالب ويتجمد عليه. ولذلك فإن المنتج لا يتكون من إضافة مادة جديدة داخل القالب، بل من استئطالة مادة موجودة مسبقا في الباريسون أو البريفورم، ويصبح توزيع السماكة نتيجة مباشرة لمسار التمدد قبل لحظة التجميد.

- الباريسون في البثق بالنفخ أو البريفورم في الحقن بالنفخ لا يمثل شكل المنتج النهائي، بل يمثل مخزون المادة الذي سيتم توزيعه. وأي تفاوت في سماكته أو في توزيعه الحراري يتحول مباشرة إلى تفاوت أكبر في سماكة الجدار بعد التمدد، لأن المناطق الرقيقة تتمدد بسرعة أكبر وتفقد قدرتها على حمل المادة، بينما تبقى المناطق السمكية أكثر مقاومة للاستئطالة.

- عند خروج الباريسون من الرأس يكون في حالة توازن بين درجة حرارته ولزوجته ووزنه الذاتي. فإذا كانت حرارته مرتفعة أكثر من اللازم يحدث ترهل بفعل الجاذبية قبل إغلاق القالب، وإذا كانت منخفضة يفقد قدرته على التمدد عند دخول الهواء. ولذلك فإن التحكم في درجة حرارة المصهور عند الخروج من القالب (Die) هو تحكم في قابلية التمدد اللاحقة وليس فقط في استقرار الباريسون.

- عند بدء النفخ تتحول طاقة الهواء إلى شد ثنائي الاتجاه داخل الجدار، ويبدأ الغشاء في التمدد حتى يلامس جدار القالب. والمناطق التي تلامس القالب أولا تتجمد أولا وتحجز المادة، بينما تستمر المناطق الأخرى في التمدد ويحدث فيها ترقق أكبر. ولهذا فإن توزيع السماكة النهائي لا يتحدد فقط بتوزيع الباريسون، بل بترتيب ملاصقة الغشاء لجدار القالب وتاريخ التبريد المرتبط به.

- تصميم القالب يحدد المسافات التي يقطعها الغشاء قبل التجميد، ولذلك فإن المناطق العميقة أو الزوايا الحادة تتطلب استئطالة أكبر وتكون أكثر عرضة للترقق، بينما تتجمد المناطق القريبة مبكرا وتحفظ بسماكة أعلى. وبذلك يصبح القالب أداة للتحكم في توزيع السماكة وليس في الشكل فقط.

- التبريد داخل القالب لا يحدد زمن الدورة فقط، بل يحدد لحظة تثبيت السماكة النهائية. فعند ملاصقة الجدار يتجمد السطح الخارجي بينما يبقى الداخل في حالة لزجة لفترة قصيرة، وخلال هذه الفترة يستمر الضغط الداخلي في إعادة

توزيع محدودة للمادة. وعند تجمد المقطع بالكامل يتوقف أي تغير في الشكل أو السماكة وتتحول الفروق الحرارية إلى إجهادات داخلية تؤثر على ثبات المنتج بعد خروجه من القالب.

- نافذة التشغيل في التشكيل بالنفخ

نافذة التشغيل هي المجال الحراري والزمني الذي تبقى فيه المادة قادرة على التمدد دون تهرل ودون تجمد مبكر. فإذا كانت درجة الحرارة مرتفعة أكثر من اللازم يفقد الباريسون استقراره قبل إغلاق القالب، وإذا كانت منخفضة تتجمد الطبقة السطحية قبل اكتمال التمدد فتظهر مناطق سميكة وأخرى رقيقة. وإذا كان زمن الانتقال طويلا يحدث فقد حراري يؤدي إلى عدم تماثل التمدد، وإذا كان معدل التمدد عاليا خارج المجال الحراري المناسب يحدث ترقق مفرط أو تمزق في الجدار.

- التمدد ثنائي الاتجاه في الحقن بالنفخ المتمد

في الحقن بالنفخ المتمد يتم شد البريفورم طوليا قبل أو أثناء النفخ، فيتحول التمدد إلى توجيه جزئي في اتجاهين متعامدين. ويؤدي ذلك إلى زيادة المتانة ومقاومة الانفجار وتحسين الخواص البصرية وتقليل النفاذية، ولكن هذه الخواص لا تنتج عن المادة وحدها بل عن وقوع التمدد داخل المجال الحراري الذي يسمح بحركة السلاسل دون انهيار البنية. وإذا تم التمدد خارج هذا المجال تتجمد البنية قبل اكتمال التوجيه وتنفذ القطعة جزءا كبيرا من خواصها.

- التحكم في توزيع السماكة

في البثق بالنفخ يتم التحكم في توزيع المادة عن طريق برمجة سماكة الباريسون، لأن المادة لا يمكن نقلها من منطقة إلى أخرى بعد التمدد. أما في الحقن بالنفخ فإن توزيع السماكة يبدأ من تصميم البريفورم نفسه ومن التحكم في درجة حرارته قبل التمدد، لأن كل جزء منه يخضع لنسبة استطالة مختلفة داخل القالب.

- العيوب الصناعية في التشكيل بالنفخ

- ترقق القاع يدل على أن المادة قطعت مسافة استطالة أكبر قبل التجميد.
- زيادة السماكة في الكتف تدل على توقف التمدد مبكرا بسبب التبريد السريع.
- عدم تماثل الجدار يدل على عدم توازن حراري في الباريسون أو على تمدد غير متماثل داخل القالب.
- التجاعيد تدل على ملامسة مبكرة لجدار القالب قبل اكتمال الاستطالة.
- التمزق يدل على أن نسبة الاستطالة المطلوبة تجاوزت قدرة المادة داخل المجال الحراري متاح.

قراءة العيب تعني تحديد مسار التمدد الذي أدى إليه وليس تغيير ضغط الهواء فقط.

- التشكيل بالنفخ متعدد الطبقات

في النفخ متعدد الطبقات يصبح الباريسون نظام جريان لعدة مصاهير يجب أن تبقى منفصلة أثناء الخروج من الرأس وأثناء التمدد. ويحدد توازن اللزوجة بين الطبقات قدرتها على البقاء في مواقعها، لأن الطبقة الأقل لزوجة تميل إلى الهجرة نحو الخارج تحت تأثير الشد بينما تبقى الأعلى لزوجة في الداخل. وأي اختلال في هذا التوازن يؤدي إلى انكشاف طبقة القلب أو انزياح الطبقات داخل المقطع.

خلال التمدد تتعرض جميع الطبقات لنفس الزيادة في المساحة ولكن نسبة الترقق تختلف حسب مقاومتها للاستطالة، ولذلك فإن الطبقات الرقيقة تكون الأكثر عرضة للانقطاع أو للانكشاف. وعند التبريد تتولد إجهادات بينية نتيجة اختلاف الانكماش ومعامل التمدد الحراري بين المواد، وقد يؤدي ذلك إلى تقوس أو انفصال طبقي أو تشقق داخلي أو فقدان وظيفة طبقة الحاجز دون تغيير واضح في الشكل الخارجي.

نافذة التشغيل في النفخ متعدد الطبقات أضيق من النفخ أحادي الطبقة لأنها تتطلب توازن اللزوجة أثناء الخروج من الرأس وقابلية التمدد المتساوية والتوافق في الانكماش أثناء التبريد.

- البعد البنيوي متعدد الطبقات

المالتي-لير في النفخ هو نفس المبدأ الفيزيائي في البثق المشترك والأفلام متعددة الطبقات. فالطبقات تبقى في مواقعها نتيجة توازن اللزوجة وطاقة الجريان والتوافق في الانكماش، ويختلف فقط شكل مجال الجريان. ففي البثق يكون الجريان مستمرا، وفي الفيلم يكون التمدد حرا في المجال المفتوح، أما في النفخ فيتمدد توزيع الطبقات وفق مسار الاستطالة داخل القالب.

- الخلاصة الصناعية

- الباريسون يحدد مخزون المادة
- الحرارة تحدد قابلية التمدد
- الهواء يحدد مسار الاستطالة
- القالب يحدد ترتيب التجميد
- التبريد يحدد توزيع السماكة

والمنتج النهائي هو نتيجة مباشرة لمسار التمدد قبل لحظة ملامسة الغشاء لجدار القالب، وأي عيب يظهر بعد الإنتاج يكون قد نشأ قبل تجمد الجدار.

13.8 التشكيل الدوراني

- فلسفة بناء الجدار بالانتشار الحراري دون جريان ضغطي

- في التشكيل الدوراني لا يتحدد الشكل بملء تجويف تحت ضغط كما في القولية بالحقن، ولا بالسحب أو بالتمدد كما في البثق والنفخ، بل بانتقال المادة الصلبة إلى حالة لزجة تلتصق تدريجياً بجدار قالب ساخن تحت تأثير الحركة الدورانية. فلا يوجد جريان يدفع المادة داخل التجويف، ولا توجد جبهة مصهور تتقدم في اتجاه معين، بل توجد طبقة تتكون تدريجياً نتيجة التصاق الحبيبات المنصهرة بالسطح الداخلي للقالب. وبذلك فإن بناء الجدار لا يكون نتيجة تدفق المادة، بل نتيجة تراكمها الحراري المنتظم.

- المادة في هذه العملية تدخل القالب على شكل مسحوق أو حبيبات دقيقة، وتبقى في البداية في الحالة الصلبة أثناء دوران القالب، ثم تبدأ بالانصهار عند ملامستها للسطح الساخن. وتتحول الحبيبات المنصهرة إلى طبقة لزجة تلتصق بالجدار، بينما تستمر المادة الصلبة في التدرج داخل القالب حتى تنصهر هي الأخرى وتلتحق بالطبقة المتكونة. ولهذا فإن توزيع السماكة لا يتحدد بحركة جريان، بل بمدة بقاء المادة في الحالة المنصهرة وبانتظام انتقال الحرارة داخل القالب.

- غياب الضغط في هذه العملية يعني أن كثافة المنتج تتحدد بقدرة المصهور على الاندماج الذاتي قبل التبريد. فإذا لم تصل المادة إلى درجة الانصهار الكاملة تبقى الفراغات بين الحبيبات وتظهر المسامية داخل الجدار. ولذلك فإن درجة الحرارة داخل القالب لا تهدف فقط إلى الانصهار، بل إلى تحقيق الاندماج الكامل بين الطبقات المتكونة.

- الحركة الدورانية حول محورين متعامدين لا تهدف إلى خلط المادة، بل إلى توزيعها بالتساوي على جميع الأسطح الداخلية للقالب. وأي اختلاف في سرعة الدوران أو في نسبتها بين المحورين يؤدي إلى تراكم المادة في مناطق دون أخرى، ويظهر ذلك على شكل تفاوت في السماكة.

- المراحل الحرارية لتكوين الجدار

مرحلة التسخين هي المرحلة التي يتكون فيها الجدار بالكامل، لأن المادة تبقى في القالب حتى تصل إلى درجة الانصهار ثم إلى درجة الاندماج. وخلال هذه المرحلة تتحول الحبيبات إلى طبقة مستمرة، وتختفي الحدود بينها نتيجة الانتشار الجزيئي. وزمن هذه المرحلة يحدد كثافة الجدار ودرجة خلوه من المسامية.

عند اكتمال الاندماج تبدأ مرحلة التبريد مع استمرار الدوران، والهدف منها تثبيت الشكل دون السماح بانسياب المادة تحت تأثير الجاذبية. فالتبريد المبكر قبل اكتمال الاندماج يؤدي إلى جدار مسامي، والتبريد البطيء بعد التماسك يؤدي إلى نشوء نتيجة الانكماش غير المتوازن.

التبريد في التشكيل الدوراني لا يحدد زمن الدورة فقط، بل يحدد مستوى التبلور في المواد شبه المتبلورة ومقدار الانكماش وثبات الأبعاد. لأن المنتج يبرد دون ضغط داخلي يعوض الانكماش، ولذلك فإن أي اختلاف في معدل التبريد يتحول مباشرة إلى تقوس أو سحب في الجدران.

- توزيع السماكة

سماكة الجدار تتحدد بكمية المادة وتوزيعها الحراري والزمني داخل القالب. فالمناطق التي تبقى ساخنة لفترة أطول تستقبل مادة منصهرة أكثر وتصبح أكثر سماكة، بينما المناطق التي تفقد حرارتها بسرعة تتوقف عند سماكة أقل. ولهذا فإن تصميم القالب وتوزيع الحرارة عليه يلعبان الدور الأساسي في التحكم في السماكة وليس حركة المادة.

الزوايا الداخلية تستقبل مادة أكثر بسبب تجمع المصهور فيها أثناء الدوران، بينما تكون الحواف الخارجية أكثر عرضة للترقق نتيجة فقدان الحرارة السريع. وبذلك فإن التحكم في السماكة يتم عبر التحكم في المجال الحراري للقالب وليس عبر تغيير حركة المادة.

- العيوب الصناعية في التشكيل الدوراني

- المسامية داخل الجدار تدل على عدم اكتمال الاندماج الحراري بين الحبيبات نتيجة انخفاض درجة الحرارة أو قصر زمن التسخين.

- الترقق في مناطق معينة يدل على فقدان حراري سريع أدى إلى توقف تراكم المادة مبكراً.

- زيادة السماكة الموضعية تدل على بقاء المصهور في تلك المنطقة لفترة أطول نتيجة توزيع حراري غير متوازن.

- التثويه بعد التبريد يدل على اختلاف معدلات الانكماش نتيجة تبريد غير متجانس.
- الفقاعات الداخلية تدل على وجود هواء محبوس أو على تحلل حراري نتيجة ارتفاع درجة الحرارة لفترة طويلة .
- قراءة العيب تعني تحليل المسار الحراري للمادة داخل القالب وليس تغيير سرعة الدوران فقط.

- البنية الميكانيكية للمنتج

المنتج في التشكيل الدوراني يخلو من التوجه الجزيئي الناتج عن الجريان أو التمدد، ولذلك تكون خواصه الميكانيكية متجانسة في جميع الاتجاهات. ولكن غياب الضغط يعني أن الكثافة النهائية تعتمد بالكامل على جودة الاندماج الحراري، ولهذا فإن تحقيق الكثافة الكاملة يتطلب وصول المصهور إلى حالة لزجة تسمح بالانتشار الجزيئي الكامل قبل التبريد.

- 13.9 التشكيل متعدد الطبقات في في الالقولبة الدورانية (Rotational Molding)

يمكن تكوين طبقات متعددة بإضافة المادة على مراحل داخل القالب، بحيث تتصهر الطبقة الأولى وتثبت قبل إضافة الطبقة التالية. ويصبح التحدي هو تحقيق الترابط بين الطبقات عبر إعادة تسخين سطح الطبقة الأولى إلى درجة تسمح بالاندماج دون فقدان شكلها. وأي اختلاف كبير في الانكماش أو في درجة الانصهار بين المواد يؤدي إلى انفصال طبقي أو تشقق داخلي.

الطبقات في هذه العملية لا تتكون نتيجة جريان مشترك كما في البثق أو الحقن، بل نتيجة تراكم حراري متتابع، ولذلك فإن نجاحها يعتمد على التوافق الحراري والزمني بين المواد أكثر من اعتماده على توازن اللزوجة.

- الخلاصة الصناعية

- المادة لا تتحرك داخل القالب بل تذوب وتلتصق بجدرانه
- السماكة تتحدد بالمجال الحراري وليس بالجريان
- الكثافة تتحدد بجودة الاندماج الحراري
- التبريد يحدد الانكماش وثبات الأبعاد

والمنتج النهائي هو نتيجة مباشرة للمسار الحراري للمادة داخل القالب، وأي عيب يظهر بعد الإنتاج يكون قد نشأ أثناء مرحلة التسخين قبل بدء التبريد.

- 13.10 صناعة الفيلم

- فلسفة وأهمية ودور صناعة الفيلم

عندما يتحول التشكيل من جريان إلى تمدد مورفولوجي

عندما قيل إن جميع صناعات البلاستيك ليست أكثر من إذابة ثم تشكيل ثم تبريد، بدا الأمر وكأنه قاعدة عامة تختصر العمليات المختلفة في مسار واحد. لكن هذه القاعدة لا تكشف قوتها الحقيقية إلا في صناعة الفيلم، لأن مرحلة التشكيل هنا لا تعود مجرد إعطاء شكل هندسي، بل تتحول إلى لحظة إعادة بناء كاملة للمورفولوجي داخل المادة. في البثق كان المصهور يجري ثم يسحب، وفي الحقن كان يملأ ثم يتجمد تحت الضغط، أما في الفيلم فإن السلسلة الجزيئية لا تنقل فقط من حالة إلى أخرى، بل تمتد في اتجاه أو اتجاهين، وتجبر على أن تعيد ترتيب نفسها قبل أن تتجمد. وهنا يصبح التبريد ليس مجرد فقدان حرارة، بل تثبيتاً لبنية جزيئية تم خلقها أثناء التمدد.

لهذا لا تكون صناعة الفيلم تطبيقاً آخر للبثق، رغم أنها تبدأ بداي وتدفق مصهور. ما يخرج من القالب (Die) ليس منتجاً نهائياً، بل مادة في حالة انتقال، تعيش لحظة قصيرة بين أن تكون مصهوراً لزجاً وأن تصبح بنية صلبة موجهة. هذه اللحظة هي التي تحدد كل شيء: الشفافية، المتانة، مقاومة الثقب، قابلية اللحام، وحتى الإحساس البصري باللمعة. أي أن الفيلم لا يكتسب خواصه من البوليمر وحده، بل من التاريخ الذي عاشته السلسلة الجزيئية وهي تتمدد قبل التجميد.

وهنا يظهر المعنى الأعمق لاختيار الصنف. في العمليات السابقة كان السؤال يدور حول قدرة المصهور على الجريان أو على نقل الضغط أو على مقاومة الشد، أما في الفيلم فإن السؤال يصبح: هل تستطيع السلسلة الجزيئية أن تتمدد دون أن تنقطع، وأن تبقى حية حتى تتوزع الاستطالة على كامل العرض، ثم تتجمد في اللحظة التي تعطي البنية المطلوبة؟ المادة التي تنجح في الحقن بسهولة قد تفشل هنا لأنها تفقد تماسكها أثناء التمدد، والمادة التي تعطي قوة مصهور عالية في النفخ قد تعطي فيلماً خشناً لأنها تقاوم إعادة الترتيب الجزيئي.

بهذا المعنى تصبح صناعة الفيلم الامتحان الأكثر اكتمالا لفكرة أن المادة لا تختار باسمها ولا برقم سيولتها، بل بشكل حياتها داخل العملية. السلسلة الجزيئية هنا يجب أن تتحرك، وتتمدد، وتعيد ترتيب نفسها، ثم تتجمد في زمن محسوب بدقة. وكل تغيير في الوزن الجزيئي أو في توزيعه أو في البنية الخطية أو المتفرعة يتحول مباشرة إلى تغيير في المورفولوجي المتكون داخل الفيلم.

ومن هنا أيضا يتضح موقع الفيلم داخل منظومة الصناعات البلاستيكية. إذا كان الحقن يختبر قدرة المصهور على ملء الفراغ، وكان النفخ يختبر قدرته على تحمل الشد، فإن الفيلم يختبر قدرته على التمدد المتوازن وعلى بناء بنية موجهة. إنه العملية التي تظهر فيها العلاقة الكاملة بين الجريان والتبريد والبنية النهائية، ولذلك يصبح فهمه امتدادا طبيعيا لكل ما سبق، وليس فصلا منفصلا عنه.

- المجال الفيزيائي لتشكيل الفيلم

من مصهور يخرج من القالب (Die) إلى بنية موجهة تتجمد في الزمن الصحيح

ما إن يغادر المصهور فتحة القالب (Die) حتى يتوقف عن أن يكون مجرد مادة لزجة تتحرك تحت تأثير الضغط، ويصبح مادة تعيش تحت تأثير الشد. في هذه اللحظة تبدأ السلسلة الجزيئية بالاستطالة، ولا يكون الهدف إعطاء سماكة أقل فقط، بل خلق حالة من التوجه داخل البنية. هذا التوجه هو الذي يحدد لاحقا مقاومة الشد، ومقاومة الثقب، وسلوك الفيلم أثناء اللحام، وحتى الصوت الذي يصدره عند التجعيد.

في الفيلم المنفوخ يحدث التمدد في اتجاهين في الوقت نفسه. الفقاعة لا ترتفع فقط، بل تتمدد عرضيا، أي أن السلاسل الجزيئية تجبر على توزيع استطالتها على محورين قبل أن تصل إلى لحظة التجميد عند خط التبلور. هذه المنطقة — التي تبدو في خط الإنتاج مجرد نقطة يتحول عندها المصهور إلى فيلم — هي في الحقيقة لحظة تثبيت المورفولوجي. إذا تجمدت المادة مبكرا بقيت الاستطالة غير متوازنة وظهرت الاختلافات في الخواص بين الاتجاهين، وإذا تأخر التجميد فقدت الفقاعة استقرارها لأن المصهور بقي حيا أكثر مما ينبغي.

أما في الكاست فإن التمدد يحدث في اتجاه واحد تحت سيطرة ميكانيكية كاملة، ثم يأتي التبريد المفاجئ على الرول البارد ليجمد البنية قبل أن تعيد السلاسل ترتيب نفسها. ولهذا تبدو أفلام الكاست أكثر شفافية ولمعانا، لأن التجميد السريع يمنع التبلور الكبير ويثبت البنية في حالة أقرب إلى اللاتبلور.

بهذا المعنى لا يكون الفرق بين البلوون والكاست فرق ماكينات، بل فرق في تاريخ الحياة الذي تعيشه السلسلة الجزيئية بين لحظة خروجها من القالب (Die) ولحظة تجمدها.

- معنى المونولاير (Monolayer - الطبقة الواحدة) والمالتي لاير في الفيلم

من طبقة واحدة إلى تصميم مورفولوجي متعدد الوظائف

عندما يكون الفيلم أحادي الطبقة فإن كل ما يطلب من المادة يجب أن يتحقق داخل بنية جزيئية واحدة. يجب أن تعطي المتانة، وقابلية اللحام، والشفافية، ومقاومة الثقب، وسلوك الانزلاق. ولهذا يكون اختيار البوليمر هنا بحثاً عن توازن داخلي بين خصائص متعارضة.

أما في الفيلم متعدد الطبقات فإن الفكرة لا تعود إيجاد مادة تحقق كل شيء، بل توزيع الوظائف على طبقات مختلفة. طبقة تعطي المتانة، طبقة تعطي قابلية اللحام، طبقة تعطي الحاجز، طبقة تعطي الاستقرار أثناء التمدد. هنا يتحول التشكيل نفسه إلى عملية بناء بنية مركبة، ويصبح توازن اللزوجة بين الطبقات هو العامل الذي يحافظ على هذا الترتيب أثناء الجريان والتمدد.

الطبقات لا تبقى منفصلة لأنها خرجت من داي متعدد القنوات، بل لأنها تمتلك تاريخ جريان وتمدد متقارب يسمح لها بأن تعيش اللحظة الحرجة قبل التجميد دون أن تخترق إحداها الأخرى. أي أن المالتي لاير في الفيلم هو تطبيق مباشر لكل ما قيل عن التوازن بين الوزن الجزيئي والتوزيع الجزيئي، لكن هذه المرة بين مواد مختلفة.

- الفيلم كتطبيقات... والبنية المطلوبة لكل تطبيق

عندما ينتقل الفيلم من كونه غشاء بلاستيكية إلى أن يصبح فيلماً زراعياً أو فيلم تغليف أو فيلم أكياس أو شربك، فإن الذي يتغير ليس الشكل، بل المورفولوجي المطلوب تثبيته عند لحظة التجميد.

الفيلم الزراعي يعيش في مجال شد منخفض لكنه يتعرض لزمان طويل تحت تأثير الحرارة والضوء، ولهذا تكون البنية المطلوبة هي بنية تتحمل الزحف البطيء ولا تفقد متانتها مع الزمن. هنا تظهر قيمة السلاسل الطويلة والتوزيع الجزيئي الذي يعطي مقاومة للتمزق المستمر.

في أفلام التغليف يصبح التوازن بين المتانة والشفافية وسلوك اللحام هو الحاكم. البنية يجب أن تسمح بانتقال الحرارة أثناء اللحام دون أن تنهار منطقة الشد حولها، أي أن التبلور يجب أن يكون مضبوطاً بحيث يعطي نافذة لحام واضحة.

في أفلام الأكياس التي تعمل على خطوط عالية السرعة يصبح الاستقرار أثناء التمدد أهم من المتانة النهائية فقط، لأن أي اختلاف في توزيع الاستطالة يظهر مباشرة في سلوك الفيلم على الماكينة.

أما في أفلام الشريнок فإن الفيلم ينتج ببنية موجهة ثم يطلب منه أن يعود وينكمش. أي أن التوجه الجزيئي لا يكون هدفه إعطاء مقاومة شد فقط، بل تخزين طاقة داخل البنية تتحرر لاحقاً عند التسخين. المادة هنا لا تختار لتتحمل الشد فقط، بل لتتذكر اتجاه التمدد.

- لماذا تتفوق عائلات بوليمرية معينة في الفيلم

- تفوق LLDPE في معظم تطبيقات الفيلم ليس لأنه أسهل في التشغيل ، بل لأن بنيته الخطية مع التفرعات القصيرة تعطيه قدرة على التمدد المتوازن دون أن يفقد التماسك .
- LDPE يدخل ليعطي استقرار الفقاعة لأن تفرعاته الطويلة تبطئ حركة السلاسل وتمنع الانهيار المفاجئ .
- HDPE يعطي صلابة وحاجزا أفضل لكنه يقاوم التمدد، ولهذا يحتاج إلى تاريخ تمدد مختلف ليعيش داخل الفيلم دون أن يعطي سطحا خشنا.
- وهكذا يصبح تركيب الطبقات في المالتى لاير ليس خلط مواد، بل توزيع أدوار مورفولوجية داخل بنية واحدة.

-قراءة عيوب الفيلم كبنية جزيئية

- الاختلاف في الخواص بين الاتجاهين ليس مشكلة سحب فقط، بل دليل على أن التجميد حدث قبل اكتمال توزيع التمدد.
- الفقاعة غير المستقرة تعني أن المصهور فقد حياته قبل أن يصل إلى منطقة التجميد.
- اللحام الضعيف يعني أن البنية المتكونة لا تملك المجال الحراري المناسب لإعادة الاندماج.
- الضبابية تعني أن التبلور نما قبل أن يتم تثبيته بتبريد سريع.

كل عيب هو جملة تقول إن لحظة التجميد لم تأت في الزمن الذي يثبت البنية المطلوبة.

- موقع صناعة الفيلم في المنظومة الكاملة

إذا كان الحقن يختبر قدرة المصهور على ملء الفراغ، والنفخ يختبر قدرته على تحمل الشد، فإن الفيلم يختبر قدرته على أن يتحول إلى بنية موجهة قبل أن يتجمد. إنه العملية التي يظهر فيها بأوضح صورة أن خواص المنتج لا تأتي من البوليمر وحده، بل من التاريخ الذي عاشته السلسلة الجزيئية بين الجريان والتجميد.

ولهذا تكون صناعة الفيلم هي المرحلة التي تتجسد فيها كل مفاهيم اختيار المادة التي بنيت في الفصول السابقة، لأنها تحول الجريان والتبريد إلى عملية تصميم مورفولوجي كاملة.

- اختيار الصنف في صناعة الفيلم

عندما تتحول الداتا شيت إلى خريطة لزمن التمدد والتجميد

في عمليات التشكيل السابقة كان رقم السيولة يقرأ على أنه مؤشر لسهولة الجريان داخل الماكينة، أما في الفيلم فإن معناه يتغير بالكامل. المصهور هنا لا يطلب منه أن يملأ فراغا أو أن يحمل نفسه فقط، بل أن يبقى متماسكا وهو يتمدد لمسافة كبيرة ثم يتجمد في لحظة محددة. لذلك فإن قيمة الـ MFI لا تعبر عن سهولة التشغيل، بل عن الزمن الذي تبقى فيه السلسلة الجزيئية قادرة على توزيع الاستطالة قبل أن تفقد تماسكها.

عندما تكون السيولة مرتفعة تتحرك السلاسل بسهولة وتبدأ عملية التمدد بطاقة أقل، لكن عدد التشابكات يكون أقل، أي أن المصهور يفقد قدرته على مقاومة الترقق بسرعة. في الفقاعة يظهر ذلك على شكل منطقة تصبح أضعف من غيرها فتستمر في الاستطالة حتى يحدث الانهيار. وعندما تكون السيولة منخفضة تبقى شبكة التشابك متماسكة زمنا أطول، فتتوزع الاستطالة على كامل العرض، لكن الطاقة المطلوبة لبدء التمدد تكون أعلى، ويصبح تاريخ الحرارة داخل المصهور أطول. التوازن المطلوب هنا ليس أقل ضغط ولا أعلى متانة، بل الزمن الذي تبقى فيه الفقاعة مستقرة قبل أن تصل إلى خط التجميد.

لكن هذا الزمن لا يتحدد بالوزن الجزيئي وحده، بل بطريقة توزيعه. التوزيع الجزيئي الواسع في مواد الفيلم يعطي جزءا من السلاسل القصيرة يبدأ الجريان بسهولة، وجزءا من السلاسل الطويلة يبقى حيا حتى نهاية التمدد. هذه الثنائية هي التي تسمح بالحصول على فقاعة مستقرة وسماكة متوازنة في الوقت نفسه. لذلك فإن صنفين يحملان نفس قيمة MFI قد يعطيان سلوكا مختلفا تماما في الفيلم لأن أحدهما يملك توزيعا يسمح ببقاء جزء من البنية الجزيئية حيا حتى لحظة التجميد.

ثم تأتي الكثافة لتغير معنى المتانة نفسها. في البولي إيثيلين لا تعني الكثافة وزناً أكبر فقط، بل درجة تبلور أعلى. زيادة التبلور تعطي صلابة ومقاومة شد أعلى، لكنها تقلل القدرة على التمدد المتوازن، لأن المناطق المتبلورة تبدأ في الظهور أثناء التبريد المبكر وتمنع توزيع الاستطالة. ولهذا يظهر تفوق LLDPE منخفض الكثافة في الأفلام التي تحتاج إلى مقاومة ثقب عالية، لأن البنية الأقل تبلوراً تبقى قادرة على امتصاص الطاقة دون أن تتحول إلى شق.

أما نوع الكومونومر — بيوتين أو هيكسين أو أوكتين — فهو في الحقيقة طريقة لتوزيع نقاط الضعف داخل البنية البلورية. التفرعات الأطول في الأوكتين تخلق مناطق لينة موزعة بانتظام داخل الشبكة، تسمح بتوزيع الإجهاد على مساحة أكبر قبل أن يحدث القطع. ولهذا تعطي مواد الأوكتين مقاومة ثقب أعلى وقدرة على التمدد في التطبيقات الصعبة، بينما تكون مواد البيوتين كافية في التطبيقات التي يكون فيها التوازن بين الكلفة والأداء هو المطلوب.

في أفلام الشرينك يتغير معنى الصنف مرة أخرى. هنا لا يكون الهدف أن تبقى البنية مستقرة بعد التبريد، بل أن تحتفظ بذاكرة التمدد. السلسلة الجزيئية تمد ثم تجمد بسرعة بحيث تبقى في حالة توتر داخلي. وعند التسخين تعود إلى وضعها الأصلي. الصنف المناسب هنا هو الذي يستطيع أن يمد دون أن ينقطع، وأن يتجمد قبل أن يعيد ترتيب نفسه بالكامل. أي أن نافذة التبلور يجب أن تكون أبداً من زمن التمدد وأسرع من زمن التبريد.

في الأفلام الزراعية يصبح الزمن الطويل تحت الحمل الحراري هو العامل الحاكم. المادة التي تعطي متانة عالية لحظة الإنتاج قد تفقدها مع الزمن إذا كانت البنية الجزيئية تتحرك ببطء تحت تأثير الحرارة. لذلك يكون اختيار الصنف هنا مرتبطاً بمقاومة الزحف البطيء أكثر من مقاومة الشد اللحظية، أي بقدرة السلاسل على البقاء متشابكة زمناً طويلاً.

في أفلام التغليف عالية السرعة يظهر عامل آخر: استقرار التمدد. الفيلم يجب أن يعيش على خط تحويل بسرعة عالية دون أن يتغير عرضه أو سلوكه عند الشد. هذا الاستقرار لا يأتي من المتانة النهائية فقط، بل من تجانس التاريخ الجزيئي عبر العرض، أي من توزيع جزيئي يعطي نفس زمن الحياة لكل جزء من المصهور.

- معنى تركيب الطبقات في المألتي لاير من منظور الصنف

- قراءة مشاكل الفيلم كقرار تغيير صنف

- الفقاعة التي تهتز رغم ثبات ظروف التشغيل تقول إن جزءا من البنية الجزيئية يموت قبل أن يصل إلى خط التجميد.

- السماكة غير المتوازنة تقول إن توزيع التشابكات غير كافٍ لتوزيع الاستطالة.

- اللحام الذي يحتاج حرارة أعلى يقول إن التبلور حدث مبكرا وأغلق نافذة الاندماج.

- الضبابية تقول إن البنية البلورية نمت قبل أن يتم تثبيتها بالتبريد.

- التمزق المفاجئ يقول إن السلسلة لم تملك طولا كافيا لامتناس الطاقة.

كل واحدة من هذه الظواهر ليست مشكلة تشغيل، بل رسالة تقول أي شكل من الصنف يحتاجه الخط.

- الفيلم كأعلى تطبيق لفكرة اختيار المادة

في هذه الصناعة يظهر بوضوح أن المادة لا تختار لتعمل داخل الماكينة، بل لتعيش المسافة الزمنية بين خروجها من القالب (Die) ووصولها إلى خط التجميد دون أن تفقد توازنها. هذه المسافة هي التي تصمم من خلال اختيار الوزن الجزيئي وتوزيعه والكثافة ونوع الكومونومر، أي من خلال الصنف نفسه.

وهنا تتحول الداتا شيت من جدول أرقام إلى وصف دقيق لحياة السلسلة الجزيئية أثناء التمدد.

- الخيوط والمونوفلامنت والشبك

الانتقال من التمدد في الحالة المنصهرة إلى إعادة بناء البنية في الحالة الصلبة

إذا كانت صناعة الفيلم تمثل اللحظة التي تمد فيها السلسلة الجزيئية وهي منصهرة ثم تجمد لتثبيت اتجاهها، فإن صناعة الخيوط والمونوفلامنت تمثل خطوة أبعد في حياة البوليمر. هنا لا يكتفي المصهور بأن يتمدد قبل التجميد، بل يطلب منه بعد أن يصبح صلبا أن يتمدد مرة أخرى، وأن يعيد ترتيب بنيته البلورية في اتجاه الشد. في هذه اللحظة لا نكون أمام تشكيل هندسي فقط، بل أمام عملية تحويل مورفولوجي كاملة تنتقل فيها المادة من بنية شبه عشوائية إلى بنية موجهة ذات تبلور مرتفع.

ما يحدث في مرحلة السحب بعد التجميد ليس تحسينا للخواص فقط، بل إعادة بناء للسلسلة الجزيئية نفسها. المناطق غير المتبلورة تجبر على الاصطفاف، والبلورات الصغيرة تتحول إلى صفائح ممتدة في اتجاه الشد،

فتظهر قوة شد لا يمكن الحصول عليها في أي عملية أخرى. ولهذا لا يكون اختيار الصنف هنا مرتبطا بسهولة الجريان أثناء البثق، بل بقدرة المادة على أن تعيش مرحلتين من التمدد: الأولى وهي منصهرة، والثانية وهي صلبة.

