

PENGARUH PAPARAN MICROWAVE TERHADAP DERAJAT IKATAN SILANG PADA VULKANISASI KARET STIRENA BUTADIENA

Effect of Microwave Exposure on The Degree of Crosslinking in Styrene Butadiene Rubber Vulcanization

Andri Saputra¹, Atiqa Rahmawati², Uma Fadzilia Arifin¹, dan Mertza Fitra Agustian¹

¹Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta, Tarudan Bangunharjo, Sewon, Bantul, 55188

²Program Studi Teknologi Pengolahan Kulit, Politeknik ATK Yogyakarta, Tarudan Bangunharjo, Sewon, Bantul, 55188
Email: tiqa054@gmail.com

Diterima 18 Maret 2024 / Direvisi 26 April 2024 / Disetujui 10 Mei 2024

Abstrak

Vulkanisasi karet diperlukan untuk meningkatkan sifat kekuatan dan elastisitas suatu produk karet. Selain mempersingkat waktu proses, kelebihan vulkanisasi menggunakan radiasi elektromagnetik dari microwave adalah panas yang seragam yang tidak tergantung pada ketebalan produk. Penelitian ini bertujuan mengetahui karakteristik vulkanisasi karet stirena butadiena pada berbagai waktu paparan radiasi microwave. Kompon karet stirena butadiena dimasukkan dalam microwave dan diberi paparan radiasi elektromagnetik menggunakan daya 5 W pada berbagai waktu (10, 30, 50, 60, dan 70 menit). Derajat ikatan silang vulkanisat diuji menggunakan metode Flory-Rehner. Hasil penelitian diketahui bahwa tahap induksi vulkanisasi karet stirena butadiena pada daya 100 W membutuhkan durasi paparan yang lama sekitar 50 menit dengan derajat ikatan silang sebesar $0,52 \times 10^{-8}$ mol/cm³. Tren hasil menunjukkan bahwa lama paparan radiasi berbanding lurus dengan nilai derajat ikatan silang karet stirena butadiene. Derajat ikatan silang karet stirena butadiene pada waktu 50, 60, dan 70 menit secara berurutan adalah $0,52 \times 10^{-8}$ mol/cm³, $4,65 \times 10^{-8}$ mol/cm³, dan $29,41 \times 10^{-8}$ mol/cm³. Paparan radiasi elektromagnetik dari microwave di atas menit ke-70 diperkirakan masih dapat menyebabkan terbentuknya ikatan silang antar karet stirena

butadiene hingga titik maksimum pada menit tertentu.

Kata kunci: derajat ikatan silang, karet stirena butadiena, *microwave*, vulkanisasi

Abstract

Vulcanization of rubber is necessary to improve rubber products' strength and elasticity properties. In addition to shortening the processing time, the advantage of vulcanization using electromagnetic radiation from microwaves is the distribution of uniform heat into the product and it does not depend on the thickness of the product. This study aims to determine the vulcanization characteristics of styrene butadiene rubber at various exposure times to radiation in the microwave. Styrene butadiene rubber compounds were placed in the microwave and exposed an electromagnetic radiation using 5 W at various times (10, 30, 50, 60, and 70 minutes). The degree of crosslinking of the vulcanizates was tested using the Flory-Rehner method. The results showed that the induction of vulcanization of styrene butadiene rubber at 100 W required a long exposure duration of around 50 minutes with a degree of crosslinking of 0.52×10^{-8} mol/cm³. The trend of results showed that the duration of radiation was in line with the degree of crosslinking of styrene butadiene rubber. The degree of crosslinking at 50, 60, and 70 minutes were 0.52×10^{-8} mol/cm³, 4.65×10^{-8} mol/cm³, and 29.41×10^{-8} mol/cm³, respectively. Exposure to electromagnetic radiation above 70 minutes was still possible to cause the

formation of crosslinking between styrene butadiene rubber until the maximum point at a certain time.

