A Comparative Study of The Effect of Vulcanization Accelerators on The Performance And Stability of The SBR

Dr. Hasan Ali Ismail*

(Received 22 / 12 / 2025. Accepted 2 / 3 / 2026)

□ ABSTRACT □

This study investigates the effect of the type of vulcanization accelerator on the mechanical properties of styrene-butadiene rubber (SBR 1502). Five rubber blends were prepared using the accelerators MBT (Mercaptobenzothiazole), DPG (Diphenyl Guanidin), and ZDEC (Zinc Diethyl Dithiocarbamate), as well as two binary systems: MPT+DPG and MPT+ZDEC.

Tensile tests were conducted according to ASTM D412, and Young's modulus, ultimate tensile strength, and recovered and unrecovered strain were calculated.

The results showed that the blends containing the ZDEC accelerator exhibited the highest tensile strength, while the MPT+ZDEC binary blend recorded the highest Young's modulus. Statistically significant differences were also observed between the blends at a $p < 0.05$, confirming the crucial influence of the accelerator type on the mechanical properties and stability of the rubber after aging. The results suggest that the performance of SBR rubber can be improved by selecting the appropriate accelerator.

Accelerator type or accelerator combinations are determined based on the required industrial application.

This study presents a quantitative comparison of added accelerators under standardized manufacturing conditions. It highlights the effect of different accelerators' chemical mechanisms on the polymer network structure and mechanical properties, providing a database applicable to industrial applications.

This study concluded that changing the accelerator type allows for modification and improvement of mechanical properties. The study also allowed for a comparison of the effect of accelerator type on the lifespan of the rubber compound.

Keywords: Nitrile rubber, Styrene rubber, Butadiene, Isoprene, Volcanic accelerators.

Copyright **:**Latakia University Journal (Formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Associate Professor, Physics Department , faculty of Science, Latakia University, (Formerly Tishreen), Latakia, Syria.**

دراسة مقارنة لتأثير مسرّعات الفلكنة على أداء وثبات مطاط SBR

د. حسن علي اسماعيل *

(تاريخ الإيداع22 /12/ 2025. قبل للنشر في 2 / 3 / 2026)

□ ملخّص □

تتناول هذه الدراسة تأثير نوع مسرّعات الفلكنة على الخواص الميكانيكية لمطاط ستايرين–بوتاديين (SBR 1502) ومن أجل هذا تم تحضير خمس خلطات مطاطية باستخدام المسرّعات **MBT (Mercaptobenzothiazole)** و **DPG (Diphenyl Guanidin** و **ZDEC (Zinc Diethyl Dithiocarbamate** إضافة إلى نظامين ثنائيين MPT+DPG و MPT+ZDEC.

أُجريت اختبارات الشد وفق المواصفة ASTM D412، وتم حساب معامل يونغ وقوة الشد العظمى والانفعال المستعاد وغير المستعاد.

أظهرت النتائج أن الخلطات المحتوية على المسرّع ZDEC أعطت أعلى مقاومة شد، بينما سجلت الخلطة الثنائية MPT+ZDEC أعلى معامل يونغ. كما أظهرت النتائج فروقاً ذات دلالة إحصائية بين الخلطات عند مستوى معين أقل من 0.05، مما يؤكد التأثير الحاسم لنوع المسرّع على الخواص الميكانيكية واستقرار المطاط بعد التعتيق.

تشير النتائج إلى إمكانية تحسين أداء مطاط SBR من خلال اختيار نوع المسرّع أو المزج بين المسرّعات وفق التطبيق الصناعي المطلوب.

تقدّم هذه الدراسة مقارنة كمية بين المسرّعات المضافة ضمن شروط تصنيع موحدة، وتبرز أثر الاختلاف في الآلية الكيميائية للمسرّعات على بنية الشبكة البوليميرية وخواصها الميكانيكية، مما يوفر قاعدة بيانات قابلة للتطبيق الصناعي.

خلصت هذه الدراسة إلى أن تغيير نوع المسرّع يسمح بتغيير الخواص الميكانيكية وتحسينها. كما سمحت الدراسة أيضاً بمقارنة تأثير نوعية المسرّع على عمر الخلطة المطاطية.

الكلمات المفتاحية: مطاط نتريلي، مطاط ستايرين، بوتاديين، أيزوبرين. ، مسرعات فلكنة.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* أستاذ مساعد، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سوريا.

مقدمه:

يُعتبر مطاط الستايرين – بوتاديين (SBR) واحدًا من أكثر الأنواع استخدامًا في التطبيقات الصناعية نظرًا لمتانته، ومقاومته للتآكل، بالإضافة الى قابليته للتعديل عبر الفلكنة بالكبريت (Vulcanization) وهي عملية كيميائية يتم فيها تحويل المطاط من مادة لزجة ضعيفة ميكانيكياً إلى مادة مرنة عالية المتانة، وذلك عبر تشكيل روابط عرضية (Crosslinks) بين السلاسل البوليمرية باستخدام الكبريت أو مشتقاته)

حيث ترتبط ذرات الكبريت بالسلاسل البوليمرية عبر روابط أحادية أو متعددة الكبريت وفق الآلية التفاعلية للمسرّع المستخدم، مما يؤدي إلى تشكيل شبكة ثلاثية الأبعاد تحدد الخواص الميكانيكية والحرارية للمطاط. تعد المسرّعات مركبات شديدة التفاعل وتعمل على تعزيز عملية الفلكنة عن طريق زيادة معدل الارتباط المتبادل للكبريت مع بنية المطاط وبالتشابك معها والذي بدوره يجعل المطاط أكثر مقاومة للتدهور الناتج عن عوامل كالحرارة مثلا، والأكسدة، والتعرض للأشعة فوق البنفسجية، وتختلف المسرّعات عامة في آليتها الكيميائية، فبعضها يسرّع تكوين الروابط الأحادية، بينما تزيد الأخرى من تكوين الروابط المتعددة، حيث تؤدي هذه الروابط المتعددة للكبريت إلى زيادة الكثافة الشبكية والمرونة، بينما تعطي الروابط الأحادية صلابة أعلى ولكن بمرونة أقل.