المادة التي تنجح في الفيلم لأنها تبقى لينة زمنا طويلا قد تفشل هنا لأنها لا تملك سرعة تبلور كافية لبناء نقاط تثبيت قبل السحب. والمادة التي تعطي صلابة عالية مباشرة بعد التبريد قد تكون مثالية لأنها توفر شبكة أولية تسحب وتتحول إلى بنية عالية التوجه.

13.11 - المونوفلامنت كأعلى درجات التوجه الجزيئي

في المونوفلامنت لا يكون الهدف الحصول على قطاع فقط، بل الحصول على خيط يحمل حملا ميكانيكيا حقيقيا. السلسلة الجزيئية تمد إلى درجات عالية جدا، ويصبح التوازن بين المناطق المتبلورة وغير المتبلورة هو الذي يحدد هل سيحدث السحب بسلاسة أم سيحدث انقطاع مفاجئ.

هنا يظهر معنى الوزن الجزيئي مرة أخرى بطريقة مختلفة. السلاسل الطويلة تعطي قدرة على نقل الإجهاد أثناء السحب دون أن تنفصل، لكن إذا كان التوزيع الجزيئي ضيقا جدا تصبح عملية السحب حساسة لأي عيب صغير. وجود جزء من السلاسل الأقصر يسمح ببداية إعادة الترتيب بسهولة، بينما تبقى السلاسل الأطول لتحمل الحمل النهائي. أي أن التوزيع الجزيئي هنا ليس لتحسين الجريان، بل لضبط مسار التحول البلوري أثناء السحب.

ولهذا تتفوق مواد مثل HDPE و pp في تطبيقات المونوفلامنت لأن بنيتها قادرة على بناء درجة عالية من التبلور الموجه، وهو ما يعطي مقاومة شد ومقاومة تآكل لا يمكن الحصول عليها من مواد ذات بنية لابلورية.

13. 12 الشبك كنقطة التقاء ثلاث تقنيات :

الشبك الذي يبدو منتجا واحدا هو في الحقيقة ثلاث بنيات مختلفة تماما.

هناك شبك يتكون من فيلم يتم شقه ثم سحبه ليتحول إلى شرائط موجهة تنسج لاحقا. في هذه الحالة يعيش البوليمر حياة الفيلم أولا، ثم حياة الخيط أثناء السحب، ثم حياة النسيج أثناء النسج. كل مرحلة تعيد ترتيب البنية وتضيف مستوى جديدا من التوجه.

وهناك شبك يتكون مباشرة من خيوط تبتثق ثم تسحب وتنسج. هنا لا توجد مرحلة فيلم، بل انتقال مباشر إلى البنية الموجهة، وتصبح قابلية النسيج ومقاومة الاحتكاك هي التي تحدد اختيار المادة.

أما النوع الثالث — الذي يخرج من رأس دائري شبيه برأس الفيلم لكنه يتجه إلى الأسفل ويدخل في حوض ماء — فهو في الحقيقة عملية بثق مباشر لشبك مصهور، حيث يتكون التقاطع بين الخيوط وهي لا تزال في الحالة المنصهرة. في هذه اللحظة لا يكون الالتحام نتيجة حرارة لاحقة أو عملية نسج، بل نتيجة اندماج جزئي مباشر. هذا النوع يختبر قدرة المصهور على أن يحافظ على شكله كخيوط منفصلة وأن يندمج في نقاط التقاطع في الوقت نفسه. أي أن المطلوب من المادة أن تملك لزوجة تسمح بتشكيل الفتحات دون انهيار، وقدرة على الالتحام في نقاط محددة قبل التجميد.

ولهذا فإن اختيار الصنف هنا لا يرتبط فقط بقوة الخيط، بل بزمان حياة المصهور قبل التجميد وبقدرة السلاسل على الاندماج في نقاط التقاطع دون أن تختفي الفتحات.

- موقع هذه الصناعة في المنظومة الكاملة

إذا كان الفيلم قد كشف العلاقة بين التمدد في الحالة المنصهرة وبناء المورفولوجي عند التجميد، فإن الخيوط والمونوفلامنت تكشف ما يحدث عندما نعيد فتح هذه البنية الصلبة ونجبرها على أن تعيد ترتيب نفسها. إنها المرحلة التي تتحول فيها السلسلة الجزيئية من مجرد بنية متجمدة إلى عنصر إنشائي يحمل الحمل الميكانيكي الحقيقي.

وفي الشبك تلتقي كل هذه المراحل:

- تمدد مصهور كما في الفيلم،

- سحب في الحالة الصلبة كما في الخيوط،

- اندماج مصهور عند نقاط التقاطع.

ولهذا لا يمكن قراءة هذه الصناعة كمنتج واحد، بل كأعلى تطبيق لفكرة أن خواص البلاستيك تبنى من تاريخ الحركة والتبريد وإعادة الترتيب.

- اختيار الصنف في الخيوط والمونوفلامنت والشبك

عندما يصبح الوزن الجزيئي مسارا لإعادة بناء البلورة

في هذه الصناعة يتغير معنى كل الأرقام التي اعتدنا قراءتها في الداتا شيت. في الفيلم كان الصنف يختار ليعيش زمن التمدد قبل التجميد، أما هنا فإن المادة تجمد أولا ثم يطلب منها أن تعود إلى الحياة مرة أخرى تحت الشد. ولذلك فإن الخاصية الحاكمة لم تعد فقط لزوجة المصهور، بل قدرة البنية الصلبة على أن تنفتح وتعيد ترتيب نفسها دون أن تنكسر.

عند خروج الخيط من القالب وتبريده يتكون داخله تبلور أولي يشبه شبكة تثبيت مؤقتة. هذه الشبكة هي التي تسمح ببدء السحب في الحالة الصلبة. إذا كانت المادة بطيئة التبلور جدا يبقى الخيط ليناً ولا يملك نقاط تثبيت كافية، فيحدث الانقطاع قبل أن تبدأ عملية التوجيه. وإذا كانت سريعة التبلور جدا تصبح البنية قاسية لا تسمح بإعادة ترتيب السلاسل، فيتحول السحب إلى عملية كسر بدل أن يكون عملية توجيه.

هنا يظهر معنى الوزن الجزيئي مرة أخرى، لكن ليس من زاوية الجريان، بل من زاوية نقل الإجهاد أثناء السحب. السلاسل الطويلة تعمل كجسور تربط بين المناطق البلورية، وعند شدها تنقل الحمل عبر المقطع بالكامل. إذا كان الوزن الجزيئي منخفضا تنفصل هذه الجسور ويحدث الانقطاع حتى لو بدا الخيط متماسكا قبل السحب. لذلك يكون الصنف الناجح في المونوفلامنت هو الذي يملك وزنا جزيئيا يسمح بنقل الإجهاد لمسافات طويلة داخل البنية.

لكن التوزيع الجزيئي يبقى هو العامل الذي يحدد سلاسة التحول. وجود جزء من السلاسل الأقصر يسمح ببدء الانزلاق داخل المناطق غير المتبلورة، بينما تبقى السلاسل الأطول لتحمل الحمل النهائي بعد اكتمال التوجيه. ولهذا فإن الصنف ذو التوزيع الواسع يعطي نافذة سحب أكبر ويجعل العملية أكثر استقرارا.

- لماذا يتفوق PP في الشرائط والرافيا

- في الشرائط المسحوبة التي تتحول لاحقا إلى أقمشة منسوجة، يكون المطلوب بنية تستطيع أن تتحول إلى درجة عالية جدا من التوجه دون أن تفقد تماسكها العرضي. البولي بروبيلين يملك قدرة فريدة على إعادة ترتيب بلوراته أثناء السحب لتتحول إلى صفائح موجهة في اتجاه الشد. هذه البنية تعطي مقاومة شد عالية مع وزن منخفض، وهو ما يجعلها مثالية للأكياس المنسوجة والتطبيقات التي تعتمد على نسبة القوة إلى الوزن.

- كما أن سرعة تبلور البولي بروبيلين تعطي خيطا يمكن التعامل معه مباشرة بعد التبريد، أي أن العملية لا تحتاج إلى زمن طويل لبناء الشبكة الأولية قبل السحب. وفي الوقت نفسه تبقى المناطق غير المتبلورة كافية للسماح بإعادة الترتيب أثناء التوجيه.

- لماذا يتفوق HDPE في المونوفلامنت

في المونوفلامنت الذي يستخدم في الشباك أو في الخيوط التي تتعرض للاحتكاك المستمر، يصبح المطلوب بنية ذات تبلور مرتفع ومقاومة تأكل عالية. البولي إيثيلين عالي الكثافة يعطي هذه البنية بسبب انتظام سلسله وقدرته على تكوين بلورات ممتدة أثناء السحب. هذه البلورات الموجهة تعطي مقاومة شد عالية ومقاومة تأكل لا يمكن الحصول عليها من مواد أقل تبلورا.

لكن نجاح HDPE هنا مرتبط بصنف يملك وزنا جزيئيا مرتفعا بما يكفي لنقل الإجهاد أثناء السحب، وفي الوقت نفسه لزوجة تسمح بتشكيل الخيط دون ضغط مفرط داخل القالب.

- متى يدخل PET في الخيوط

عندما يكون المطلوب ثبات أبعاد عالي جدا ومقاومة زحف منخفضة تحت الحمل المستمر، تظهر مواد مثل PET. التبلور البطيء نسبيا يسمح بمرحلة سحب طويلة تبنى خلالها بنية عالية التوجه، ثم يتحول التثبيت الحراري لاحقا إلى مرحلة تثبيت لهذه البنية. هنا لا يكون السحب فقط لزيادة المتانة، بل لبناء مورفولوجي يعطي ثباتا حراريا وميكانيكيا على مدى زمني طويل.

- قراءة مشاكل السحب كإشارة بنيوية

الانقطاع أثناء السحب لا يكون سببه السرعة فقط، بل يعني أن السلاسل الجزيئية لا تملك طولا كافيا لنقل الإجهاد بين المناطق البلورية. - السحب الذي يحتاج درجات حرارة أعلى من المعتاد يعني أن البنية المتكونة بعد التبريد قاسية أكثر مما يجب، أي أن التبلور حدث بسرعة كبيرة. التشقق الدقيق بعد التوجيه يعني أن التوجه لم يكن متجانسا عبر المقطع، وأن جزءا من البنية بقي غير قادر على حمل الحمل.

في كل حالة تكون المشكلة في التوازن بين سرعة بناء البلورة وبين قدرة السلاسل على إعادة ترتيب نفسها.

- اختيار الصنف في الشبك المبتوق مباشرة

في الشبك الذي يتكون من مصهور يندمج في نقاط التقاطع قبل التجميد، تكون لحظة الالتحام هي الحاكمة. المادة يجب أن تبقى لزجة زمنا كافيا ليحدث الانتشار الجزيئي بين الخيوط المتقاطعة، لكنها في الوقت نفسه يجب أن تملك لزوجة تسمح بالحفاظ على شكل الفتحات دون أن تنهار. الصنف هنا هو الذي يحدد هذا الزمن الدقيق بين التماسك والاندماج.

- موقع هذه الصناعة في رحلة البوليمر

- في الفيلم كانت السلسلة تمد وهي منصهرة ثم تجمد.

- في الخيوط والمونوفلامنت تجمد ثم تمد مرة أخرى لتعيد بناء نفسها.

- وفي الشبك تلتقي المرحلتان في بنية واحدة.

هنا يصل البوليمر إلى أعلى درجة من استغلال قدرته على التوجه، وتتحول السلسلة الجزيئية من عنصر يعطي شكلا إلى عنصر يحمل حملا ميكانيكيا حقيقيا.

- 13.13 الماسترباتش (Masterbatch) والكمباوند (Compound)

والإضافات (Additives)- من اختيار البوليمر إلى هندسة البنية

في جميع عمليات التشكيل التي تناولناها سابقا كانت المادة نقطة البداية، وكانت العملية هي التي تفرض عليها مسارها الحراري والزمني، فتتكون البنية النهائية تبعا لسلوك الصنف داخل هذا المسار. أما هنا فإن الاتجاه ينعكس بالكامل. لم تعد العملية هي التي تشكل المادة، بل المادة نفسها تصمم مسبقا لتعيش داخل أكثر من عملية وتعطي في كل منها سلوكا محسوبا.

هذا التحول هو الفاصل الحقيقي بين مصنع يشغل خامة ومصنع يملك قرار الخامة.

- 13.14 دور الإضافات (Additives) — الوظيفة قبل البنية

قبل الوصول إلى الماسترباتش أو الكمباوند، تكون نقطة البداية هي الإضافة نفسها. (Additive) وهي تمثل وظيفة محددة داخل البوليمر، مثل:

- الصبغات (Pigments)

- المواد المألئة (Fillers) مثل CaCO_3
- مضادات الأكسدة (Antioxidants)
- عوامل الانزلاق (Slip Agents)

في هذه المرحلة، الإضافة ليست نظاما بعد، بل مادة خام غير موزعة داخل مصفوفة بوليمرية.

وهنا يظهر دور اختبار FTIR ، الذي يسمح بتحديد نوع المادة وتركيبها الكيميائي، لكنه لا يعطي أي دلالة على سلوكها داخل المصهور، لأنه لا يقرأ التشتت ولا البنية.

أي أن الإضافة تعرف... لكنها لم تدخل المجال الجرياني بعد.

الماسترباتش — (Masterbatch) نظام توزيع مورفولوجي

الماسترباتش لا يمثل منتجا بقدر ما يمثل بنية مصممة لنقل الإضافة.

فيه يبقى البوليمر الحامل مجرد وسيط لنقل نظام إضافي إلى مادة أخرى. هو نظام توزيع مركز، هدفه أن يدخل إلى عملية ثانية ويذوب داخل مصهور آخر دون أن يترك حدودا طورية مؤثرة.

عند دخول الماسترباتش إلى المصهور، تحدث عملية ذوبان مزدوجة:

يذوب الحامل أولا، ثم يبدأ طور الإضافة بالانتشار داخل المصهور الأساسي.

نجاح هذه العملية لا يرتبط بنسبة الإضافة فقط، بل بـ:

- حجم الطور الموزع
- المسافة بين الجسيمات
- قدرته على الدخول في المجال الجرياني

اللون مثلا لا يفشل لأنه ضعيف، بل لأنه بقي في صورة تجمعات.

وعامل الانزلاق لا يعطي تأثيره لأنه لم يصل إلى السطح في الزمن الصحيح.

والمادة المألئة لا تخفض الكلفة فقط، بل تغير مسار التبلور وسرعة التبريد والانكماش.

أي أن كل إضافة هي نظام مورفولوجي كامل، وليست نسبة وزنية.

أمثلة:

- ماسترباتش ألوان
- ماسترباتش أبيض (TiO_2)
- ماسترباتش فيلر عالي التركيز
- الحامل كعنصر زمني حراري

اختيار الحامل في الماسترباتش هو في الحقيقة اختيار زمن الذوبان داخل العملية الثانية.

إذا ذاب قبل زمن اختلاط المصهور يصبح جزءا من المجال الجرياني.

وإذا تأخر في الذوبان بقي كطور منفصل وظهر على شكل عيوب.

ولهذا فإن توافق الحامل مع البوليمر النهائي ليس توافقا كيميائيا فقط، بل توافق زمني حراري، يجب أن يعيش نفس تاريخ الانصهار والتبلور.

وهنا يظهر دور MFI ، ليس كرقم سيولة فقط، بل كمؤشر على:

- الوزن الجزيئي
- زمن الذوبان
- سلوك المادة داخل العملية
- الكمباوند — (Compound) بناء البنية النهائية

في الكمباوند لا يكون الهدف نقل إضافة، بل بناء مادة جديدة.

الماسترباتش ينقل طورا...

أما الكمباوند فيبني علاقة بين أطوار.

عند خلط مطاط داخل بولي بروبيلين مثلا لا نحصل على مادة بين الاثنين، بل على طور مطاطي موزع داخل مصفوفة شبه بلورية.

الخواص النهائية هنا لا تعتمد على النسبة فقط، بل على:

- حجم الجسيمات
- شكلها
- مساحة السطح البيني
- درجة الارتباط بين الطورين

وهنا يصبح دور الاكسترودر هو بناء هذه البنية.

القص لا يخلط فقط، بل يحدد:

- حجم الجسيمات
- توزيعها
- سلوكها تحت الإجهاد

أي أن الاكسترودر في الكمبوند هو مفاعل مورفولوجي.

أمثلة:

PP + Talc Compound

HDPE + CaCO₃ Compound

Impact Modified PP

لماذا يُستخدم مصطلح Compounding في صناعة الماسترباتش والكمبوند

يُستخدم مصطلح Compounding لأن العمليتين تشتركان في نفس الأساس الفيزيائي:

إدخال طور داخل مصفوفة بوليمرية، ثم إعادة توزيعه وبناءه تحت تأثير القص والحرارة.

سواء كان الهدف:

– توزيع إضافة (Masterbatch)

أو

– بناء مادة (Compound)

فإن العملية تعتمد على:

- Dispersive Mixing :تفكيك التجمعات
- Distributive Mixing توزيع الطور داخل المصهور

ولهذا فإن Compounding هو اسم العملية، وليس اسم المنتج.

البنية أهم من النسبة

الماسترباتش والكمباوند لا يمثلان منتجا، بل يمثلان بنية:

- توزيع طور داخل طور
- تعديل مسار التبلور
- تغيير سلوك الجريان
- بناء مورفولوجي جديد

وهنا تظهر الحقيقة الأساسية:

خواص المنتج لا تؤخذ من اسم البوليمر،

بل من تاريخ البنية الذي يمر به المصهور قبل أن يتجمد.

الإضافة كأداة قرار صناعي

عندما يفهم المصنع أن:

- الكثافة ليست رقما فقط بل درجة تبلور

- MFI ليس سيولة فقط بل وزن جزيئي وتوزيع
- الإضافة ليست نسبة بل طور مورفولوجي

يصبح قادرا على:

- تغيير الصنف دون تغيير المنتج
- تحسين الخواص دون تغيير العملية
- تخفيض الكلفة دون فقدان الاستقرار
- وهنا يتحول القرار من شراء مادة إلى تصميم مادة.
- ربط البنية بالاختبارات

لفهم هذه البنية، لا يكفي النظر إلى المادة، بل يجب قراءتها عبر الاختبارات:

- FTIR يحدد نوع المادة وتركيبها
- MFI يعطي مؤشر على سلوك الجريان والوزن الجزيئي
- DSC يكشف درجة التبلور وتأثير الإضافات على البنية الحرارية

هذه الاختبارات لا تعمل منفصلة، بل تعطي قراءة متكاملة لنفس الظاهرة من زوايا مختلفة.

معنى الإضافة في سلوك العمليات

الإضافة لا تعمل بنفس الطريقة في كل العمليات:

- في الفيلم: تعيش زمن تمدد طويل
- في الحقن: يجب أن تصل إلى السطح قبل تجمد البوابة
- في البروفایل: تتحكم في الصلابة والانكماش

أي أن تصميم الماسترباتش أو المركب لا يكون لتطبيق واحد، بل لمسار حراري وزمني كامل.

أمثلة تطبيقية على تصميم البنية

رفع الصلابة لا يتم فقط بزيادة التبلور، بل بضبط توزيع البلورات عبر نوى تبلور دقيقة.

زيادة مقاومة الصدمة لا تعتمد على نسبة المطاط فقط، بل على حجم جسيماته وتوزيعها.

تحسين الجريان لا يكون فقط برفع MFI ، بل بتعديل البنية وتقليل الاحتكاك بين السلاسل.

رفع ESCR لا يتم بإضافة مادة فقط، بل ببناء بنية تسمح بحركة السلاسل دون انفصال.

التشتت كنقطة الفصل

أي إضافة لا تدخل المجال الجرياني تبقى جسما غريبا، وتتحول إلى نقطة ضعف.

التشتت ليس خطأ... بل تحول الطور إلى جزء من البنية.

موقع هذا الفصل في رحلة البوليمر

في العمليات السابقة كانت البنية تتكون داخل القالب أو أثناء التشكيل.

أما هنا فإن البنية تبنى قبل دخول العملية.

إنه الانتقال من تشكيل المنتج... إلى تشكيل المادة نفسها.

وهذا هو أعلى مستوى في الصناعة البلاستيكية، لأن المصنع لم يعد تابعا للمادة، بل أصبح قادرا على بنائها.

الباب الرابع عشر

إعادة التدوير Recycling

14.1 مفهوم إعادة التدوير

- الكربون الصناعي بين أن يغادر الدورة على شكل غازات دفيئة أو أن يعود مادة خام

عندما ينتج البوليمر البكر فإن ما يحدث في جوهرة هو إدخال كربون جديد من مصدر أحفوري إلى المنظومة الصناعية عبر سلسلة طويلة من العمليات ذات الاستهلاك العالي للطاقة: تكسير، بلمرة، فصل، نقل، وتحويل حراري متكرر. كل مرحلة من هذه المراحل مرتبطة مباشرة بإطلاق غازات دفيئة، لأن الطاقة المستخدمة فيها ما تزال في معظم العالم مرتبطة بمصادر كربونية. وعندما ننظر إلى طن واحد من البولي إيثيلين أو البولي بروبيلين المنتج من الصفر فإننا في الحقيقة ننظر إلى كمية كبيرة من الطاقة المتجسدة داخل السلسلة الجزيئية نفسها.

في المقابل، عندما تعود المادة البلاستيكية بعد استخدامها إلى خط إعادة التدوير فإن الكربون الموجود فيها لا يحتاج إلى أن يستخرج من باطن الأرض مرة أخرى، ولا يحتاج إلى أن يمر بمراحل التكسير والبلمرة. هو موجود أصلاً داخل سلسلة جزيئية جاهزة، وكل ما يتطلبه الأمر هو إعادة إدخاله إلى المجال الحراري. الفرق في استهلاك الطاقة بين الحالتين ليس فرقاً بسيطاً في الكلفة التشغيلية، بل فرق في كمية الغازات الدفيئة المنبعثة لكل طن مادة يدخل السوق.

في المتوسط الصناعي العالمي يتطلب إنتاج طن واحد من البوليمرات الشائعة طاقة أولية تتجاوز عدة عشرات من الجيجا جول، بينما تنخفض هذه القيمة في إعادة التدوير الميكانيكية إلى جزء من ذلك، وفي بعض التطبيقات إلى أقل من ربعها. هذه الطاقة التي لم تستهلك تعني مباشرة كمية من الغازات الدفيئة لم تطلق إلى الغلاف الجوي. ولذلك فإن كل طن مادة يعاد تدويره لا يمثل فقط مادة خام بديلة، بل يمثل أيضاً كمية من الانبعاثات تم تجنبها. ومع تحول الأسواق العالمية إلى احتساب البصمة الكربونية للمنتجات، تصبح هذه الحقيقة عاملاً تنافسياً صناعياً وليس مجرد قيمة بيئية.

هنا تتغير طبيعة إعادة التدوير بالكامل. لم تعد نشاطاً للتعامل مع المخلفات، بل أصبحت أداة لإدارة الكربون داخل الصناعة.

- القابلية لإعادة التدوير كقرار تصميمي يبدأ من اختيار البوليمر

في مرحلة التشكيل كان الفرق بين النيرموبلاستيك والثيرموست فرقا في السلوك الحراري تحت القالب أو داخل الفقاعة أو أثناء السحب. أما في مرحلة إعادة التدوير فهو فرق في المصير الصناعي للكربون نفسه.

النيرموبلاستيك يحتفظ بإمكانية العودة إلى المجال الحراري لأن بنيته الجزيئية لم تتحول إلى شبكة مترابطة ثلاثية الأبعاد. يمكن صهره مرة أخرى، ويمكن إعادة توزيع وزنه الجزيئي، ويمكن إعادة تصميم مورفولوجيته. أي أن الكربون الموجود داخله يبقى داخل الدورة الصناعية.

أما النيرموست، فعندما تكون الربط العرضي داخل بنيته خرج من هذه الدائرة. لم يعد بالإمكان إعادته إلى الحالة المنصهرة دون تفسير روابطه الأساسية. إعادة تدويره ميكانيكيا بمعنى إعادة تشكيله غير ممكنة. كل ما يمكن فعله هو تحويل موقعه داخل بنية أخرى كطور مالى، أو تفكيكه كيميائيا، أو استرجاع طاقته. الكربون هنا لم يعد مادة خام جاهزة، بل تحول إلى محتوى طاقي أو إلى حشو داخل مادة أخرى.

هذا الفرق يجعل قابلية إعادة التدوير خاصية تصمم في المنتج منذ لحظة اختيار البوليمر، وليس قرارا يتخذ عند نهاية عمره.

- المادة المستعملة ليست مادة واحدة بل تواريخ جزيئية مختلفة

المنتج البلاستيكي الذي يصل إلى خط إعادة التدوير لا يصل كبوليمر خام، بل كسلسلة جزيئية مرت بظروف متعددة: تعرض حراري أثناء التشكيل، تعرض للأكسجين، أشعة فوق بنفسجية، إجهاد ميكانيكي، زمن استخدام، وتاريخ تخزين. كل واحد من هذه العوامل ترك أثرا على طول السلسلة وعلى توزيعها وعلى درجة التبلور وعلى استهلاك الإضافات.

عندما تختلط هذه المنتجات دون فرز فإننا لا نخلط مواد مختلفة فقط، بل نخلط تواريخ جزيئية مختلفة. السلاسل الطويلة مع القصيرة، السلاسل المؤكسدة مع غير المؤكسدة، المواد ذات المثبتات المستهلكة مع مواد ما تزال مستقرة. هذا الخليط هو الذي يحدد هل سنبنى بنية متجانسة أم بنية مليئة بنقاط ضعف.

الفرز من المصدر هنا ليس خطوة لوجستية، بل أول عملية ضبط مورفولوجي في الصناعة. كل درجة نقاء تتحقق خارج المصنع تعني أن السلاسل التي ستصهر معا داخل (Injection Mould) تملك تاريخا متقاربا، أي أنها قادرة على بناء مجال جرياني متجانس. لذلك فإن نجاح إعادة التدوير ليس قرار مصنع فقط، بل قرار منظومة كاملة تبدأ من المستهلك وتنتهي في المختبر.

- خط إعادة التدوير كمفاعل لإعادة توزيع الوزن الجزيئي

الطن والغسيل والتجفيف ليست مراحل تحضير فقط. إزالة الملوثات تعني إزالة مواقع ستتحول داخل المصهور إلى نقاط بداية للتدهور الحراري. إزالة الرطوبة تعني منع القص الكيميائي أثناء الانصهار. تقليل حجم الجسيمات يحدد مساحة السطح المعرضة للأكسجين.

وعندما تدخل المادة إلى (Injection Mould) فإنها تمر بعملية قص حراري تعيد توزيع الوزن الجزيئي. السلاسل الطويلة تنكسر جزئياً، والسلاسل الأقصر تندمج داخل المجال الجرياني، ويتغير التوزيع الجزيئي بالكامل. هنا لا يحدث تحبيب، بل يحدث بناء لحالة توازن جديدة.

إضافة المثبتات الحرارية في هذه المرحلة لا تعني حماية المادة فقط، بل تعني إيقاف استمرار الانهيار الجزيئي أثناء المعالجة. استخدام موسعات السلاسل لا يعني رفع اللزوجة فقط، بل يعني إعادة بناء الجسور التي تسمح بنقل الإجهاد داخل المقطع.

إعادة التدوير الناجحة ليست إعادة المادة إلى حالتها الأولى، بل تصميم حالة جزيئية جديدة مستقرة.

- المادة المعاد تدويرها كمادة ذات تطبيق محدد وليس كمادة منخفضة الجودة

عندما تقرأ المادة المعاد تدويرها على أساس اسمها التجاري فإنها تصنف مباشرة كمادة درجة ثانية. أما عندما تقرأ على أساس وزنها الجزيئي وتوزيعه وسرعة تبلورها فإنها تتحول إلى مادة ذات نافذة تطبيق واضحة.

مادة فقدت جزءاً من وزنها الجزيئي قد تصبح مثالية للحقن لأنها تعطي جريانا أعلى واستقراراً في الملاء. مادة ذات توزيع واسع قد تكون مناسبة للبروفيل حيث لا يكون التوجه عالياً. مادة ما تزال تملك سلاسل طويلة يمكن أن تدخل في تطبيقات الفيلم بعد إعادة بناء جزء من بنيتها.

القيمة هنا لا تأتي من نقاء المادة فقط، بل من القدرة على قراءة تاريخها وتوجيهها إلى التطبيق المناسب.

- القيمة الاقتصادية للنقاء والبنية

سعر الحبيبة المعاد تدويرها لا يتحدد بكلفة جمعها فقط، بل بمستوى التطبيقات التي يمكن أن تدخلها. كل درجة نقاء إضافية، وكل عملية إعادة بناء بنية ناجحة، ترفع المادة درجة في سلم القيمة.

وعندما تفرض التشريعات نسب محتوى معاد تدويره داخل المنتجات فإنها لا تدعم المصنع فقط، بل تخلق طلبا ثابتا يحول المادة من منتج ثانوي إلى مادة خام ذات سوق مستقرة. هنا تتحول إعادة التدوير من نشاط يعتمد على تقلبات أسعار البوليمر البكر إلى صناعة قائمة بذاتها.

- المختبر كمركز قرار صناعي

في هذه الصناعة لا يكون المختبر مكانا لقياس MFI والكثافة فقط. هو المكان الذي تقرأ فيه التواريخ الجزيئية المختلفة وتصنف المواد وتصمم الخلطات وتحدد التطبيقات. هو الذي يقرر هل هذه المادة ستذهب إلى فيلم أم إلى حقن، هل تحتاج إلى رفع وزن جزيئي أم إلى تعديل صدمة، هل يمكن أن تدخل في تطبيق غذائي بعد إزالة التلوث أم لا.

المختبر هنا هو الذي يحول التدفق غير المنتظم للنفايات إلى منصة مواد مستقرة.

- 14.2 إعادة التدوير كسيادة صناعية على المادة والطاقة

المصنع الذي يملك منظومة إعادة تدوير لا يملك فقط مادة خام أقل كلفة، بل يملك استقلالا جزئيا عن تقلبات سوق البوليمر البكر، ويملك قدرة على خفض الطاقة المتجسدة في كل طن منتج، ويملك منتجا ذا بصمة كربونية أقل في سوق أصبح يقيس المنتجات بهذه اللغة.

إعادة التدوير هنا ليست خطأ إضافيا في المصنع، بل تحول في موقع المصنع داخل الاقتصاد الصناعي: من مستهلك لمادة خام إلى منتج لها، ومن مستهلك للطاقة إلى مدير لدورة الكربون داخل منظومته.

عندما تغادر حدود المصنع ويدخل إلى مستوى المنظومة الكاملة لإعادة التدوير يتغير السؤال مرة أخرى. لم يعد السؤال كيف نشغل خط إعادة تدوير بكفاءة، بل كيف تتحول المادة المستعملة في مجتمع كامل إلى تدفق مستقر يمكن للصناعة أن تبني عليه قرارات طويلة المدى. لأن أكبر تحدٍ في إعادة التدوير ليس تقنيا داخل (Injection Mould)، بل هو قلب طبيعة المادة الداخلة إليه. البوليمر البكر يدخل المصنع بخصائص محددة، أما المادة المعاد تدويرها فتدخل كتدفق غير منتظم في الزمن، وغير متجانس في التاريخ الجزيئي، وغير ثابت في التركيب.

وهنا يظهر الفرق بين بلد يملك صناعة إعادة تدوير وبلد يملك فقط مصانع طحن وتحبيب. الأول يبني منظومة تضمن أن تتحول المخلفات إلى مادة خام بمواصفات يمكن التنبؤ بها، والثاني يبقى أسيرا لتقلبات الجودة والسعر لأنه يتعامل مع المخلفات كسلعة وليس كمصدر مادة.

استقرار التدفق يبدأ خارج المصنع. عندما يتم جمع المواد دون فصل، فإن الطاقة التي تستهلك داخل المصنع للفصل والغسيل والتجفيف لا ترفع فقط الكلفة التشغيلية، بل ترفع كمية الطاقة المرتبطة بكل طن حبيبات، أي ترفع كمية الغازات الدفينة المنبعثة لكل طن مادة معاد تدويرها. في هذه اللحظة تفقد إعادة التدوير أحد أهم مبرراتها الصناعية: خفض الطاقة المتجسدة في المادة. لذلك فإن الفرز من المصدر ليس سلوكا بيئيا، بل هو أول خطوة في خفض البصمة الكربونية للصناعة.

الدول التي نجحت في تحويل إعادة التدوير إلى صناعة مادة خام لم تبدأ ب(Injection Mould)، بل بدأت بنظام جمع منفصل يضمن نقاء تيارات المواد. هذا النقاء لا يرفع جودة المنتج فقط، بل يخفض الطاقة المستهلكة في المعالجة، ويخفض استهلاك الماء، ويخفض كمية الملوثات التي تتحول إلى انبعاثات أثناء الصهر. أي أن النقاء هنا يتحول مباشرة إلى خفض في الغازات الدفينة.

عندما تصل المادة إلى المصنع بعد فرز حقيقي، يصبح بالإمكان الانتقال من نموذج “بيع حبيبة” إلى نموذج “تصميم مادة”. هنا يظهر التصنيف الحقيقي لمصانع إعادة التدوير. هناك مصانع تباع حبيبات حسب السعر اللحظي للسوق، وهذه تبقى مرتبطة دائما بتقلبات أسعار البوليمر البكر. وهناك مصانع تبني منصات مواد PCR ذات خصائص ثابتة، تدخل في تطبيقات محددة بعقود طويلة المدى. الفرق بين الاثنين ليس في نوع (Injection Mould)، بل في القدرة على قراءة المادة وتحويل تدفق غير مستقر إلى نظام مورفولوجي مستقر.

في هذا المستوى يصبح المختبر هو قلب المصنع. ليس لقياس المواصفات، بل لتصنيف التيارات الداخلة، وبناء خلطات تعطي وزنا جزيئيا مستهدفا، وتوزيعا جزيئيا مناسباً، وسرعة تبلور متوافقة مع التطبيق النهائي. المادة المعاد تدويرها هنا لا تباع على أنها بديل رخيص، بل على أنها مادة لها نافذة تشغيل محددة.

وهنا نصل إلى التحول الأهم: الـ PCR كمادة هندسية.

عندما يعاد بناء الوزن الجزيئي عبر موسعات السلاسل، ويتم تثبيت البنية ضد الأكسدة، ويتم ضبط التوزيع الجزيئي عبر المزج، تتحول المادة من مادة فقدت جزءاً من خصائصها إلى مادة تملك خصائص مصممة. في بعض التطبيقات، وخاصة في الحقن والبروفيل، يمكن أن يصبح التوزيع الجزيئي الأوسع ميزة لأنه يعطي استقراراً في الملء وتوازناً في الانكماش. في هذه الحالة لا تكون المادة المعاد تدويرها بديلاً، بل خياراً هندسياً.

لكن الوصول إلى هذا المستوى يتطلب شرطا واحداً: أن يكون هناك طلب صناعي ثابت عليها. وهنا يدخل دور التشريعات. عندما تفرض القوانين نسب محتوى معاد تدويره في المنتجات فإنها لا تقوم بعمل بيئي فقط، بل تخلق سوقاً مستقرة لمادة لها خصائص محددة. الاستقرار في الطلب يعني أن المصنع يستطيع أن يستثمر في أنظمة فرز وغسيل

ومعالجة متقدمة، أي أن جودة المادة ترتفع، أي أن التطبيقات ترتفع، أي أن القيمة الاقتصادية ترتفع. في غياب هذا الطلب الإلزامي تبقى الصناعة أسيرة للسعر، وتبقى المادة في أدنى سلم القيمة.

في التطبيقات الغذائية والدوائية يصل الموضوع إلى مستوى آخر. هنا لا يكفي أن تكون المادة نظيفة ظاهرياً، بل يجب أن يكون تاريخها قابلاً للتتبع. إزالة الملوثات لا تكون بالغسيل فقط، بل عبر عمليات إزالة تطاير ومراحل حرارية تحت تفريغ تعيد بناء نقاء البوليمر. في هذه التطبيقات يصبح المختبر جهة اعتماد، وليس جهة فحص، لأن القرار هنا يتعلق بسلامة المنتج النهائي.