Keywords: crosslink density, styrene butadiene rubber, microwave, vulcanization

Pendahuluan

Penggunaan karet mentah, baik karet alam maupun karet sintesis untuk dijadikan sebuah produk memiliki batasan seperti lengket jika terpapar panas dan retak jika pada kondisi dingin (Vijayaram, 2009). Untuk meningkatkan sifat produk, maka karet mentah perlu diolah dengan teknik vulkanisasi (Cifriadi, Falaah, & Puspitasari, 2021). Vulkanisasi adalah proses ikatan silang rantai molekul karet membentuk ikatan tiga dimensi yang lebih kuat dan stabil pada rentang suhu yang lebih luas. Tujuan proses vulkanisasi yaitu memperoleh sifat fisik dan mekanik produk karet yang optimal (Chen *et al.*, 2017) seperti tegangan putus, ketahanan terhadap panas maupun pelarut, dan meningkatkan perpanjangan putus (Handayani *et al.*, 2020).

Teknik vulkanisasi karet yang telah berkembang sejak abad ke-19 belas hingga saat ini antara lain vulkanisasi panas termal (konvensional dan *open cure*) dan radiasi seperti radiasi *microwave* (Aoudia *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2017) dan radiasi energi tinggi (radiasi gamma, sinar-x, electron beam) (Handayani *et al.*, 2020; Ibrahim *et al.*, 2018; Rimjaem *et al.*, 2017). Meskipun teknik vulkanisasi dengan menggunakan termal masih umum digunakan oleh industri, akan tetapi terdapat kebutuhan di industri untuk mempersingkat waktu proses vulkanisasi dengan alasan penghematan biaya. Radiasi *microwave* sebagai sumber energi untuk vulkanisasi bahan polimer diakui sebagai alternatif pengganti panas termal tradisional. Keunggulan vulkanisasi teknik radiasi adalah produk karet yang dihasilkan tidak mengalami degradasi karena pemanasan, mempunyai ikatan silang C-C yang kuat, meningkatkan sifat mekanik dan termal, limbah material lebih rendah, dapat dilakukan pada suhu ambien, energi yang digunakan lebih sedikit

dan ramah lingkungan (Reowdecha *et al.*, 2021; Rimjaem *et al.*, 2017; Saputra, 2021).

Vulkanisasi *microwave* merupakan teknik vulkanisasi menggunakan gelombang radiasi mikro yang mengarahkan dan mengagitasi zat dielektrik dalam suatu senyawa pada tingkat molekuler, sehingga menghasilkan panas yang seragam namun terpusat, dimana hal ini baik untuk proses pemanasan karet dengan ketebalan yang bervariasi dan menghindari tingkat curing pada ketebalan sampel yang berbeda (Ariff *et al.*, 2020). Pemanasan *microwave* adalah *bulk-heating*, sehingga mempunyai laju pemanasan yang lebih tinggi dibandingkan vulkanisasi konvensional, karakteristik pemanasan yang seragam menghasilkan produk karet yang lebih baik dibandingkan dengan vulkanisasi konvensional (Chen *et al.*, 2017). Radiasi gelombang mikro menyebabkan degradasi termal terkendali dengan efisiensi tinggi, dan mempunyai karakter ramah lingkungan (Formela *et al.*, 2019).

Beberapa studi penggunaan *microwave* dalam proses vulkanisasi telah dilakukan oleh Peneliti terdahulu. Sombatsompop dan Kumnuantip, (2006) telah meneliti tentang sifat fisik dan mekanik karet alam dengan *filler carbon black* dan campuran karet reklamasi yang divulkanisasi dengan metode konvensional dan radiasi *microwave*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanik karet reklamasi lebih tinggi dibandingkan dengan vulkanisasi *microwave*. Sensitivitas perubahan sifat vulkanisasi akibat penambahan kandungan karet reklamasi lebih besar pada metode vulkanisasi konvensional dibandingkan *microwave*, dan hal ini terkait dengan keseragaman sifat pada ketebalan sampel. Perbedaan sifat vulkanisat yang diperoleh sistem konvensional dan *microwave* dijelaskan pada kepadatan dan jenis ikatan silang yang ada pada vulkanisasi. Martin *et al.* (2002) meneliti campuran karet yang divulkanisasi dengan menggunakan radiasi *microwave* dan berkas elektron. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis iradiasi dan waktu iradiasi berkurang secara nyata, yaitu dari 2