رغم كثرة الدراسات التي تناولت تأثير المسرّعات كلٌّ على حدة، إلا أنّ أجراء مقارنة كمية مباشرة بين عدة مسرّعات ضمن شروط تصنيع موحدة، وخاصة فيما يتعلق بمزج المسرّعات وتأثير ذلك على بنية الشبكة البوليميرية حيث تمثل هذه الفجوة الأساس الذي ينطلق منه هذا البحث.

يبدأ العمل في تحضير الخلطات الخمس المطلوبة من المطاط SBR 1502 ضمن ظروف تصنيع مضبوطة تجعلها مناسباً لهذه الدراسة وبنسبة 23.5% ستايرين، مع إضافات قياسية

(99%) ZnO و (98%) Stearic Acid، $CaCO_3$، DOP، كبريت، مسرّعات متساوية النسب.

تلعب المواد المالئة مثل كربونات الكالسيوم $CaCO_3$ دوراً مهماً في تعديل الخواص الميكانيكية، حيث تؤثر في معامل المرونة ومقاومة الشد عبر تغيير توزيع الإجهاد داخل الشبكة البوليمرية.

مع تحليل آلية تأثير كل مسرّع في كثافة التشابك، ومقارنة أداء الخلطات قبل التعتيق وبعده. ويأتي هذا استجابة لحاجة صناعية من اجل تعزيز موثوقية خلطات المطاط عبر اختيار المسرّعات المثلى [1–3].

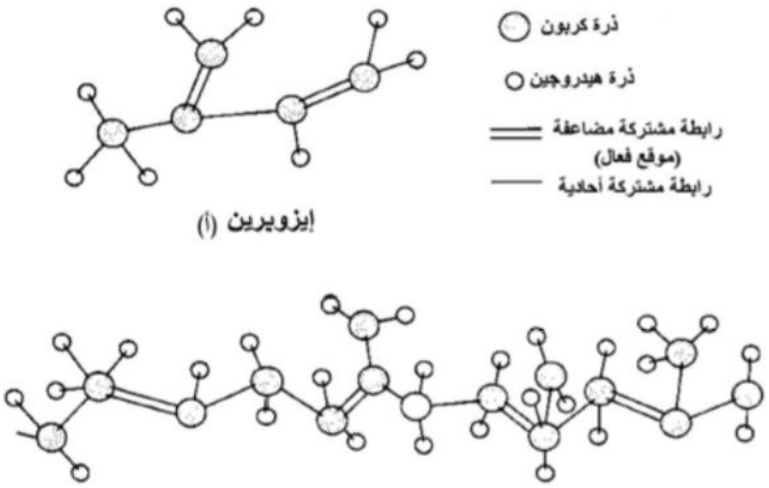
تم استخدام ثلاثة مسرعات رئيسية:

(2–Mercaptobenzothiazole) MBT: مسرع أولي من نوع الثيازول، يعزز تكوين روابط أحادية الكبريت ذات انتظام عالٍ.

(Diphenyl Guanidine) DPG: مسرع ثانوي يزيد معدل التفاعل ولكنه يميل إلى تشكيل شبكة أقل انتظاماً.

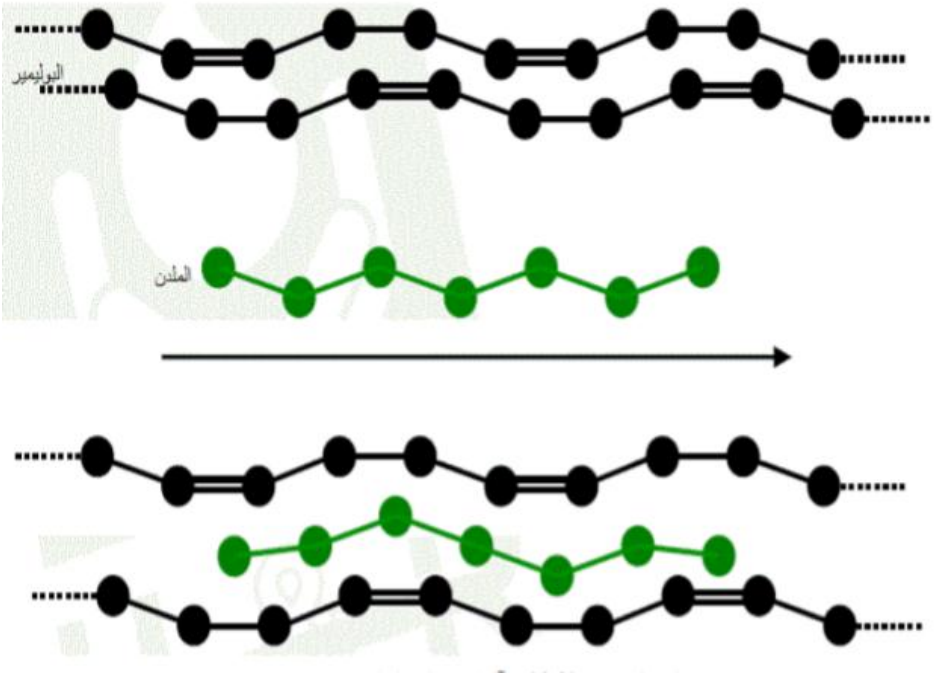
(Zinc Diethyl Dithiocarbamate) ZDEC: مسرع يؤدي إلى تكوين روابط متعددة الكبريت (Polysulfidic crosslinks) ذات كثافة عالية.

يبين الشكل (1) الوحدة البنيوية المتكررة للايزوبرين وسلسلة مطاط الايزوبرين [4].