وعندما ننظر إلى الصورة الكاملة نجد أن إعادة التدوير لم تعد صناعة مواد فقط، بل أصبحت جزءاً من سياسة الطاقة والمواد الخام للدولة. كل طن PCR يدخل في السوق يعني طن بوليمر بكر لم ينتج، أي كمية من الوقود الأحفوري لم تستهلك، أي كمية من الغازات الدفينة لم تطلق. في عالم تقاس فيه المنتجات ببصمتها الكربونية يصبح هذا عاملاً تنافسياً للصناعة الوطنية.

وهنا تعود الفكرة إلى نقطة البداية في هذا الباب: الكربون داخل البوليمر.

إما أن يغادر الدورة الصناعية على شكل غازات دفيئة، أو يبقى داخلها كمادة خام لدورة جديدة.

إعادة التدوير هي القرار الذي يحدد أي المسارين سنسلك.

عندما نصل إلى مرحلة تصميم المنتج من أجل إعادة تدويره فإننا في الحقيقة نعود خطوة إلى الوراء في دورة حياة البوليمر، إلى اللحظة التي لم تكن فيها المخلفات قد وجدت بعد. في هذه اللحظة يتحدد كل شيء: هل سيبقى الكربون داخل الدورة الصناعية أم سيغادرها نهائياً، هل ستكون المادة مصدراً لمادة خام جديدة أم عبئاً يحتاج إلى طاقة إضافية للتخلص منه.

تصميم المنتج تقليدياً كان يتم بمنطق الأداء أثناء الاستخدام فقط: المتانة، المظهر، مقاومة الحرارة، أو الكلفة. أما في منظومة إعادة التدوير الحديثة فإن هناك متغيراً جديداً يدخل إلى المعادلة منذ البداية، وهو قابلية المنتج لأن يعود إلى المجال الحراري دون أن يفقد قيمته البنوية. هذا المتغير لا يتعلق بنوع البوليمر فقط، بل بكل ما يضاف إليه: اللون، الطباعة، الطبقات، المواد اللاصقة، الإضافات، وحتى شكل المنتج نفسه.

عندما يصنع المنتج من بوليمر واحد فإننا نضمن أن السلسلة الجزيئية التي ستعود إلى المصنع تنتمي إلى عائلة واحدة يمكن إعادة توزيع وزنها الجزيئي وبناء مورفولوجي جديد منها. أما عندما تتكون البنية من طبقات غير متوافقة فإننا لا نحصل على مادة مركبة ذات أداء أعلى فقط، بل نحصل أيضاً على مادة فقدت إمكانية العودة إلى حالة التجانس. في

هذه الحالة يتحول كل طور إلى ملوث للآخر، ويصبح الفصل هو العملية الأكثر استهلاكاً للطاقة، أي الأكثر توليداً للغازات الدفيئة.

وهنا يظهر التوازن الصناعي الحقيقي بين الأداء أثناء الاستخدام وقابلية إعادة التدوير بعده. الطبقات الحاجزة التي تعطي عمراً أطول للمنتج الغذائي تقلل الفاقد الغذائي، أي تقلل انبعاثات الغازات الدفيئة المرتبطة بإنتاج الغذاء نفسه، لكنها في الوقت نفسه تصعب إعادة تدوير العبوة. القرار هنا لا يكون تقنياً فقط، بل قراراً على مستوى دورة الحياة الكاملة للمنتج. الصناعة المتقدمة لا تختار بين الخيارين، بل تعيد تصميم البنية بحيث تحقق الأداء المطلوب وتبقى ضمن منظومة قابلة للفصل أو ضمن عائلة بوليمرية واحدة.

اللون مثال آخر على قرار تصميمي بسيط ظاهرياً لكنه عميق صناعياً. الألوان الكربونية السوداء تمتص الإشعاع في أنظمة الفرز الطيفي، فتخرج العبوة من منظومة الفصل بالكامل. هذا يعني أن مادة يمكن أن تكون مصدراً لمادة خام عالية القيمة تتحول إلى تيار منخفض القيمة أو إلى وقود. تغيير نظام التلوين هنا ليس قراراً جمالياً فقط، بل قرار يحدد مصير الكربون داخل المنتج.

المواد اللاصقة وأنظمة الطباعة تدخل في نفس المعادلة. مادة لاصقة غير متوافقة كيميائياً مع البوليمر الأساسي تتحول أثناء الصهر إلى طور منفصل يضاعف الخواص الميكانيكية. الطباعة التي تحتوي على معادن ثقيلة أو أصباغ غير قابلة للذوبان تتحول إلى نقاط ضعف داخل البنية. في هذه الحالات لا تكون المشكلة في خط إعادة التدوير، بل في التصميم الأولي للمنتج.

وهنا نصل إلى الحقيقة التي تغير شكل الصناعة بالكامل: معظم الطاقة التي تستهلك في إعادة التدوير تستهلك لتعويض قرارات تصميمية خاطئة.

عندما يصمم المنتج بحيث ينتمي إلى تيار مادي واضح، ويستخدم فيه نظام تلوين يمكن قراءته، وتختار الإضافات بحيث تذوب داخل نفس المجال الجرياني، فإن عملية إعادة التدوير تتحول من عملية فصل معقدة إلى عملية إعادة تشكيل مباشرة. في هذه الحالة تنخفض الطاقة المستهلكة، وتنخفض كمية الغازات الدفيئة، وترتفع القيمة الاقتصادية للمادة.

هذا هو المكان الذي يلتقي فيه المصمم الصناعي مع مهندس البوليمرات ومع خبير إعادة التدوير. لأن القرار لم يعد قرار مصنع منفرد، بل قرار سلسلة قيمة كاملة.

عندما تنتقل هذه الفلسفة إلى مستوى الصناعة الوطنية تتغير خريطة المواد بالكامل. المنتج لم يعد يقيم فقط بسعره وأدائه، بل بقدرته على أن يعود إلى الدورة الصناعية. الشركات التي تملك منتجات قابلة لإعادة التدوير تدخل أسواقا جديدة لأن بصمتها الكربونية أقل. المواد التي لا يمكن إعادة تدويرها تخرج تدريجيا من التطبيقات ذات التنظيم العالي.

في هذه المرحلة تتحول إعادة التدوير من نشاط لاحق للاستخدام إلى عنصر في تصميم المنتج نفسه.

وعندما تعود المادة المصممة بهذه الطريقة إلى المصنع فإن ما يصل إلى (Injection Mould) ليس مخلفات، بل مادة خام ذات تاريخ معروف وبنية قابلة لإعادة البناء. في هذه اللحظة تختفي الفجوة بين البوليمر البكر والمادة المعاد تدويرها، لأن الاثنين يدخلان إلى العملية كأنظمة جزيئية يمكن تصميمها.

وهنا تكتمل الدائرة الصناعية للكربون:

- تصميم يراعي إعادة التدوير استخدام جمع منفصل إعادة بناء البنية منتج جديد.

في كل دورة يبقى الكربون داخل النظام بدل أن يتحول إلى غازات دفيئة.

عندما يعتمد المصنع على مصدر واحد ثابت من البوليمر البكر فإن استقرار العملية يكون نتيجة مباشرة لاستقرار المادة. أما في إعادة التدوير فالمادة نفسها تصبح متغيرا. التيار الداخل يتغير يوميا في التركيب، وفي تاريخ التعرض الحراري، وفي مستوى الأكسدة، وفي بقايا الإضافات. إذا تم التعامل مع هذا التيار كما يتم التعامل مع خامه بكر فإن النتيجة الحتمية هي عدم استقرار في التشغيل، وتذبذب في الخواص، وانخفاض في القيمة السوقية.

التحول الحقيقي يبدأ عندما لا ينظر إلى التيار الداخل كمادة يجب "تحسينها"، بل كمنظومة تيارات يجب إدارتها

مورفولوجيا.

- مفهوم منصة مواد الـ PCR.

المصنع المتقدم لا ينتج حبيبة واحدة بمواصفة عامة، بل يبني عدة عائلات من المواد، كل عائلة لها مجال تطبيق محدد، ويتم تغذيتها بخليط محسوب من التيارات المختلفة. التيار ذو الوزن الجزيئي المرتفع لا يستخدم مباشرة، بل يستعمل كعنصر لرفع بنية تيار آخر. التيار ذو الجريان العالي لا يعتبر مادة ضعيفة، بل أداة لضبط قابلية التشغيل في تطبيق معين. المادة التي تعرضت لتاريخ حراري قاس لا ترفض، بل توجه إلى تطبيق لا يعتمد على التوجه الجزيئي العالي.

في هذه اللحظة يتحول التغير في المادة من مشكلة إلى أداة تصميم.

المزج هنا ليس خلطاً وزنياً، بل تصميم لتوزيع جزيئي مستهدف. عندما يتم مزج تيارات ذات أوزان جزيئية مختلفة فإننا لا نحصل على متوسط بينها، بل على توزيع جديد بالكامل. هذا التوزيع هو الذي يحدد استقرار الجريان داخل القلب، وتوازن الانكماش، وقدرة المادة على تحمل الإجهاد. أي أن المصنع لم يعد يشتري توزيعاً جزيئياً جاهزاً من شركة بتروكيماويات، بل أصبح يبنيه بنفسه.

وهنا يتغير دور (Injection Mould) مرة أخرى. لم يعد خط تحبيب، بل أصبح أداة لبناء حالة توازن جزيئي. زمن المكوث، مستوى القص، نظام التفريغ، مواقع إضافة المثبتات أو موسعات السلاسل — كلها تتحول إلى متغيرات تصميم لمادة جديدة، وليس فقط لضبط جودة الحبيبة.

استقرار الجودة في هذه الحالة لا يأتي من ثبات التيار الداخل، بل من ثبات نموذج الخلط.

المختبر هنا يعمل كغرفة تحكم للمنظومة. كل تيار يدخل يتم تحليله ليس فقط لمعرفة MFI أو الكثافة، بل لتحديد موقعه داخل شبكة المواد. هل هو رافع لوزن جزيئي؟ هل هو معدل جريان؟ هل هو مناسب لتطبيق غير حساس للأكسدة؟ قاعدة البيانات التي تبنى مع الزمن تتحول إلى خريطة تدفق مواد، والمصنع يبدأ بالعمل كمنشأة إدارة موارد وليس كمنشأة معالجة مخلفات.

في هذا المستوى يصبح بالإمكان تقديم مادة PCR بعقد طويل المدى لمحول صناعي، لأن خواصها لم تعد مرتبطة بشحنة معينة من المخلفات، بل بنظام خلط ثابت.

اقتصادياً، هذا التحول يرفع المصنع درجة كاملة في سلسلة القيمة.

بيع الحبيبة حسب السعر اللحظي للسوق يبقى المصنع مرتبطاً بتقلبات أسعار البوليمر البكر. أما بيع مادة بمواصفات ثابتة لتطبيق محدد فيحولها إلى مادة خام حقيقية. الفرق بين الاثنين هو الفرق بين سوق مفتوح وسوق تعاقدية.

وعندما ترتبط هذه المادة بعقد توريد مع صناعات تحتاج إلى محتوى معاد تدويره لتحقيق أهداف خفض الغازات الدفيئة، فإن الطلب عليها يصبح غير مرتبط بسعر البوليمر البكر فقط، بل مرتبط أيضاً بقيمة البصمة الكربونية المنخفضة للمنتج النهائي. هنا تدخل إعادة التدوير إلى قلب اقتصاد الطاقة.

كل طن مادة PCR يدخل في منتج نهائي يخفض الطاقة المتجسدة في هذا المنتج، ويخفض كمية الغازات الدفيئة المرتبطة به. في الصناعات التي بدأت تسعر الكربون، هذه القيمة تتحول إلى عنصر مالي مباشر. المادة المعاد تدويرها لا تنافس فقط بالسعر، بل بالبصمة الكربونية.

هذا التحول ينعكس أيضا على شكل المصنع نفسه.

مصنع إعادة التدوير التقليدي يبني حول خط واحد.

مصنع منصة المواد يبني حول:

- إدارة تيارات
- نظم خلط متعددة
- قاعدة بيانات مورفولوجية
- مختبر قرار
- وعقود تطبيقات.

في هذه اللحظة لا يعود المصنع تابعا لما يدخل إليه، بل يصبح هو من يحدد ما يجب أن يدخل ليحافظ على توازن منظومته.

وهنا نصل إلى نقطة عميقة في نهاية هذه الرحلة:

- إعادة التدوير ليست تقنية
- ليست خط إنتاج
- ليست حتى صناعة مستقلة.

هي تحول في مفهوم المادة داخل الاقتصاد الصناعي.

المادة لم تعد تنتج مرة واحدة ثم تستهلك، بل أصبحت تدخل في دورات متتالية، وفي كل دورة يعاد تصميم بنيتها لتناسب تطبيقا جديدا.

الكربون نفسه لم يعد مسارا خطيا من البئر إلى الجو، بل أصبح عنصرا يدور داخل منظومة مغلقة تقل فيها الغازات الدفينة مع كل دورة ناجحة.

وعندما ننظر إلى خريطة العالم في إعادة التدوير نلاحظ أن التقنية متوفرة تقريبا في كل مكان. خطوط الغسيل، أنظمة الفرز البصري، (Injection Mould) قوالب الحقن متعددة المراحل، وحدات التفريغ، أنظمة إزالة التطاير كلها لم تعد حكرا على دولة دون أخرى. ومع ذلك، فإن نتائج هذه الخطوط تختلف جذريا من بلد إلى آخر. في مكان

تتحول المخلفات إلى مادة خام تدخل في تطبيقات عالية الأداء، وفي مكان آخر تبقى الحبيبة الناتجة محصورة في أدنى التطبيقات قيمة أو تخرج من السوق تماما. السبب هنا لا يكون تقنيا داخل المصنع، بل بنويها في المنظومة التي تغذي المصنع.

14.3 عناصر منظومة إعادة تدوير متكاملة :

- أول عنصر في هذه المنظومة هو الطاقة. إعادة التدوير تسوق غالبا على أنها صناعة موفرة للطاقة مقارنة بإنتاج البوليمر البكر، وهذا صحيح على مستوى دورة الحياة الكاملة، لكن على مستوى المصنع الفردي تصبح كلفة الطاقة عاملا حاسما في القدرة على الوصول إلى مستوى تنقية عالٍ. عمليات الغسيل الساخن، التجفيف، التفريغ العميق، والقص متعدد المراحل — كلها تستهلك طاقة. في الدول التي تكون فيها الطاقة مرتفعة الكلفة، يتجه المصنع إلى تقليل مراحل المعالجة، فتخرج المادة بدرجة نقاء أقل، وتبقى في التطبيقات منخفضة القيمة. وفي الدول التي تكون فيها الطاقة جزءا من سياسة صناعية لدعم المواد المعاد تدويرها، يصبح بالإمكان الوصول إلى مستويات نقاء تجعل المادة منافسة للبوليمر البكر في تطبيقات حساسة.
- العلاقة هنا ليست علاقة كلفة تشغيل فقط، بل علاقة مباشرة بكمية الغازات الدفيئة. الطاقة الرخيصة إذا كانت قادمة من مصادر كثيفة الكربون قد تخفض كلفة الإنتاج لكنها ترفع البصمة الكربونية للطن المنتج، بينما الطاقة المرتبطة بمصادر منخفضة الكربون ترفع القدرة التنافسية للمادة المعاد تدويرها في الأسواق التي تسعر الكربون. المصنع الذي يعمل ضمن منظومة طاقة منخفضة الانبعاثات يبيع مادة وبصمة كربونية منخفضة في الوقت نفسه.
- **العنصر الثاني هو سعر المخلفات نفسه.** في المنظومات غير المنظمة تعامل المخلفات كعبء يجب التخلص منه، فتصل إلى المصنع بتكلفة منخفضة ولكن بدرجة نقاء منخفضة جدا. الطاقة والماء والكيماويات اللازمة لرفع جودة هذه المخلفات تستهلك قيمة أكبر من القيمة التي يمكن إضافتها إلى الحبيبة. في المنظومات المنظمة تعامل المخلفات كمورد، فيدفع مقابل جمعها وفرزها، لكنها تصل بدرجة نقاء عالية تجعل كل وحدة طاقة داخل المصنع تتحول مباشرة إلى قيمة في المنتج النهائي. هنا يتغير مفهوم “المادة الرخيصة”. المادة الأرخص ليست التي تدخل بسعر أقل، بل التي تصل بدرجة نقاء تقلل الطاقة اللازمة لمعالجتها.
- **العنصر الثالث هو التشريع،** لكنه ليس تشريعا بيئيا فقط، بل تشريع سوق. عندما يفرض حد أدنى للمحتوى المعاد تدويره في منتجات معينة، فإن هذا القرار لا يخلق طلبا على الحبيبات فقط، بل يخلق طلبا على مواد ذات مواصفات محددة. المصنع يصبح مضطرا لبناء منصة مواد مستقرة، والمحول الصناعي يصبح مضطرا لتعديل تصميم المنتج ليتوافق مع هذه المادة. هنا تنشأ لغة مشتركة بين الطرفين: لغة المورفولوجي وليس لغة السعر فقط.
- في غياب هذا الطلب الإلزامي تبقى إعادة التدوير أسيرة معادلة سعر البوليمر البكر. عندما ينخفض سعر النفط تنخفض قيمة المادة المعاد تدويرها، وتتهار الاستثمارات في تحسين الجودة، وتعود الحبيبة إلى أدنى التطبيقات. وعندما يرتفع السعر تعود الاستثمارات مؤقتا. هذه الدورية تمنع بناء صناعة مستقرة.

- **العنصر الرابع هو شكل المنتج في السوق.** في الدول التي تصمم منتجاتها ضمن عائلات مادية واضحة يصبح الفرز الصناعي عملية فصل بين تيارات نقية، أما في الدول التي تستخدم فيها التركيبات العشوائية متعددة المواد فإن المصنع يتحول إلى مركز فصل لمركبات غير قابلة للفصل اقتصاديا. هنا لا يكون الفصل في المصنع، بل في التصميم الصناعي للمنتج.

وهنا يظهر البعد المجتمعي الحقيقي. سلوك المستهلك في الفصل من المصدر ليس عاملا تجميلا. عندما يفصل المستهلك العبوة ضمن تيار واضح فإنه في الحقيقة يشارك في تحديد التوزيع الجزيئي للمادة التي ستدخل (Injection Mould) بعد أشهر. كل عبوة توضع في التيار الصحيح تقلل كمية الطاقة اللازمة للفصل، تقلل كمية الماء، تقلل كمية المواد الكيميائية، وتقلل كمية الغازات الدفيئة الناتجة عن المعالجة. المستهلك هنا يصبح جزءا من العملية المورفولوجية للمادة دون أن يراها.

في هذه المنظومة الكاملة تتغير وظيفة المصنع. لم يعد مصنعا يستقبل مخلفات، بل أصبح عقدة في شبكة إدارة مواد وطاقة وكرتون. قراراته في اختيار التيارات، وفي مستوى المعالجة، وفي تصميم الخطات، ترتبط مباشرة بسوق الطاقة، وبسعر الكربون، وبالتشريعات، وبسلوك المجتمع.

وعندما تصل هذه المنظومة إلى مرحلة النضج يظهر التحول الأكبر: المادة المعاد تدويرها لا تدخل السوق لأنها أرخص، بل لأنها تحمل قيمة إضافية — قيمة البصمة الكربونية المنخفضة.

في هذه اللحظة يصبح الكربون نفسه وحدة اقتصادية.

المنتج الذي يحتوي على نسبة مرتفعة من PCR لا يباع فقط بخصائصه الميكانيكية، بل بكمية الغازات الدفيئة التي لم تطلق أثناء إنتاج مادته. الشركات التي تلتزم بأهداف خفض الانبعاثات تحتاج إلى هذه المادة لتصل إلى أهدافها، فتدخل في عقود طويلة المدى لتأمينها. المصنع هنا لم يعد بائع حبيبات، بل موردا لحل طاقي وكرتوني.

وهذا يعيد تعريف السيادة الصناعية. الدولة التي تملك منظومة إعادة تدوير متكاملة لا تقلل فقط من استيراد البوليمر البكر، بل تقلل من استيراد الطاقة المتجسدة فيه، وتقلل من تعرض صناعاتها لتقلبات أسعار النفط والغاز، وتخلق مصدرا داخليا للكربون الصناعي يمكن التحكم فيه.

في هذه المرحلة تكتمل دائرة البوليمر: ليس كمنتج يصنع ويستهلك، بل كعنصر في نظام طاقة ومواد وكرتون مغلق نسبيا.

وعندما تدخل إعادة التدوير إلى مستوى الصناعة الفعلية فإن أول ما يتغير هو طريقة قراءة الخط نفسه. الخط لم يعد مجموعة معدات متتالية تبدأ بطاحونة وتنتهي بحبيبات، بل أصبح مفاعلا متعدد المراحل يعيد بناء المادة عبر مسار حراري – ميكانيكي – فيزيائي محدد بدقة.

الجاروشة هنا لا تكون مجرد أداة تصغير حجم، بل أول مرحلة في التحكم بتاريخ المادة. شكل القطع الناتجة يحدد سلوك الغسيل، ويحدد كفاءة الفصل الكثافي، ويحدد معدل التجفيف لاحقا. القطع الرقيقة ذات المساحة السطحية العالية تتأكسد أسرع أثناء التجفيف الحراري، بينما القطع السمكية تحتفظ بالرطوبة في قلبها وتطلقها داخل (Injection Mould). قرار نوع الجاروشة وسرعة دورانها وشكل السكاكين هو قرار مورفولوجي وليس ميكانيكي فقط.

مرحلة الغسيل ليست تنظيفا بصريا، بل عملية فصل أطوار. درجة الحرارة، نوع الوسط القلوي أو الحمضي، زمن الاحتكاك، وسرعة الدوران — كلها تحدد هل ستبقى الملوثات العضوية مرتبطة بسطح البوليمر أم ستنفصل. في هذه المرحلة يتحدد مقدار التطاير التي سيضطر (Injection Mould) إلى التعامل معها لاحقا، وبالتالي يتحدد الحمل الطاقى على مرحلة التفرغ.

التجفيف بدوره ليس فقط إزالة ماء. الرطوبة المتبقية تتحول داخل المصهور إلى بخار، والبخار يخلق فراغات ميكروية داخل الجريان، وهذه الفراغات تتحول إلى نقاط ضعف ميكانيكية أو إلى تذبذب في الضغط. التحكم في نقطة الندى للهواء ودرجة حرارة التجفيف وزمنه هو تحكم مباشر في استقرار الجريان داخل (Injection Mould).

عندما تصل المادة إلى (Injection Mould) تبدأ المرحلة التي تشبه ما يحدث في إنتاج البوليمر نفسه ولكن على نطاق مختلف. هنا لا يتم فقط صهر المادة، بل يتم:

- إيقاف الأكسدة
- توزيع الملوثات المتبقية على مستوى مجهري
- إعادة بناء التوزيع الجزيئي عبر الخلط مع تيارات أخرى أو عبر إضافات تفاعلية

في خطوط إعادة التدوير المتقدمة يعمل كمفاعل ضبط بنية. مناطق القص لا تستخدم فقط للخلط، بل لكسر التكتلات الصلبة، ومناطق الضغط المنخفض لا تستخدم فقط لسحب الغازات بل لوقف تفاعلات التحلل الحراري.

الفلتر هنا ليست حماية للداي فقط، بل عملية فصل نهائية تحدد المجال الذي يمكن أن تدخل فيه المادة. حجم المايكرون في الشاشات ليس رقما تشغيليا فقط، بل حدا فاصلا بين تطبيق وآخر.

نظام التحبيب بدوره يؤثر على التاريخ الحراري للحبيبة. التحبيب تحت الماء يعطي تبريدا سريعا يحافظ على البنية، بينما التحبيب الهوائي يعطي تبريدا أبطأ يسمح بإعادة ترتيب بلوري جزئي. هذا ينعكس لاحقا على سلوك الانصهار في عمليات التشكيل.

كما في باقي الصناعات، لكل نوع بوليمر فلسفة تشغيل مختلفة داخل إعادة التدوير.

البولي إيثيلين ذو الكثافة المنخفضة يتحمل تاريخا حراريا أطول لكنه حساس للقص العالي الذي يخفض الوزن الجزيئي بسرعة.

البولي بروبيلين يتأكسد أسرع ويحتاج إلى إدارة دقيقة للتفريغ والمثبتات.

PET يعتمد بالكامل على التجفيف العميق لأن وجود أجزاء من الألف من الماء يغير البنية بالكامل.

البولي ستايرين يحافظ على اللزوجة لكنه حساس جدا للتطايرات.

أي أن خط إعادة التدوير لا يكون عاما، بل يبني حول عائلة مادية محددة كما في خطوط التشكيل.

- 4.16 المشاكل التشغيلية في إعادة التدوير

- **عدم استقرار الضغط في (Injection Mould)** يعني تذبذبا في اللزوجة ناتجا عن رطوبة أو عن توزيع غير متجانس للملوثات.

- **الجيل في الحبيبات** يعني أن مرحلة الغسيل لم تفصل طورا غير متوافق.

- **الرائحة تعني أن التفريغ** لم يصل إلى المستوى الذي يوقف تطايرات ناتجة عن تاريخ حراري سابق.

أي أن العيب النهائي هو نتيجة مرحلة سابقة في الخط.

وعندما تخرج الحبيبة وتدخل إلى عملية تشكيل — حقن أو فيلم أو نفخ — فإنها لا تكون مادة جديدة، بل مادة تحمل تاريخها بالكامل. المصنع الذي يفهم إعادة التدوير كصناعة يستطيع أن يربط بين هذا التاريخ وبين نافذة التشغيل في عملية التشكيل.

هنا تكتمل الحلقة بين فصل إعادة التدوير وباقي فصول الكتاب:

- نحن لا ننتج حبيبات فقط،

- نحن نعيد تصميم مادة لتدخل في عملية تشكيل ضمن نافذة محددة.

عندما تبني خطوط إعادة التدوير على أساس نوع المخلفات فقط فإن الناتج يكون حبيبة عامة تبحث عن سوق. أما عندما تبني على أساس التطبيق النهائي فإن كل جزء في الخط يصبح موجها للوصول إلى بنية محددة تخدم عملية تشكيل معروفة مسبقا.

الفرق بين الخطين هو الفرق بين إنتاج حبيبات و إنتاج مادة.

خط يستهدف مادة فيلم — مثلا — لا يصمم بنفس فلسفة خط يستهدف الحقن.

في الفيلم نحن لا نبحث فقط عن لزوجة مناسبة، بل عن:

- توزيع جزيئي يعطي استقرارا في الفقاعة
- نقاء عالٍ يمنع تكسر الفقاعة
- غياب الجبل الذي يتحول إلى ثقوب ميكروية
- تاريخ حراري يسمح بتمدد ثنائي الاتجاه دون انهيار

وهذا يعني أن مرحلة الفلترة ستكون أدق، وأن التحكم في الرطوبة سيكون أكثر صرامة، وأن زمن المكوث داخل

(Injection Mould) سيكون أقصر لتقليل التحلل.

بينما المادة التي تستهدف الحقن يمكن أن تتحمل مجالا أوسع في التوزيع الجزيئي، لكنها حساسة لتذبذب اللزوجة الذي ينعكس مباشرة على وزن القطعة وثبات الأبعاد. هنا يصبح استقرار التغذية والخلط أهم من الوصول إلى أعلى مستوى نقاء بصري.

أما الخط الذي يستهدف النفخ — خزانات أو عبوات — فإنه يحتاج إلى بنية تعطي:

- قوة انصهار عالية
- مقاومة للانهيأ أثناء التمدد
- سلوك تبلور يسمح بالحفاظ على السماكة في المناطق الحرجة

وهذا يعيدنا إلى التحكم في الوزن الجزيئي الطويل السلسلة وليس فقط في MFI بهذا المعنى، إعادة التدوير ليست

مرحلة تسبق التصنيع، بل هي أول مرحلة في تصميم المنتج.

5.16 مفهوم إعادة التدوير التفاعلية

في الخطوط التقليدية نحن نحاول المحافظة على ما تبقى من السلاسل الجزيئية.

أما في إعادة التدوير التفاعلية فإننا نقوم بإعادة بناء هذه السلاسل داخل .

الإضافات التفاعلية لا تستخدم هنا كمحسنات خواص، بل كأدوات هندسة جزيئية :

- موسعات السلسلة تعيد ربط السلاسل القصيرة لتكوين توزيع جزيئي جديد.
- العوامل المتفرعة ترفع قوة الانصهار دون رفع اللزوجة القصية.
- المثبتات لا تمنع التحلل فقط، بل توقف تاريخا حراريا مستمرا داخل المصهور.

في هذه اللحظة يصبح (Injection Mould) أقرب إلى مفاعل بلمرة مصغر يعمل على مادة كانت تعتبر منتهية.

تصميم مناطق (Injection Mould) في هذا النوع من الخطوط يصبح علما قائما بذاته.

- مناطق الانصهار يجب أن تكون كافية لتجانس الطور دون تدمير ما تبقى من السلاسل الطويلة.
- مناطق الخلط يجب أن توزع الإضافة التفاعلية في الزمن المناسب قبل أن يبدأ التفاعل.
- مناطق التفريغ يجب أن تكون بعد التفاعل لإزالة نواتج التفاعلات الثانوية.

أي تغيير في ترتيب هذه المناطق يغير النتيجة النهائية حتى لو بقيت نفس المواد ونفس درجات الحرارة.

عند هذه النقطة يختفي الفاصل التقليدي بين:

- مصنع كومباوند
- مصنع إعادة تدوير.

كلاهما أصبح يعيد بناء مادة للوصول إلى نافذة تشغيل محددة. نفس المنطق ينطبق على إدارة الملوثات غير القابلة للفصل الكامل.

- في الخطوط التقليدية ينظر إلى هذه الملوثات كعيب.

- في الخطوط المتقدمة يتم توزيعها على مستوى مجهري بحيث تفقد قدرتها على التأثير على الجريان أو على الخواص الميكانيكية.

التحكم هنا يكون في:

- شدة القص
- زمن المكوث
- تصميم عناصر الخلط

بحيث تتحول الجسيمات الصلبة من نقاط ضعف إلى طور مشنت داخل مصفوفة مستمرة. هذا المستوى من التصميم يعيد تعريف جودة المادة المعاد تدويرها.

الجودة لم تعد نقاء بصريا، بل قدرة على:

- الدخول في نافذة تشغيل عملية التشكيل دون تعديل جذري في الإعدادات
- إعطاء منتج بخصائص قابلة للتنبؤ
- العمل ضمن دورات إنتاج طويلة دون عدم استقرار

أي أن الجودة تقاس داخل ماكينة التشكيل وليس في مختبر الحبيبات فقط. وهنا يعود دور المختبر ولكن بصورة مختلفة.

المختبر لم يعد مكانا لإصدار شهادات تحليل، بل أصبح مركز بناء نموذج المادة.

القياسات التي تجري MFI — ، الكثافة، OIT، التوزيع الجزيئي، الرطوبة — لا تستخدم لتصنيف المنتج فقط، بل لتعديل نموذج الخلط والتشغيل في الزمن الحقيقي. المختبر هنا جزء من نظام التحكم في المصنع.

وعندما يصل المصنع إلى هذا المستوى يصبح قادرا على إنتاج عائلات مواد، وليس درجات منفصلة.

- عائلة مواد للفيلم
- عائلة مواد للحقن

- عائلة مواد للنفخ

كل عائلة لها نافذة بنوية محددة يتم الوصول إليها عبر تغيير نسب التيارات وليس عبر تغيير الخط.

هذا هو التحول من مصنع إعادة تدوير إلى منصة مواد.

الفرق بين الخططين هو الفرق بين إنتاج حبيبات و إنتاج مادة.

عندما ننظر إلى الفرز من زاوية تشغيلية فقط فإنه يبدو كمرحلة لإزالة الشوائب قبل دخول المادة إلى الخط. لكن في الصناعة المتقدمة الفرز هو أول خطوة في بناء البنية الجزيئية للمادة التي ستخرج بعد ساعات في صورة حبيبات.

الفرق بين الفرز لإزالة الملوثات و الفرز لبناء تيارات مادية نقية هو نفس الفرق بين تنظيف خام معدني وبين تركيزه.

- في الحالة الأولى نحاول فقط الوصول إلى مادة “صالحة للتشغيل” .

- في الحالة الثانية نحن نبني تيارا له هوية مادية محددة:

- فيلم منخفض الكثافة ضمن مجال لزوجي معين PE

- حقن ضمن مجال تبلور محدد PP

- زجاجات ضمن مستوى IV مستهدف PET

أي أن الفرز هنا ليس بصريا، بل مورفولوجيا.

التقنيات المختلفة للفرز — الهوائي، الكثافي، البصري، الكهروستاتيكي — لا تكون أدوات مستقلة، بل مراحل متتالية لبناء هذا التيار.

الفصل الكثافي لا يزيل مادة فقط، بل يحدد مجال الكثافة الذي سيحدد لاحقا سلوك الانكماش في المنتج النهائي.
الفرز البصري لا يزيل لونا فقط، بل يحدد مستوى الاستقرار الحراري لأن كل بوليمر له تاريخ حراري مختلف.
الفصل الهوائي لا يزيل رقائق خفيفة فقط، بل يحدد نسبة المواد ذات المساحة السطحية العالية التي تتأكسد بسرعة داخل

Injection Mould

بهذا المعنى يصبح الفرز عملية تصميم مادة قبل أن تكون عملية تجهيز مادة. وهنا يظهر الارتباط المباشر بين تصميم المنتج في السوق وقابلية إعادة تدويره صناعيا.

المنتج الذي يصمم من طبقات غير متوافقة مورفولوجيا لا يفشل في سلة المهملات، بل يفشل داخل Injection Mould.

المنتج الذي يحتوي على إضافات غير قابلة للفصل يتحول إلى مصدر عدم استقرار في كل شحنة يدخل فيها.
أي أن "قابلية إعادة التدوير" ليست صفة بيئية للمنتج، بل خاصية هندسية تحدد هل يمكن إدخاله في نموذج مادة صناعي أم لا.

في هذه اللحظة يتغير دور المصمم الصناعي.

لم يعد التصميم يقتصر على : الشكل - الوزن - التكلفة

بل أصبح يشمل:

التيار المادي الذي سينتمي إليه المنتج بعد انتهاء عمره هل سينضم إلى تيار PE الفيلم؟
أم سيخلق تيارا جديدا غير قابل للمعالجة؟

هذا القرار يتخذ في مرحلة التصميم الأولى وليس في نهاية عمر المنتج. وعندما تبنى السوق على هذا الأساس تظهر عائلات منتجات كاملة تنتمي إلى نفس التيار المادي:

- الفرز يصبح أكثر كفاءة،

- الطاقة اللازمة للمعالجة تنخفض،

- جودة المادة الناتجة ترتفع،

- تنخفض كمية الغازات الدفيئة الناتجة عن كل طن.

وهنا يظهر الرابط الحقيقي بين التصميم الصناعي وخفض الانبعاثات. كل منتج يصمم ضمن عائلة مادية واضحة يقلل الطاقة اللازمة لإعادة تدويره مستقبلاً. في المنظومات التي تصل إلى هذا المستوى يتحول الفرز من مرحلة مكلفة إلى مصدر قيمة.

- التيار النقي يباع بسعر أعلى قبل أن يدخل إلى (Injection Mould) لأنه يحمل معه طاقة معالجة أقل.

- التيار المختلط يصبح مادة منخفضة القيمة لأنه يحتاج إلى طاقة أكبر للوصول إلى نفس المستوى.

