

جهاز Foam Meter: نظام تقييم جودة رغوة البولي يوريثان

(قياس معايير الجودة أثناء عملية تكوين الرغوة)

حول جهاز Foam Meter ومراقبة جودة رغوة البولي يوريثان:

يتزايد الطلب من العملاء الرئيسيين في صناعة البولي يوريثان، مثل مصنعي قطع غيار السيارات (المقاعد، لوحات القيادة وغيرها)، ومصنعي الأثاث، ومنتجي الثلجات ومواد العزل المستخدمة في المباني، على ضمان جودة المنتجات واستقرارها. وفي الوقت نفسه، تُلزم شركات صناعة السيارات موردي قطع الغيار بالامتثال لمتطلبات جودة صارمة؛ لذلك يتعين على مصنعي الرغوة تزويد عملائهم بمعلومات دقيقة حول معايير عملية تكوين الرغوة.

وفي الوقت نفسه، يسعى المصنعون إلى تحقيق تحكم أكثر دقة في عملية إنتاج الرغوة، ولا سيما لضمان استمرارية جودة المنتج وثباتها.

وقد أدت هذه المتطلبات إلى تطوير أجهزة قياس لتسجيل الخصائص الرئيسية، مثل ارتفاع الرغوة أثناء النمو، وتغيرات درجة الحرارة، والضغط، والاستقطاب العازل أثناء عملية تكوين الرغوة. كما تُعد معلومات أخرى مثل اللزوجة، وزمن التجلط، وسلوك المعالجة من البيانات المهمة التي تساعد في تقييم خصائص الرغوة.

جهاز Foam Meter هو جهاز قياس يتيح قياس وتسجيل الخصائص الرئيسية لعملية تكوين الرغوة، مثل ارتفاع الرغوة، ودرجة حرارة التفاعل، وضغط الارتفاع، والاستقطاب العازل. ويمكن أيضًا الحصول من البيانات على معلومات إضافية مثل اللزوجة، وزمن التجلط، وسلوك المعالجة، مما يجعل هذه الأداة وسيلة قيمة لتحديد خصائص الرغوة المنتجة، كما يجعل هذه القياسات جزءًا مهمًا من توثيق عملية الإنتاج.

المقدمة:

تعتمد جودة رغوات البولي يوريثان بدرجة كبيرة على العمليات التي تحدث أثناء تكوين الرغوة. لذلك، من المنطقي تسجيل معايير التكوين باستخدام أدوات قياس مناسبة وفحصها بصورة منتظمة على عينات الرغوة. ومن المزايا الأخرى لهذه القياسات إمكانية التحقق من ثبات جودة المواد الكيميائية الأولية قبل استخدامها في التركيبة النهائية.

وتكون هذه المراقبة ذات أهمية كبيرة أيضًا عند تطوير أنظمة رغوية جديدة ذات خصائص محددة. إذ يوفر قياس معايير التكوين معلومات حول كيفية سير التفاعل، وكيفية تأثير عملية تكوين الرغوة بالمواد المضافة وعوامل النفخ والمثبتات، وكذلك بالتغيرات في التركيبة الأساسية.

ولتحقيق هذه الأهداف، يمكن استخدام جهاز قياس الرغوة (Foam Meter) لتحديد ما إذا كانت الرغوة تلي المتطلبات الصارمة من حيث دقة القياس وقابلية تكرار النتائج.

منحنى نمو الرغوة (Foam Fingerprint):

تتمثل الطريقة التقليدية لتحديد خصائص الرغوة في قياس ارتفاع عينة رغوية أثناء نموها داخل كوب أو وعاء أسطواني. وفي هذا الاختبار، يتم تحديد زمن بدء التفاعل وزمن انتهاء نمو الرغوة من خلال منحنى النمو. وعلى الرغم من أن هذه المصطلحات ليست موحدة بشكل كامل، فإن زمن البدء يشير عمومًا إلى بداية التفاعل بين المكون A (البوليول + المواد المضافة) والمكون B (الإيزوسيانات) بعد الخلط، بينما يشير زمن الانتهاء النمو إلى اللحظة التي تصل فيها الرغوة إلى أقصى تمدد لها.

تُعد المستشعرات فوق الصوتية مفيدة للغاية لقياس ارتفاع سطح الرغوة أثناء نموها، ويمكن استخدامها بديلاً عن طرق القياس اليدوية، مما يساعد على تقليل حالات عدم اليقين المرتبطة بها (الشكل ١).