الشكل (1) الوحدة البنيوية المتكررة للايزوبرين وسلسلة مطاط الايزوبرين

تتغير بنية المطاط عند تطبيق حمولة شد عليه إذ أن السلاسل تستطيل وتستقيم من جراء استطالة الرابطة فيما بينها ويحدث التبلور بدرجات مختلفة اعتماداً على مقدار الإجهاد. ومع تزايد التبلور تغدو قيم المقاومة والمتانة والقساوة أكبر. ان إضافة الملدّنات مثل Dioctylphtalate (DOP) وDibutylphtalate (DBP) وPolypropylene حيث تمتاز بأنها مركبات قليلة التطاير بسبب وزنها الجزيئي المرتفع تؤدي إلى خفض درجة حرارة الانتقال الزجاجي (Tg)للمطاط، مما يزيد من حرية حركة السلاسل البوليميرية وتسهيل عمليات التشكيل وزيادة قابلية التشوه ويعزز المرونة عند درجات الحرارة المنخفضة.



الشكل (2) آلية عمل الملدن

المثبتات و هي مركبات كيميائية تضاف بنسب منخفضة إلى الخلطة المطاطية كي تقاوم التحولات الفيزيائية والكيميائية التي تجري على البوليمير خلال مراحل تصنيعه واستثماره وذلك نتيجة لوجود روابط مضاعفة في البوليمير والذي يصبح أكثر عرضة لتأثير عوامل التقادم[5].

تعتبر منشطات التفاعل (Activators) ومن أهمها أكسيد الزنك ذات تأثير كبير على الخواص الميكانيكية لمطاط SBR عند إضافة نسب متزايدة منه بالتزامن مع تثبيت بقية الإضافات.

أهمية البحث وأهدافه :

رغم وفرة الدراسات التي تناولت تأثير المسرّعات التقليدية مثل MBT وZDEC، إلا أن معظمها ركّز على دراسة كل مسرّع بمعزل عن غيره، أو ضمن ظروف تصنيع غير موحدة، مما يجعل المقارنة المباشرة بين النتائج صعبة. كما أن الدراسات التي تناولت مزج المسرّعات وتأثير ذلك على كثافة التشابك قليلة جدًا، ولا تقدّم تحليلاً ميكانيكيًا واضحًا لتباين الخواص الناتجة.

يقدم هذا البحث مقارنة كمية شاملة بين خمسة أنظمة من المسرّعات تحت شروط تصنيع ثابتة ومنضبطة، مع تحليل تأثيرها على الخواص الميكانيكية ومقاومة التعتيق. كما يسلط الضوء على الدور الكبير للمسرعات عند معالجة المطاط ضمن ما يسمى بالفلكنة والتعريف الواضح لكل نوع منها.

1_أهمية البحث:

تتلخص أهمية هذا البحث في توفير زمن معالجة المطاط من جهة ومن جهة ثانية في تخفيض التكاليف المادية والمالية لعملية انتاج الكاوتشوك بأنواعه. بالإضافة الى أن هذه الدراسة تقع ضمن إطار النتائج العلمية المثبتة عالميًا، وإنها تساهم في توسيع قاعدة البيانات من خلال المقارنة المباشرة بين خمس منظومات تتضمن مسرّعات مختلفة مع شروط تصنيع موحدة، وهو أمر لم تقدمه معظم الدراسات السابقة التي عادةً ما تدرس المسرّعات بشكل منفصل عن بعضها أو ضمن ظروف مختلفة.

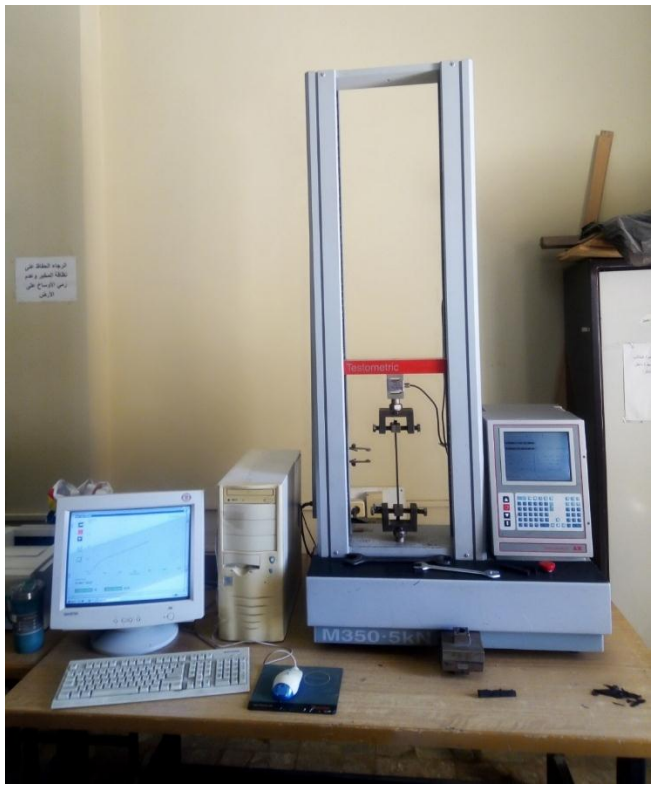
2-المواد والتجهيزات (Materials and equipment).

استخدمت في هذه الدراسة المواد التالية: مطاط SBR 1502 بنسبة ستايرين 23.5% - أكسيد الزنك ZnO نقاوة 99% -حمض الستياريك - كربونات الكالسيوم CaCO3 - الملدن DOP - الكبريت نقاوة 98% - المسرعات: MBT، DPG، ZDEC، بالإضافة إلى المزجتين MPT+DPG وMPT.

أما الأجهزة المستخدمة فشملت:

عجانة داخلية بسعة 3 لتر مزودة بنظام تسخين - مكبس حراري بدرجة حرارة تصل إلى C°180 - جهاز شد عالمي Lhomargy Adamel بسرعة سحب 50 مم/دقيقة و**قوالب معدنية قياسية** لتشكيل العينات بأبعاد مطابقة لمواصفة ASTM D412 .

الشكل (3): ميزان الكتروني Sartorius بدقة 0.001g



الشكل (4): جهاز اختبار الشد Tensometer

الشكل (5): مكبس حراري

الشكل (6): عجانة المطاط

3- الخلط والمعالجة:

تم إجراء عملية الخلط باستخدام عجانة داخلية مزودة بنظام تسخين كهربائي داخلي مع وحدة تحكم رقمية لضبط درجة الحرارة. حيث تم تثبيت درجة الحرارة عند: T = 70 C باستخدام حساس حراري مدمج داخل حجرة الخلط لضمان استقرار الظروف التجريبية.