14.6 دور و مسؤولية المجتمع الصناعي

القيمة هنا تخلق قبل التصنيع. وهذا يعيد توزيع المسؤولية عبر المجتمع الصناعي بالكامل :

- الفرد الذي يفصل المخلفات من المصدر يقلل الطاقة اللازمة للفرز الصناعي.

- البلدية التي تبني منظومة جمع منفصلة ترفع قيمة التيار المادي.

- المصمم الذي يختار مواد متوافقة يبني مادة خام مستقبلية.

- المصنع الذي يعيد التدوير يحول هذه المنظومة إلى حبيبات.

إعادة التدوير هنا ليست صناعة منفصلة، بل شبكة صناعية تبدأ من قرار التصميم وتنتهي في ماكينة التشكيل.

- عندما تكتمل هذه الشبكة يظهر أثرها على مستوى الدولة.

- كمية البوليمر البكر المستورد او المصنع تنخفض الطاقة المتجسدة في المواد تنخفض الغازات الدفيئة تنخفض ويظهر مصدر داخلي ثابت لمادة خام صناعية .

وبهذا المفهوم يصبح هذا ليس ملف نفايات — هذا ملف سيادة صناعية.

وعند هذه النقطة يمكن قراءة مؤشر نجاح منظومة إعادة التدوير بطريقة مختلفة. ليس بنسبة الجمع وليس بكمية المخلفات المعالجة

بل بـ:

- كمية المادة التي عادت إلى تطبيقات عالية القيمة
- كمية الطاقة التي تم توفيرها
- كمية الغازات الدفينة التي تم تجنبها
- مدى استقرار تيارات المواد الصناعية داخل الدولة

بهذا الشكل تكتمل الحلقة :

- تصميم المنتج
- الفرز
- إعادة بناء المادة
- عملية التشكيل
- منتج جديد داخل نفس التيار

وهذا هو الاقتصاد الدائري في صورته الصناعية الحقيقية، وليس كشعار.

تدخل المادة المعاد تدويرها إلى ماكينة الحقن أو إلى خط الفيلم أو إلى رأس النفخ فإنها لا تتصرف كمادة جديدة، لأنها تحمل داخلها تاريخا كاملا من:

- توزيع جزيئي مختلف
- درجة أكسدة معينة
- مستوى تبلور سابق
- بقايا إضافات أو ملوثات موزعة مجهريا

وهذا التاريخ لا يظهر في رقم الـ MFI وحده، بل يظهر في نافذة التشغيل نفسها.

المحول الصناعي الذي يحاول تشغيل PCR بنفس إعدادات البوليمر البكر يفشل ليس لأن المادة سيئة، بل لأنه يتجاهل تاريخها.

في الحقن مثلا، التغير الأول الذي يظهر ليس في الملاء، بل في مرحلة الضغط التعويضي.

المادة ذات التوزيع الجزيئي الأوسع تستجيب للضغط بطريقة مختلفة. جزء منها يتجمد مبكرا وجزء يبقى في حالة جريان، فتصبح عملية التعويض الحجمي غير متجانسة. هنا لا يكون الحل في رفع الضغط فقط، بل في إعادة توزيع نقطة التحويل من السرعة إلى الضغط بحيث يتم الوصول إلى تجمد بوابة متوازن مع هذا التوزيع الجديد زمن التبريد أيضا لا يقرأ بنفس الطريقة. المادة التي تعرضت لتاريخ حراري سابق تملك سلوك تبلور مختلف، وقد تصل إلى ثبات أبعادي بزمن أقصر أو أطول حسب بنيتها. أي أن نافذة التشغيل تعاد كتابتها، لا لأن المادة أضعف، بل لأنها مختلفة بنويا.

في الفيلم يظهر التاريخ بصورة أوضح. استقرار الفقاعة يعتمد على قوة الانصهار وعلى توازن التمدد الطولي والعرضي. المادة المعاد تدويرها ذات السلاسل الأقصر تعطي تمدا أسهل لكنها أقل مقاومة للانهيال.

هنا لا يكون التعديل في درجة الحرارة فقط، بل في:

- نسبة النفخ
- معدل السحب
- موقع خط التجمد

بحيث يتم توزيع الإجهادات على البنية الجديدة للمادة.

الجيل المجهرى الذي لا يظهر في الحبيبات يتحول إلى نقاط ضعف عند التمدد الثنائي، ولذلك فإن نافذة الفترة في خط إعادة التدوير تظهر نتيجتها هنا مباشرة.

في النفخ (الخزانات والعبوات) يصبح التحكم في توزيع السماكة مرتبطا مباشرة بالبنية الجزيئية.

- المادة ذات الوزن الجزيئي الطويل تعطي "ذاكرة انصهار" تسمح بتعليق الباريسون دون انهيار.

- المادة التي فقدت هذا الجزء من التوزيع تحتاج إلى:

- تبريد مختلف في القالب
- برمجة سماكة مختلفة
- زمن نفخ مختلف

أي أن تصميم البرنامج نفسه يتغير حسب المادة.

وهنا يظهر القرار الصناعي الحقيقي:

متى نغير الإعدادات؟

ومتى نعيد تصميم المادة؟

إذا كانت نافذة التشغيل ضيقة جدا بحيث تؤثر على الإنتاجية، فإن الحل ليس في إجبار الماكينة على العمل خارج مجالها، بل في العودة إلى نموذج الخط في مصنع إعادة التدوير وبناء بنية أقرب إلى التطبيق.

هذا هو الربط الحقيقي بين المصنعين.

المصانع التي تصل إلى هذا المستوى لا تتعامل مع PCR كدرجة واحدة، بل كعائلات مواد لها:

- نوافذ تشغيل محددة
- برامج حقن محددة
- وصفات فيلم محددة

ويتم تخزين هذه المعرفة داخل قواعد بيانات تشغيلية.

مع مرور الوقت يصبح بالإمكان تشغيل المادة الجديدة مباشرة على إعدادات محفوظة مسبقا لأنها تنتمي إلى نفس العائلة البنيوية. اقتصاديا، هذا التحول هو الذي يرفع قيمة المادة المعاد تدويرها.

المحول الصناعي يدفع أكثر مقابل مادة لا تضطره إلى إبطاء الخط، ولا تزيد نسبة الهدر، ولا تخلق عدم استقرار في الأبعاد. القيمة هنا ليست في سعر الطن، بل في استقرار العملية.

على مستوى الطاقة والغازات الدفينة، هذا الاستقرار له أثر مباشر.

- كل توقف خط
- كل إعادة تشغيل
- كل منتج مرفوض

يعني طاقة إضافية وانبعاثات إضافية.

المادة المصممة لتعمل داخل نافذة تشغيل ثابتة تقلل الانبعثات ليس فقط في مصنع إعادة التدوير، بل في كل مصنع يستخدمها. وهكذا تمتد فائدة إعادة التدوير عبر سلسلة الصناعة كاملة.

في هذه اللحظة نصل إلى الصورة النهائية لهذا الباب:

إعادة التدوير ليست مرحلة قبل التصنيع، وليست صناعة موازية، بل هي المرحلة الأولى في تصميم المادة لكل عمليات التشكيل التي تحدث بعدها.

كما أن البثق يصمم التوزيع العرضي، والحقن يصمم الكثافة النهائية، والفيلم يصمم التوجه الجزيئي، فإن إعادة التدوير تصمم البنية التي ستدخل إلى كل هذه العمليات.

وبذلك تعود المادة إلى نقطة البداية:

- بوليمر يدخل في عملية إذابة - ثم تشكيل - ثم تبريد

لكن هذه المرة وهو يحمل تاريخاً يمكن قراءته، وإعادة بنائه، وتوجيهه. وهنا يلتقي هذا الباب مع الفكرة الأساسية التي مرت في كل فصول الكتاب:

كل صناعات البلاستيك — بكرا كانت أو معاد تدويرها — هي في جوهرها:

- عند الوصول إلى نهاية رحلة إعادة التدوير يتغير تعريف البوليمر نفسه. لم يعد مادة خرجت من مفاعل بتروكيميائي لتدخل إلى ماكينة تشكيل ثم تنتهي كمنتج، بل أصبح عنصراً يتحرك داخل دورة طاقة — مادية — زمنية يمكن التحكم فيها وإعادة توجيهها.

- في بداية الصناعة كان البوليمر يقاس بسعر الطن. ثم أصبح يقاس بالخواص الميكانيكية. ثم أصبح يقاس بقابليته للتشغيل.

- أما في المرحلة القادمة فإنه سيقاس بكمية الطاقة التي يحملها وكمية الغازات الدفينة التي لم تطلق أثناء وجوده داخل الدورة الصناعية. القيمة هنا لم تعد في المادة وحدها، بل في التاريخ الذي تحمله.

- الصناعة التي تفهم إعادة التدوير بهذا الشكل لا ترى في المخلفات نهاية عمر المنتج، بل ترى فيها بداية عمر مادة جديدة.

- الطن الذي يخرج من خط إعادة التدوير ليس بديلا عن طن بكر فقط، بل هو:

- طن من الطاقة لم يعد استهلاكها
- طن من الكربون بقي داخل الدورة الصناعية
- طن من الاعتماد على السوق الخارجية تم الاستغناء عنه

وهذا هو المعنى الحقيقي للسيادة المادية فالدولة التي تملك القدرة على إدارة تدفق البوليمر داخل حدودها لا تدير ملف نفايات، بل تدير:

- أمنها الطاقى
- مرونة صناعتها
- قدرتها على تثبيت تكاليفها
- موقعها داخل اقتصاد الكربون العالمي

في هذه المرحلة يختفي الفصل التقليدي بين الصناعات.

- مصنع البتروكيماويات
- مصنع التحضير التركيبى (Compounding)
- مصنع التشكيل
- مصنع إعادة التدوير

كلها تتحول إلى عقد داخل شبكة واحدة تدير المادة عبر الزمن.

الفرق لم يعد في مصدر البوليمر، بل في قدرته على الدخول في هذه الشبكة والبقاء داخلها. وهذا يعيد تعريف مفهوم الجودة نفسه.

الجودة لم تعد سطحا لامعا أو قيمة شد مرتفعة، بل أصبحت قدرة المادة على:

- التحرك بين عمليات التشكيل المختلفة

- الاحتفاظ ببنيته عبر دورات متعددة
- العمل داخل نوافذ تشغيل مستقرة
- حمل قيمة طاقة وكر بونية يمكن قياسها

والجودة هنا خاصية زمنية وليست لحظية.

عندما تقرأ الصناعة بهذه الطريقة يصبح واضحاً أن مستقبل البوليمرات لن يبني فقط في المفاعلات، بل في خطوط إعادة التدوير أيضاً. المفاعل يعطي المادة شكلها الأول اما إعادة التدوير تعطيها قدرتها على البقاء.

وهنا يظهر التحول الأكبر في عقلية المهندس والمصنع فالقرار لم يعد أي مادة أرخص بل أصبح:

- أي بنية أكثر قدرة على البقاء داخل الدورة الصناعية؟
- أي مادة تعطي أقل طاقة كلية عبر عمرها الكامل؟
- أي تصميم يسمح بعودة المنتج إلى نفس التيار بعد سنوات؟

هذه الأسئلة هي التي ستحدد شكل المصانع القادمة.

13.7 خلاصة الفصل :

في بداية هذه الرحلة بدا البوليمر وكأنه مادة تعرف داخل مختبر: سلاسل جزيئية، أوزان مختلفة، تبلور، لزوجة، ومنحنيات شد وانكسار. كان من الممكن أن يبقى هناك، داخل حدود التعريف الكيميائي، كما تفعل كثير من الكتب، فيغادر القارئ وهو يعرف المادة لكنه لا يرى حياتها. لكن ما إن دخلنا إلى عالم التشكيل حتى تغير المعنى بالكامل؛ لم تعد السلسلة الجزيئية بنية ساكنة، بل حركة داخل زمن، وسلوك داخل مجال حراري، واستجابة لإجهاد يتغير لحظة بعد لحظة. في البثق لم يكن المنتج يخرج من القالب (Die) فقط، بل كانت البنية تسحب وتجمد في مسار مستمر. وفي القولبة بالحقن لم يكن الشكل نتيجة التجويف، بل نتيجة لحظة تجمد البوابة حيث تتحول الطاقة إلى كثافة. وفي الفيلم لم يكن الامتداد مجرد زيادة في المساحة، بل إعادة ترتيب جزيئي يحدث في الهواء قبل أن تستقر البنية على الرول. وفي النفخ لم تكن السماكة توزيعاً هندسياً فقط، بل ذاكرة انصهار تقرأ في كل نقطة من نقاط الباريسون.

مع كل عملية كان يتضح أن الماكينات ليست موضوع الصناعة، بل إن موضوعها الحقيقي هو كيفية إدارة حركة البنية الجزيئية داخل زمن محدد. كان الاختلاف بين عملية وأخرى اختلافاً في طريقة طرح السؤال نفسه: متى تتحرك السلاسل؟ متى تتجمد؟ تحت أي قص؟ وبأي تاريخ حراري؟ ومع هذا التقدم لم تعد العمليات تبدو منفصلة كما في الواقع الصناعي اليومي، بل بدت وكأنها وجوه متعددة لقانون واحد.

وعندما وصلنا إلى إعادة التدوير اكتملت الصورة على نحو لم يكن ظاهرا في البداية. المادة التي خرجت من المفاعل في الفصول الأولى عادت إلينا وهي تحمل تاريخها الكامل: تاريخ التشكيل، وتاريخ الاستخدام، وتاريخ الحرارة والإجهاد والأكسدة. لم تعد مادة جديدة، بل مادة لها ذاكرة. هنا لم تعد الصناعة تحويل مادة إلى منتج، بل إدارة عمر مادة عبر الزمن، وإعادة إدخالها في نفس المجال الذي خرجت منه، لا بوصفها بديلا أقل قيمة، بل بوصفها بنية يمكن إعادة تصميمها.

في هذه اللحظة تلاشى الفصل التقليدي بين البوليمر البكر والمادة المعاد تدويرها. كلاهما يدخل إلى نفس المجال الحراري، وكلاهما يمر بمرحلة إذابة ثم تشكيل ثم تبريد، لكن أحدهما يبدأ بتوزيع جزيئي صمم في المفاعل، والآخر يبدأ بتوزيع صاغه التاريخ ويمكن إعادة بنائه داخل (Injection Mould). هنا تغيرت لغة القرار الصناعي نفسها؛ لم يعد السؤال أي مادة تعطيني هذا المنتج، بل أي بنية يجب أن أصممها — في المفاعل أو في خط إعادة التدوير — لكي تعمل داخل نافذة التشكيل المطلوبة.

بهذا المعنى لم تعد المصانع وحدات إنتاج منفصلة، بل عقدا في شبكة واحدة تتحرك فيها المادة عبر الزمن. المفاعل يضع البداية، التحضير التركيبي (Compounding) يضبط المجال، والتشكيل يعطي الشكل، والاستخدام يكتب التاريخ، وإعادة التدوير تعيد بناء البنية. إنها دورة واحدة تتحرك فيها نفس السلسلة الجزيئية عبر مجالات مختلفة، لكن تحت قانون واحد.

وعند هذه النقطة يظهر البعد الذي لم يكن واضحا في الصفحة الأولى: الطاقة والكربون. لم تعد كل عملية إذابة حركة مادة فقط، بل حركة طاقة مخزنة داخلها. ولم تعد كل عملية إعادة تدوير توفيراً لمادة فقط، بل توفيراً للطاقة التي كان يجب أن تستهلك لإنتاجها من جديد. كل منتج يبقى داخل هذه الدورة هو كمية من الكربون لم تعد إلى الغلاف الجوي، وكل دورة إضافية هي زمن أطول تبقى فيه القيمة داخل الصناعة.

هنا يتغير موقع البلاستيك في الوعي الصناعي. المادة التي قرئت طويلا كعيب يبني تظهر بوصفها إحدى أهم أدوات خفض الغازات الدفيئة عندما تدار داخل دورة مغلقة. ليس لأنها مادة بلا عيوب، بل لأنها المادة القادرة على أن تذاب وتشكل وتعود مرة أخرى إلى نفس المستوى الوظيفي مرات متعددة من دون أن تفقد جوهرها.

ومن هذا الفهم يتشكل مستقبل الصناعة. لن تبنى المصانع القادمة حول الماكينات وحدها، بل حول تدفق المادة عبر الزمن. لن تكون درجة المادة رقما في كتالوج، بل عائلة بنوية لها نافذة تشغيل محفوظة. وسيبدأ تصميم المنتج من السؤال: إلى أي تيار مادي سيعود بعد انتهاء عمره؟ وعندها لن يكون ملف إعادة التدوير ملف نفايات، بل ملف سيادة مادية وطاقة صناعية واستقرار اقتصادي.

وعندما يعود القارئ إلى بداية هذه الرحلة سيرى أن البوليمر الذي قدم كمادة كيميائية لم يكن سوى نقطة البداية لنظام صناعي كامل. من باطن الأرض إلى المفاعل، ومن المفاعل إلى خط التشكيل، ومن المنتج إلى الاستخدام، ثم إلى إعادة التدوير، ثم إلى خط التشكيل مرة أخرى — رحلة واحدة تتحرك فيها نفس البنية عبر مجالات مختلفة، لكنها لا تفقد قيمتها.

لهذا لا تنتهي هذه الرحلة عند الصفحة الأخيرة. فكل حبيبة بوليمر ستخرج من أي خط إنتاج بعد هذا الفهم لن تكون مادة خام فقط، بل ستكون جزءاً من دورة يجب أن تستمر. وهذا هو الفارق بين أن نعمل في صناعة البلاستيك... وبين أن نرى المادة وهي تعيش داخل الزمن الصناعي.

خاتمة الكتاب

كما بدأت هذه الرحلة من أرض المصنع، من ملاحظة سلوك مادة لا تُرى بنيتها بالعين المجردة، تنتهي هنا بالعودة إلى نفس النقطة، ولكن بفهم مختلف. فالمادة التي كانت تبدو في البداية مجرد حبيبات تدخل إلى الإكسترودر وتخرج على شكل منتج، أصبحت تُرى كنظام متكامل يحمل في داخله تاريخاً كاملاً من التكوين والتحول.

لقد مررنا في هذه الصفحات عبر مراحل متعددة: من المصدر الأولي للمادة، إلى المونومر، إلى البلمرة وتكوين السلاسل، ثم إلى الحبيبات، بالإضافة، فالعمليات الصناعية المختلفة، وصولاً إلى المنتج النهائي، بل وحتى إلى إعادة التدوير. وما قد يبدو ظاهرياً كسلسلة من المراحل المنفصلة، اتضح في جوهره أنه مسار واحد متصل، تتراكم فيه آثار كل مرحلة داخل البنية النهائية للمادة.

فالبنية التي تتكون في المفاعل لا تختفي عند التحبيب، وسلوك المصهور داخل الإكسترودر لا ينفصل عن توزيع الوزن الجزيئي، والعيوب التي تظهر في المنتج ليست أحداثاً طارئة، بل نتائج طبيعية لتوازنات لم تكتمل في مراحل سابقة. وهكذا يصبح كل ما نراه على خط الإنتاج انعكاساً لما حدث داخل المادة عبر رحلتها الكاملة.

ومن هنا يتغير معنى الخبرة الصناعية. لم تعد الخبرة مجرد القدرة على تشغيل خط أو ضبط بارامتر، بل أصبحت القدرة على قراءة المادة نفسها، وفهم ما يحدث داخلها، وربط الظواهر الظاهرة بأسبابها الباطنة. فالمهندس أو المشغل الذي يرى التغير في السلوك لا يكتفي بوصفه، بل يبحث عن جذوره في البنية، في الجريان، في التبريد، وفي التشتت، وفي كل ما مرت به المادة قبل أن تصل إلى تلك اللحظة.

وعند هذه المرحلة، لا يعود السؤال: ما الذي يجب تغييره في الماكينة؟

بل يصبح: ما الذي يحدث داخل المادة؟ ولماذا؟

هذا التحول في طريقة التفكير هو الهدف الحقيقي من هذه الرحلة. ففهم البوليمرات لا يتحقق بجمع المعلومات، بل بالقدرة على الربط بين ما يبدو متفرقاً، ورؤية الصورة الكاملة التي تجمع بين العلم والتطبيق، بين الجزيء وخط الإنتاج.

ومع ذلك، فإن ما تم عرضه في هذا الكتاب، رغم امتداده عبر مراحل متعددة، لا يمكن أن يغطي كل التفاصيل التي تتطلبها الممارسة الصناعية الدقيقة. فهناك موضوعات تحتاج إلى توسع أكبر، سواء في التحليل التطبيقي، أو في المقارنات، أو في عرض الحالات الصناعية الواقعية. ولهذا تم تخصيص مجموعة من الملاحق في نهاية الكتاب لتقديم هذه الجوانب بصورة أكثر تركيزاً، بحيث تكون امتداداً عملياً لما تم بناؤه داخل الفصول، وتساعد القارئ على الانتقال من الفهم النظري إلى التطبيق المباشر.

وفي ختام هذه الرحلة، يعود القارئ إلى النقطة التي بدأ منها: إلى المادة وهي تُعالج، وتُسخن، وتُسحب، وتُشكل. لكن الفرق الآن أن ما كان يُرى كسلوك متغير أصبح يُفهم كنظام له أسبابه وقوانينه. وما كان يُعالج بالتجربة فقط أصبح يُقرأ ويُفسر.

ويبقى عالم البوليمرات، كما أشرنا في البداية، مجالاً مفتوحاً للتعلم المستمر. فكل عملية، وكل مادة، وكل منتج، يحمل معه فرصة جديدة لفهم أعمق، واكتشاف جديد. وما هذه الصفحات إلا خطوة في طريق طويل يتجدد مع كل تجربة ومع كل سؤال جديد.

وفي النهاية، يبقى العلم كما هو:

محاولة مستمرة لفهم ما أودعه الله سبحانه وتعالى في هذا الكون من نظم دقيقة، نتعلم منها بقدر ما يُفتح لنا من الفهم، ونسعى من خلالها إلى توظيف هذا العلم في ما ينفع الناس ويعمر الأرض.

مقدمة الملاحق

بعد استكمال رحلة البوليمر عبر فصول هذا الكتاب، من نشأته كمادة خام مشتقة من النفط أو الغاز، مروراً بتحوله إلى منتج في الاستخدام، وانتهاءً بعودته ضمن دورة إعادة التدوير، تبقى هناك مساحة لا يمكن احتواؤها بالكامل داخل التسلسل الرئيسي للفصول، وهي المساحة التي يتحول فيها الفهم إلى ممارسة، والمعلومة إلى أداة. ومن هنا جاءت هذه الملاحق.

لا تُقدّم هذه الملاحق كمواد إضافية منفصلة، بل كامتداد مباشر لما تم بناؤه في هذا الكتاب، ولكن من زوايا مختلفة تكمل الصورة العامة للصناعة. فهي تعيد طرح نفس المفاهيم الأساسية — البنية، الاختبارات، الجريان، التشتت، والتوازن — ولكن في سياقات تطبيقية ولغوية وتنظيمية أوسع.

- **الملحق الأول**، يتم الانتقال إلى أرض الواقع الصناعي من خلال تحليل حالات عملية، حيث يبدأ الفهم من المشكلة نفسها، ثم يتم تتبعها عبر الاختبارات حتى الوصول إلى البنية الداخلية للمادة وربطها بظروف التشغيل والقرار الصناعي.
- **الملحق الثاني**، فيتم عكس اتجاه القراءة؛ حيث يُنظر إلى المنتج كمدخل للفهم، ويتم من خلال سلوكه الوصول إلى تفسير البنية الجزيئية، ثم ترجمة ذلك إلى خريطة قرار صناعي تساعد على اختيار المادة أو تعديلها أو ضبط العملية.
- **الملحق الثالث**، يتم بناء لغة مشتركة للصناعة، لأن جزءاً من صعوبة التعامل مع البوليمرات لا يعود إلى تعقيدها فقط، بل إلى اختلاف المصطلحات بين المختبر وخط الإنتاج، وبين المورد والمستخدم. ومن هنا تأتي أهمية توحيد المفاهيم وربط المصطلح بسياقه الصناعي.
- أما الملحق الرابع، فيربط المادة بوجودها في المنتج النهائي، من خلال رموز تعريف البوليمرات، وهي النقطة التي يلتقي فيها التصنيع مع الاستخدام، ويظهر فيها البوليمر ضمن منظومة أوسع تشمل التصنيف وإعادة التدوير والتعامل مع المنتج بعد خروجه من المصنع. وبهذا، لا تمثل هذه الملاحق تكراراً لما سبق، بل توسعاً فيه؛ حيث تُعرض المفاهيم نفسها من زوايا متعددة:

مرة من خلال المشكلة، ومرة من خلال المنتج، ومرة من خلال اللغة، ومرة من خلال التطبيق النهائي .

الملحق الأول

تحليل منهجي للحالات الصناعية في تشكيل البوليمرات

ربط الاختبارات بسلوك المادة داخل عمليات التصنيع من واقع دراسة حالات عملية

تحليل منهجي للحالات الصناعية في تشكيل البوليمرات وربط نتائج الاختبارات بسلوك المادة داخل عمليات التصنيع يمثل حجر الأساس لأي قرار هندسي صحيح داخل المصنع. في هذه الحالة يتم تناول نموذج واقعي لفشل منتج إنشائي مصنوع بتقنية الحقن، مع تتبع العلاقة بين خصائص المادة المقاسة مخبرياً وبين الأداء الفعلي تحت الحمل.

الحالة الأولى :

فشل طبليية حقن من البولي بروبيلين ذات حمل إنشائي

- وصف الظاهرة

خلال التشغيل الفعلي في خط الحقن، وبعد اعتماد المنتج تجارياً وبدء التوريد، وردت ملاحظة من العميل تفيد بأن الطبليية لا تتحمل الأحمال المصممة لها. تم إعادة اختبار الطبليية داخل المصنع باستخدام نفس أسلوب التحميل المتبع لدى العميل، حيث تم تحميلها تدريجياً. عند حدود 450-500 كغ بدأت الشروخ بالظهور بشكل مفاجئ، ثم حدث الكسر خلال فترة قصيرة، رغم أن التصميم معتمد على 1000 كغ.

الملاحظة الأهم لم تكن فقط في قيمة الحمل، بل في طبيعة الفشل. الكسر كان هشاً وسريعاً، دون أي انبعاج أو تشوه تدريجي، وظهر دائماً في مناطق محددة: الزوايا السفلية ونقاط التقاء الدعامات. تم تكرار الاختبار على أكثر من قطعة من إنتاجات مختلفة، وكانت النتيجة متطابقة تقريباً.

- تحليل أولي للبيانات

تم سحب عينات مباشرة من نفس التشغيلات التي خرجت منها الطلبيات، وليس من مواد خام مخزنة، وذلك لتفادي أي اختلاف. الهدف كان فهم المادة كما دخلت فعلاً في المنتج، وليس كما يفترض أنها حسب المورد.

تم البدء بثلاثة اختبارات أساسية داخل المختبر MFI:، الكثافة، ونسبة الرماد، لأنها الأسرع والأكثر قدرة على إعطاء اتجاه واضح.

- اختبارات المنتج النهائي (الميكانيكية والفيزيائية)

النتائج جاءت كالتالي:

- MFI أعلى بشكل واضح من القيم المعتادة لمثل هذا التطبيق
- الكثافة أعلى من الكثافة المعروفة للبولي بروبيلين النقي
- نسبة الرماد ضمن نطاق 15-20%

تم التأكد من هذه النتائج بإعادة الفحص على أكثر من عينة مأخوذة من نفس الطبلية ومن طبليلات أخرى من نفس الإنتاج.

- قراءة هذه النتائج

هذه النتائج لم يتم التعامل معها كأرقام فقط، بل تمت مقارنتها مباشرة مع متطلبات التطبيق:

- ارتفاع MFI يعني أن المادة كانت منخفضة اللزوجة أثناء الحقن، وهو أمر مرغوب تشغيليًا، لكنه في المقابل يدل على انخفاض الوزن الجزيئي
- عمليًا، هذا النوع من المواد يعطي تدفقًا ممتازًا داخل القالب، لكنه ينتج منتجًا أضعف ميكانيكيًا
- الكثافة المرتفعة مباشرة أعطت مؤشرًا أن المادة ليست نقية
- نسبة الرماد أكدت وجود filler بنسبة تقارب 18%

في هذه المرحلة لم يكن التشخيص نظريًا، بل كان واضحًا من واقع الأرقام أن المادة المستخدمة مختلفة جذريًا عما يتطلبه المنتج الإنشائي.

- التحليل البنيوي

بمراجعة نتائج الفحص مع شكل الكسر، أصبح الربط مباشرًا. المنتج تم تصنيعه من تركيبة تحتوي على نسبة عالية من الفيلر، مع بولي بروبيلين منخفض الوزن الجزيئي.

في أرض الواقع، هذا النوع من التركيبات شائع لتقليل التكلفة أو لتحسين الصلابة الظاهرية، لكنه غير مناسب إطلاقاً لتحمل الأحمال أو الصدمات.

تم أيضاً ملاحظة أن الكسر يبدأ من مناطق محددة، ما يشير إلى أن هذه المناطق أصبحت نقاط تركيز إجهاد، ومع ضعف المادة، تحولت إلى نقاط فشل مباشرة.

- تفسير سلوك الفشل

الفشل الذي حدث لم يكن مفاجئاً بعد قراءة النتائج.

في المواد ذات MFI المرتفع، السلاسل البوليمرية أقصر، وبالتالي لا تستطيع امتصاص الطاقة أو توزيع الإجهاد. وعند إضافة filler بنسبة عالية، تتحول هذه الجزيئات إلى نقاط ضعف داخل البنية، خصوصاً إذا لم يكن هناك توافق جيد بينها وبين البوليمر.

عملياً، ما حدث هو أن المنتج خرج صلباً شكلياً، لكن هشاً وظيفياً. وعند أول تحميل حقيقي، لم يكن هناك أي قدرة على امتصاص الإجهاد، فحدث الكسر مباشرة.

- السيناريوهات المحتملة

بمراجعة ظروف التشغيل وسجلات المواد، تم حصر الأسباب الواقعية التي قد تكون أدت إلى هذه النتيجة:

- استخدام خام بولي بروبيلين عالي السيولة لتسهيل الحقن في قالب كبير
- رفع نسبة الفيلر لتقليل تكلفة الطن دون تعديل التصميم
- إدخال مواد معاد تدويرها ضمن الخلطة دون ضبط خصائصها
- عدم وجود خلط كافٍ قبل التشغيل مما أدى إلى تفاوت محلي في التركيبة

عدم استخدام compatibilizer لتحسين ترابط الفيلر

- السبب المرجح

بناءً على ما تم فحصه فعلياً، فإن السبب الأقرب هو اعتماد تركيبة غير مناسبة للتطبيق: بولي بروبيلين عالي MFI مع نسبة filler مرتفعة. هذا القرار قد يكون اتخذ لتحسين التشغيل أو تقليل التكلفة، لكنه لم يُراجع مقابل متطلبات التحمل الفعلية للطبقة.

- حدود الاستنتاج

رغم وضوح المؤشرات، تم تسجيل أن هناك اختبارات إضافية كان من الممكن أن تعطي دقة أعلى:

اختبار شد واستطالة لتأكيد الهشاشة رقميًا

- DSC لمعرفة درجة التبلور
- SEM لتحليل سطح الكسر
- FTIR للتحقق من أي خلطات غير متوقعة

غياب هذه الاختبارات لا يغير الاتجاه العام للتشخيص، لكنه يحد من تفصيل مساهمة كل عامل.

- التوصيات

- بناءً على ما تم تطبيقه فعليًا بعد المشكلة:
- تغيير خام البولي بروبيلين إلى درجة ذات MFI منخفض (ضمن 2-5 g/10 min)
- تخفيض نسبة الفيلار إلى حد مقبول أو إعادة تصميم الطبلية لتحملها
- إدخال compatibilizer لتحسين الترابط الداخلي
- فرض فحص إلزامي لكل دفعة مواد (MFI + Density + Ash) قبل دخولها الإنتاج
- اعتماد خلط مسبق وبعدي للدفعات لضمان التجانس
- إعادة اختبار التحمل بعد التعديل للتأكد من استقرار الأداء

- الخلاصة

هذه الحالة لم تبدأ من المختبر، بل من شكوى ميدانية ثم تم تتبعها حتى الجذر. ثلاث اختبارات بسيطة كانت كافية لكشف أن المشكلة ليست في القالب ولا في التشغيل، بل في اختيار المادة نفسها. كما أشرنا في فصل الاختبارات، قراءة المادة قبل التشغيل ليست خطوة شكلية، بل هي التي تحدد مصير المنتج بالكامل. هنا، تجاهل هذه الخطوة أدى إلى منتج يبدو سليمًا عند الخروج من الماكينة، لكنه يفشل عند أول استخدام فعلي.

الحالة الثانية:

ضعف ميكانيكي غير متماثل في عبوة HDPE مصنعة بعملية النفخ

- وصف الظاهرة

خلال التشغيل الفعلي على أحد خطوط النفخ في المصنع، وأثناء الفحص الروتيني للإنتاج، تم ملاحظة شكوى متكررة من قسم الجودة تتعلق بعبوات سعة 30 لتر. العبوات كانت مقبولة شكلياً عند خروجها من القالب، ولا يظهر عليها أي عيب بصري واضح، لكن عند الفحص اليدوي داخل خط الإنتاج، كان المشغلون يلاحظون أن جهة معينة من العبوة “تنهار” بسهولة عند الضغط، بينما الجهة المقابلة تبدو طبيعية ومتماسكة.

تم تكرار الفحص على عدة قطع من دفعات مختلفة، وكانت النتيجة ثابتة: نفس الجهة من كل عبوة تظهر ضعفاً واضحاً. هذه النقطة كانت حاسمة، لأنها استبعدت منذ البداية أن يكون السبب عشوائياً أو مرتبطاً بدفعة مادة معينة.

- اختبارات المنتج النهائي

تم أخذ عينات مباشرة من خط الإنتاج، من نفس العبوات التي أظهرت المشكلة، وتم تمييز الجهة الضعيفة والجهة السليمة عليها قبل قصها. الهدف لم يكن فقط القياس، بل الربط بين الإحساس العملي ونتائج الاختبارات.

- الفحص اليدوي

الفحص اليدوي داخل الخط لم يكن مجرد ملاحظة عابرة، بل تم اعتماده كأداة فرز أولية. تم تدريب العامل على تحديد الجهة الأضعف، ثم تم تأكيد هذه الملاحظة على أكثر من عبوة. هذا الربط بين الإحساس اليدوي والسلوك المتكرر أعطى اتجاهاً واضحاً للتحليل.

- قراءة الاختبارات الأساسية

تم إجراء اختبارات MFI والكثافة على عينات مأخوذة من نفس العبوة، من الجهتين المختلفتين. النتائج كانت متطابقة تقريباً، ضمن حدود الخطأ المخبري.

هذا الاستنتاج كان مهمًا عمليًا: المادة نفسها ليست السبب. لا يوجد خلط خاطئ، ولا اختلاف في التركيبة بين الجهات. المشكلة إذاً تولدت داخل القالب أثناء التشكيل.

- التحليل البنيوي

بناءً على ذلك، تم التعامل مع الحالة كخلل في توزيع البنية داخل الجدار، وليس في نوع المادة. في عمليات النفخ، هذا يعني مباشرة ثلاثة محاور: توزيع السماكة، سلوك الـ parison، وظروف التبريد والنفخ.

- تحليل توزيع السماكة

تم قص العبوات من عدة مواقع حول المحيط، وتم قياس السماكة باستخدام ميكرومتر. النتائج كانت واضحة: الجهة التي تظهر ضعفًا تمتلك سماكة أقل بشكل ملحوظ مقارنة ببقية الجوانب.