الشكل ١. قياس منحني نمو الرغوة باستخدام جهاز Foam Meter

يمكن تقييم خصائص تركيبيّة جديدة من خلال مقارنة منحني نمو الرغوة الخاص بها (Foam Fingerprint) بالمنحني المرجعي، مما يسمح بتقييم جودة التركيبيّة الجديدة ومدى ثباتها.

درجة حرارة التفاعل (Reaction Temperature):

يؤدي تفاعل البلمرة الطارد للحرارة إلى ارتفاع درجة الحرارة داخل عينة الرغوة. ومع ذلك، فإن توزيع درجة الحرارة داخل العينة ليس متجانساً، لأنه يتأثر بفقدان الحرارة من السطح العلوي الحر للرغوة، وانتقال الحرارة عبر جدار الوعاء، وخصائص العزل الحراري للرغوة، بالإضافة إلى التمدد الأديباتي للرغوة نفسها. لذلك، يمكن أن تكون النقطة التي يتم عندها قياس تغير درجة الحرارة داخل الرغوة أثناء نموها ذات أهمية كبيرة.

تجريبياً، يمكن قياس أقصى درجة حرارة في قلب الرغوة بأفضل شكل من خلال وضع المزيج الحراري (Thermocouple) في الثلث السفلي من الارتفاع الكلي للرغوة. ومع استمرار التفاعل، يبدأ تجلط مكونات الرغوة ويتولد ضغط داخلها. ونظراً إلى أن الرغوة تكون حرة في التمدد إلى الأعلى أثناء قياس الضغط، يمكن للمستشعر فوق الصوتي قياس الزيادة في حجم الرغوة في الوقت نفسه.

ضغط الارتفاع (Rise Pressure):

أثناء عملية التجلط، تتكوّن مصفوفة من الخلايا المستقرة تمنع المزيد من التمدد وتحد أيضاً من خروج عوامل النفخ. وتؤدي هاتان العمليتان إلى توليد إجهاد (ضغط) داخل الرغوة، وقد يكون لهذا الضغط تأثير ضار في التطبيقات العملية.

فعلى سبيل المثال، أثناء إنتاج الثلاثجات، قد تتعرض الصفائح المعدنية لضغط في اتجاه عمودي على اتجاه نمو الرغوة. وفي كثير من الحالات، تتولد قوى ضغط كبيرة، مما يتطلب بقاء أجزاء المنتج داخل القالب حتى اكتمال عملية المعالجة. وفي الحالات الشديدة، قد تؤدي هذه القوى إلى إتلاف الجزء نفسه. ولذلك أصبحت مراقبة هذا المعامل من المتطلبات المهمة في إنتاج الرغوات الصلبة.

في جهاز Foam Meter، ونظراً إلى أن الإجهادات الموضعية الناتجة عن التجلط تعتمد بدرجة كبيرة على مقدار ارتفاع الرغوة، يتم قياس تغيرات القوة على شكل ضغط الارتفاع. وبينما يسجل منحني نمو الرغوة بصورة أساسية ديناميكية (حركية) تكوّن عامل النفخ، يعكس ضغط الارتفاع خصائص خلايا الرغوة التي تتأثر بتفاعل البلمرة. ويتم قياس ضغط الارتفاع باستخدام قالب معدني يمكن صب مكونات الرغوة بداخله (الشكل ٢). ومع تمدد الرغوة، تضغط على قاع القالب، ويتم قياس القوة (الضغط) الناتجة بواسطة مقياس الضغط.



الشكل ٢. قياس ضغط الارتفاع أثناء تكوّن رغوة البولي يوريثان

يوفر منحني الضغط أيضًا معلومات قيمة لعمليات الإنتاج الفعلية؛ إذ يوضح الزمن الذي يبدأ عنده الضغط في الانخفاض، وبالتالي يساعد في تحديد الوقت الذي يصبح فيه فتح قالب آمنًا. ويساعد ذلك المصنّعين على تحديد الوقت الأمثل لإزالة المنتج من القالب وتجنب المشكلات الناتجة عن التمدد اللاحق (Post-expansion). كما يسمح لهم بتحسين مدة بقاء الجزء داخل القالب، وتجنب إطالة زمن فتح القالب دون حاجة، وبالتالي تحسين كفاءة الإنتاج.