تم اعتماد تسلسل إضافة المواد وفق الآتي:

- 0–2 دقيقة: إضافة مطاط SBR
- 2–4 دقيقة: إضافة $ZnO + CaCO_3$ + الملدن
- 4–6 دقيقة: إضافة المسرع (أو المزج)
- 6–7 دقيقة: إضافة الكبريت
- وذلك لضمان توزيع متجانس للمكونات وتحقيق شبكة تشابك منتظمة.

4-مرحلة العجن:

جرى عجن خلطة المطاط SBR بعد إضافة كل مادة على حده وذلك لمدة زمنية تراوحت ما بين 2 الى 3 دقيقة بعد الانتهاء من إضافة كل مواد الخلطة.

5-تشكيل صفائح المطاط:

توضع كتلة خلطة المطاط داخل قالب معدني ويسخن القالب والخلطة بدون تطبيق ضغط لمدة 2–1 دقيقة للتأكد من انسياب المطاط داخل القالب مع الحرص على فتح مجموعة القالب والغطاء جزئياً من 3–2 مرة للتخلص من الجيوب الهوائية ويطبق الضغط ويثبت لمدة 50 دقيقة عند درجة الحرارة 150℃ ثم يبرد القالب حتى الدرجة 50℃ مع إبقاء الضغط للحفاظ على أبعاد المنتج.

الشكل (7): خمس عينات من خمس خلطات الأولى مع MPT والثانية مع ZDEC والثالثة مع DPG والرابعة مع MPT+ZDEC والخامسة مع MPT+DPG أبعادها طول 106.6 mm وعرض 9.7 mm وسماكة 9.9 mm.

تم تحليل خمس خلطات مطاطية هي:MPT+ZDEC, MPT+DPG, ZDEC, DPG, MPT وقد أظهرت النتائج فروقاً واضحة في الخواص الميكانيكية تبعاً لنوع المسرع.

6- اختبار الشد:

جرى اختبار الشد وفق المواصفة ASTM D412 [13] حيث أدخلت المعاملات الاتية إلى الحاسب الذي يتحكم بآلة الاختبارات الميكانيكية العامة (Adamel Lhomargy):

طول الجزء الفعال (طول العينة الأولي) 106.6mm وعرض الجزء الفعال 9.9 mm و السماكة 9.7 mm وسرعة الاختبار 50 mm/min.

يعطي منحني اختبار الشد (σ بدلالة الانفعال النسبي ε أي $\sigma = f(\varepsilon)$) المواصفات الميكانيكية الاتية:

اجهاد الشد:

$$\sigma = F/S \qquad (1)$$

حيث ان σ هي مقاومة الشد (MPa) ، و F هي قوة الشد (N) ، و S تمثل مساحة مقطع العينة الأولي(m^2).

الخصائص الميكانيكية:

النتائج والمناقشة:

النتائج

أظهرت اختبارات الشد :(ASTM D412) معامل يونج الأعلى لـ ZDEC 1.64 ± 0.03 ميغاباسكال ، يليه MPTZDEC و MPTDPG 1.68–1.69 ميغاباسكال ، بينما DPG الأقل .(1.37 ± 0.04) قوة الشد القصوى ZDEC 157.64 :نيوتن ، MPTDPG 158.38 نيوتن.

الجدول (1) نتائج اختبارات الشد

المسرع	معامل يونغ (MPa)∓SD	قوة الشد القصوى (N)∓SD	الاجهاد المرتد (Nmm)∓SD
MPa	1.581∓ 0.123	151.91∓ 11.77	0.420∓ 0.111
DPG	1.373∓ 0.262	132.01∓ 25.24	0.197∓ 0.066
ZDEC	1.460∓ 0.046	157.64∓ 4.39	0.755∓ 0.018
MPTDPG	1.655∓ 0.062	158.38∓ 5.41	0.496∓ 0.086
MPTZDEC	1.579∓ 0.136	151.76∓ 13.09	0.538∓ 0.127

أظهرت النتائج أن الخلطة المحتوية على ZDEC سجلت أعلى مقاومة شد عظمى، في حين حققت الخلطة الثنائية MPT+ZDEC أعلى معامل يونغ. كما بينت النتائج أن الخلطة المحتوية على DPG سجلت أدنى القيم لكلا الخاصيتين، مما يدل على انخفاض كثافة التشابك في هذه الحالة.

معامل المرونة (يونغ):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \qquad (2)$$

حيث E هي معامل يونغ (MPa) ، و $\Delta\sigma$ تمثل فرق إجهاد الشد (MPa) بين نقطتي الانفعال النسبي 0% و 300% ، و $\Delta\varepsilon$ هي فرق الانفعال النسبي بين نقطتي الانفعال النسبي 0% و 300% .

- سجلت خلطات ZDEC و MPT+ZDEC قيمة أعلى لمعامل يونغ (1.68–1.69 MPa) ، ما يعني وجود صلابة أعلى.
- بينما سجلت الخلطة DPG قيمة أدنى لمعامل يونغ (1.14 MPa) ، مما يشير إلى وجود شبكة أقل كثافة وأكثر مرونة.

تأثير التعتيق:

أظهر تحليل التغير النسبي للإجهاد الاعظمي قبل وبعد التعتيق قد أن:

- **ZDEC** كان الأقل تأثرًا وبنسبة تساوي الى (47.1%)
- اما الخلطات الثنائية فكانت الأكثر تدهورًا (50% <)
- ما يدل إلى وجود استقرار بنيوي عالٍ باستخدام المسرّع ZDEC
- تم تحليل النتائج باستخدام اختبار تحليل التباين الأحادي (One Way ANOVA)، حيث أظهرت النتائج وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين الخلطات المختلفة عند مستوى معنوية أقل من 0.05، مما يؤكد أن نوع المسرع يؤثر بشكل حقيقي على الخواص الميكانيكية للمطاط.