الفارق لم يكن كبيرًا رقميًا، لكنه كان كافيًا ليؤثر على مقاومة الانبعاج عند الضغط. هذا أكد أن الإحساس اليدوي لم يكن خداعًا، بل انعكاسًا مباشرًا لفارق في البنية.

- تحليل الـ Parison

بمراقبة التشغيل، تبين أن الـ parison قبل إغلاق القالب لم يكن مستقرًا تمامًا، وكان هناك ميل خفيف باتجاه معين. هذا الميل، رغم أنه غير ملحوظ للمشغل غير الخبير، يؤدي إلى توزيع غير متساوٍ للمادة داخل القالب.

تمت ملاحظة أن هذا السلوك يتكرر بنفس الاتجاه، ما يفسر لماذا الضعف دائمًا في نفس الجهة من المنتج.

- تحليل التبريد

عند مراجعة القالب، تم الاشتباه بوجود اختلاف في كفاءة التبريد بين الجانبين. لم يكن هناك عطل واضح، لكن احتمال وجود انسداد جزئي أو فرق في تدفق الماء كان قائمًا.

في HDPE، هذا العامل مهم، لأن اختلاف معدل التبريد يغير درجة التبلور، وبالتالي الصلابة النهائية.

- تحليل توزيع الهواء

تمت مراجعة نظام الهواء داخل القالب، ولوحظ أن فتحات التنفيس في أحد الجوانب لم تكن بنفس الكفاءة. هذا يؤدي إلى تأخر في ملامسة المادة لجدار القالب، وبالتالي ترقق الجدار في تلك المنطقة.

- تفسير سلوك الفشل

السلوك الذي يظهر في هذه الحالة لا ينبغي تفسيره على أنه مجرد تفاوت بسيط في الإحساس أو الصلابة، بل كعلامة على أن المنتج يحتوي على عدم تجانس حقيقي في توزيع الإجهاد. الجهة الأضعف تتحمل تشوهاً أكبر تحت نفس الحمل، ما يجعلها نقطة بدء للفشل.

عملياً، المنتج ينجح بصرياً، لكنه يفشل وظيفياً، وهذه من أخطر الحالات في الإنتاج.

- السيناريوهات المحتملة

بناءً على ما تم رصده في الخط:

- انحراف بسيط في الـ parison يؤدي إلى توزيع غير متساوٍ
- تفاوت في التبريد بين جانبي القالب
- ضعف في كفاءة التنفيس في جهة محددة
- تراكم أكثر من عامل صغير يؤدي في النهاية إلى فرق واضح في الأداء

- حدود الاستنتاج

رغم قوة هذا التشخيص، لا يمكن توزيع وزن كل عامل بدقة نهائية دون استكمال ما يلي:

- mapping أكثر تفصيلاً لسماكة الجدار حول كامل المحيط
- thermal mapping للقالب أثناء التشغيل
- مراقبة مباشرة لسلوك الـ parison قبل إغلاق القالب
- مراجعة توزيع الهواء وفتحات التنفيس داخل القالب

غياب هذه الخطوات لا يضعف أصل التشخيص، لكنه يحد من القدرة على تحديد أي عنصر هو المسيطر بين عناصر العملية.

- التوصيات

- بناءً على ما تم فعلياً في الخط:
- تعديل إعدادات الرأس لضبط تماثل خروج الـ parison
- تقليل زمن التعليق قبل إغلاق قالب
- تنظيف ومراجعة فتحات التنفيس داخل القالب
- فحص نظام التبريد والتأكد من تساوي تدفق المياه
- اعتماد فحص سماكة دوري مرتبط بمحيط العبوة وليس نقطة واحدة فقط
- تدريب المشغلين على ربط الفحص اليدوي بنتائج القياس وليس الاعتماد عليه فقط

- الخلاصة

هذه الحالة توضح بوضوح أن المشكلة لم تكن في المادة، بل في كيفية تشكلها داخل القالب. الملاحظة الميدانية (الفحص اليدوي) كانت نقطة البداية، لكن تأكيدها جاء من القياسات. الربط بين سلوك الـ parison ، توزيع السماكة، والتبريد أظهر أن المنتج النهائي هو نتيجة مباشرة لتوازن دقيق داخل العملية. أي انحراف بسيط، إذا كان ثابتاً، سيتحول إلى عيب متكرر في المنتج.

- الحالة الثالثة:

- الفشل المبكر في اختبار الضغط الهيدروستاتيكي لأنابيب PPR

- وصف الظاهرة

خلال التشغيل الفعلي ومتابعة نتائج المختبر الداخلي، تم تسجيل فشل غير متوقع في اختبار الضغط الهيدروستاتيكي لدفعة من أنابيب PPR. الأنابيب كانت مصنعة وممررة بصرياً دون أي ملاحظات، كما أن أبعادها ضمن المواصفات.

عند إدخال العينات في اختبار الضغط، بدأ الانتباه عندما فشلت إحدى العينات عند حوالي 16 بار خلال أقل من ساعة (قراءة 45 دقيقة)، رغم أن هذا المستوى من الضغط يجب أن تتحمله الأنابيب لفترة أطول بكثير.

تم إيقاف الاختبار وإعادة التجربة على عينات أخرى من نفس الإنتاج، وكانت النتيجة مقاربة. تم بعدها سحب عينات من إنتاج سابق ناجح ومقارنتها تحت نفس ظروف الاختبار، فنجحت العينات القديمة بينما فشلت الحالية، ما أكد أن المشكلة مرتبطة بهذه الدفعة تحديداً.

- تحليل أولي للبيانات

تم الرجوع مباشرة إلى سجل التشغيل للخط، ولم يتم ملاحظة تغيير جذري في الإعدادات المعلنة (سرعة الخط، درجات الحرارة، السحب).

لكن بناءً على خبرة التشغيل، تم التركيز على عاملين: نوع المادة الفعلية المستخدمة، وسلوكها داخل الخط، وليس فقط القيم المسجلة.

تم أخذ عينات من نفس الأنابيب المفحوصة، وليس من الخام قبل التشغيل، لضمان أن التحليل يعكس الحالة الحقيقية.

- قراءة الاختبارات الأساسية

- تم إجراء اختبارات MFI والكثافة على العينات:
- MFI ظهر أعلى قليلاً من القيم التي اعتاد عليها الخط في الإنتاجات الناجحة
- الكثافة ضمن المجال الطبيعي، ما استبعد وجود filler أو خلط واضح
- الفحص البصري للمقطع العرضي لم يظهر عيوباً واضحة، لكن عند التدقيق لوحظ أن البنية ليست متجانسة تماماً عبر السماكة

هذه النتائج عملياً استبعدت مشاكل الخلط أو التلوث، لكنها أشارت إلى أن المادة عند حدها الأدنى من الأداء المطلوب.

- التحليل البنيوي

بربط النتائج مع سلوك الفشل، تم التعامل مع الحالة على أنها مشكلة في مقاومة الزحف (Creep) أكثر من كونها مشكلة قوة لحظية.

في أنابيب الضغط، المادة قد تنجح في اختبارات سريعة، لكنها تفشل تحت حمل مستمر إذا كانت السلاسل البوليمرية قصيرة أو إذا كانت البنية الداخلية غير مستقرة.

MFI الأعلى نسبياً يعني أن الوزن الجزيئي أقل، وهذا ينعكس مباشرة على قدرة الأنبوب على تحمل الضغط مع الزمن.

- القراءة الهندسية لهذه الحالة تقود إلى ثلاثة محاور رئيسية

● المحور الأول: خصائص المادة

المادة المستخدمة قريبة من الحد الأعلى للسيولة المقبولة، ما يعني أنها تعطي تشغيلًا أسهل، لكنها أقل مقاومة للزحف على المدى الزمني.

● المحور الثاني: بنية الجدار

تم الاشتباه بوجود اختلاف في التبلور أو في توزيع البنية عبر سماكة الجدار، حتى لو لم يكن واضحًا بصريًا.

● المحور الثالث: الإجهادات المتبقية

من خلال مراجعة التشغيل، تبين أن السحب كان أعلى قليلًا من المعتاد، وهذا قد يترك إجهادات داخلية لا تظهر إلا تحت الضغط.

- تحليل موقع ونمط الفشل

عند فحص العينات بعد الانفجار، لوحظ أن بداية الشق كانت من الجدار الداخلي للأنبوب، وهو أمر متوقع لأن هذا السطح يتعرض لأعلى إجهاد شد.

كما أن الشق لم يكن ناتجًا عن عيب موضعي (مثل فقاعة أو شوائب)، بل بدأ كنقطة دقيقة ثم امتد بسرعة. هذا النمط تم ملاحظته في أكثر من عينة، ما أكد أن المشكلة بنيوية وليست عيبًا عشوائيًا.

- تفسير سلوك الفشل

السلوك الذي تم رصده لا يشير إلى ضعف فوري في المادة، بل إلى فقدان تدريجي لقدرتها على مقاومة الحمل. الأنبوب في البداية يتحمل الضغط، ثم يبدأ تشكل شروخ دقيقة بسبب الإجهاد المستمر، ومع الوقت تتسارع هذه الشروخ حتى يحدث الانفجار.

هذا النوع من الفشل هو فشل زحف متسارع، وغالبًا ما يكون نتيجة تراكم عاملين: مادة بخصائص حدية، مع ظروف تشغيل تولد إجهادات داخلية.

- السيناريوهات المحتملة

من واقع مراجعة الخط:

- استخدام خام بدرجة MFI أعلى من المثالي لتسهيل البثق
- ارتفاع فعلي في حرارة المصهور أعلى مما هو مسجل
- سحب زائد أثناء الإنتاج أدى إلى اتجاهية في السلاسل
- تبريد غير متوازن عبر سماكة الجدار
- تذبذب في استقرار الخط أثناء التشغيل

- السبب المرجح

التحليل الميداني يقود إلى أن السبب ليس خطأ واحدًا واضحًا، بل تراكب بين مادة على الحد المقبول من حيث MFI ، مع ظروف تشغيل أدت إلى توليد إجهادات داخلية. هذا التراكب هو ما خفّض زمن التحمل بشكل حاد.

- حدود الاستنتاج

رغم وضوح الاتجاه، تم تسجيل أن تأكيد التفاصيل يحتاج إلى:

- اختبار creep rupture لفترات أطول
- تحليل DSC لمقارنة التبلور
- فحص مجهري لمقطع الجدار
- قياس توزيع السماكة بشكل دقيق

عدم توفر هذه النتائج لا يغير التشخيص العام، لكنه يحد من تحديد وزن كل عامل.

- التوصيات

بناءً على ما تم تطبيقه فعليًا:

- خفض MFI للمادة المستخدمة والالتزام بدرجات مخصصة للضغط
- مراجعة درجات الحرارة الفعلية وليس المسجلة فقط

- تقليل السحب للحفاظ على بنية متوازنة
- تحسين التبريد لضمان تجانس الجدار
- إعادة اختبار الإنتاج بعد التعديلات قبل اعتماده
- ربط نتائج MFI والتشغيل مباشرة بقرار السماح بالإنتاج

- الخلاصة

هذه الحالة بدأت من نتيجة مخبرية غير متوقعة، وتم تتبعها حتى وصلت إلى توازن دقيق بين المادة وظروف التشغيل. الأنبوب لم يفشل لأنه “سيء”، بل لأنه يعمل عند حدوده، ومع أي انحراف بسيط في التشغيل يظهر الفشل مباشرة. كما أشرنا في فصل الاختبارات، اختبارات الضغط طويلة الأمد ليست إجراء روتينيًا، بل هي المؤشر الحقيقي على جودة المنتج في التطبيقات الحرجة.

- الحالة الرابعة: الانتفاخات الداخلية وانفصال الطبقات في خزان مياه مصنع بالقولبة الدورانية متعددة

الطبقات

وصف الظاهرة

خلال التشغيل الفعلي لخط القولبة الدورانية، وبعد توريد دفعة من خزانات المياه متعددة الطبقات إلى الموقع، وردت ملاحظات من فريق التركيب بوجود تشوهات غير طبيعية في بعض الخزانات بعد فترة قصيرة من الاستخدام. عند إعادة الفحص داخل المصنع، لم تظهر عيوب واضحة على السطح الخارجي للخزان، لكن عند الضغط اليدوي على بعض المناطق، لوحظ وجود “ليونة موضعية” غير طبيعية.

تم قطع إحدى العينات للتحقق، وهنا ظهرت المشكلة بوضوح: وجود انتفاخات داخلية (blisters) داخل الجدار، وفي بعض المواقع كان هناك انفصال جزئي بين الطبقات.

تم بعدها سحب عينات من نفس التشغيل ومن تشغيلات قريبة، وتكرر ظهور نفس العيب، ما أكد أن المشكلة مرتبطة بظروف الإنتاج وليست حالة فردية.

- تحليل أولي للبيانات

تم الرجوع إلى سجل التشغيل لنفس الدفعة، ومراجعة المواد المستخدمة لكل طبقة، بالإضافة إلى زمن الدورة ودرجات الحرارة. لم يظهر اختلاف كبير في الإعدادات المسجلة مقارنة بإنتاجات سابقة ناجحة، لكن بناءً

على طبيعة العيب، تم التركيز على ثلاثة عناصر مباشرة: حالة المادة قبل التشغيل، سلوكها أثناء التسخين، وطريقة بناء الطبقات داخل القلب.

تم أخذ عينات من البودرة المستخدمة من نفس التشغيل، وليس من المخزون العام، لضمان دقة التقييم.

- اختبارات المنتج النهائي

تم التعامل مع الحالة ميدانيًا من خلال:

- قطع مقاطع عرضية من مناطق سليمة وأخرى متضررة
- فحص بصري داخلي للجدار
- اختبار يدوي لمحاولة فصل الطبقات
- مقارنة بين مناطق تحتوي على انتفاخات وأخرى سليمة

في المناطق المتضررة، كان من الممكن ملاحظة الفراغات الداخلية بوضوح، وفي بعض الحالات كان الانفصال بين الطبقات يحدث بسهولة نسبيًا عند محاولة الشد اليدوي.

- قراءة الفحوص الأساسية

الفحص لم يُظهر وجود شوائب صلبة أو تلوث واضح، ما استبعد وجود مواد غريبة.

لكن من خلال المقطع، لوحظ أن البنية ليست كثيفة بشكل متجانس، بل تحتوي على مناطق أقل تماسكًا.

كما أن واجهة الطبقات لم تكن متداخلة بالشكل الطبيعي، بل بدت وكأن كل طبقة “مستقلة جزئيًا” عن الأخرى في بعض المواقع.

- التحليل البنيوي

بربط هذه الملاحظات، أصبح واضحًا أن المشكلة ليست في المادة كتركيب كيميائي، بل في كيفية تليدها (sintering) والتحامها أثناء الدورة الحرارية.

في القوالب الدورانية، نجاح المنتج يعتمد على تحول البودرة إلى جدار متصل عبر مرحلتين:

- الأولى: اندماج الجزيئات داخل كل طبقة
- الثانية: التحام الطبقات مع بعضها أثناء التتابع الحراري

أي خلل في إحدى هاتين المرحلتين يؤدي مباشرة إلى بنية ضعيفة، حتى لو بدا الشكل الخارجي سليمًا.

- تحليل الانتفاخات الداخلية

الانتفاخات التي تم رصدها لم تكن سطحية، بل داخلية، وهذا مؤشر مباشر على وجود غازات أو هواء محبوس أثناء التشكيل.

في الواقع العملي، هذا يحدث غالبًا بسبب:

- رطوبة داخل البودرة تتحول إلى بخار أثناء التسخين
- أو هواء لم يتم طرده بشكل كافٍ أثناء التلييد

هذه الغازات، عندما لا تجد مسار خروج، تتجمع في نقاط موضعية وتكوّن فراغات أو blisters داخل الجدار .

- تحليل انفصال الطبقات

في المناطق التي ظهرت فيها delamination ، لوحظ أن الطبقات لم تلتحم بشكل حقيقي، بل كانت متماسكة شكليًا فقط.

هذا النوع من السلوك يشير إلى أن الطبقة الثانية (أو الثالثة) تم ترسيبها على طبقة لم تصل بعد إلى الحالة الحرارية المناسبة لحدوث fusion فعلي.

بمعنى آخر، التوقيت أو درجة الحرارة لم تسمح بتكوين واجهة مترابطة بين الطبقات.

- تحليل شكل الفشل

المهم في هذه الحالة أن الانتفاخات والانفصال لم يظهرهما كعيبين منفصلين، بل غالبًا في نفس المناطق أو بشكل مترابط.

في البداية تظهر الانتفاخات كعييب داخلي، ومع الاستخدام أو التعرض للإجهاد الحراري، تبدأ هذه المناطق في التوسع، ثم يتبعها انفصال بين الطبقات.

- تفسير سلوك الفشل

الانتفاخات الداخلية والانفصال بين الطبقات ليسا عييبين منفصلين تمامًا، بل يمكن فهمهما ضمن صورة واحدة: الجدار لم يكتمل بناؤه الداخلي بالشكل الصحيح.

ما حدث فعليًا هو أن الجدار خرج من القالب وهو يحتوي على فراغات داخلية وضعف في الواجهات البينية. هذه البنية قد تبدو مستقرة في البداية، لكنها غير قادرة على تحمل الإجهادات.

عند التعرض للحرارة أو الضغط أو حتى التمدد الطبيعي أثناء الاستخدام، تبدأ هذه المناطق الضعيفة في الانكشاف، فتظهر delamination أو تتوسع الفراغات.

بالتالي، الفشل هنا ليس حدثًا مفاجئًا، بل نتيجة مباشرة لبنية لم تكتمل منذ مرحلة التصنيع.

- السيناريوهات المحتملة

من خلال ما تم رصده في الخط:

- وجود رطوبة فعلية في البودرة المستخدمة
- تلييد غير مكتمل أدى إلى بقاء هواء محبوس
- ضعف في كفاءة venting داخل القالب
- عدم ضبط تسلسل الطبقات من حيث التوقيت أو الحرارة
- اختلاف في سلوك المواد بين الطبقات
- تراكم أكثر من عامل في نفس الوقت، وهو ما يتطابق مع ما تم ملاحظته فعليًا

- السبب المرجح

بناءً على الفحص الميداني والربط بين شكل العيب وسلوك التشغيل، فإن السبب الأقرب هو تراكم عاملين:

وجود غازات أو فراغات محبوسة داخل الجدار، نتيجة رطوبة أو هواء لم يتم تفريغها، مع ضعف في الالتحام بين الطبقات بسبب عدم تحقق شروط fusion المناسبة أثناء بناء الجدار.

هذا التراكب يفسر لماذا ظهرت الانتفاخات أولاً، ثم تطور الأمر إلى انفصال طبقي أثناء الخدمة.

- حدود الاستنتاج

رغم قوة التشخيص، تم تسجيل الحاجة إلى تأكيدات إضافية:

- قياس فعلي لمحتوى الرطوبة في البودرة
- اختبار peel لقوة الترابط بين الطبقات
- مقارنة قبل وبعد تجفيف المادة
- فحص أدق لواجهة الطبقات تحت التكبير
- تقييم كفاءة venting أثناء التشغيل

عدم توفر هذه البيانات لا يلغي التشخيص، لكنه يحد من تحديد وزن كل عامل بدقة.

- التوصيات

بناءً على ما تم تطبيقه ومراجعته في الخط:

- قياس رطوبة المواد قبل التشغيل وعدم الاعتماد على التخزين فقط
- تجفيف البودرة وإعادة التشغيل للمقارنة
- مراجعة وتنظيف نظام venting في القالب
- ضبط توقيت إضافة الطبقات بحيث تتم ضمن نافذة حرارية مناسبة
- اختبار قوة الترابط بين الطبقات بشكل دوري
- فحص المقاطع العرضية بشكل روتيني وربطها بجودة التشغيل
- مراجعة توافق المواد بين الطبقات إذا كانت مختلفة

- الخلاصة

هذه الحالة بدأت من ملاحظة ميدانية بعد الاستخدام، وتم تتبعها حتى داخل بنية الجدار. الخزان لم يفشل لأنه “ضعيف ظاهرياً”، بل لأنه لم يُبَيَّن داخلياً بشكل متكامل.

الانتفاخات كانت أول إشارة لوجود فراغات داخلية، وانفصال الطبقات كشف أن الترابط لم يكن كافياً منذ البداية.

كما أشرنا في فصل الاختبارات، جودة المنتج في القوالب الدورانية لا تُقاس بالشكل الخارجي، بل بمدى اكتمال التلبيد والالتحام داخل الجدار. وأي خلل في هذه المراحل ينتج منتجاً يبدو سليماً عند الخروج من القالب، لكنه يفشل لاحقاً أثناء الخدمة.

- الحالة الخامسة:

- عدم استقرار تشتيت الصبغة في الأنظمة البوليمرية الملونة

- وصف الظاهرة

خلال التشغيل الفعلي على خط إنتاج الفيلم، بدأ فريق الجودة يلاحظ عيباً غير معتاد في بعض الرولات الخارجية. في البداية، كان العيب يظهر على شكل نقاط داكنة صغيرة موزعة داخل الفيلم، تظهر بوضوح عند تمرير الفيلم تحت الإضاءة أو عند شده.

تم إيقاف الخط مؤقتاً وفحص المادة، لكن اللون العام كان يبدو مقبولاً من بعيد، ما جعل بعض المشغلين يظنون أن المشكلة بسيطة.

بعد عدة أيام، ظهرت ملاحظة أخرى من المخزون: بعض الرولات التي كانت مقبولة وقت الإنتاج، تغير مظهرها بعد التخزين، حيث أصبح اللون أقل تجانساً، وظهرت طبقة خفيفة على السطح مع اختلاف في اللمعان.

هنا أصبح واضحاً أننا أمام مشكلتين ظهرتنا في نفس المنتج: عيب فوري أثناء الإنتاج، وعيب يتطور مع الوقت.

- تحليل أولي للبيانات

تم التعامل مع الحالتين بشكل منفصل في البداية، لأن التسرع بربطهما مباشرة قد يقود لتشخيص خاطئ.

الملاحظات الميدانية كانت كالتالي:

- النقاط الداكنة تظهر فوراً أثناء الإنتاج
- نفس العيب يتكرر في نفس التشغيل وليس بشكل عشوائي
- بعد التخزين، تظهر مشكلة مختلفة: تغير في اللمعان وسلوك سطحي
- العيب الثاني لم يكن موجوداً لحظة خروج المنتج

هذا الفرق الزمني كان مهماً، لأنه دللنا أن المشكلة ليست واحدة فقط، بل هناك خلل أثناء التشييت، وخلال آخر في الاستقرار بعد التشكيل.

- اختبارات المنتج النهائي

تم البدء من المنتج نفسه، وليس من الخام:

- فحص بصري مباشر تحت إضاءة قوية
- شد الفيلم في اتجاهات مختلفة لإظهار أي تكتلات
- مقارنة نفس الرول مباشرة بعد الإنتاج وبعد التخزين
- فحص سطحي ولمسي لملاحظة أي طبقة أو تغير في الملمس

النتيجة كانت واضحة عملياً:

- في البداية: نقاط أو تكتلات موضعية داكنة
- لاحقاً: تغير سطحي عام، وليس نقاط محددة
- هذا الفرق في شكل العيب كان مفتاح التشخيص.

- قراءة الفحوص الأساسية

تم فحص الخام الأساسية (البوليمر) ولم يظهر أي خلل واضح في MFI أو الكثافة.

وهنا كان الخطأ الشائع الذي تم تجنبه: عدم التوقف عند “الخامة سليمة إذًا المشكلة ليست منها.”

لأن التجربة أثبتت أن النظام اللوني بالكامل هو الذي يجب تقييمه، وليس البوليمر فقط.

تم التركيز على:

- نوع الماسترباتش المستخدم
- نسبة الإضافة
- توافق الحامل (carrier) مع البوليمر
- سلوك المواد المساعدة داخل النظام

- التحليل البنيوي

بربط شكل العيب مع توقيت ظهوره، تم الوصول إلى تفسير عملي:

- العيب الأول (النقاط الداكنة) ناتج عن تكتلات صبغية لم يتم تفكيكها
- العيب الثاني (التغير السطحي) ناتج عن حركة مكونات داخل النظام نحو السطح

بمعنى آخر، لدينا مشكلتان:

- فشل في التشيت داخل الخط
- فشل في الاستقرار بعد التشكيل

- تحليل العيب الأول: تكتلات الصبغة

تمت مراجعة التشغيل، ولم يكن هناك تغيير كبير في إعدادات الخط.

لكن عند مقارنة نفس الماسترباتش المستخدم مع مورد آخر، ظهرت فروقات واضحة في جودة التشيت.

كما تم ملاحظة:

- أن القص داخل الماكينة لم يكن كافياً لتفكيك التكتلات
- وأن اللزوجة العامة للنظام كانت مرتفعة نسبياً، ما قلل من فعالية التشيت
- بالتالي، التكتلات لم تكن بسبب عامل واحد، بل نتيجة:
- pre-dispersion غير كافٍ في الماسترباتش

shear غير كافٍ داخل الخط

- تحليل العيب الثاني: الهجرة أو Blooming

المشكلة الثانية لم تظهر إلا بعد التخزين، وهذا غير اتجاه التحليل.

تم ملاحظة أن الطبقة السطحية التي ظهرت خفيفة وغير لزجة، لكنها أثرت على اللمعان.

هذا السلوك لا يرتبط عادة بالصبغة نفسها، بل بمكونات مصاحبة مثل:

waxes

dispersants

مواد منخفضة الوزن الجزيئي

تم الاشتباه أن أحد هذه المكونات يتحرك نحو السطح مع الزمن، خاصة مع تغير درجة الحرارة أثناء التخزين.

- تحليل شكل العيب

- التكتلات: نقاط داكنة محددة → عيب موضعي → مشكلة تشتت
- التغير السطحي: انتشار عام → بدون حدود واضحة → مشكلة استقرار

هذا التفريق لم يكن نظرياً، بل تم تأكيده من خلال مقارنة نفس العينة في مرحلتين زمنيتين.

- تفسير سلوك الفشل

ما حدث فعلياً هو أن النظام اللوني لم يحقق شرطين أساسيين:

- لم يتشتت بالكامل أثناء التشغيل
- ولم يبقَ مستقرًا بعد التشكيل

بالتالي، المنتج خرج من الخط مقبولا ظاهرياً، لكنه يحمل داخله خللاً يظهر بطريقتين مختلفتين حسب الزمن.

- السيناريوهات المحتملة

من واقع التشغيل والمقارنة الفعلية:

- جودة ماسترباتش غير كافية من حيث pre-dispersion
- shear غير كافٍ داخل الخط
- carrier غير متوافق تمامًا مع البوليمر
- تحميل لوني قريب من الحد الأعلى
- وجود مكونات منخفضة الوزن الجزيئي مسؤولة عن الهجرة
- تراكب أكثر من عامل، وهو ما تطابق مع الحالة فعليًا

- السبب المرجح

بناءً على الاختبارات والمقارنة العملية، فإن السبب الأقرب هو عدم توازن في تصميم النظام اللوني نفسه:

- جزء منه لا ينتشت بشكل كامل
 - وجزء منه غير مستقر داخل المصفوفة
- أي أن المشكلة ليست “صبغة سيئة” فقط، بل نظام كامل غير متوازن.

- حدود الاستنتاج

رغم وضوح الاتجاه، تم تسجيل الحاجة إلى:

- فحص مجهري أدق لمستوى التشتيت
- اختبارات aging لمراقبة تطور السطح
- مقارنة مع ماسترباتش مختلف
- تقييم extractables أو الهجرة
- لكن حتى بدون هذه الاختبارات، كان الاتجاه العام واضحًا من السلوك الفعلي.

- التوصيات

بناءً على ما تم تطبيقه في الخط:

- تغيير الماسترباتش إلى نوع ذو pre-dispersion أفضل
- تقليل نسبة التحميل اللوني ومراقبة الأثر

- تعديل ظروف التشغيل لزيادة shear
- مراجعة توافق carrier مع البوليمر
- تقليل أو تعديل المواد المساعدة منخفضة الوزن الجزيئي
- إجراء اختبار تخزين قبل اعتماد أي دفعة

- الخلاصة

هذه الحالة بدأت من ملاحظة بسيطة في المنتج، لكنها كشفت خللاً مركباً داخل النظام اللوني.

اللون كان يبدو صحيحاً عند النظر السريع، لكنه لم يكن متجانساً ولا مستقرًا.

وكما أشرنا في فصل الاختبارات، تقييم اللون لا يجب أن يكون بصرياً فقط، بل يجب أن يشمل سلوك التشتيت والاستقرار معاً. لأن أي خلل في أحدهما قد لا يظهر فوراً، لكنه سيظهر حتماً إما أثناء التشغيل أو بعد وصول المنتج للعميل.

- الحالة السادسة

- ظهور تموجات لونية ممتدة في فيلم LDPE

- وصف الظاهرة

في أحد خطوط نفخ الفيلم باستخدام مادة البولي إيثيلين منخفض الكثافة، ومع استخدام ماستر باتش لوني، يظهر الفيلم المنتج بشكل غير متجانس بصرياً، حيث تُلاحظ تموجات لونية ممتدة تشبه الأمواج على كامل محيط الفقاعة.

هذه التموجات لا تظهر كنقاط منفصلة أو عيوب موضعية محددة، بل على هيئة مناطق ممتدة ذات اختلاف طفيف في كثافة اللون مقارنة بالمناطق المجاورة، بحيث يبدو اللون وكأنه يتغير تدريجياً على شكل خطوط متموجة. وتكون هذه الظاهرة أكثر وضوحاً عند النظر إلى الفيلم مقابل مصدر ضوء، أو عند فردة على سطح مستو ومقارنة مناطق اللون عبر العرض والمحيط.

المشكلة تظهر بشكل مستمر أثناء التشغيل، ولا تختفي مع ثبات ظروف العملية، كما لوحظ أن تغيير نوع الماستر باتش المستخدم أدى إلى اختفاء الظاهرة بشكل شبه كامل. وهذه الملاحظة الأخيرة ذات قيمة تشخيصية عالية، لأنها لا تثبت السبب وحدها، لكنها تنقل مركز الشبهة من المادة الأساسية أو من العيوب الميكانيكية العامة في الخط إلى النظام اللوني نفسه أو إلى تفاعله مع ظروف التشغيل.

- تحليل أولي للبيانات

يمكن تلخيص المعطيات الأساسية في هذه الحالة كما يلي:

المادة الأساسية LDPE :

- وجود إضافة لونية: نعم
- شكل العيب: تموجات لونية ممتدة
- توزيع العيب: على كامل محيط الفقاعة
- ثبات العيب: مستمر أثناء التشغيل
- نتيجة المقارنة العملية: اختفاء الظاهرة عند تغيير الماسترباتش

هذه الصورة لا تنتمي إلى فئة العيوب الموضعية من نوع contamination أو gel أو black specks ، لأن العيب هنا ليس نقطيًا ولا عشوائيًا ولا يرتبط بموضع ثابت صغير، بل يظهر كنمط ممتد مع اتجاه الجريان. كما أنها لا تنتمي مباشرة إلى عيوب التمزق أو ضعف السمك أو flutter الميكانيكي الصرف، لأن العرض الأساسي للظاهرة هو اضطراب بصري في توزيع اللون، لا انهيار في الفقاعة أو تمزق ميكانيكي في المنتج.

ومن هنا فإن القراءة الأولية الصحيحة هي أن هذه الحالة تمثل عدم تجانس بصري ناتجًا عن سلوك غير ثابت للنظام اللوني داخل المصهور أثناء التشكيل، لا مجرد اختلاف بسيط في shade أو خطأ في جرعة الإضافة.

- اختبارات المنتج النهائي

بما أن الظاهرة تظهر في الفيلم النهائي نفسه، فقد كان من الضروري أن يبدأ التشخيص من المنتج، لا من الخام فقط. وفي هذه الحالة يتم التعامل مع الفيلم بوصفه السجل النهائي لسلوك النظام داخل الفقاعة، ولذلك كان لا بد من فحصه بصريًا ووظيفيًا بالصورة التي تكشف طبيعة العيب بدقة.

وشملت القراءة الفعلية للمنتج النهائي العناصر التالية:

- فحص بصري مباشر للفيلم تحت إضاءة نافذة أو أمام مصدر ضوء
- فرد الفيلم على سطح مستوٍ لمراقبة انتظام اللون عبر المساحات المختلفة
- مقارنة شكل التموجات حول المحيط لمعرفة ما إذا كانت موضعية أم ممتدة

- التحقق مما إذا كانت الظاهرة تظهر كنقاط أو بقع أم كنمط موجي مستمر
- مقارنة الفيلم المنتج باستخدام الماسترباتش الأول بالفيلم المنتج بعد استبداله بـ ماستر باتش آخر

وقد أظهرت هذه المقارنة أن العيب لا يأخذ شكل تكتلات صبغية واضحة أو نقاط كثيفة اللون، بل يظهر كنمط ممتد ومتكرر على شكل تموجات لونية، وأن هذا النمط اختفى بصورة كبيرة عند استخدام ماستر باتش مختلف. وهذه النتيجة بالذات مهمة جدًا، لأنها لا تقول فقط إن “اللون تغير”، بل تقول إن سلوك النظام اللوني داخل التدفق تغير. فالمنتج النهائي هنا لا يكشف فقط عن خلل بصري، بل يكشف عن أن الماستر باتش السابق لم يكن يتصرف داخل المصهور بالطريقة نفسها التي تصرف بها البديل.

- قراءة الفحوص الأساسية

في هذه الحالة، لا تكون اختبارات المادة الأساسية مثل MFI أو الكثافة هي نقطة البداية الأكثر قيمة، لأن المادة الأساسية ليست موضع الشك المباشر، ولأن الظاهرة لم تظهر بوصفها انهيارًا عامًا في الفيلم أو تفاوتًا ميكانيكيًا واضحًا أو تدهورًا حراريًا عامًا في الخام الأساسي.

لكن يجب الانتباه إلى أمر جوهري: النظام المستخدم هنا لا يتكون من البوليمر الأساسي وحده، بل من:

- LDPE
- الماستر باتش اللوني
- الحامل البوليمري للماستر باتش
- الصبغة نفسها
- الشموع أو المساعدات أو dispersing aids أو أي إضافات مرافقة داخل نظام اللون

وعليه، فإن قراءة الفحوص الأساسية لا ينبغي أن تقتصر على سؤال: هل خامة LDPE سليمة؟ بل يجب أن تنتقل إلى سؤال أكثر دقة: هل النظام المركب من LDPE + masterbatch يتصرف كمصهور متجانس ومستقر أثناء الجريان أم لا؟

ومن هنا تصبح المقارنة العملية بين نوعي الماستر باتش بمثابة “اختبار أساسي” مهم في هذه الحالة، لأن اختفاء العيب عند تغيير النظام اللوني يعني أن العامل المؤثر موجود ضمن هذا النظام، سواء في الحامل، أو في درجة التشبث، أو في استجابة النظام للقص، أو في توافقه مع المادة الأساسية.

- التحليل البنيوي

التموجات اللونية الممتدة تشير إلى أن توزيع الصبغة داخل المصهور لم يكن ثابتاً أثناء الجريان، بل شهد تغيرات موضوعية مستمرة. وهذا لا يعني بالضرورة وجود agglomerates كبيرة بالمعنى التقليدي، بل قد يكون نتيجة واحد أو أكثر من العوامل التالية:

- اختلاف موضعي في تركيز الصبغة داخل تيار المصهور
- تفاوت في امتزاج الحامل مع LDPE
- اختلاف في لزوجة بعض مناطق النظام عن غيرها
- تغير في البنية الميكروية للفيلم يؤثر على تفاعل الضوء مع السطح أو مع bulk الفيلم

في أفلام البولي إيثيلين، تؤثر البنية المورفولوجية بشكل مباشر على المظهر البصري. لذلك فإن أي تفاوت في هذه البنية، حتى لو كان ناتجاً عن تغير موضعي في سلوك الماسترباتش أثناء الجريان، قد ينعكس على شكل تموجات لونية. وبعبارة أخرى، قد لا تكون المشكلة في “كمية الصبغة” فقط، بل في كيفية وجودها داخل المصهور أثناء التشكيل.