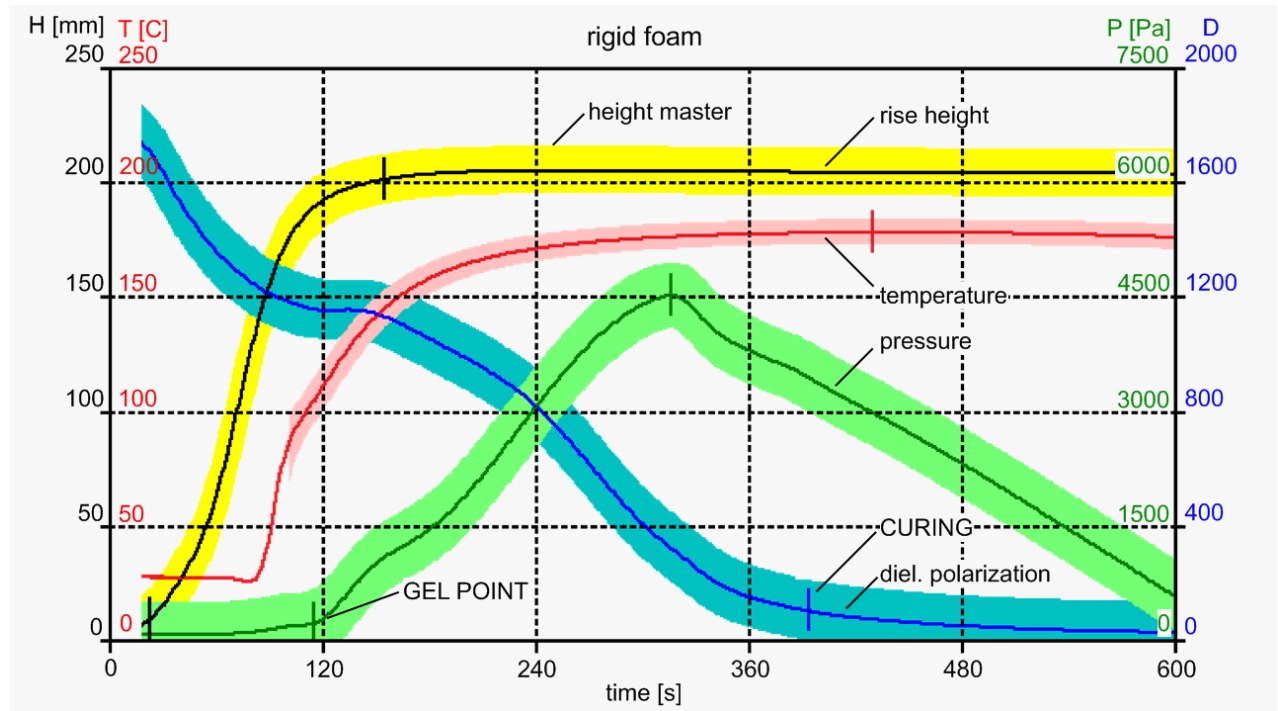
الاستقطاب العازل (Dielectric Polarization):

الاستقطاب العازل هو أحد معايير القياس التي توفر معلومات حول العمليات الكهروكيميائية التي تحدث أثناء تكوّن الرغوة. وينشأ الاستقطاب العازل بصورة أساسية عن الجزيئات الشبيهة بالسلاسل ذات عزوم ثنائية القطب الكبيرة نتيجة وجود مجموعات قطبية في نهاياتها، مثل مجموعات OH و NCO في رغوات PU و PIR. ويحدث تكوّن السلاسل قبل تفاعل التشابك، ومع اكتمال عملية المعالجة تتوقف في النهاية حركة ثنائيات القطب.