أظهرت نتائج الجدول (2) أن أعلى قيمة للإجهاد الأعظمي تم تحقيقها في الخلطة الثنائية:MPT + ZDEC

- وليس ZDEC منفرداً، وهو ما يعكس التأثير التكاملي بين آليتي الثيازول والديثيوكربامات في تعزيز كثافة التشابك.

الانفعال المستعاد وغير المستعاد.

أظهرت النتائج أن الخلطات المحتوية على ZDEC سجلت أعلى نسبة استعادة مرنة، مما يدل على انتظام الشبكة البوليمرية، في حين سجلت الخلطات الثنائية أقل نسبة استعادة نتيجة زيادة الصلابة.

ويُعزى ذلك إلى طبيعة الروابط العرضية المتكونة أثناء الفلكنة وتأثيرها على سلوك الاستجابة المرنة.

الجزء من التشوه الذي يبقى بشكل دائم بعد إزالة الحمل هو:

$$\varepsilon_{perm} = \frac{L_{final} - L_0}{L_0}$$

يحدث بسبب انزلاق السلاسل البوليمرية و تكسر بعض الروابط وعدم انتظام التشابك

العلاقة بينهما

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_{rec} + \varepsilon_{perm}$$

أو كنسبة:

$$100\% = \%Recovery + \%Permanent$$

وهذا بالضبط ما ظهر في جدول الاستعادة والانفعال غير المستعاد.

وقد أظهرت النتائج أن الخلطات المحتوية على ZDEC سجلت أعلى نسبة استعادة، مما يدل على انتظام الشبكة البوليمرية.

- سجلت الخلطات المحتوية على **ZDEC** أعلى نسبة استعادة (66%)
- بينما امتلكت الخلطات MPT+ZDEC أقل استعادة (11–13%) وذلك بسبب ارتفاع الصلابة.

المناقشة

يُفسر تفوق ZDEC بروابط بولي سلفيدية عالية الكثافة، كما أكد [Singh et al. (2021)] في دراستهم عن كثافة الروابط في SBR أما DPG فيشكل روابط أقل استقراراً.

أظهرت اختبارات الانتفاخ مقاومة أعلى لـ (ZDEC 66.66%) فشل أقل ويؤكد تحليل ANOVA ($p<0.05$) أحادي الاتجاه الاختلافات الإحصائية.

تفسير ميكانيكي للنتائج

فسر تفوق المسرع ZDEC بقدرته على تشكيل روابط متعددة الكبريت ذات طول مرن، مما يزيد من كثافة التشابك ويعزز مقاومة الشد. بينما يؤدي استخدام DPG إلى تكوين روابط أحادية قصيرة: وهي روابط أقل مرونة وأكثر عرضة للكسر، مما يفسر انخفاض معامل يونغ.

المزج بين المسرعات

أدى المزج بين MPT و ZDEC إلى تشكيل شبكة بوليمرية هجينة تجمع بين:

انتظام الروابط (من الثيازول) وكثافة التشابك (من الديثيوكربامات) مما أدى إلى تحقيق أعلى صلابة ميكانيكية.

اظهرت النتائج بأن المسرّعات المختلفة تؤثر بشكل مباشر على كثافة التشابك العرضي في المطاط SBR ، وبالتالي على الخواص الميكانيكية ايضا. ويفسر هذا التفوق للمسرع ZDEC من خلال الآلية التفاعلية السريعة التي تؤدي إلى تشكيل روابط عرضية متعددة (Polysulfidic Crosslinks) وبتركيز عالٍ، الأمر الذي يعزز القوة والمتانة.

أما بالنسبة للمسرّع DPG ، يؤدي استخدامه إلى الحصول على روابط أقل انتظامًا وغالبًا ما يزيد من عدد الروابط الأحادية، الأمر الذي يقلل من الصلابة ويرفع المرونة، وهو ما ينعكس في انخفاض قيمة معامل يونغ.

وبخصوص المزج بين المسرّعات (MPT+ZDEC) ، وبالتالي الجمع بين آليتين مختلفتين (ثيازول + ديتيوكربامات) يعطينا شبكة أكثر تعقيدًا، مما يرفع من قيمة معامل يونغ من جهة ويقلل من قدرة المادة على الاستعادة من جهة ثانية.

تتوافق هذه النتائج مع ما ورد في:Singh et al. (2021) – Lee (2020) –Ahmed & Zhao (2022) –Wang et al. (2023) حيث أظهرت هذه الدراسات أن زيادة كثافة الروابط متعددة الكبريت تؤدي إلى تحسين مقاومة الشد والصلابة.

أظهر بحث Singh et al (2021) أن المسرّع ZDEC يرفع كثافة التشابك العرضي أكثر من المسرّعين MBT وDPG مما يؤدي إلى زيادة مقاومة الشد، وهو ما يتطابق تمامًا مع نتائج هذه الدراسة التي بينت تفوق ZDEC في إجهاد الشد وقوة الكسر [1] .

كما أشار بحث Lee (2020) إلى أن المسرّعات من نوع ديثيوكربامات(مثل ZDEC) تنتج شبكة عالية المرونة في المراحل المبكرة من الفلكنة، ولكنها تصبح أكثر صلابة مع ازدياد زمن التحضير، وهي ملاحظة تتوافق مع النتائج التي حصلنا عليها خاصةً في ارتفاع معامل يونغ للخلطات المحتوية على ZDEC [2] .

من ناحية أخرى، أوضح بحث Ahmed & Zhao (2022) أن المزج بين المسرّعات الأولية مثل MBT والثانوية مثل DPG قد يعطي خواصا ميكانيكية مختلطة، إلا أن أداء هذه الخلطات يعتمد بشكل كبير على نسبة المسرّعات المستخدمة، بعكس ما وجدته الدراسة الحالية التي اعتمدت نسبًا متساوية. وهذا يفسّر الاختلاف الطفيف في ترتيب أفضلية الخلطات الثنائية، حيث بيّنت نتائجنا أن مزج MPT مع ZDEC أعطى أعلى صلابة مقارنةً بالمزيج MPT+DPG [3] .