- وهنا يجب التمييز بين حالتين كثيراً ما تختلطان:

الحالة الأولى pigment agglomeration: التقليدي، حيث تظهر الصبغة على شكل نقاط أو clusters موضوعية

الحالة الثانية: تفاوت ديناميكي في توزيع الصبغة أو في تأثيرها البصري أثناء الجريان، وهو ما يولد نمطاً ممتداً متصلًا كالذي نراه هنا

والعيب في هذه الحالة أقرب بوضوح إلى الحالة الثانية .

- تحليل سلوك المصهور

من أهم محاور هذه الحالة هو سلوك النظام أثناء الجريان داخل الإكسترودر وخروج المصهور من القالب.

إذا كان هناك تفاوت في سلوك مكونات النظام، فقد يحدث:

- تغير موضعي في توزيع الصبغة أثناء التدفق
- اختلاف في سرعة تحرك بعض المكونات مقارنة بغيرها
- تذبذب في بنية الفيلم الناتجة بسبب عدم ثبات حالة الامتزاج

وهذا النوع من التغير لا يظهر عادة على شكل عيب نقطي ثابت، بل على شكل نمط ممتد مع اتجاه الجريان، وهو ما يتوافق تمامًا مع شكل التموجات المرصودة.

وفي هذه الحالة تحديداً، فإن ثبات العملية العامة مع استمرار العيب ثم اختفائه عند تغيير الماسترباتش، يرجح أن النظام السابق كان يعاني من سلوك ريولوجي أو امتزاجي غير مستقر داخل المصهور، بحيث لم يكن اللون يتوزع بالطريقة نفسها في كل المناطق أثناء مرور المصهور عبر القالب وتحوله إلى فيلم.

وهذا يفسر لماذا يبدو العيب كأنه “يتكرر مع التيار” لا كأنه عيب متوقف في نقطة واحدة .

- تحليل التوافق بين المكونات

التوافق بين الماسترباتش والمادة الأساسية عامل حاسم في هذه الحالة. فإذا كان الحامل البوليمري في الماسترباتش مختلفاً في سلوكه عن LDPE ، أو لا ينسجم معه بالدرجة الكافية، فقد يؤدي ذلك إلى:

- تفاوت في الامتزاج
- اختلاف في اللزوجة الموضعية
- تغير في سلوك الجريان
- عدم ثبات في وضع الصبغة داخل التيار

وهذا قد ينعكس على شكل توزيع غير ثابت للون أثناء المعالجة.

فالمشكلة هنا ليست بالضرورة أن الحامل “خاطئ” تماماً، بل قد يكون أقل توافقاً أو أقل استقراراً تحت ظروف التشغيل الفعلية من الحامل الموجود في الماسترباتش البديل. ولذلك فإن استبدال الماسترباتش واختفاء الظاهرة لا يعني فقط أن “الصبغة الجديدة أفضل”، بل قد يعني أن الحامل الجديد يذوب أو يمتزج أو يتدفق مع LDPE بصورة أكثر تجانساً .

- تحليل استجابة النظام للقص

في بعض الأنظمة، تكون استجابة المكونات للقص غير متجانسة، بحيث:

- تتغير درجة توزيع الصبغة مع تغير ظروف الجريان
- أو يظهر سلوك مختلف في مناطق مختلفة من القالب
- أو يصبح النظام حساساً لفروق shear history عبر المقطع أو عبر محيط الفقاعة

إذا كان النظام حساساً لهذه التغيرات، فإن ذلك قد يؤدي إلى نمط لوني غير ثابت يظهر على شكل تموجات ممتدة.

وهنا تكمن نقطة مهمة: ليس شرطاً أن يكون هناك shear شديد أو غير طبيعي كي تظهر المشكلة، بل يكفي أن يكون النظام نفسه غير مستقر تحت shear التشغيل المعتاد. وهذا ما يجعل بعض الماسترباتشات تعمل جيداً في خط معين، بينما تُظهر عيوباً بصرية في خط آخر، أو حتى في الخط نفسه عند شرط تشغيلي مختلف.

في هذه الحالة، فإن اختفاء العيب مع تغيير الماسترباتش يرجح أن استجابة النظام الأول للقص كانت جزءاً من المشكلة، سواء بسبب ضعف التشتيت، أو ضعف التوافق، أو اختلاف اللزوجة، أو اجتماع ذلك كله.

- تحليل شكل العيب

التموجات في هذه الحالة تتميز بأنها:

- ممتدة ومتواصلة
- غير حادة الحواف
- موزعة على كامل المحيط
- مرتبطة باتجاه الجريان

وهذا يميزها بوضوح عن:

- التكتلات الصبغية التقليدية، التي تظهر كنقاط أو clusters واضحة
- التلوث، الذي يكون عادة عشوائياً وغير منتظم
- تفاوت السماكة الصرف، الذي يظهر بصرياً بطريقة مختلفة، وغالباً يترافق مع فرق أوضح في الشفافية أو المظهر الهندسي للفيلم

ومن هنا، فإن شكل العيب نفسه يدعم بقوة فرضية أنه مرتبط بسلوك ديناميكي أثناء المعالجة، وليس بعيب ساكن داخل المادة. وهذه نقطة أساسية، لأنها تمنع تشخيص الحالة خطأً على أنها مجرد dispersion defect من النوع النقطي، بينما هي في الواقع أقرب إلى flow-related color instability.

- تفسير سلوك الظاهرة

هذه الحالة تمثل خللاً في استقرار توزيع اللون أثناء عملية التشكيل، وليس مجرد اختلاف في كمية الصبغة.

بمعنى أن المشكلة ليست بالضرورة في “كمية اللون”، بل في “كيفية بقائه موزعاً” داخل النظام أثناء التدفق والتصلب. فإذا كان هذا التوزيع يتغير موضعياً وبصورة مستمرة، فإن الفيلم الناتج سيظهر بنمط لوني غير متجانس، حتى لو كانت التركيبة، في المتوسط، تحتوي على النسبة الصحيحة من الإضافة.

وهذا يفسر نقطة مهمة جداً:

العيب هنا لا يعكس بالضرورة أن المنتج “أعمق” أو “أفتح” عمومًا، بل يعكس أن اللون غير ثابت مكانياً أثناء التشكيل، ولذلك يظهر كتموجات ممتدة.

- السيناريوهات المحتملة

● السيناريو الأول: تفاوت في التوافق بين الماسترباتش والمادة الأساسية

يؤدي إلى اختلاف في الامتزاج وسلوك الجريان.

● السيناريو الثاني: اختلاف في اللزوجة بين مكونات النظام

يسبب توزيعاً غير متجانس أثناء التدفق.

● السيناريو الثالث: حساسية النظام لظروف القص

يؤدي إلى تغير في توزيع اللون مع تغيرات طفيفة في التشغيل أو في تاريخ الجريان.

● السيناريو الرابع: ضعف في نظام التشبث داخل الماسترباتش

يؤدي إلى توزيع غير مستقر للصبغة أثناء التشكيل، حتى لو لم يظهر على شكل agglomerates صريحة.

● السيناريو الخامس: وجود مكونات إضافية تؤثر على السلوك السطحي أو البصري

مثل الشموع أو المساعدات، مما يغير طريقة تفاعل الضوء مع السطح أو مع البنية الدقيقة للفيلم.

السيناريو السادس: تراكم عدة عوامل

وهو الاحتمال الأكثر شيوعاً، حيث تتفاعل عدة عوامل صغيرة لتنتج الظاهرة بشكل واضح ومتكرر .

- السبب المرجح

بناءً على المعطيات، فإن السبب المرجح هو وجود عدم استقرار في توزيع الصبغة داخل المصهور أثناء الجريان، نتيجة تفاعل بين خصائص الماسترباتش والمادة الأساسية وظروف التشغيل، مما أدى إلى ظهور نمط لوني متموج في الفيلم.

وهذا السبب المرجح لا يحمل pigment وحده المسؤولية، بل يضع المسؤولية على استقرار النظام اللوني ككل داخل بيئة الجريان الفعلية. واختفاء العيب عند تغيير الماسترباتش يدعم هذا التفسير بقوة، لأنه يثبت أن التغيير الفعال لم يكن في المادة الأساسية ولا في الخط ذاته، بل في النظام اللوني الذي كان يرافقها .

- حدود الاستنتاج

لا يمكن تحديد العامل المسيطر بشكل قاطع دون توفر بيانات إضافية مثل:

- توصيف دقيق لمكونات الماسترباتش
- مقارنة لزوجة النظام قبل وبعد الإضافة
- تحليل مستوى التشبث
- دراسة تأثير تغير ظروف التشغيل على الظاهرة

مقارنة أكثر من carrier system على المادة نفسها

وبدون هذه الفحوص، يبقى التحليل قوياً ومقنعاً، لكنه يظل في إطار السبب المرجح لا السبب المثبت نهائياً .

- التوصيات

- استخدام ماسترباتش بحامل متوافق مع المادة الأساسية .
- مقارنة أداء أكثر من مورد تحت نفس ظروف التشغيل .
- تقليل نسبة التحميل اللوني مؤقتاً لمراقبة أثر ذلك على شكل التموجات .
- تعديل ظروف التشغيل ومراقبة استجابة الظاهرة، خصوصاً ما يتعلق بدرجات الحرارة وظروف القص .

- التأكد من جودة التشتيت داخل الماسترباتش نفسه، وعدم الاكتفاء بدرجة اللون الظاهرية .
- تقييم استقرار اللون على المدى الزمني وليس فقط أثناء الإنتاج، لأن بعض الأنظمة قد تبدو سليمة في البداية ثم تكشف عدم استقرارها لاحقاً .

- الخلاصة

توضح هذه الحالة أن العيوب اللونية الممتدة في الفيلم لا ترتبط دائماً بوجود تكتلات أو تلوث، بل قد تكون نتيجة عدم استقرار في توزيع اللون أثناء عملية التشكيل. كما تؤكد أن النظام اللوني يجب أن يفهم كنظام متكامل، وأن استقراره أثناء الجريان لا يقل أهمية عن مظهره النهائي.

وهذا يعني أن اللون في التطبيقات الصناعية ليس مجرد خاصية بصرية منفصلة، بل مؤشر شديد الحساسية على مدى تجانس النظام داخل المصهور. وأي خلل في هذا الاستقرار قد ينعكس مباشرة على جودة الفيلم وعلى قابلية قبوله بصرياً في التطبيقات التي تتطلب تجانساً عالياً.

- الحالة السابعة

- انقطاع متكرر في خيوط PP Monofilament عند نفس المواضع

- وصف الظاهرة

في أحد خطوط إنتاج الخيوط الأحادية من البولي بروبيلين (PP monofilament) ، يُلاحظ حدوث انقطاع متكرر في عدد محدد من الخيوط، بينما تستمر بقية الخيوط في العمل بصورة طبيعية.

اللافت في هذه الحالة أن الانقطاع لا يحدث بشكل عشوائي بين جميع الخيوط، بل يتكرر دائماً في خيوط محددة، ترتبط بمواضع ثابتة داخل رأس البثق. أي أن نفس الفتحات (dies) هي التي تنتج الخيوط التي تنقطع، بينما الخيوط الخارجة من الفتحات الأخرى تبقى مستقرة.

الانقطاع يحدث أثناء التشغيل، غالباً بعد مرحلة السحب (drawing) ، ولا يرتبط بحدث مفاجئ واحد، بل يتكرر مع إعادة التشغيل، ومع تغيير البكرة، ومع استمرار الخط، مما يعطيه طابعاً تكرارياً ثابتاً وليس حادثاً عرضياً.

هذه الصورة منذ البداية تخرج الحالة من نطاق “ضعف عام في المادة” إلى نطاق “خلل موضعي مرتبط بجزء محدد من العملية”. لكن هذا الاستنتاج لا يُعتمد مباشرة، بل يجب إثباته عبر قراءة منهجية للمنتج وسلوك الكسر والاختبارات المرتبطة به.

- تحليل أولي للبيانات

المعطيات الأساسية في هذه الحالة:

المادة PP :

العملية **Monofilament extrusion + drawing** :

- العيب: انقطاع الخيوط
- نمط التكرار: ثابت
- موقع العيب: خيوط محددة فقط
- بقية الخيوط: تعمل بشكل طبيعي

هذا التباين بين خيوط من نفس المادة وتحت نفس الظروف التشغيلية يمثل مفتاح التحليل.

لو كانت المشكلة في:

- المادة الخام
- الرطوبة
- التدهور الحراري العام
- أو إعدادات الخط العامة

لظهر العيب في جميع الخيوط أو بشكل عشوائي بينها. أما أن يظهر فقط في خيوط مرتبطة بفتحات محددة، فهذا يعني أن هناك عاملاً تفاضلياً **local differentiation** داخل النظام.

لكن هذا لا يكفي وحده للحكم أن السبب “الميكانيكي فقط”، لأن هناك سيناريوهات أخرى قد تعطي النمط نفسه، مثل:

- عدم تجانس feed داخل الرأس
- اختلاف shear history بين القنوات
- تدهور موضعي داخل منطقة معينة

ولهذا لا بد من الانتقال إلى قراءة المنتج نفسه، وليس الاكتفاء بنمط التكرار.

- اختبارات المنتج النهائي (الخيوط)

بما أن الفشل يظهر في الخيط نفسه، فقد كان من الضروري التعامل مع الخيط كعينة اختبار، وليس فقط كوسيط إنتاج.

تمت قراءة سلوك الخيوط عبر:

- ملاحظة نقطة الانقطاع
- مقارنة الخيوط السليمة والمتضررة
- فحص شكل الكسر بصرياً
- إجراء اختبار شد (tensile) على خيوط من نفس الدفعة

نتائج اختبار الشد أظهرت أن الخيوط (بشكل عام) تقع ضمن الحدود المقبولة من حيث القوة والاستطالة. وهذه نتيجة مهمة جداً، لكنها تحمل احتمالين:

- إما أن المادة سليمة فعلاً
- أو أن اختبار الشد لم يلتقط آلية الفشل الحقيقية

وهذا التفريق مهم، لأن اختبار الشد التقليدي يقيس behavior تحت تحميل منتظم، بينما الانقطاع في الخط يحدث تحت:

- شد مستمر
- سرعة عالية
- احتمالية وجود عيوب سطحية دقيقة

أي أن failure mode في الخط قد لا يُعاد إنتاجه بالكامل في اختبار الشد القياسي.

تحليل شكل الكسر (Fractography)

عند فحص الخيوط المقطوعة:

- يظهر الكسر حاداً نسبياً
- لا توجد استطالة واضحة قبل الانقطاع

● لا تظهر necking واضحة

في بعض الحالات يمكن ملاحظة سطح كسر غير منتظم

هذه المظاهر تشير إلى:

● سلوك أقرب للهشاشة الموضعية

● أو كسر ناتج عن initiation سريع من نقطة ضعف

وفي بعض الحالات، يمكن وصف سطح الكسر بأنه يحتوي على مناطق خشنة مع ملامح توحى بانتشار سريع للشرخ، دون وجود مرحلة سحب طويلة.

هذا النمط لا يتوافق مع:

● فشل ناتج عن overload تدريجي

● بل يتوافق أكثر مع :

● failure initiated من defect موضعي

أي أن الكسر لا يبدأ لأن الخيط “ضعيف بالكامل”، بل لأن هناك نقطة محددة بدأت منها عملية الانهيار.

- قراءة العلاقة بين MFI والسلوك

في حال كانت المادة ذات MFI مرتفع نسبياً، فإن ذلك يعني:

● وزن جزيئي أقل

● استطالة أقل

● حساسية أعلى للعيوب

“ ارتفاع مؤشر الانسياب غالباً يرتبط بانخفاض الوزن الجزيئي، وهو عامل رئيسي في انخفاض المتانة”.

لكن في هذه الحالة، حتى لو كان MFI عاملاً مساعداً، فهو لا يفسر:

لماذا تنقطع خيوط محددة فقط؟

وهذا يعيدنا إلى نقطة أساسية:

المادة قد تكون على الحافة من حيث المتانة، لكن العامل الحاسم هنا ليس “ضعف عام”، بل “trigger” موضعي.”

- التحليل البنيوي للخيوط

الخيوط الأحادي بعد السحب يمتلك بنية موجهة (oriented structure) ، وهذه البنية:

- تعطيه قوة شد عالية
- لكنها تزيد من حساسيته للعيوب
- أي defect صغير:
- خدش
- notch
- عدم انتظام سطحي

قد يتحول إلى نقطة بدء شرخ بسرعة كبيرة.

وهذا يعني أن الخيوط ليس نظامًا متسامحًا مع العيوب، بل نظام حساس جدًا لها، خصوصًا بعد drawing.

- تحليل مسار الخيوط (Die + Path)

بما أن:

- نفس الفتحات تعطي نفس المشكلة
- وبقية الفتحات تعمل بشكل طبيعي

فإن التحليل ينتقل إلى:

- المسار الذي يمر به الخيط منذ خروجه من الفتحة وحتى دخوله منطقة السحب.

أي خلل في:

- حافة الفتحة
- نعومة السطح
- وجود خدش أو burr
- زاوية الخروج
- أو نقطة تماس لاحقة

قد يؤدي إلى:

- إحداث micro-notch في الخيط

هذا الشق الصغير يصبح نقطة بدء للكسر أثناء السحب

وهنا نصل إلى نقطة حاسمة:

الخيط لا ينكسر لأنه “ضعيف”، بل لأنه “مخدوش في نقطة محددة.”

- تحليل السيناريوهات الممكنة

- السيناريو الأول: عيب في الفتحات (Die defects)

خشونة

تآكل

حواف حادة

يؤدي إلى خدش متكرر لنفس الخيوط

- السيناريو الثاني: مسار غير نظيف للخيط

احتكاك مع سطح خشن

guide غير مصقول

● السيناريو الثالث: عدم تجانس تدفق محلي

أقل ترجيحاً لأنه لا يفسر نمط الكسر

● السيناريو الرابع: تدهور موضعي

يحتاج دليل حراري أو زمني، غير ظاهر هنا

- السبب المرجح

السبب المرجح هو وجود عيب موضعي في الفتحات أو في مسار الخيط يؤدي إلى إحداث خدوش دقيقة (micro-notches) في خيوط محددة، مما يجعلها نقاط بدء للكسر أثناء مرحلة السحب.

- حدود الاستنتاج

لا يمكن الجزم النهائي بدون:

- فحص ميكروسكوبي لحواف الفتحات
- مقارنة سطح الخيوط قبل وبعد السحب
- توثيق شكل الكسر بدقة أعلى

- التوصيات

- فحص وصقل الفتحات المتأثرة
- تنظيف مسار الخيط بالكامل
- استبدال الفتحات المشكوك بها
- مراقبة تحسين السلوك بعد التعديل
- مقارنة الخيوط قبل وبعد التعديل

- الخلاصة

هذه الحالة توضح أن الفشل في الأنظمة الموجهة مثل monofilament لا يرتبط دائماً بضعف المادة، بل قد يكون نتيجة عيب ميكانيكي دقيق جداً يتحول إلى نقطة بدء كسر تحت الشد.

كما تؤكد أن التكرار الموضعي للعيب هو أحد أقوى الأدلة على أن المشكلة ليست عامة، بل مرتبطة بموقع محدد داخل العملية.

- الحالة الثامنة

- تباين غير مبرر في مؤشر الانسياب لمواد PE معاد تدويرها من نفس الدفعة

- وصف الظاهرة

في أحد خطوط إعادة التدوير يتم إنتاج حبيبات بولي إيثيلين من خامات مجروشة ومقطعة، جرى تصنيفها مبدئياً على أنها من نفس العائلة البوليمرية. تمر المادة بمراحل الجرش والتقطيع، ثم البثق، ثم التشكيل (تحبيب)، وبعد ذلك تُعبأ الدفعة النهائية في أكياس.

المشكلة لا تظهر في الشكل العام للحبيبات، إذ تبدو الحبيبات الناتجة مقبولة بصرياً من حيث اللون والشكل الخارجي وعدم وجود عيوب صارخة واضحة. إلا أن المشكلة تظهر عند إجراء اختبار مؤشر الانسياب على عينات مسحوبة من نفس الدفعة، حيث تظهر فروقات كبيرة وغير مبررة بين النتائج، رغم أن العينات جميعها يفترض أنها تعود إلى مادة واحدة ومن تشغيل واحد.

وفي بعض الحالات لا يقتصر التفاوت على الفرق بين كيس وآخر، بل يظهر حتى عند أخذ عينات من مواضع مختلفة من الكيس نفسه، أو عند مقارنة عينات من بداية الدفعة ونهايتها. وهذا يعني أن المشكلة ليست مجرد تفاوت بسيط بين التشغيلات، بل عدم تجانس فعلي داخل نفس الدفعة المنتجة.

- تحليل أولي للبيانات

البيانات الأساسية في هذه الحالة تتمثل في الآتي:

- نوع المادة: بولي إيثيلين معاد تدويره
- مصدر الخامات: مختلط لكنه مصنّف ضمن العائلة نفسها
- العملية: جرش وتقطيع بثق تشكيل (تحبيب)

- موضع ظهور المشكلة: اختبار MFI

طبيعة المشكلة: تباين ملحوظ في النتائج داخل نفس الدفعة

هذا التباين لا يمكن التعامل معه على أنه خطأ قياس بسيط ما دام يتكرر ويظهر على نطاق أوسع من حدود الخطأ الطبيعي للاختبار. كما أنه لا يمكن اعتباره تفاوتًا مقبولًا بين دفعات مختلفة، لأن المشكلة هنا داخل نفس الدفعة نفسها.

ومن ثم فإن القراءة الأولية الصحيحة هي أن المنتج النهائي، رغم مروره بمرحلة الانصهار والبثق وإعادة التشكيل، لا يمثل نظامًا متجانسًا بالقدر الذي يُفترض أن تكون عليه الدفعة الواحدة.

- اختبارات المنتج النهائي

بما أن المشكلة ظهرت في الحبيبات المنتجة نفسها، فقد كان من الضروري أن يبدأ التشخيص من المنتج النهائي، لا من افتراضات حول الخامات فقط. وفي هذه الحالة، المنتج النهائي هو الحبيبات، وهي التي يجب أن تمثل الدفعة تمثيلًا حقيقيًا.

- الاختبارات الفعلية المرتبطة بهذه الحالة تشمل:

- سحب عينات متعددة من نفس الدفعة
- سحب عينات من مواضع مختلفة من الكيس نفسه
- مقارنة نتائج MFI بين الأكياس المختلفة داخل نفس التشغيل
- مقارنة نتائج بداية الدفعة ونهايتها
- ربط نتائج الاختبار بطريقة الخلط قبل البثق وبعده

وقد أظهرت النتائج أن القيم لا تدور حول متوسط ضيق يمكن قبوله على أنه تفاوت طبيعي، بل تتوزع على نطاق أوسع، بما يعني أن كل عينة لا تمثل بالضرورة التركيب نفسه الموجود في العينة الأخرى.

وهنا يجب الانتباه إلى نقطة مهمة:

اختبار MFI هنا لا يكشف فقط “سيولة المادة”، بل يكشف أيضًا مدى تمثيل العينة للدفعة ومدى تجانس الدفعة نفسها.

- قراءة اختبار مؤشر الانسياب

في المواد البكر المتجانسة، تكون قراءة مؤشر الانسياب في العادة ذات معنى مباشر نسبياً، لأنها تعكس سلوك مادة ذات تركيب معروف ومضبوط. أما في المواد المعاد تدويرها، فالوضع أكثر تعقيداً.

فالعينة المختبرة لا تمثل دائماً بوليمراً واحداً نقياً، بل تمثل خليطاً من مواد متقاربة أو متباينة جزئياً في:

● النوع الدقيق داخل عائلة PE

● الوزن الجزيئي

● الإضافات

● السماكة الأصلية للمنتجات الداخلة

● التاريخ الحراري السابق

● مستوى التدهور

ولذلك فإن قيمة MFI في هذه الحالة لا يجب أن تُقرأ على أنها “صفة ثابتة لمادة واحدة”، بل على أنها قراءة لحالة خليط. وإذا اختلفت القراءة بين عينات من نفس الدفعة، فهذا يعني أن الخليط نفسه لم يكن موزعاً بصورة متجانسة بما يكفي.

بمعنى آخر، المشكلة ليست في الاختبار فقط، بل في أن المادة التي يجري عليها الاختبار ليست متماثلة فعلياً من عينة إلى أخرى.

- التحليل البنيوي

عند التعامل مع خامات معاد تدويرها من عائلة PE ، يجب الانتباه إلى أن التصنيف العام لا يعني تجانساً حقيقياً. فحتى لو قيل إن المواد كلها “بولي إيثيلين”، فقد تكون في الواقع خليطاً من:

● HDPE

● LDPE

● LLDPE

● درجات مختلفة داخل النوع نفسه

● خامات ذات تاريخ حراري مختلف

● مواد تحتوي على إضافات متباينة

وعند إدخال هذه المواد إلى الإكسترودر، لا يحدث توحيد كيميائي بينها، بل يحدث امتزاج فيزيائي في المصهور. وهذا الامتزاج قد يكون جيّدًا بصريًا أو مقبولاّ تشغيليًا، لكنه لا يعني بالضرورة أن النظام أصبح متجانسًا بصورة كاملة على مستوى كل جزء من الحبيبات الناتجة.

وهنا تظهر نقطة مهمة جدًا:

الإكسترودر لا يحول الخليط بالضرورة إلى “مادة واحدة جديدة” بالمعنى الكامل، بل قد ينتج مادة ممتزجة ظاهريًا لكنها لا تزال تحتفظ بتفاوتات تركيبية داخلية إذا كانت الخامة الداخلة غير منتظمة أو إذا كان الخلط غير كافٍ.

- تحليل سبب التفاوت داخل الدفعة

لكي نفهم لماذا تظهر قيم MFI مختلفة داخل نفس الدفعة، لا يكفي أن نقول إن “الخامة مختلطة”، بل يجب أن نحدد أين فشل النظام في الوصول إلى التجانس.

- أول نقطة ضعف محتملة تكون قبل البثق، أي بعد مرحلة الجرش والتقطيع مباشرة. فالخامات في هذه المرحلة لا تكون موزعة بشكل متماثل تلقائيًا، بل تبقى على هيئة قطع أو رقائق تختلف في:

- التركيب
- الكثافة
- السماكة
- الإضافات
- القابلية للذوبان
- السلوك داخل الإكسترودر

وإذا دخلت هذه المواد إلى الإكسترودر دون خلط مسبق كافٍ، فإن التغذية نفسها تصبح غير منتظمة، بحيث تمر أحيانًا منطقة غنية بخامة معينة، ثم تليها منطقة مختلفة عنها. وهذا يعني أن المصهور الداخل إلى مرحلة البثق ليس ثابت التركيب أصلًا، وبالتالي لا يمكن توقع أن تكون الحبيبات الناتجة ممثلة تمثيلاً متماثلًا.

- النقطة الثانية تكون داخل الإكسترودر نفسه. فإذا لم يكن الخلط الداخلي كافيًا، أو إذا كان التباين بين المكونات كبيرًا من حيث اللزوجة أو طبيعة الذوبان، فإن بعض الفروق التركيبية تبقى موجودة بعد البثق، حتى لو لم تكن مرئية مباشرة.

- **النقطة الثالثة** تكون بعد التحبيب. فحتى لو حدث قدر مقبول من الخلط داخل الإكسترودر، فإن الحبيبات الناتجة قد لا تتوزع تلقائيًا بشكل ممثل داخل الدفعة. وقد يحدث نوع من عدم التجانس بين أجزاء المنتج النهائي أو بين الأكياس المختلفة، خاصة إذا تم التعبئة مباشرة دون إعادة خلط للدفعة.
- **تفسير سلوك الظاهرة**

هذه الحالة لا تعني أن المادة “فاسدة” بالضرورة، لكنها تعني أن الدفعة ليست متجانسة بالقدر الذي يسمح بأن تمثلها كل عينة بشكل صحيح.

فإذا كانت بعض العينات أكثر غنى بنوع معين من PE أو بمناطق أقل تدهورًا أو أكثر تدهورًا أو أكثر احتواء على إضافات معينة، فإن MFI سيختلف حتى لو كانت جميع العينات مأخوذة من “نفس الدفعة” على الورق. وهذا يقود إلى نتيجة مهمة جدًا عمليًا:

المشكلة هنا ليست فقط في قيمة MFI، بل في تمثيل الدفعة نفسها. فإذا لم تكن الدفعة متجانسة، فإن أي اختبار يسحب منها سيكون معرضًا لإعطاء نتائج متفاوتة، ليس لأن الاختبار سيئ، بل لأن المادة نفسها لا تعطي عينة ممثلة.

- السيناريوهات المحتملة

- السيناريو الأول هو أن المواد بعد الجرش والتقطيع لم تُخلط بشكل كافٍ قبل دخولها إلى الإكسترودر، فدخلت التغذية بصورة غير منتظمة ومتحركة التركيب.
- السيناريو الثاني هو أن الخلط داخل الإكسترودر لم يكن كافيًا لتوزيع المكونات المختلفة توزيعًا متجانسًا، سواء بسبب تصميم اللولب أو بسبب طبيعة الخليط نفسه.
- السيناريو الثالث هو أن الاختلاف بين مكونات الخامة المختلطة كان كبيرًا بما يكفي لجعل الامتزاج الكامل غير متحقق حتى بعد البثق.
- السيناريو الرابع هو أن الحبيبات بعد التحبيب لم تُخلط مجددًا، فبقيت الدفعة النهائية غير ممثلة بشكل متجانس داخل الأكياس أو داخل أجزاء الدفعة المختلفة.
- والسيناريو الأكثر واقعية هنا هو تراكم العاملين معًا:

عدم انتظام التغذية قبل البثق، ثم عدم وجود خلط كافٍ للدفعة بعد التحبيب.

- السبب المرجح

بناءً على المعطيات، فإن السبب المرجح هو عدم تجانس الدفعة على مستويين:

عدم تجانس المواد الداخلة قبل البثق نتيجة غياب خلط فعلي كافٍ بعد الجرش والتقطيع

وعدم تجانس الدفعة النهائية بعد التحبيب نتيجة غياب خلط لاحق للحبيبات قبل التعبئة أو قبل سحب العينات

وهذا يعني أن التفاوت في MFI لا يمثل فقط اختلافاً في القياس، بل يعكس أن كل عينة قد تمثل تركيباً مختلفاً جزئياً عن الأخرى داخل نفس الدفعة.

- حدود الاستنتاج

رغم قوة هذا التفسير، لا يمكن الجزم الكامل بطبيعة جميع الفروق داخل الخليط دون فحوص إضافية مثل:

- FTIR لتحديد طبيعة المكونات المختلفة
- DSC لدراسة تعدد الأطوار
- قياس الكثافة لعينات متعددة من نفس الدفعة
- تقييم أدق لعلاقة موضع العينة داخل الدفعة بنتيجة MFI

لكن غياب هذه الفحوص لا يضعف أصل التشخيص، لأن تكرار تفاوت MFI داخل نفس الدفعة، مع طبيعة المواد المعاد تدويرها، يكفي ليؤكد أن المشكلة الأساسية هي في التجانس والتمثيل.

- التوصيات

- خلط المواد بعد مرحلة الجرش والتقطيع مباشرة وقبل البثق، باستخدام خلاط مناسب، لأن هذه المرحلة هي النقطة الأولى التي يمكن فيها تقليل عدم التجانس في التغذية.
- فالخامات الداخلة، حتى وإن صُنفت ضمن العائلة نفسها، لا تكون متجانسة فعلياً، بل تكون موزعة على شكل قطع تختلف في النوع والدرجة والإضافات والسماكة والتاريخ الحراري. وخلطها قبل البثق يعطي توزيعاً أكثر تماثلاً للمواد الداخلة، ويجعل تركيب المصهور داخل الإكسترودر أكثر استقراراً.
- خلط الحبيبات بعد الإنتاج على الأقل كل 1 طن مرة واحدة في خلاط سريع، حتى تصبح الدفعة النهائية أكثر تمثيلاً وتجانساً قبل التعبئة أو قبل سحب العينات أو قبل الاستخدام اللاحق.

- وهذه الخطوة ضرورية لأن الخلط داخل الإكسترودر وحده لا يضمن أن تكون كل الأكياس أو كل أجزاء الدفعة ممثلة تمثيلاً مقارباً .
- اعتماد أسلوب سحب عينات يعكس الدفعة كلها، لا عينة موضعية واحدة، خصوصاً عند تقييم MFI أو الكثافة أو أي خاصية حساسة للتفاوت الداخلي .
- مراجعة مستوى تجانس الخلطة الداخلة، وعدم الاكتفاء بالتصنيف العام للخامة بوصفها "PE"، لأن هذا الوصف لا يكفي وحده لضمان تجانس سلوكها .

إذا ظل التفاوت مرتفعاً، فيجب إعادة النظر في مستوى الخلط داخل الإكسترودر نفسه وفي مدى قدرة نظام الخلط الحالي على التعامل مع خامات متفاوتة التركيب .

- الخلاصة

توضح هذه الحالة أن البثق لا يضمن وحده تجانساً كاملاً في المواد المعاد تدويرها، وأن قيمة MFI في هذه الأنظمة لا يجب أن تُقرأ كقيمة مطلقة لمادة واحدة، بل كمؤشر على مدى تجانس الخليط ومدى تمثيل العينة للدفعة.

كما تؤكد هذه الحالة أن الوصول إلى دفعة مستقرة لا يتحقق بخطوة واحدة، بل يحتاج إلى مرحلتين واضحتين من الخلط:

- خلط قبل البثق بعد الجرّش والتقطيع لتوحيد التغذية
- و خلط بعد التحبيب لتوحيد الدفعة النهائية

وهذا هو الفارق بين مادة تبدو متقاربة في الشكل، ومادة تمثل فعلياً دفعة يمكن الاعتماد على نتائج اختبارها وعلى سلوكها الصناعي.

- الحالة التاسعة

- ضعف غير متوقع في قوة اللحام الحراري في فيلم تغليف من البولي إيثيلين رغم ثبات السماكة وظروف

التشغيل

- وصف الظاهرة

في أحد خطوط إنتاج أفلام التغليف المرنة يتم تصنيع فيلم من البولي إيثيلين، إما من LDPE أو LLDPE أو خليط بينهما، لاستخدامه في تطبيقات تتطلب لحاماً حرارياً موثقاً. يظهر الفيلم من حيث الشكل العام بمظهر

مقبول، حيث لا توجد عيوب واضحة مثل الجل، أو التمزقات، أو الثقوب، أو التفاوت الكبير في السماكة، كما أن السمك يقع ضمن الحدود المطلوبة، ويبدو الفيلم من حيث الشفافية والسطح والمظهر العام مقبولا إنتاجيا.

إلا أن المشكلة تظهر عند إجراء اختبارات اللحام الحراري أو أثناء الاستخدام الفعلي في ماكينة التعبئة، حيث يُلاحظ أن قوة اللحام أقل من المتوقع، أو غير مستقرة بين عينة وأخرى، رغم ثبات عناصر كان يُفترض أن تقود إلى نتائج متقاربة، مثل:

- السماكة
- نوع الفيلم الأساسي
- درجات حرارة اللحام
- زمن التلامس
- ضغط الفكوك

وفي بعض العينات يظهر الفشل على هيئة انفصال نظيف عند خط اللحام نفسه، دون أن يحدث تمزق داخل جسم الفيلم بعيداً عن خط اللحام. وهذا يعني منذ البداية أن المشكلة لا تتعلق فقط بقوة الفيلم ككل، بل بقدره سطحي الفيلم على تكوين وصلة حرارية متماسكة.