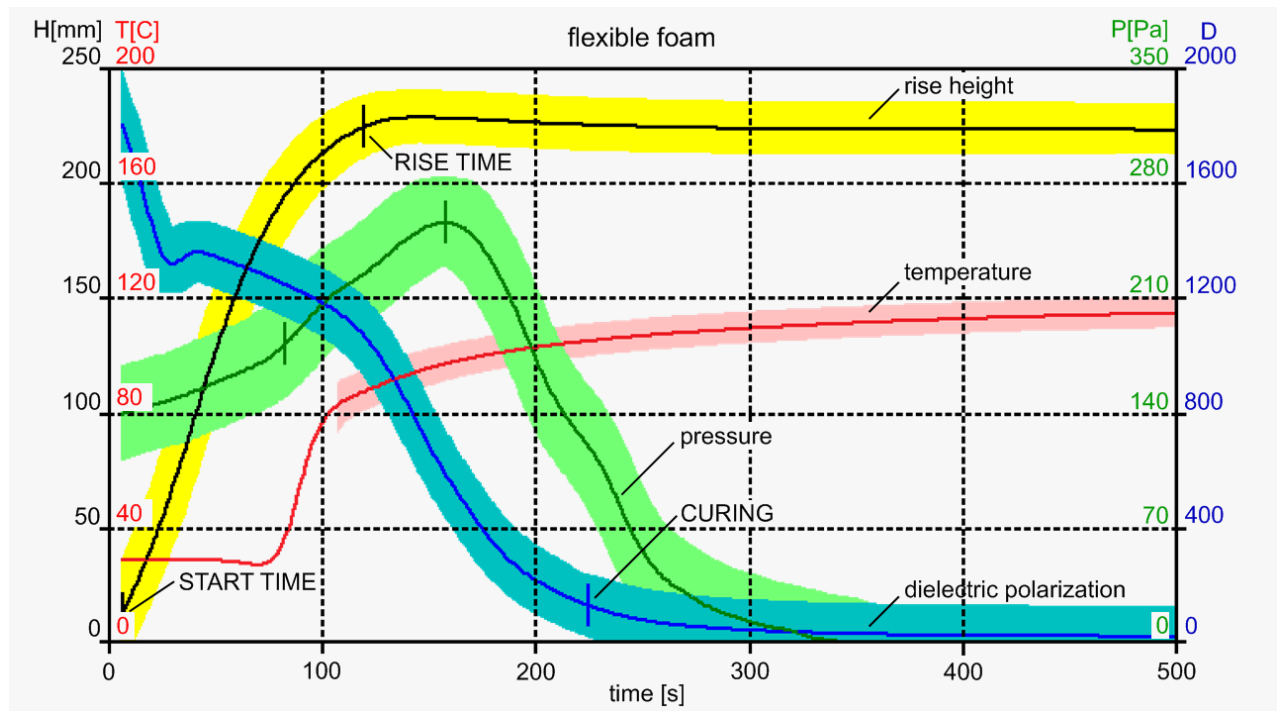
يوجد مستشعر الاستقطاب العازل (CMD) على لوحة الضغط FPM (الشكل ٣). ومع ارتفاع الضغط، تنضغط الرغوة على سطح CMD. ويمكن للاستقطاب العازل أن يوضح تكوّن المواد الوسيطة مثل الأمينات وعملية المعالجة النهائية للرغوة، حيث تنخفض الإشارة إلى مستوى منخفض وثابت بعد اكتمال التفاعل الكيميائي.

تُعرض في الرسمين البيانيين ١ و ٢ أمثلة لنوعين من رغوات البولي يوريثان الصلبة والمرنة. وتمثل المناطق المظلمة في الرسوم البيانية التالية نطاقًا مرجعيًا؛ فإذا وقعت العينات المختبرة ضمن هذا النطاق، فإن المنتج الجديد لا يُظهر تغييرًا ملحوظًا في خصائصه الأساسية. وباستخدام جهاز Foamate، يمكن لمديري الجودة تحديد المنحنيات الرئيسية لمجموعة واسعة من التركيبات المستخدمة وتحديد النطاقات المرجعية المناسبة.

يقارن الرسم البياني ١ زمن التجلط، ومدة بقاء الجزء داخل القالب، وأقصى درجة حرارة متولدة أثناء التفاعل، وأقصى تمدد للعينة بالقيم المرجعية. أما بالنسبة إلى الرغوة المرنة، فيعرض الرسم البياني ٢ مقارنات مماثلة تشمل أقصى زمن للنمو، ومقدار هبوط العينة (Collapse) بعد انتهاء زمن النمو، وأقصى ضغط ودرجة حرارة، بالإضافة إلى زمن انخفاض الضغط الذي يشير إلى مدة بقاء الجزء داخل القالب.



الرسم البياني ١. معايير تكوّن ومراقبة جودة رغوة البولي يوريثان الصلبة



الرسم البياني ٢. معايير تكوّن ومراقبة جودة رغوة البولي يوريثان المرنة

المراجع:

- Meeting product quality demands by monitoring PU foam formation: Bernd H. W. Hofmann
- Hagen-Poiseuille Equation: Essential Guide for Fluid Dynamics — Charlie Young, P.E.