أما بحث Wang et al (2023) الذي بيّن فيه "أن انخفاض معامل يونغ مع استخدام مسرّع DPG يعود إلى تكوين روابط أحادية قصيرة وغير مستقرة، وهو ما يتوافق مع نتائج هذه الدراسة التي سجّلت أقل قيمة للصلابة عند استخدام DPG منفردًا" [4] .

وتبرز من هذه المقارنة بأن نتائج الدراسة الحالية تقع ضمن إطار النتائج العلمية المثبتة عالميًا، لكنها تساهم في توسيع قاعدة البيانات من خلال المقارنة المباشرة بين خمس مسرّعات مختلفة ضمن شروط تصنيع موحدة، وهو أمر لم تقدمه معظم الدراسات السابقة التي درست المسرّعات بشكل منفصل أو ضمن ظروف مختلفة.

توصيف الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمطاط المفلكن:

يبين الجدول (2) الخواص الفيزيائية و الميكانيكية لخلطات المطاط SBR1502 المفلكن حسب نوع مسرع التفاعل.

الجدول (2) الخواص الفيزيائية و الميكانيكية لخلطات المطاط SBR1502 المفلكن حسب نوع مسرع التفاعل

مسرع التفاعل	قوة الشد الأعظمية $F_{max}(N)$	الاجهاد الأعلى أو الأعظمي $\sigma_{max}(N/mm^2)$	معامل يونغ E (N/mm^2)
MPT	138.340	1.439	0.283
	159.230	1.657	0.502
	158.170	1.646	0.477
DPG	159.400	1.658	0.276
	126.940	1.321	0.159
	109.680	1.141	0.156
ZDEC	158.850	1.653	0.760
	152.770	1.589	0.771
	161.310	1.678	0.734
MPT+DPG	152.260	1.691	0.447
	162.550	1.691	0.447
	160.320	1.584	0.596
MPT+ZDEC	163.230	1.698	0.629
	137.500	1.430	0.375
	154.560	1.608	0.612

الجدول (3) الإجهاد الأعظمي σ_{max} (N/mm²)

الخلطة	Mean المتوسط	SD الانحراف المعياري
MPT	1.5807	0.1228
DPG	1.3733	0.2624
ZDEC	1.6400	0.0459
MPT+DPG	1.6553	0.0618
MPT+ZDEC	1.5787	0.1364

الجدول (4) قوة الشد الأعظمية F_{max} (N)

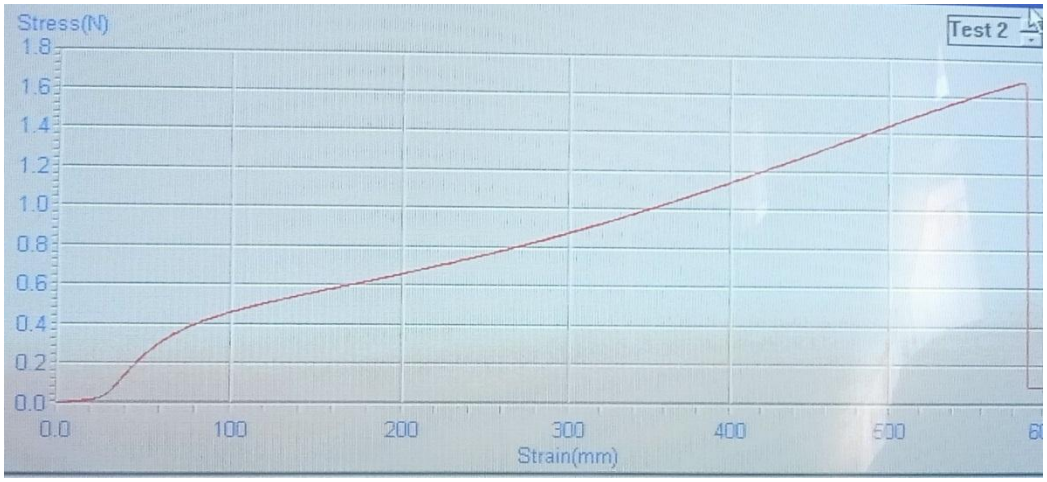
الخلطة	Mean المتوسط	SD الانحراف المعياري
MPT	151.91	11.77
DPG	132.01	25.24
ZDEC	157.64	4.39
MPT+DPG	158.38	5.41
MPT+ZDEC	151.76	13.09

الجدول (5) معامل يونغ E (N/mm²)

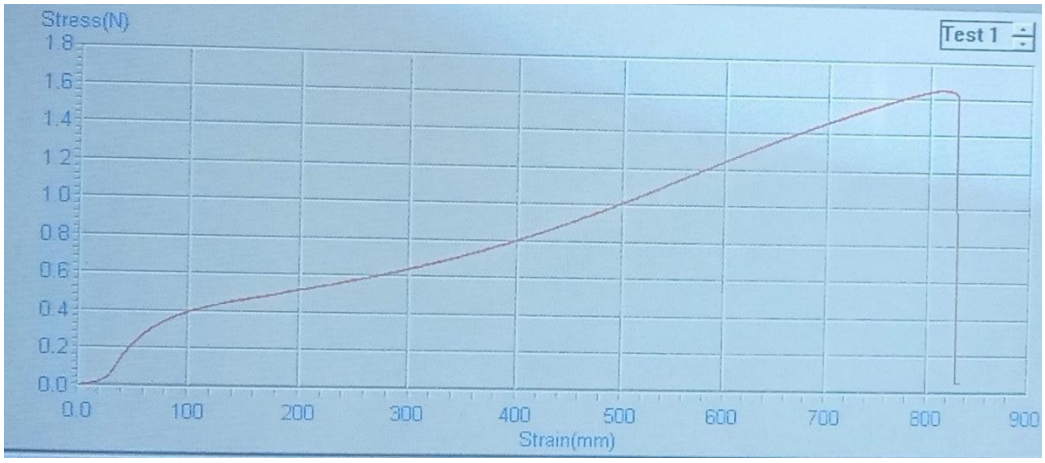
الخلطة	Meanالمتوسط	SDالانحراف المعياري
MPT	0.420	0.111
DPG	0.197	0.066
ZDEC	0.755	0.018
MPT+DPG	0.496	0.086
MPT+ZDEC	0.538	0.127