- تحليل أولي للبيانات

المعطيات الأساسية في هذه الحالة يمكن تلخيصها كما يلي:

- نوع المنتج: فيلم تغليف قابل للحام الحراري
- السماكة: ضمن المجال المطلوب
- المظهر العام: مقبول
- ظروف اللحام: ثابتة أو مضبوطة
- موضع الفشل: عند منطقة اللحام
- نمط الفشل: ضعف في قوة اللحام أو تفاوت واضح بين العينات

هذه الصورة تستبعد منذ البداية عدداً من التفسيرات السهلة. فلو كانت المشكلة في السماكة نفسها، لظهرت على هيئة اختلافات أوضح في شكل الفيلم أو في أدائه الميكانيكي العام. ولو كانت المشكلة في تمزق الفيلم أو ضعفه البنيوي العام، لكان الفشل يحدث داخل جسم الفيلم أو على امتداد منطقة أكبر من خط اللحام. أما أن

يتركز الفشل في واجهة اللحام نفسها، فهذا يوجه التحليل مباشرة نحو سلوك السطح وبنية الطبقة القابلة للحام أكثر من توجيهه نحو bulk المادة فقط.

- اختبارات المنتج النهائي

بما أن العيب يظهر في الأداء الوظيفي للفيلم النهائي، فقد كان من الضروري أن يبدأ التشخيص من اختبارات المنتج نفسه، لا من توصيف الخام وحده. وفي هذه الحالة فإن الاختبارات والملاحظات الأكثر أهمية هي:

- اختبار قوة اللحام الحراري
- مقارنة النتائج عند درجات حرارة مختلفة ضمن نفس المجال التشغيلي
- ملاحظة نوع الفشل: هل هو انفصال عند الواجهة أم تمزق داخل الفيلم
- مقارنة النتائج بين عينات مأخوذة من نفس الرول أو من عدة رولات
- مراقبة تغير الأداء بعد التخزين أو بعد مرور زمن معين على الإنتاج

وقد أظهرت اختبارات اللحام أن الفشل لا يحدث على هيئة تمزق داخل جسم الفيلم، بل على هيئة انفصال عند خط اللحام نفسه. وهذه نتيجة شديدة الأهمية، لأنها تعني أن المشكلة ليست في أن الفيلم ضعيف ميكانيكياً بصورة عامة، بل في أن عملية الالتحام بين السطحين لم تحقق الترابط المطلوب.

بعبارة أدق، المنتج النهائي هنا يقول بوضوح إن الخلل في sealing interface أكثر من كونه في bulk film strength.

- قراءة اختبارات اللحام

عند قراءة نتائج Heat Seal Strength ، لا يكفي النظر إلى القيمة النهائية فقط، بل يجب النظر أيضاً إلى طبيعة الفشل. ففي أفلام التغليف هناك فرق كبير بين حالتين:

- فشل يدل على أن اللحام نفسه ضعيف
- وفشل يدل على أن اللحام أصبح أقوى من الفيلم نفسه

في الحالة الأولى ينفصل الخط الحراري بصورة نظيفة نسبياً، مما يعني أن الطبقتين لم تُكوّنا اتصالاً جزيئياً كافياً.

وفي الحالة الثانية، إذا كان اللحام جيداً، فقد يتمزق الفيلم خارج منطقة اللحام أو يمتد التمزق داخل جسم المادة.

وفي هذه الحالة، فإن ظهور الفشل عند الواجهة يدل على أن المشكلة لا تتعلق فقط بوجود حرارة أو ضغط، بل بأن السطح نفسه لم يكن مهياً لتكوين تداخل جزيئي فعال.

وهنا تصبح قراءة نتيجة الاختبار كالاتي:

- انخفاض قيمة Seal Strength مع ظهور adhesive-type failure يعني أن هناك خللاً في قدرة السطح على الالتحام، وليس فقط خللاً في مقاومة الفيلم الكلية.
- قراءة الخصائص الأساسية للمادة

في مثل هذه الحالات، قد تبدو خصائص المادة الأساسية ضمن الحدود المقبولة، وقد لا تُظهر اختبارات مثل MFI أو الكثافة خللاً واضحاً. لكن هذا لا يكفي لتبرئة النظام. فالمشكلة في أفلام اللحام الحراري لا تُحسم من خلال سلوك bulk resin فقط، لأن نجاح اللحام يعتمد أساساً على ما يحدث عند السطح أو في الطبقة التي ستدخل في التلامس الحراري.

قد تكون المادة الأساسية مناسبة من حيث القابلية للتشكيل، لكن الطبقة السطحية نفسها تحتوي على:

- إضافات تقلل الاحتكاك
- إضافات تمنع الالتصاق بين اللفات
- مكونات مهاجرة إلى السطح
- أو درجة orientation تجعل السطح أقل قابلية لإعادة الاندماج أثناء اللحام

ولهذا فإن قراءة الخصائص الأساسية للمادة يجب أن تكون أوسع من مجرد سؤال: هل الخام مناسب للفيلم؟

بل يجب أن تكون: هل السطح النهائي للفيلم ما زال صالحاً للحام بعد اكتمال التشكيل واستقرار الإضافات عليه؟

- التحليل البنيوي للسطح والواجهة

لكي يتحقق لحام حراري جيد في أفلام البولي إيثيلين، لا يكفي أن يلامس السطحان بعضهما تحت الحرارة، بل يجب أن يحدث الاتي:

- تليين أو انصهار سطحي مناسب
- تماس حقيقي بين السطحين
- تداخل بين السلاسل الجزيئية عبر الواجهة
- إعادة تصلب بعد إزالة الحرارة مع تكوين منطقة مشتركة مترابطة
- إذا تعطل أي عنصر من هذه العناصر، فإن اللحام يضعف.

وهنا تصبح بنية السطح عاملاً حاسماً. فإذا كان السطح مغطى بطبقة رقيقة من مكونات مهاجرة، أو إذا كان غنياً بإضافات تقلل الالتصاق، أو إذا كانت الطبقة السطحية نفسها مختلفة في تركيبها عن bulk المادة، فإن التلامس الجزيئي الفعال يتعطل. والنتيجة هي أن الفكين الحراريين يطبقان الحرارة والضغط فعلاً، لكنهما لا يحصلان على وصلة متماسكة بالقدر المطلوب.

أي أن اللحام قد يحدث شكلياً، لكن لا يتحول إلى رابط وظيفي قوي.

- تحليل دور الإضافات السطحية

في أفلام التغليف، كثيراً ما تُستخدم إضافات من نوع:

- Slip additives
- Anti-block additives
- Processing aids
- شمعيات أو مكونات منخفضة الوزن الجزيئي

وهذه الإضافات مفيدة وظيفياً في مجالات محددة، مثل تحسين الانزلاق أو منع التصاق اللفات أو تسهيل التشغيل. لكن مشكلتها أنها لا تبقى دائماً موزعة بصورة متجانسة داخل bulk الفيلم، بل تميل بعض أنواعها إلى الهجرة نحو السطح مع الزمن أو الحرارة.

وعندما تتجمع هذه المكونات على السطح، فإنها قد تكون طبقة رقيقة جداً لا تُرى بسهولة بالعين، لكنها تكفي لتغيير سلوك اللحام الحراري. فيصبح السطح:

- أقل قابلية للتماس الحقيقي
- أقل قابلية للانصهار الفعال عند الواجهة
- أقل قدرة على تكوين interdiffusion بين السطحين

- وهنا تكمن المفارقة الصناعية:

الإضافة التي تحسن سلوك الفيلم في جانب معين قد تضعفه في جانب اللحم إذا لم يُصمم النظام بصورة متوازنة.

- تحليل ظاهرة الهجرة السطحية

إذا كان الأداء عند بداية الإنتاج أفضل ثم يضعف بعد التخزين، أو إذا كانت بعض الرولات تلحم جيداً وأخرى أضعف رغم التشابه الظاهري، فإن هذا يرفع احتمال وجود migration أو blooming على السطح.

ففي هذه الحالة لا تكون المشكلة فقط في وجود الإضافة، بل في سلوكها الزمني. بعض المكونات ذات الوزن الجزيئي المنخفض لا تبقى موزعة داخل الفيلم، بل تتحرك تدريجياً إلى السطح. وعند وصولها إلى السطح، فإنها تغير خواصه بصورة تجعل الواجهة أقل قابلية للالتحام.

ومن العلامات التي تدعم هذا التفسير:

- انخفاض قوة اللحام رغم ثبات السماكة
- تحسن أو تدهور مرتبط بزمن التخزين
- فشل عند الواجهة لا في bulk الفيلم
- عدم وجود عيب بصري جسيم يفسر السلوك

أي أن الفيلم قد يبدو جيداً تماماً، لكنه يكون في الحقيقة “مُزلق السطح” أكثر من اللازم بالنسبة لمتطلبات اللحام.

- تحليل دور Orientation

في بعض الحالات، لا يكون العامل السطحي وحده هو المسؤول، بل تسهم orientation العالية في الطبقة السطحية في تقليل قابلية السطح لإعادة الاندماج الحراري. فكلما زاد ترتيب السلاسل أو شدتها أثناء التشكيل، قد تقل حرية حركتها عند اللحام، ويصبح تحقيق interdiffusion الكامل أصعب ضمن زمن اللحام المحدود.

وهذا العامل لا يعمل عادة منفردًا، لكنه قد يضاعف أثر الإضافات السطحية أو يجعل السطح أكثر حساسية لها. لذلك يجب ألا يُهمل، خصوصًا إذا كانت ظروف النفخ أو السحب أو التبريد تنتج فيلمًا ذا orientation عالية نسبيًا.

- تحليل شكل الفشل

في هذه الحالة، شكل الفشل نفسه من أهم المفاتيح التشخيصية. فإذا كان الفشل يحدث عند خط اللحام مباشرة على هيئة انفصال نظيف نسبيًا، فإن هذا يعني أن المشكلة ليست في مقاومة الفيلم للتمزق، بل في أن الواجهة لم تبين ترابطًا كافيًا.

أما لو كان الفشل يحدث بتمزق داخل الفيلم بعيدًا عن خط اللحام، لكان هذا دليلًا على أن اللحام أصبح أقوى من جسم الفيلم نفسه. لكن بما أن الفشل هنا عند منطقة اللحام، فإن شكل العيب يدعم بقوة فرضية أن الواجهة لم تحقق fusion أو interdiffusion بالقدر المطلوب.

وهذا يجعل شكل الفشل في هذه الحالة معادلًا لدور fractography في حالات الكسر:

فهو لا يصف النتيجة فقط، بل يكشف موضع الضعف الحقيقي في النظام.

- تفسير سلوك الفشل

الفيلم هنا لا يفشل لأنه ضعيف ميكانيكيًا بالمطلق، بل لأنه لا يحقق واجهة لحام متماسكة بالقدر الكافي. وهذا فرق جوهري.

فالخلل لا يقع بالضرورة في bulk structure، بل في الطبقة الفاصلة بين السطحين عند لحظة اللحام. وإذا كانت هذه الطبقة تحتوي على مكونات مهاجرة أو إضافات تقلل الالتصاق، أو إذا كانت أقل قابلية للانصهار والتداخل الجزيئي، فإن اللحام سيبدو موجودًا شكليًا لكنه لن يحمل الإجهاد المطلوب وظيفيًا.

ومن هنا فإن فشل seal strength لا يعني دائمًا "فيلم ضعيف"، بل قد يعني أن الفيلم غير قابل للحام جيدًا في حالته السطحية الحالية.

- السيناريوهات المحتملة

- السيناريو الأول: وجود إضافات سطحية مهاجرة مثل slip أو anti-block بتركيز أو سلوك يجعل السطح أقل قابلية للحام.
- السيناريو الثاني: حدوث blooming أو migration بمرور الزمن، مما غير حالة السطح بين الإنتاج والاستخدام.
- السيناريو الثالث: أن تكون الطبقة السطحية نفسها، في حال كان الفيلم متعدد الطبقات، غير مثالية للحام الحراري رغم أن bulk structure مقبول.
- السيناريو الرابع: ارتفاع orientation في الطبقة السطحية بدرجة تقلل قدرة السطح على تكوين interdiffusion سريع أثناء اللحام.
- السيناريو الخامس: وجود تلوث سطحي أو بقايا تشغيل، وهذا عادة احتمال أقل إذا كان النمط منتظماً ومتكرراً وليس عشوائياً.
- والسيناريو الأكثر واقعية غالباً هو تراكب بين إضافات سطحية مهاجرة وبين حساسية البنية السطحية نفسها لظروف اللحام.
- السبب المرجح

بناءً على المعطيات، فإن السبب المرجح هو وجود طبقة سطحية تقلل من كفاءة التلامس والتداخل الجزيئي أثناء اللحام، ناتجة غالباً عن migration لبعض الإضافات السطحية أو مكونات منخفضة الوزن الجزيئي، وربما يتعزز أثرها بطبيعة البنية السطحية للفيلم أو بدرجة orientation فيه.

أي أن المشكلة الأساسية ليست في أن الفيلم لا ينصهر، بل في أن السطح الذي يجب أن يندمج بالسطح المقابل لا يملك الحالة المناسبة لتكوين لحام قوي ومستقر.

- حدود الاستنتاج

رغم قوة هذا التفسير، لا يمكن الجزم النهائي دون فحوص إضافية مثل:

- قياس COF وربطه بدرجة الهجرة السطحية
- مقارنة الأداء قبل التخزين وبعده
- تحليل سطحي مثل ATR-FTIR
- اختبار التنظيف السطحي ومقارنة أثره على قوة اللحام
- مراجعة تركيب الطبقة السطحية بدقة

وبدون هذه الأدوات يبقى التحليل قوياً جداً، لكنه يظل في إطار السبب المرجح لا الإثبات القاطع.

- التوصيات

- مراجعة نوع وجرعة الإضافات السطحية، خصوصاً slip و anti-block، وعدم النظر إليها بمعزل عن متطلبات اللحام .
- استخدام تركيبات أو grades مخصصة لتطبيقات heat seal ، لا مجرد أفلام مقبولة شكلياً .
- مقارنة قوة اللحام مباشرة بعد الإنتاج وبعد التخزين، لرصد أثر الهجرة السطحية بوضوح .
- إجراء اختبار تشخيصي بسيط بتنظيف السطح قبل اللحام ومقارنة قوة اللحام قبل التنظيف وبعده .
- مراجعة تركيب الطبقة السطحية، خصوصاً في الأفلام متعددة الطبقات، والتأكد من أن السطح المصمم للحام هو فعلاً السطح الذي يدخل في منطقة seal.
- ربط نتائج seal strength دائماً بنوع الفشل، وعدم الاكتفاء بالقيمة النهائية فقط .

- الخلاصة

توضح هذه الحالة أن أداء اللحام لا يعتمد فقط على نوع البوليمر أو سماكة الفيلم أو حرارة الفكوك، بل يعتمد بصورة حاسمة على حالة السطح نفسه. وقد يكون الفيلم جيداً بصرياً ومقبولاً ميكانيكياً، لكنه يفشل وظيفياً لأن سطحه لم يعد مهياً لتكوين لحام حراري قوي.

كما تؤكد هذه الحالة أن الخلل في تطبيقات التغليف لا يكون دائماً في bulk المادة، بل قد يكون في طبقة سطحية دقيقة لا تُرى بالعين، لكنها تتحكم مباشرة في جودة الوصلة الحرارية وفي صلاحية المنتج للاستخدام النهائي.

- الحالة العاشرة

تمزق عرضي غير متماثل في فيلم بلاستيكي مع ثبات اتجاه الضعف في جهة واحدة

وصف الظاهرة

في أحد خطوط إنتاج الفيلم البلاستيكي، يظهر المنتج من حيث الشكل العام بمظهر مقبول، فلا تلاحظ عيوب واضحة مثل الثقوب أو الجل أو التفاوت الكبير في السمك أو الاضطرابات البصرية الشديدة. كما أن التشغيل يبدو مستقرًا من حيث استمرار الفقاعة وخروج الفيلم بصورة طبيعية.

إلا أن المشكلة تظهر عند اختبار الفيلم أو الأكياس الناتجة ميدانيًا، حيث يُلاحظ أن الفيلم يتمزق عرضيًا بسهولة أكبر عند سحبه من جهة محددة من الرول، بينما لا يظهر السلوك نفسه بالحدة ذاتها عند السحب من الجهة المقابلة. وبعبارة أخرى، فإن مقاومة التمزق العرضي ليست متماثلة بين جانبي الفيلم، رغم أن الفيلم يبدو ظاهريًا متجانسًا.

الأهم في هذه الحالة أن جهة الضعف ثابتة. أي أن الجهة نفسها من الرول أو من عرض الفيلم هي التي تُظهر سهولة التمزق، وهذا يرفع احتمال أن تكون المشكلة مرتبطة بعدم تماثل ثابت في العملية أو في بنية الفيلم عبر العرض، لا بعيب عشوائي متفرق داخل المادة.

- تحليل أولي للبيانات

المعطيات الأساسية في هذه الحالة يمكن تلخيصها كما يلي:

- المظهر العام للفيلم: مقبول
- السماكة الاسمية: ضمن المجال المطلوب
- طبيعة العيب: ضعف في مقاومة التمزق العرضي
- اتجاه العيب: ثابت في جهة واحدة
- موضع العيب: مرتبط بجانب محدد من عرض الفيلم
- التكرار: متكرر وليس عارضًا

هذه الصورة لا تشير إلى عيب موضعي صغير مثل ثقب أو gel contamination ، لأن هذه العيوب تعطي عادة نقاط ضعف متفرقة أو غير منتظمة. كما أنها لا تشير مباشرة إلى ضعف عام في المادة، لأن الضعف لو كان عامًا لظهر عبر العرض كله وبدرجات متقاربة.

ثبات جهة الضعف يعني أن هناك لا تماثلًا حقيقيًا side-to-side asymmetry داخل الفيلم نفسه، سواء كان هذا اللاتماثل في السمك، أو في البنية المورفولوجية، أو في الاتجاهية، أو في التركيب المحلي للمادة، أو في مجموعة من هذه العوامل مجتمعة.

- اختبارات المنتج النهائي

بما أن العيب ظهر في السلوك الوظيفي للفيلم النهائي، فقد كان من الضروري أن يبدأ التشخيص من اختبارات وملاحظات مرتبطة مباشرة بالمنتج، لا من الخام فقط.

وتشمل الاختبارات أو المقارنات التي تُبنى عليها هذه الحالة:

- اختبار التمزق العرضي بين جهتي الفيلم
- مقارنة سلوك التمزق في عينات مأخوذة من أكثر من موضع عبر العرض
- مقارنة التمزق بين الجهة اليمنى واليسرى وبين الوسط
- ربط نتائج التمزق بقياسات السماكة الفعلية
- مقارنة مقاومة الشد والاستطالة عبر أكثر من موضع من عرض الفيلم
- مراقبة ما إذا كان الفشل يبدأ دائمًا من الجهة نفسها أو من حافة محددة

في مثل هذه الحالة، لا تكفي ملاحظة أن “الفيلم يتمزق من جهة واحدة” بوصفها انطباعًا، بل يجب أن تتحول إلى قراءة مقاسة عبر عينات موزعة على العرض.

والنقطة الحاسمة هنا أن اختبار الشد التقليدي وحده قد لا يكشف المشكلة كاملة، لأن الفيلم قد يُظهر قيم شد مقبولة نسبيًا، بينما يبقى سلوكه في التمزق العرضي ضعيفًا وغير متماثل. فمقاومة التمزق ليست هي نفسها مقاومة الشد، بل ترتبط بشدة بقدرة البنية على منع بدء الشرخ ثم إيقاف امتداده.

- قراءة الاختبارات الأساسية

في هذه الحالة، لا يكفي أن نقول إن السمك “ضمن الحدود” أو إن المادة “هي نفسها” عبر عرض الفيلم. لأن القبول العام للسمك أو للدرجة لا يعني بالضرورة أن البنية النهائية للفيلم متماثلة عبر العرض.

ولذلك فإن أهم الاختبارات الأساسية التي يجب أن تُقرأ هنا تشمل:

توزيع السماكة الحقيقي عبر العرض، لا المتوسط فقط

مقاومة التمزق العرضي في أكثر من موضع

مقاومة الشد والاستطالة في عدة مواضع عبر العرض

مقارنة الخصائص بين الجهة الضعيفة والجهة الأقوى

وربط نتائج ذلك بتاريخ التشغيل عبر قالب والتبريد والسحب

إذا ظهر أن الشد مقبول في كل المواضع بينما التمزق العرضي ضعيف في جهة معينة، فهذه إشارة قوية إلى أن الخلل ليس مجرد انخفاض عام في القوة، بل خلل في آلية انتشار الشرخ في هذه الجهة.

أما إذا ظهر أيضاً تفاوت في الاستطالة أو في السمك أو في المظهر المورفولوجي، فإن هذا يقوي فرضية أن الجهة الضعيفة ليست فقط أضعف ميكانيكياً، بل مبنية بنيوياً بصورة مختلفة عن بقية الفيلم.

- التحليل البنيوي

الفيلم البلاستيكي لا يخرج من الخط كمادة متجانسة بالكامل حتى لو كانت الخامات نفسها واحدة، لأن بنيته النهائية تتحدد من خلال:

تاريخ الجريان داخل قالب

توزيع الحرارة عبر العرض

سرعة التبريد

orientation المتكونة أثناء النفخ أو السحب

وتفاعل هذه العوامل مع نوع المادة نفسها

ولهذا قد يتكون الفيلم، في الجهة اليسرى مثلاً، ببنية مختلفة قليلاً عن الجهة اليمنى، حتى لو كان السمك المتوسط متقارباً. هذه الاختلافات قد لا تظهر بصرياً بوضوح، لكنها تظهر في السلوك الميكانيكي، خاصة في الاختبارات الحساسة مثل التمزق العرضي.

في مقاومة التمزق، لا يكفي أن يكون الفيلم قوياً تحت الشد، بل يجب أن تكون بنيته قادرة على مقاومة بدء الشرخ ومنع تقدمه السريع. وإذا كانت إحدى الجهتين أكثر اتجاهية أو أقل تجانساً أو أرق موضعياً أو أضعف ترابطاً داخلياً، فإن الشرخ سيجد في هذه الجهة مساراً أسهل للانتشار.

ومن هنا فإن هذه الحالة تُقرأ كحالة لا تماثل بنيوي across the width أكثر من كونها حالة ضعف عام في المادة.

- تحليل علاقة السمك بالعيب

من أول ما يجب فحصه في هذه الحالة هو توزيع السماكة الحقيقي عبر عرض الفيلم. لأن التمزق العرضي يتأثر بشدة بالسمك، وأي انخفاض موضعي ثابت في الجهة نفسها قد يكون جزءاً مباشراً من التفسير.

لكن هنا يجب الحذر من تبسيط المسألة. فحتى لو كانت الجهة الضعيفة أقل سماكة، فإن هذه النتيجة لا تمثل السبب الجذري، بل تمثل أحد مظاهره. إذ لا بد أن نسأل: لماذا كانت هذه الجهة أرق أصلاً؟ وهل يكفي فرق السمك وحده لتفسير الفرق الكبير في التمزق؟ أم أن هناك عاملاً بنيوياً آخر يرافقه؟

وفي كثير من الحالات، يكون الفرق في السمك جزءاً من المشكلة، لكنه لا يكون التفسير الكامل، لأن بعض الأفلام قد تتحمل فروقاً بسيطة في السمك دون أن تنهار مقاومة التمزق بهذه الصورة، ما لم تكن هناك فروق أخرى في الاتجاهية أو morphology أو التبريد.

- تحليل الاتجاهية والبنية المورفولوجية

التمزق العرضي يتأثر بصورة كبيرة بدرجة orientation في الفيلم. فإذا كانت إحدى جهتي الفيلم أكثر اتجاهية من الأخرى، أو إذا كان ترتيب السلاسل فيها مختلفًا، فإن سلوك الشرخ سيتغير.

الجهة التي تحمل بنية أكثر قابلية لتوجيه الشرخ أو أقل قدرة على إيقافه ستكون أكثر عرضة للتمزق، حتى لو لم يكن الفرق في الشد العام كبيرًا جدًا. وهذا يفسر لماذا قد يبدو الفيلم مقبولا في اختبارات بسيطة، لكنه يُظهر ضعفاً واضحاً عند التمزق العرضي من جهة واحدة.

كذلك فإن أي اختلاف في التبلور أو في سرعة التبريد عبر العرض قد يؤدي إلى اختلاف في lamellar structure أو في morphology الموضعية، وهو ما ينعكس لاحقاً على سلوك التمزق.

وبالتالي فإن التحليل البنيوي هنا لا يجوز أن يقف عند سؤال “هل السمك متساوٍ؟” فقط، بل يجب أن يشمل سؤالاً أعمق:

هل الجهتان بُنيتا فعلاً بالأسلوب نفسه من حيث الاتجاهية والتبلور والبنية الدقيقة؟

- تحليل تأثير العملية

في كثير من الحالات، يكون أصل المشكلة في العملية نفسها، لا في الخام. ومن أهم العناصر التي قد تولد لا تماثلاً ثابتاً عبر عرض الفيلم:

تفاوت حراري عبر القالب

عدم تماثل فتحة الشفة أو lip opening

اختلاف التبريد عبر العرض

تغير موضعي في سلوك الهواء أو في ثبات الفقاعة

اختلاف في شد السحب أو في توزيع اللفات

هذه العوامل لا تنتج دائماً عيباً بصرياً صارخاً، لكنها قد تولد بنية مختلفة بين جهة وأخرى. وإذا كانت المادة نفسها ذات هامش أمان محدود أو تحتوي على نسبة من recycled أو filler أو off-grade ، فإن هذا اللاتماثل يصبح أكثر وضوحاً ويتحول إلى فشل فعلي في جهة محددة.

أي أن العملية هنا قد لا تكون سيئة بالمعنى المطلق، لكنها تكشف نقطة ضعف كامنة في الجهة الأقل تحملاً.

- تحليل شكل الفشل

شكل الفشل في هذه الحالة لا يظهر عادة على هيئة كسر موضعي منفرد، بل على هيئة تمزق عرضي يجد في جهة محددة مساراً أسهل للانتشار. وهذا معناه أن العيب لا يتعلق بوجود نقطة واحدة شاذة فقط، بل بطبيعة المنطقة كلها.

وعندما يبدأ التمزق من جهة واحدة باستمرار، فإن هذا يشير إلى أن هذه الجهة تملك:

مقاومة أقل لبداية الشرخ

أو مقاومة أقل لإيقاف امتداده

أو كليهما معاً

وهذا يميزها عن العيوب الناتجة عن contamination أو holes أو gel defects ، لأن تلك العيوب تعطي عادة نقطة بدء معزولة، بينما هنا لدينا سلوك اتجاهي متكرر مرتبط بجانب كامل من الفيلم.

- تفسير سلوك الفشل

الفيلم هنا لا يفشل لأنه ضعيف ميكانيكياً ككل، بل لأنه غير متماثل عبر العرض من حيث مقاومة التمزق. والجهة التي يبدو فيها الفيلم "أسهل تمزقاً" ليست فقط أضعف قليلاً، بل تحتوي على بنية تسمح للشرخ بأن يبدأ ويمتد فيها بسرعة أكبر من الجهة المقابلة.

وقد يكون هذا ناتجاً عن:

فرق ثابت في السمك

فرق في orientation

فرق في morphology

أو عن تفاعل هذه العوامل مع نوع المادة نفسها

ولهذا فإن هذه الحالة يجب أن تُقرأ كحالة interaction between process asymmetry and material response، لا كحالة خام ضعيف فقط ولا كحالة عملية فقط.

- السيناريوهات المحتملة

- السيناريو الأول: تفاوت ثابت في السماكة عبر العرض

مما يجعل جهة معينة أضعف في مقاومة التمزق.

- السيناريو الثاني: تفاوت في orientation بين جهتين

بحيث تصبح إحدى الجهتين أكثر قابلية لتوجيه الشرخ وانتشاره.

- السيناريو الثالث: اختلاف في morphology أو التبلور بسبب تفاوت التبريد

مما يضعف قدرة جهة معينة على مقاومة بدء التمزق.

- السيناريو الرابع: لا تماثل في العملية مع مادة هامش أمانها منخفض

مثل وجود recycled content أو filler أو off-grade، مما يجعل الجهة الأضعف أكثر حساسية من غيرها.

- السيناريو الخامس: تراكب أكثر من عامل

وهو الاحتمال الأكثر واقعية، حيث يوجد تفاوت محدود في العملية، لكنه يتحول إلى فشل فعلي لأن المادة نفسها لا تمتص هذا التفاوت بالقدر الكافي.

- السبب المرجح

بناءً على المعطيات، فإن السبب المرجح هو وجود لا تماثل ثابت عبر عرض الفيلم في واحدة أو أكثر من الخصائص التالية:

السماكة

البنية المورفولوجية

الاتجاهية

أو تاريخ التبريد

مما أدى إلى أن تصبح إحدى الجهتين أقل مقاومة لبدء التمزق وانتشاره من الجهة المقابلة. وقد يكون هذا اللاتماثل ناتجًا عن العملية مباشرة، أو عن تفاعلها مع مادة ذات هامش تحمل أقل.

- حدود الاستنتاج

لا يمكن الجزم النهائي بالعامل المسيطر دون:

mapping دقيق للسماكة عبر العرض

اختبار تمزق عرضي في عدة مواضع

مقارنة الشد والاستطالة عبر العرض

توصيف بنيوي أو حراري لمواضع مختلفة من الفيلم

مراجعة تماثل درجات الحرارة والتبريد عبر القالب

وبدون هذه القراءات، يبقى التحليل قوياً ومقنعاً، لكنه يظل في إطار السبب المرجح لا الإثبات النهائي القاطع.

- التوصيات

إجراء قياس كامل للسماكة عبر العرض، وعدم الاكتفاء بالمتوسط العام للفيلم .

تنفيذ اختبار تمزق عرضي على عينات مأخوذة من الجهة الضعيفة والجهة المقابلة والوسط، وربط النتائج بموضع كل عينة .

مقارنة نتائج الشد والاستطالة عبر العرض للتأكد مما إذا كان الخلل في التمزق فقط أم في الخواص العامة أيضاً .

مراجعة تماثل قالب من حيث الحرارة وفتحة الشفة والتبريد، والتأكد من عدم وجود جهة تعطي تاريخ تشكيل مختلفًا عن الأخرى .

إذا كانت المادة تحتوي على recycled content أو filler أو off-grade ، فيجب تقييم ما إذا كانت هذه التركيبة تقلل هامش الأمان وتُظهر حساسية أعلى للفروق التشغيلية عبر العرض .

تعديل عامل واحد في كل مرة في الخط، حتى يمكن ربط التحسن بسبب محدد بدل إدخال عدة متغيرات معًا .

- الخلاصة

توضح هذه الحالة أن الفيلم قد يبدو جيدًا بصريًا ومقبولًا من حيث السماكة العامة، لكنه يحمل لا تماثلًا حقيقيًا في مقاومة التمزق عبر عرضه. كما تؤكد أن التمزق العرضي ليس مجرد اختبار ميكانيكي ثانوي، بل أداة حساسة تكشف الفروق الدقيقة في البنية والاتجاهية والتبريد عبر العرض.

والخلاصة الأهم أن ثبات جهة الضعف لا ينبغي تفسيره على أنه مصادفة أو عيب موضعي صغير، بل كدليل على أن الفيلم لم يتشكل كبنية متماثلة بالكامل، وأن إحدى الجهتين أصبحت تمثل مسارًا أسهل لبدء الشرخ وانتشاره مقارنة بالجهة المقابلة.

- الخاتمة

تؤكد الحالات العشر المعروضة في هذا الفصل ما تم طرحه في كل من فصل الاختبارات وفصول التصنيع، وهو أن فهم المادة لا يكتمل إلا بربط ثلاثة عناصر معًا:

- نتيجة الاختبار

طريقة التصنيع

وسلوك المنتج النهائي

فقد أظهرت هذه الحالات أن نفس الاختبار، مثل مؤشر الانسياب أو اختبار الشد، لا يمكن تفسيره بشكل صحيح إلا عند ربطه بما يحدث داخل العملية. وكما أشرنا سابقاً، فإن MFI مثلاً لا يعكس فقط سيولة المادة، بل يعكس سلوكها داخل الإكسترودر، واستقرار الجريان، وقدرتها على التوزيع داخل القالب.

كما تبين أن بعض الظواهر لا يمكن تفسيرها من خلال الاختبارات العامة وحدها، لأن العملية نفسها تخلق بنية جديدة داخل المادة، مثل:

الاتجاهية في الأفلام والخيوط

التدرج الحراري عبر السماكة

اختلاف التبريد عبر العرض

أو تكوّن طبقات سطحية مختلفة عن bulk المادة

وهذه البنية لا تظهر دائماً في الاختبارات التقليدية، لكنها تظهر بوضوح في سلوك المنتج.

وكما رأينا في الحالات:

قد يكون الفيلم مقبولاً في الشد، لكنه يفشل في اللحام بسبب السطح

قد يكون الخيط قوياً، لكنه ينكسر بسبب عيب موضعي نشأ في القالب

قد تبدو الحبيبات متجانسة، لكن الاختبار يكشف عدم تجانسها

وقد يكون المنتج سليماً شكلياً، لكنه يحمل ضعفاً بنيوياً ناتجاً عن طريقة التشكيل

وهذا ينسجم مع ما تم التأكيد عليه في فصل التصنيع، من أن المادة تتغير أثناء العملية، وأن المنتج النهائي ليس مجرد انعكاس للخام، بل نتيجة لتاريخ كامل من:

الحرارة

القص

التمدد

التبريد

والتلامس مع الأسطح

ومن أهم ما يمكن استخلاصه من هذا الفصل:

أن الاختبار لا يُفهم دون معرفة العملية

وأن العملية لا تُقَيَّم دون الرجوع إلى الاختبارات

وأن المنتج النهائي هو الحكم الحقيقي على الاثنين معًا

كما يتضح أن التحليل الصحيح لا يبدأ من “ما هي المادة؟” فقط، بل من:

ماذا حدث داخل الخط؟

كيف تصرفت المادة تحت هذه الظروف؟

وكيف انعكس ذلك على النتيجة النهائية؟

وهذا هو جوهر الربط الذي تم بناؤه في هذا الكتاب:

أن البوليمر لا يُفهم في المختبر فقط، ولا في الماكينة فقط، بل في العلاقة بينهما.

وفي النهاية، فإن القيمة الحقيقية لهذه الحالات لا تكمن في الحلول الفردية، بل في المنهج الذي يربط:

الاختبار - العملية - السلوك

وهو المنهج الذي يمكن تطبيقه على أي مشكلة صناعية أخرى، مهما اختلفت تفاصيلها، طالما تم التعامل معها كجزء من نظام متكامل، لا كعنصر منفصل.

- الملحق الثاني

- من سلوك المنتج إلى سلوك السلسلة الجزئية: قراءة البنية، الاختبارات، وخريطة القرار الصناعي

عندما يقف المصنع أمام المنتج البلاستيكي بعد خروجه من خط الإنتاج، فإنه غالبا ما يصفه بلغة مباشرة تعتمد على الملاحظة: هذا منتج صلب، هذا مرن، هذا يتحمل الشد، هذا ينكسر بسرعة، هذا يحافظ على أبعاده، وذلك يتشوه بعد التبريد. هذه اللغة، رغم بساطتها وفعاليتها في بيئة العمل اليومية، تحمل في داخلها اختزالا يبعدنا عن الفهم الحقيقي لسلوك المادة. فالمنتج النهائي لا يعكس نوع المادة فقط، بل يعكس تاريخا كاملا من التحولات التي مرت بها هذه المادة منذ دخولها في الحالة المنصهرة وحتى لحظة تجمدها. إن ما نراه من صلابة أو مرونة أو هشاشة ليس خاصية خامة بقدر ما هو نتيجة لمسار تشكل داخلي، سجلت فيه السلاسل الجزئية كل ما تعرضت له من حرارة وقص وضغط وشد وتمدد، ثم جمد هذا السجل في لحظة فقدان القدرة على إعادة الترتيب.