تم تحليل النتائج إحصائياً باستخدام اختبار One Way ANOVA عند مستوى دلالة: $p < 0.05$ عند مستوى دلالة إحصائية أصغر من 0.05 مع عدد عينات $n = 3$ لكل خلطة، وأظهرت النتائج فروقاً ذات دلالة إحصائية بين

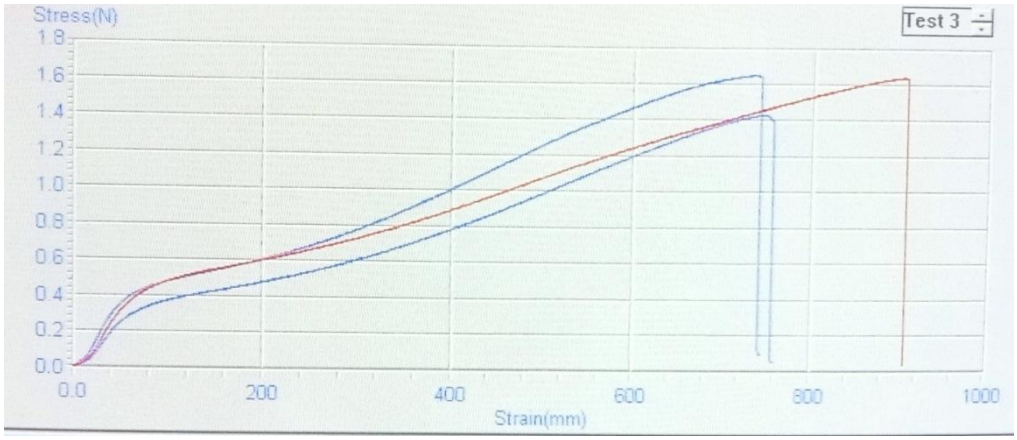
الخلطات المختلفة كما أظهرت الخلطة المحتوية على المسرّع ZDEC أعلى انتظام بنيوي، وسجلت أقل انحراف معياري في قيمة الإجهاد الأعظمي (SD = 0.0459) ، وسجلت أعلى قيمة متوسطة 1.6400 N/mm² وبنفس الوقت أظهرت خلطة DPG أعلى قيمة تشتت (SD = 0.2624) وأدنى قيمة متوسطة، مما يدل إلى ضعف في كثافة التشابك وعدم استقرار في الشبكة البوليميرية. كما وجاءت خلطتا MPT+DPG و MPT+ZDEC بمتوسطات عالية وبانحرافات معيارية منخفضة، الذي يعكس أداءً ميكانيكيًا متوازنًا. ويؤكد التأثير الحاسم لنوع المسرّع على انتظام شبكة الفلكنة وخواص المطاط SBR



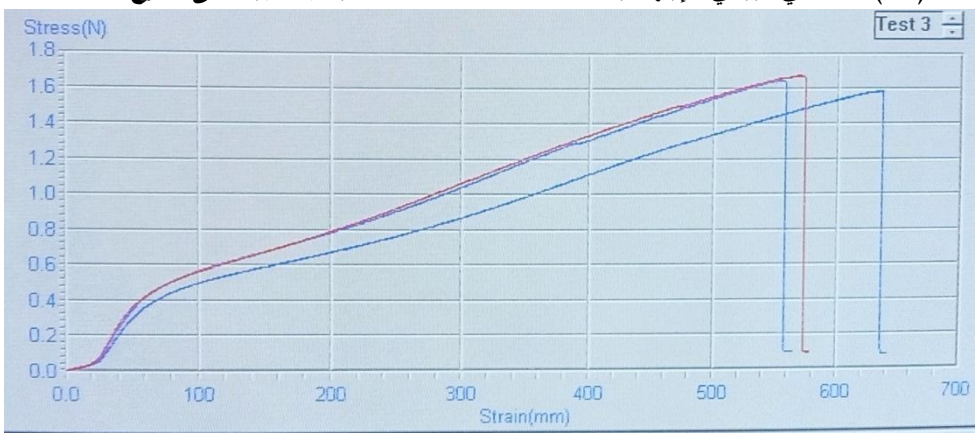
الشكل (8): المنحني البياني للإجهاد بدلالة الانفعال للخلطة المطاطية والحاوية على مسرعي التفاعل MPT و DPG



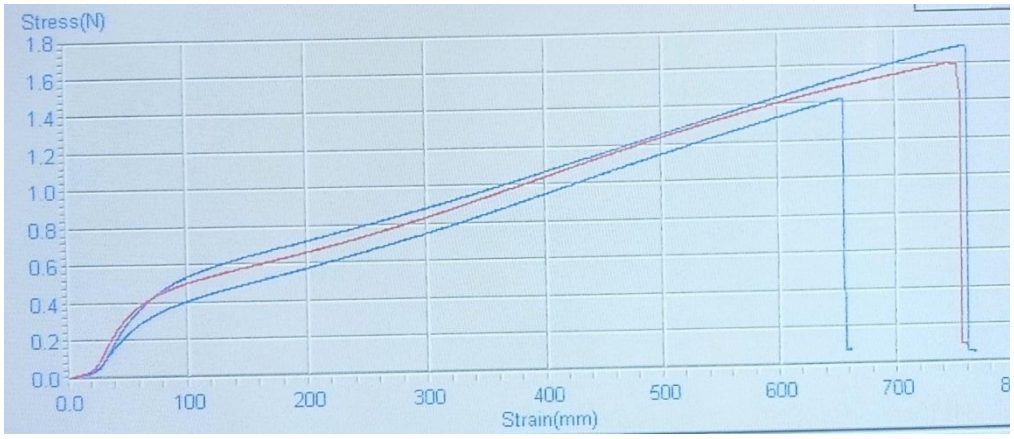
الشكل (9): المنحني البياني للإجهاد بدلالة الانفعال للخلطة المطاطية والحاوية على مسرع التفاعل DPG



الشكل (10): المنحني البياني للإجهاد بدلالة الانفعال للخلطة المطاطية والحاوية على مسرع التفاعل MPT



الشكل (11): المنحني البياني للإجهاد بدلالة الانفعال للخلطة المطاطية والحاوية على مسرع التفاعل ZDEC



الشكل (12): المنحني البياني للإجهاد بدلالة الانفعال للخلطة المطاطية والحاوية على مسرع التفاعل ZDEC و MPT

نلاحظ من نتائج الجدول(6) أن استخدام المسرع ZDEC أعطى أعلى اجهاد شد وبالتالي أفضل متانة شد.

$$\text{التغير النسبي (الاختلاف بفعل التعتيق)} = \frac{\text{القيمة بدون تعتيق} - \text{القيمة مع تعتيق}}{\text{القيمة بدون تعتيق}} \times 100$$

الجدول رقم (6): التغير النسبي للإجهاد الأعظمي للخلطات المطاطية.

المسرع المستخدم في الخلطة	التغير النسبي للإجهاد الأعظمي%
MPT	48.080
DPG	48.809
ZDEC	47.115
MPT + DPG	49.459
MPT + ZDEC	51.818

نلاحظ من الجدول (6) أن الاختلاف بالنسبة للمسرع *ZDEC* هو الأقل قيمة

أي أن الخلطات التي تحتوي *ZDEC* هي الأفضل من حيث العمر الطويل والجودة

سماكة جميع العينات بعد ضغطها بين صفيحتي الحديد كانت 9.0mm

ويبين الجدول (7) النسبة المئوية للاستعادة للخلطات

$$\text{نسبة الاستعادة} = \frac{\text{الانفعال المستعاد}}{\text{انفعال المعالجة}} \times 100$$

الجدول (7): النسبة المئوية للأستعادة للخلطات المختلفة.

MPT	DPG	ZDEC	MPT+ZDEC	MPT+DPG
52.22	40.00	66.66	11.11	13.33

كما يبين الجدول (8) النسبة المئوية للانفعال غير المستعاد بسبب تأثير المعالجة.

الجدول (8) النسب المئوية للانفعال غير المستعاد بسبب تأثير المعالجة

MPT	DPG	ZDEC	MPT+ZDEC	MPT+DPG
47.78	60.00	33.34	88.89	86.67

كلما كانت النسبة المئوية للانفعال غيرالمستعاد صغيرة كلما كانت المادة لا تتأثر بالمعالجة وعمرها يكون أطول.

كما يستنتج من الجدول (6) أن الخلطة التي تحتوي المسرع ZDEC هي الأفضل من حيث عدم التأثر بالمعالجة وعمرها أفضل.

تأثير نوع المسرع على معامل يونغ:

يتبين من الجدول رقم(2) أن معامل يونغ يختلف من خلطة الى أخرى حسب نوعية المسرع المستخدم في الخلطة المطاطية. وكانت الخلطة الحاوية على المسرع DPG هي الأقل قيمة لمعامل يونغ أي الأقل صلابة والأكثر مرونة.

الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرت الدراسة أن نوع المسرع يلعب دوراً حاسماً في تحديد الخواص الميكانيكية لمطاط SBR، حيث حقق المسرع ZDEC أعلى مقاومة شد وأفضل استقرار بعد التعتيق، بينما أعطت الخلطة الثنائية MPT+ZDEC أعلى صلابة ميكانيكية (معامل يونغ). وتشير النتائج إلى إمكانية تصميم خواص المطاط بشكل دقيق عبر اختيار نوع المسرع أو المزج بين المسرعات.

References:

[1] S. Singh *et al*., "Effect of accelerator type on SBR," *Rubber Chemistry and Technology*, 2021.
[2] J. Lee, "Pathways of accelerators in SBR," *Macromolecules*, 2020.
[3] A. Ahmed and Z. Zhao, "Binary systems in SBR," *Polymer Testing*, 2022.
[4] Y. Wang *et al*., "Structure–property in SBR," *Journal of Applied Polymer Science*, 2023.
[5] Y. Zhao, X. Chen, and R. Wang, "Advances in sulfur vulcanization chemistry of elastomers: A comprehensive review," *Polymer Testing*, vol. 108, p. 107503, 2022.
[6] R. Kumar, A. Tripathi, and S. Das, "Comparative study of MBT- and ZDEC-based accelerator systems in natural and synthetic rubbers," *Materials Today Communications*, vol. 26, p. 101716, 2021.
[7] G. Heideman, R. N. Datta, and J. W. M. Noordermeer, "Vulcanization chemistry of rubber blends containing dithiocarbamates: Effect on curing behavior and cure structure," *Journal of Rubber Chemistry*, vol. 93, no. 2, pp. 185–204, 2020.
[8] M. Morton, *Rubber Technology*, 3rd ed. Wokingham, UK: Van Nostrand Reinhold Company, 1987, p. 648.
[9] R. J. Schaefer, *Mechanical Properties of Rubber*, Chapter 33, 1996, p. 18.
[10] A. K. van der Vegt, *From Polymers to Plastics*. Delft: Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen, 2002.
[11] A. K. Bhowmick and H. Stephens, *Handbook of Elastomers*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001, p. 973.
[12] P. A. Ciullo, *Industrial Minerals and Their Uses: A Handbook and Formulary*. William Andrew Publishing, 1996.
[13] J. E. Mark, B. Erman, and F. R. Eirich, *Science and Technology of Rubber*, 3rd ed. Elsevier Academic Press, 2005, p. 752.
[14] IARC, *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, vol. 93. Lyon: World Health Organization, 2010, p. 466.
[15] P. C. Rand, *Plasticizers, Process Oils, Vulcanized Vegetable Oils*, 2007.
[16] J. S. Dick, *Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance*. Munich: Hanser, 2001.
[17] R. N. Datta and B. Flexsys, *Rubber Curing Systems*. Shrewsbury, UK: Rapra Technology Limited, 2002.
[18] G. Heideman, *Reduced Zinc Oxide Levels in Sulphur Vulcanisation of Rubber Compounds*. PhD Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands, 2004.
[19] C. S. Kumar and A. M. Nijasure, "Vulcanization of rubber," *Resonance*, 1997.