المادة البلاستيكية لا تعبر خط الإنتاج كما دخلته، بل يعاد تشكيل بنيتها بشكل مستمر داخل الماكينة. السلاسل الجزئية تتحرك، تنزلق، تتشابك، وتتمدد، ثم تصل إلى لحظة تتوقف فيها هذه الحركة. في تلك اللحظة لا يتجمد الشكل فقط، بل تتجمد البنية الداخلية التي ستحدد سلوك المنتج طوال عمره. ومن هنا، لا يمكن تفسير الصلابة أو المرونة باعتبارها خصائص ثابتة للمادة، بل يجب قراءتها كنتيجة لمسار الحركة والتبريد الذي مرت به السلاسل. المنتج الصلب هو الذي أصبحت فيه حركة السلاسل مقيدة بعد التجميد بحيث لا تسمح إلا بتشوه محدود، بينما المنتج المرن هو الذي احتفظت بنيته بقدرة على إعادة توزيع الإجهاد. وبذلك يتحول السؤال من "ما هي المادة" إلى "ماذا حدث للسلسلة الجزئية قبل أن تتجمد."

هذا الفهم يصبح أكثر وضوحا عند مقارنة طرق التشكيل المختلفة، حيث يتغير شكل الحركة قبل التجميد، فتتغير البنية، وبالتالي يتغير السلوك النهائي حتى لو كانت المادة نفسها. ولتحويل هذا المفهوم إلى أداة عملية يمكن الرجوع إليها داخل المصنع، يمكن تلخيص العلاقة بين نوع العملية، شكل حركة السلاسل، والبنية الناتجة كما يلي:

هذا الفهم لا يكتمل إلا بربطه بالاختبارات، حيث لا ينبغي قراءة النتائج كأرقام منفصلة، بل كأدوات لفهم هذا التاريخ الداخلي، كما تم تفصيله في فصل الاختبارات. ويمكن تلخيص هذا الربط كما يلي:

نوع المنتج	شكل الحركة قبل التجميد	حالة السلاسل الجزيئية	نوع البنية الناتجة	السلوك النهائي
منتجات صلبة ميثوقة	جريان + سحب محدود + تبريد	سلاسل شبه عشوائية مع تقييد تدريجي	بنية متجانسة نسبيا مع إجهادات محتملة	صلابة عالية مع احتمال تشوه لاحق
فيلم	جريان + تمدد	إعادة ترتيب وتوجه جزئي	بنية اتجاهية	مرونة ظاهرية مع اختلاف خواص حسب الاتجاه
مونوفيلامنت / شبك	جريان + سحب قوي	توجيه عالي للسلاسل	بنية موجهة بشدة	شد عالي اتجاهي وضعف عرضي
حقن	جريان داخل قالب + ضغط	طبقات سطح/قلب	بنية غير متجانسة	صلابة جيدة مع إجهادات داخلية
نفخ	تمدد غشائي	استطالة غير متوازنة	توزيع سماكة غير متجانس	حساسية للترقق
القولبة الدورانية	ذوبان + انتشار	حركة بطيئة	التحام تدريجي	جودة مرتبطة بمدى الاندماج
تشكيل حراري	تسخين + تمدد	انزلاق ضمن نافذة حرارية	إعادة توزيع السماكة	تفاوت محتمل في السماكة

من هذا الجدول يتضح أن نفس المادة يمكن أن تعطي سلوكا مختلفا تماما حسب مسار التشكيل، فالبولي إيثيلين قد يظهر كفيلم مرن، أو كأنبوب شبه صلب، أو كمونوفيلامنت عالي الشد، دون أن يتغير كيميائيا، بل لأن مسار الحركة قبل التجميد تغير. وهذا يقود إلى فهم أعمق لما يحدث داخل كل عملية.

في البثق، تخرج المادة من بيئة ضغط إلى بيئة مفتوحة، وهنا تظهر أهمية قوة المصهور، إذ يجب على المادة أن تحمل نفسها قبل أن تتجمد. في الفيلم، يتم تمديد المصهور قبل تثبيته، مما يخلق بنية اتجاهية. في المونوفيلامنت، يتم توجيه السلاسل بشكل قوي، فتزداد المقاومة في اتجاه واحد. في الحقن، يعتمد النجاح على قدرة المصهور على نقل الضغط بعد الملء. في النفخ، يتم اختبار قدرة السلاسل على الاستطالة. في التشكيل الدوراني، يكون الاندماج هو العامل الحاسم. وفي التشكيل الحراري، تتحكم النافذة الحرارية في إمكانية التمدد.

و عند ظهور عيب في المنتج، فإنه لا يكون مجرد خلل عشوائي، بل هو رسالة تصف نوع الفشل في سلوك السلسلة الجزيئية. ويمكن تحويل هذه الرسائل إلى خريطة قرار عملية تربط الظاهرة بالسبب البنيوي كما يلي:

الظاهرة في المنتج	ما تقوله عن السلاسل	التفسير البنيوي	اتجاه الحل
فقدان الشكل بعد الداي	سلاسل قصيرة أو تشابك ضعيف	ضعف قوة المصهور	اختيار مادة أقل سيولة أو توزيع أوسع
هبوط أو فراغات	المصهور يفقد حيويته مبكرا	توقف نقل الضغط	تعديل الضغط التعويضي أو المادة
تشوه بعد التبريد	إجهادات داخلية محبوسة	تجمد غير متوازن	تحسين التبريد أو تغيير الصنف
ترقق في النفخ	ضعف مقاومة الشد	استطالة غير متوازنة	رفع قوة المصهور
تمزق في الفيلم	توزيع غير متساو للسلاسل	اتجاهية غير متوازنة	ضبط نسب السحب
مسامية في الالقولبة الدورانية (Rotational Molding)	سلاسل لا تتحرك بسهولة	عدم اكتمال الاندماج	اختيار مادة مناسبة للجريان الهادئ
تفاوت في التشكيل الحراري	نطاق حراري ضيق	خروج من النافذة اللدنة	تعديل التسخين أو المادة

وبهذا الشكل يتحول العيب من مشكلة سطحية إلى مؤشر مباشر على سلوك البنية. وهنا يظهر الفرق بين مصنع يعمل بالتجربة وآخر يعمل بالفهم؛ الأول يغير الحرارة والسرعة حتى تختفي المشكلة، بينما الثاني يقرأ المشكلة كلغة تصف البنية.

هذا الفهم لا يكتمل إلا بربطه بالاختبارات، حيث لا ينبغي قراءة النتائج كأرقام منفصلة، بل كأدوات لفهم هذا التاريخ الداخلي، كما تم تفصيله في فصل الاختبارات. ويمكن تلخيص هذا الربط كما يلي:

الاختبار	ما يقيس ظاهريا	ما يكشفه فعليا	الدلالة الصناعية
MFI	السيولة	طول السلاسل	مؤشر أولي فقط
الشد	القوة والاستطالة	تقييد السلاسل	مرتبط بالتبريد والتوجه
التمزق	مقاومة القطع	الاتجاهية	مهم في الفيلم
الصدمة	امتصاص الطاقة	حرية الحركة	مؤشر على المتانة
الكثافة	تركيب مادي	التبلور	مرتبط بالتبريد

الانكماش	تغير الأبعاد	سلوك التصلب	مرتبط بزمان التجميد
----------	--------------	-------------	---------------------

وعند الانتقال من مستوى المنتج إلى مستوى المصنع، يظهر مفهوم أشمل وهو نافذة التشغيل، وهي المجال الذي تعمل ضمنه العملية بثبات نتيجة توازن بين البنية الجزيئية وسلوك المصهور وظروف التشغيل. فنجاح الخط لا يعتمد فقط على ضبط الحرارة أو السرعة، بل على بقاء جميع العوامل ضمن نطاق يسمح للجريان بأن يكون مستقرا، والتبريد أن يكون متوازنا، والبنية أن تتشكل بشكل صحيح.

هذا النطاق يتأثر بشكل مباشر بنوع العملية، ويمكن مقارنة حساسية كل عملية لعوامل التشغيل كما يلي:

العملية	حساسية اللزوجة	الحاجة لقوة المصهور	حساسية التبريد	عرض نافذة التشغيل
البثق	متوسطة	عالية	متوسطة	متوسطة
الفيلم	عالية	عالية جدا	عالية	ضيقة
المونوفيلمنت	عالية	عالية جدا	متوسطة	ضيقة
الحقن	عالية	منخفضة نسبيا	عالية	متوسطة
النفخ	متوسطة	عالية	عالية	متوسطة
الالقولبة الدورانية (Rotational Molding)	منخفضة	منخفضة	عالية	واسعة نسبيا
التشكيل الحراري	متوسطة	متوسطة	عالية جدا	ضيقة

وعندما يقترب الخط من حدود هذه النافذة، تبدأ إشارات مبكرة في الظهور مثل تذبذب الضغط، تغير استهلاك الطاقة، أو ظهور عيوب سطحية. هذه ليست مشاكل بحد ذاتها، بل إنذارات على أن التوازن بدأ يختل. وفي الوقت نفسه، فإن رفع الإنتاجية يعني غالبا الاقتراب من هذه الحدود، مما يجعل التشغيل المستقر نتيجة فهم عميق لسلوك المادة وليس مجرد ضبط عشوائي للبارامترات.

في النهاية، تكتمل الصورة عندما ندرك أن ما يحدث داخل المصنع ليس مجرد تشغيل آلات، بل هو تفاعل مستمر بين السلاسل الجزيئية وظروف العملية. الحبيبات ليست مادة خاما محايدة، بل نظام ديناميكي يتغير مع كل خطوة. وما يبدو كمنتج صلب أو مرن هو في الحقيقة سجل داخلي لمسار هذه السلاسل قبل أن تتجمد. فهم هذا السجل هو ما يحول الصناعة من تجربة إلى علم، ومن تشغيل إلى تحكم، ومن إنتاج إلى إتقان.

الملحق الثالث : قاموس المصطلحات الصناعية

- مصطلحات أساسيات البوليمر

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
البوليمر	Polymer	مادة تتكون من سلاسل جزئية طويلة تحدد خواص البلاستيك وسلوكه أثناء التشغيل.
المونومر	Monomer	الوحدة الصغيرة التي تتكرر لتكوين البوليمر.
البلمرة	Polymerization	التفاعل الكيميائي الذي يربط المونومرات لتكوين السلاسل البوليمرية.
الوزن الجزيئي	Molecular Weight	مقياس طول السلسلة ويؤثر على القوة واللزوجة.
التوزيع الجزيئي	MWD	تنوع أطوال السلاسل وهو العامل الأهم في نافذة التشغيل.
التشابك الجزيئي	Chain Entanglement	تداخل السلاسل ويعطي قوة الانصهار والمتانة.
التفرع الجزيئي	Chain Branching	سلاسل جانبية تؤثر على الكثافة والجريان.

- الخواص الحرارية والبنوية

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
درجة الانصهار	Tm	درجة حرارة انصهار المناطق المتبلورة.
درجة الانتقال الزجاجي	Tg	التحول من الحالة الصلبة إلى المطاطية.
التبلور	Crystallinity	ترتيب السلاسل في بنية منتظمة يزيد الصلابة والكثافة.
الطور غير المتبلور	Amorphous Phase	مناطق عشوائية تعطي مرونة وشفافية.
الكثافة	Density	مؤشر على درجة التبلور وتركيب المادة.

- تصنيف البوليمرات

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
الثرمو بلاستيك	Thermoplastics	مواد يمكن صهرها وإعادة تشكيلها.
الثيرموست	Thermosets	مواد تتشابك كيميائيا ولا يمكن إعادة صهرها.
الإلاستومر	Elastomer	بوليمر مرن يعود لشكله بعد التثوه.

- الريولوجيا وسلوك المصهور

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
الريولوجيا	Rheology	علم دراسة جريان المصهور البوليمري.
اللزوجة	Viscosity	مقاومة المصهور للجريان.
القص	Shear	انزلاق طبقات المصهور فوق بعضها أثناء الجريان.
معدل القص	Shear Rate	سرعة الجريان داخل القناة.
إجهاد القص	Shear Stress	القوة التي تسبب الجريان.
التخفف بالقص	Shear Thinning	انخفاض اللزوجة مع زيادة سرعة الجريان.
اللزوجة الاستطالية	Extensional Viscosity	مقاومة المصهور للتمدد (مهم للفيلم والنفخ).
قوة الانصهار	Melt Strength	قدرة المصهور على تحمل الشد دون انقطاع.
الاسترخاء الجزيئي	Molecular Relaxation	عودة السلاسل لوضعها الطبيعي بعد الإجهاد.
زمن الاسترخاء	Relaxation Time	الزمن اللازم لفقد تأثير الإجهاد.
انتفاخ القالب (Die)	Die Swell	زيادة قطر المصهور بعد خروجه من القالب.

- التاريخ الحراري :

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
التاريخ الحراري	Thermal History	كل التعرضات الحرارية التي مرت بها المادة.
زمن المكوث	Residence Time	مدة بقاء المصهور داخل الماكينة.
التحلل الحراري	Thermal Degradation	تكسير السلاسل بسبب الحرارة.
الأكسدة الحرارية	Thermal Oxidation	تفاعل البوليمر مع الأكسجين عند الحرارة.
الثبات الحراري	Thermal Stability	قدرة المادة على مقاومة التحلل.

- مفاهيم تشغيلية

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
نافذة التشغيل	Processing Window	مجال التشغيل المستقر للمادة.
الاستقرار التشغيلي	Process Stability	ثبات العملية بدون تذبذب.
تاريخ الجريان	Flow History	المسار الذي سلكه المصهور داخل الماكينة.

- مصطلحات البثق

المصطلح	English	الشرح المبسط
Injection) (Mould	Extruder	ماكينة صهر ودفع البوليمر عبر القالب (Die).
البرغي	Screw	ينقل ويصهر ويضغط المادة.

المصطلح	English	الشرح المبسط
نسبة L/D	L/D Ratio	تحدد قدرة الصهر والخلط.
القالب (Die)	Die	القالب الذي يعطي الشكل النهائي.
المعايرة	Calibration	تثبيت الأبعاد بعد القالب (Die).
السحب	Haul-off	شد المنتج لتثبيت القياسات.
التجميد	Solidification	تحول المصهور إلى صلب.
الاستقرار البعدي	Dimensional Stability	ثبات الأبعاد بعد التبريد.

- مصطلحات الحقن

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
مرحلة الملء	Filling Phase	دخول المصهور إلى القالب.
نقطة التحويل	V/P Switchover	التحول من السرعة إلى الضغط.
الضغط التعويضي	Packing / Holding	تعويض الانكماش داخل القالب.
تجمد البوابة	Gate Freeze	توقف دخول المادة إلى القالب.
الانكماش	Shrinkage	نقص الحجم أثناء التبريد.
الإجهادات الداخلية	Internal Stresses	إجهادات تسبب الالتواء.
خطوط الالتحام	Weld Lines	منطقة التقاء جبهي جريان.

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
الزوائد	Flash	خروج المادة من خط الفصل.
عدم اكتمال الملء	Short Shot	عدم وصول المصهور لكل القالب.

- مصطلحات الفيلم

المصطلح	English	الشرح المبسط
الفقاعة	Bubble	المصهور المتمدد بالهواء.
نسبة النفخ	BUR	نسبة قطر الفقاعة إلى القالب Die
نسبة السحب	DDR	نسبة الشد الطولي.
خط التجمد	Frost Line	نقطة تحول المصهور إلى صلب.
استقرار الفقاعة	Bubble Stability	ثبات الفقاعة أثناء التشغيل.
التوجه الجزيئي	Molecular Orientation	ترتيب السلاسل بسبب الشد.

- مصطلحات النفخ

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
الباريسون	Parison	الأنبوب المصهور قبل النفخ.
برمجة السماكة	Parison Programming	التحكم في توزيع السماكة.
ذاكرة الانصهار	Melt Memory	قدرة المصهور على الاحتفاظ بشكله.

- مصطلحات الروتيشن القولية الدورانية (Rotational Molding)

المصطلح	English	الشرح المبسط
المسحوق	Powder	شكل المادة المستخدم في الروتيشن.
التلبيد	Sintering	التحام الجزيئات بالحرارة.
بناء الجدار	Wall Formation	تكون سماكة المنتج تدريجيا.

- مصطلحات التحضير التركيبي (Compounding)

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
الماستر باتش	Masterbatch	مركز إضافات داخل حامل بوليمري.
التشتت	Dispersion	توزيع الإضافات داخل البوليمر.

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
الخلط	Mixing	تجانس المادة.
موسعات السلسلة	Chain Extenders	تعيد بناء الوزن الجزيئي.

- مصطلحات إعادة التدوير

المصطلح	English	الشرح المبسط
الفرز	Sorting	فصل المواد حسب النوع.
الفرز من المصدر	Source Separation	فصل المخلفات قبل وصولها للمصنع.
الغسيل	Washing	إزالة الملوثات.
التجفيف	Drying	إزالة الرطوبة.
الفلتر	Melt Filtration	إزالة الشوائب من المصهور.
البثق التفاعلي	Reactive Extrusion	إعادة بناء البنية الجزيئية داخل Injection Mould.
PCR	Post Consumer Recyclate	مادة معاد تدويرها بعد الاستخدام.
البصمة الكربونية	Carbon Footprint	كمية الانبعاثات المرتبطة بالإنتاج.
الغازات الدفيئة	Greenhouse Gases	الغازات المسببة للاحتباس الحراري.

- مصطلحات الصناعة الحديثة

المصطلح العربي	English	الشرح المبسط
منصة المواد	Material Platform	نظام إنتاج عائلات مواد بثبات تشغيلي.
العائلة البنيوية للمادة	Structural Material Family	مواد لها نفس نافذة التشغيل رغم اختلاف المصدر.
السيادة المادية	Material Sovereignty	القدرة على تأمين المواد صناعيا داخل الدولة.
إدارة الطاقة المتجسدة	Embodied Energy Management	التحكم في الطاقة المخزنة دا

الملحق الرابع رموز تعريف البوليمرات على المنتجات البلاستيكية

Plastic Resin Identification Codes

- المقدمة

يلاحظ على عدد كبير من المنتجات البلاستيكية وجود رمز صغير غالباً ما يكون في أسفل المنتج أو على جانبه، يتكون من مثلث مكوّن من ثلاثة أسهم متتابعة، يتوسطه رقم يتراوح عادة بين 1 و7. هذا الرمز أصبح مألوفاً للمستهلكين حول العالم، ويرتبط في أذهان كثير منهم بمفهوم إعادة التدوير، إلا أن معناه الحقيقي في الصناعة أكثر تحديداً ودقة.

- هذا الرمز يُعرف باسم:

Resin Identification Code (RIC)

أي رمز تعريف الراتنج البلاستيكي.

تم تطوير هذا النظام في الولايات المتحدة عام 1988 بواسطة جمعية صناعة البلاستيك الأمريكية Society of the Plastics Industry (SPI)، والتي تعرف اليوم باسم Plastics Industry Association. وقد جاء هذا النظام استجابة للحاجة المتزايدة إلى تنظيم عملية فرز النفايات البلاستيكية التي بدأت تنزايد بشكل كبير مع توسع استخدام البلاستيك في الصناعات الغذائية والدوائية والاستهلاكية.

الهدف الأساسي من هذا النظام ليس إعلام المستهلك فقط، بل تسهيل عمليات الفرز في مصانع إعادة التدوير، حيث يساعد العاملين في تلك المصانع على التعرف بسرعة على نوع البوليمر المستخدم في المنتج، وبالتالي توجيهه إلى خط المعالجة المناسب.

قبل اعتماد هذا النظام كانت المنتجات البلاستيكية المختلفة تختلط مع بعضها في تيار النفايات، مما كان يؤدي إلى صعوبة كبيرة في إعادة التدوير، لأن خلط البوليمرات المختلفة غالباً ما يؤدي إلى تدهور الخواص الميكانيكية والحرارية للمواد المعاد تدويرها.

وبذلك أصبح رمز التعريف وسيلة بسيطة وفعالة لتصنيف المواد البلاستيكية في مرحلة ما بعد الاستهلاك.

الشكل العام لرمز التعريف

يتكون رمز تعريف البلاستيك عادة من ثلاثة عناصر رئيسية:

- مثلث مكوّن من ثلاثة أسهم تشير إلى مفهوم إعادة التدوير
- رقم في وسط المثلث يحدد نوع البوليمر
- اختصار اسم البوليمر أحيانًا أسفل المثلث

الأرقام المستخدمة في هذا النظام تتراوح من 1 إلى 7، حيث يمثل كل رقم نوعًا معينًا من البوليمرات أو مجموعة من البوليمرات.

من المهم التأكيد على أن هذا الرمز لا يعني بالضرورة أن المنتج قابل لإعادة التدوير فعليًا في جميع الدول، بل يشير فقط إلى نوع المادة البلاستيكية المستخدمة في تصنيع المنتج. قابلية إعادة التدوير تعتمد على عدة عوامل إضافية مثل توفر البنية التحتية لجمع وفرز النفايات، وجود مصانع إعادة تدوير مناسبة، ومدى تلوث المنتج بعد الاستخدام.

- أهمية النظام في الصناعة

تلعب رموز تعريف البلاستيك دورًا مهمًا في عدة مجالات صناعية وبيئية، من أهمها:

- تسهيل عمليات فرز النفايات البلاستيكية
- تحسين جودة المواد المعاد تدويرها
- تقليل خلط البوليمرات غير المتوافقة
- دعم أنظمة الاقتصاد الدائري
- تسهيل عمليات إدارة النفايات الصناعية

خلط البوليمرات المختلفة دون فرز دقيق قد يؤدي إلى مشكلات صناعية عديدة، مثل ضعف الخواص الميكانيكية، عدم تجانس المنتج النهائي، انخفاض مقاومة الصدمات، أو ظهور عيوب أثناء عمليات البثق والحقن.

على سبيل المثال، وجود نسبة صغيرة من PVC في تيار إعادة تدوير PET قد يؤدي إلى تحلل حراري شديد أثناء المعالجة بسبب اختلاف درجات التحلل الحراري بين البوليمرين.

كما أن خلط PET مع البولي أوليفينات مثل البولي إيثيلين أو البولي بروبيلين يؤدي إلى ضعف الترابط بين المراحل البوليمرية بسبب عدم التوافق بين هذه المواد.

- التصنيف القياسي للبوليمرات

يقسم نظام رموز تعريف البلاستيك المواد البلاستيكية إلى سبع فئات رئيسية.

الرمز 1

PETE أو PET Polyethylene Terephthalate

يعد PET من أكثر البوليمرات استخدامًا في صناعة العبوات الغذائية. يتميز هذا البوليمر بشفافيته العالية وقوته الميكانيكية الجيدة ومقاومته النسبية لنفاد الغازات.

يستخدم PET على نطاق واسع في تصنيع زجاجات المياه المعدنية، عبوات المشروبات الغازية، عبوات الزيوت الغذائية، وعبوات العديد من المنتجات الغذائية.

كما يعد PET من أكثر أنواع البلاستيك التي يتم إعادة تدويرها عالميًا. بعد إعادة التدوير يمكن تحويله إلى ألياف صناعية تستخدم في صناعة الأقمشة والسجاد، أو إلى حبيبات بلاستيكية تستخدم في تصنيع منتجات جديدة.

الرمز 2

HDPE High Density Polyethylene

البولي إيثيلين عالي الكثافة هو أحد أكثر البوليمرات استخدامًا في التطبيقات الصناعية والاستهلاكية. يتميز هذا البوليمر بمقاومته العالية للمواد الكيميائية وصلابته الجيدة ومقاومته للرطوبة.

يستخدم HDPE في تصنيع عبوات الحليب، عبوات المنظفات، جالونات المواد الكيميائية، أنابيب المياه، وصناديق النقل البلاستيكية.

يتميز هذا البوليمر أيضًا بقابليته الجيدة لإعادة التدوير، ولذلك يعد من المواد الشائعة في صناعة إعادة تدوير البلاستيك.

الرمز 3

PVC Polyvinyl Chloride

PVC هو بوليمر يحتوي في تركيبه الكيميائي على عنصر الكلور، ويستخدم في العديد من التطبيقات الهندسية والإنشائية. من أهم استخداماته أنابيب المياه والصرف الصحي، الكابلات الكهربائية، الأرضيات البلاستيكية، وبعض تطبيقات التغليف.

يمكن إنتاج PVC بنوعين رئيسيين PVC: الصلب الذي يستخدم في الأنابيب والقطاعات الهندسية، و PVC المرن الذي يتم الحصول عليه بإضافة مواد ملدنة تزيد من مرونة البوليمر.

إعادة تدوير PVC أكثر تعقيداً مقارنة ببعض البوليمرات الأخرى بسبب احتوائه على الكلور والإضافات المختلفة.

الرمز 4

LDPE Low Density Polyethylene

البولي إيثيلين منخفض الكثافة يتميز بمرونة عالية وقدرة جيدة على التمدد، ولذلك يستخدم بشكل واسع في صناعة الأفلام البلاستيكية والأكياس.

تشمل تطبيقاته الأكياس البلاستيكية، أفلام التغليف، الأغلفة الزراعية، وبعض العبوات القابلة للعصر.

إعادة تدوير LDPE ممكنة تقنياً، لكنها تعتمد على وجود نظام فعال لجمع وفرز الأفلام البلاستيكية.

الرمز 5

PP Polypropylene

البولي بروبيلين من أكثر البوليمرات انتشاراً في الصناعات البلاستيكية الحديثة. يتميز بمقاومة حرارية جيدة وكثافة منخفضة وصلابة ميكانيكية مناسبة.

يستخدم PP في تصنيع علب الطعام، أغطية الزجاجات، الأدوات المنزلية، المنتجات الطبية، وبعض أجزاء السيارات.

في السنوات الأخيرة توسعت عمليات إعادة تدوير البولي بروبيلين مع تطور تقنيات الفرز والمعالجة.

الرمز 6

PS Polystyrene

البولي ستايرين يستخدم في عدة أشكال، منها الشكل الصلب والشكل الرغوي.

تشمل تطبيقاته أكواب الطعام، علب الوجبات السريعة، مواد العزل الحراري، والرغوة البلاستيكية المعروفة تجاريًا باسم Styrofoam.

على الرغم من استخدامه الواسع، فإن إعادة تدوير البولي ستايرين ما زالت محدودة اقتصاديًا في العديد من الدول.

الرمز 7

OTHER

يشمل هذا التصنيف جميع المواد البلاستيكية التي لا تندرج ضمن الأنواع الستة السابقة. ومن الأمثلة على ذلك:

● Polycarbonate

● ABS

● Nylon

● PLA

● البوليمرات المركبة

● المخاليط البوليمرية

وجود الرقم 7 لا يعني أن المادة غير قابلة لإعادة التدوير، بل يعني فقط أنها لا تنتمي إلى الفئات الست القياسية للنظام.

- حدود نظام الرموز

على الرغم من أهمية نظام رموز تعريف البلاستيك، إلا أنه لا يوفر جميع المعلومات المتعلقة بالمادة البلاستيكية. فالنظام لا يحدد درجة البوليمر، ولا يوضح نوع الإضافات المستخدمة، ولا يشير إلى ما إذا كانت المادة تحتوي على مواد معاد تدويرها.

كما أن هذا النظام لا يحدد التطبيقات المناسبة للمادة أو ظروف تشغيلها الصناعية.

لهذا السبب لا يعتمد المهندسون في الصناعة على هذا الرمز وحده لتحديد نوع المادة، بل يستخدمون اختبارات وتحاليل مخبرية أكثر دقة.

- طرق التعرف الصناعي على البوليمرات

في التطبيقات الصناعية تستخدم عدة تقنيات للتعرف على نوع البوليمر بدقة أكبر، مثل اختبار الكثافة، واختبار الاحتراق، والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء FTIR ، والتحليل الحراري مثل DSC و TGA. هذه الطرق تسمح بتحديد نوع البوليمر حتى في حالة عدم وجود رمز التعريف على المنتج.

- دور الرموز في منظومة الاقتصاد الدائري

تلعب رموز تعريف البلاستيك دورًا مهمًا في دعم مفهوم الاقتصاد الدائري الذي يهدف إلى تقليل النفايات وإعادة استخدام الموارد قدر الإمكان.

تساعد هذه الرموز في تسهيل عمليات جمع النفايات وفرزها وإعادة معالجتها، مما يسمح بإعادة إدخال المواد البلاستيكية في دورة الإنتاج مرة أخرى بدلاً من التخلص منها.

لكن نجاح هذه المنظومة يعتمد على عدة عوامل مثل توفر البنية التحتية لإدارة النفايات، ووعي المستهلكين، والتصميم الصناعي المناسب للمنتجات البلاستيكية.

- المفاهيم الخاطئة الشائعة

هناك عدد من المفاهيم الخاطئة المرتبطة برموز تعريف البلاستيك. من أكثرها انتشارًا الاعتقاد بأن وجود رمز المثلث يعني أن المنتج قابل لإعادة التدوير بالضرورة. في الواقع هذا الرمز يشير فقط إلى نوع المادة وليس إلى قابلية إعادة التدوير الفعلية.

كما يعتقد البعض أن الرقم الموجود داخل المثلث يشير إلى جودة البلاستيك أو درجة أمانه الصحي، بينما هو في الحقيقة مجرد رمز تصنيفي للبوليمر المستخدم.

- الخلاصة

تمثل رموز تعريف البوليمرات نظامًا عالميًا بسيطًا لكنه مهم في صناعة البلاستيك وإدارة النفايات. فهي تساعد على تصنيف المواد البلاستيكية وتسهيل عمليات الفرز وإعادة التدوير، مما يساهم في تحسين كفاءة استخدام الموارد وتقليل الأثر البيئي للنفايات البلاستيكية.

ومع ذلك فإن هذا النظام يمثل أداة تعريف أولية فقط، ولا يغني عن التحليل الصناعي الدقيق عند الحاجة إلى تحديد نوع البوليمر أو خصائصه بشكل تفصيلي .

- خاتمة الملاحق

تُظهر هذه الملاحق، على اختلاف محاورها، أن فهم البوليمرات لا يكتمل من خلال مسار واحد، بل من خلال القدرة على النظر إلى المادة من أكثر من زاوية مترابطة.

فالملاحق الأول يبيّن أن العيب الصناعي ليس حدثًا منفصلاً، بل نتيجة لمسار كامل يمكن تتبعه من المنتج إلى البنية.

والملاحق الثاني يوضح أن هذا المسار يمكن قراءته أيضًا بالعكس، حيث يقود سلوك المنتج إلى فهم السلسلة الجزئية، ومن ثم إلى اتخاذ القرار الصناعي.

أما الملحق الثالث، فيؤكد أن هذا الفهم يحتاج إلى لغة دقيقة مشتركة، تضمن أن ما يُقال في المختبر يُفهم في المصنع، وما يُكتب في الموصفات يتحول إلى سلوك قابل للتطبيق.

بينما يعيد الملحق الرابع ربط هذه المعرفة كلها بوجودها في المنتج النهائي، حيث تظهر المادة ضمن نظام يشمل التصنيف والاستخدام وإعادة التدوير.

وعند جمع هذه المحاور معًا، يتضح أن المادة لا تُفهم من خلال خاصية واحدة، ولا من خلال مرحلة واحدة، بل من خلال منظومة مترابطة تجمع بين:

- البنية
- والاختبار
- والعملية
- والتطبيق

وهذا يعيدنا إلى الفكرة الأساسية التي قام عليها هذا الكتاب:

أن البوليمر ليس مجرد مادة تُشكّل، بل نظام يتغير عبر كل مرحلة، ويُقرأ من خلال كل سلوك يظهر عليه. ولهذا فإن هذه الملاحق لا تمثل نهاية للكتاب، بل امتدادًا عمليًا له. فهي لا تضيف معلومات منفصلة، بل تعيد تنظيم ما تم بناؤه في الفصول ضمن أدوات يمكن الرجوع إليها عند الحاجة، سواء في تحليل مشكلة، أو في اتخاذ قرار، أو في تفسير سلوك مادة في تطبيق معين.

وفى النهاية، يبقى الهدف واحدًا:

- أن ينتقل القارئ من معرفة ما يحدث... إلى فهم لماذا يحدث...
- ومن التعامل مع النتائج... إلى القدرة على التأثير في أسبابها.

- المراجع العلمية (Scientific References)

Paul J. Flory. Principles of Polymer Chemistry. Cornell University Press, 1953.

George Odian. Principles of Polymerization. 4th Edition, Wiley, 2004.

J. M. G. Cowie & Valeria Arrighi. Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials. CRC Press, 2007.

Joel R. Fried. Polymer Science and Technology. 3rd Edition, Prentice Hall, 2014.

Tim A. Osswald & Georg Menges. Materials Science of Polymers for Engineers. Hanser Publishers, 2012.

Michael Rubinstein & Ralph H. Colby. Polymer Physics. Oxford University Press, 2003.

Zehev Tadmor & Costas Gogos. Principles of Polymer Processing. Wiley, 2006.

Tim A. Osswald. Polymer Processing: Fundamentals. Hanser Publishers, 2006.

Chris Rauwendaal. Polymer Extrusion. Hanser Publishers, 2014.

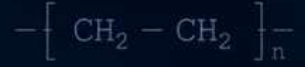
Malcolm M. Macosko. Rheology: Principles, Measurements and Applications. Wiley, 1994.

J. M. Dealy & Ronald G. Larson. Structure and Rheology of Molten Polymers. Hanser Publishers, 2006.

IUPAC. Compendium of Polymer Terminology and Nomenclature. IUPAC, 2009.

John Rumble (Editor). CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, 2023.

هذا الكتاب



هذا الكتاب ليس عرضاً نظرياً لصناعة البلاستيك، بل هو محاولة لبناء فهم متكامل يربط بين العلم والتطبيق، بين ما يحدث على مستوى الجزيء وما يظهر داخل خطوط الإنتاج.

ينطلق الكتاب من المصدر الأول للبولىميرات، مروراً بالمونومرات ومليات البلمرة، ثم ينتقل إلى البنية الجزيئية وتأثيرها المباشر على الخواص وسلوك المصهور، ليصل إلى مرحلة التركيب والإضافات بوصفها أداة تصميم حقيقية للمادة، وليس مجرد تحسين ثانوي.

وفي قلب هذا العمل، يتم التعامل مع التصنيع بوصفه منظومة متكاملة، حيث لا يُنظر إلى البثق أو الحقن أو النفخ كعمليات تشغيل منفصلة، بل كترجمة مباشرة لسلوك البولىمر تحت ظروف الجريان والتبريد وثبيت الأبعاد. كما يُعاد تعريف دور المختبر من كونه جهة فحص تقليدية إلى مركز لاتخاذ القرار الصناعي، يربط بين النتائج والواقع التشغيلي داخل المصنع.

لا يكتفي الكتاب بعرض المفاهيم، بل يقدم منهجاً عملياً لتحليل المشكلات الصناعية، وفهم أسباب العيوب، وربطها بالبنية والريولوجيا وظروف التشغيل، وصولاً إلى اختبار الحلول المناسبة على أسس علمية واضحة.

ويمتد هذا المسار ليشمل مرحلة إعادة التدوير، ليس كخيار بيئي فقط، بل كجزء أساسي من دورة حياة المادة، له تحدياته التقنية وقراراته الصناعية الخاصة.

هذا الكتاب موجّه لكل من يعمل في هذا المجال أو يسعى لفهمه بعمق.