menjadi 6 kali lipat, dengan radiasi berkas electron dan *microwave* secara bersamaan. Chen *et al.* (2017) meneliti tentang distribusi suhu pada karet selama proses vulkanisasi menggunakan *microwave*. Pada proses pemanasan karet menggunakan *microwave*, suhu dari karet meningkat seiring dengan waktu pemanasan. Laju kenaikan di zona tengah karet lembaran lebih tinggi dibandingkan laju kenaikan suhu di zona marjinal, dan suhu akhir di zona tengah karet lembaran lebih tinggi dibandingkan di zona marjinal. (Ariff *et al.*, 2020) meneliti tentang keefektifan pendekatan pemrosesan dengan menggunakan radiasi *microwave* pada karet alam. Hasil penelitian yang dilakukan oleh (Ariff *et al.*, 2020) menunjukkan bahwa sifat fisik dan struktur karet alam dengan yang divulkanisasi menggunakan radiasi *microwave* lebih baik dibandingkan dengan teknik konvensional atau panas termal. Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya tersebut, *microwave* merupakan salah satu teknik vulkanisasi yang mempunyai efisiensi yang tinggi dan menjanjikan untuk dipelajari dan dikembangkan.

Berdasarkan penelitian terdahulu, penelitian tentang pengaruh paparan radiasi *microwave* terhadap karakteristik vulkanisasi karet stirena butadiena belum pernah dilakukan. Karakteristik vulkanisasi memberikan gambaran kecepatan vulkanisasi karet yang menjadi dasar lama pematangan (*curing*) kompon karet ketika akan diaplikasikan (*scale-up*) di industri.

Penelitian ini merupakan investigasi awal yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik

vulkanisasi karet stirena butadiena pada berbagai waktu paparan radiasi *microwave*. Karet stirena butadiena dipilih karena karet tersebut umum digunakan sebagai bahan baku pembuatan produk karet di industri dengan beberapa pertimbangan, seperti relatif murah dibandingkan dengan beberapa jenis karet lainnya, memiliki ketahanan yang baik terhadap abrasi dan pengikisan, memiliki ketahanan yang baik terhadap paparan oksigen dan ozon, memiliki kekuatan tarik yang baik, memiliki kemampuan untuk dicampur dengan berbagai bahan tambahan dan aditif dengan mudah, dan menunjukkan ketahanan yang baik terhadap air (Rodgers, 2004).

Bahan dan Metode

Alat dan Bahan

Bahan untuk membuat kompon ditabulasi dalam Tabel 1 dengan jumlah dari setiap bahan dinyatakan dalam bagian seratus karet (bsk), sedangkan bahan untuk analisis derajat ikatan silang antara lain etanol dan toluena. Peralatan yang digunakan antara lain mesin *two-roll mill* (Y315H-6 LEADGO), *microwave* Samsung ME731k, *moving die rheometer* (Gotech GT-M2000-AN), oven, gelas beaker, neraca massa, kaca arloji, dan gunting.

Preparasi kompon

Bahan ditimbang berdasarkan formulasi kompon pada Tabel 1 dengan basis berat karet 1 kg. Kompon dibuat dengan cara pertama menggiling karet stirena butadiena (SBR) menggunakan mesin *two-roll mill* selama waktu 3 menit (45° C) dan diikuti dengan penambahan karbon hitam dan minyak

Tabel 1. Formula kompon karet

No	Bahan	Jumlah (bsk)	Keterangan
1	Karet stirena butadiena (SBR) Indopol	100	Karet
2	Karbon hitam N330	30	Filler
3	Minyak paraffin	3	Plasticizer
4	Zink oksida	5	Activator
5	Asam stearat	1	Activator
6	Tetrametiltiuram disulfida (TMTD)	2,5	Accelerator
7	Sulfur	1,5	Vulcanizing agent

parafin yang digiling dalam waktu 7 menit (50° C). Asam stearat dan zink oksida dicampurkan ke dalam kompon selama 2 menit (52° C). Kemudian, TMTD dan sulfur ditambahkan ke dalam kompon selama 2 menit (52° C). Produk hasil pencampuran atau komponding ini disebut kompon. Preparasi kompon ini membutuhkan waktu secara keseluruhan selama 14 menit.

Uji *rheology* kompon

Kompon karet dikarakterisasi pada kondisi isothermal di suhu 150 °C menggunakan *moving die rheometer*. Prosedur uji reologi mengikuti ASTM D5289 dan Standar Internasional ISO 6502.

Vulkanisasi kompon

Kompon dipotong persegi dengan ukuran sisi 5 cm x 5 cm dan divulkanisasi dalam *microwave* yang diatur pada daya 100 W. Lama paparan kompon dalam *microwave* diatur beragam mengikuti rancangan penelitian antara lain 10, 30, 50, 60, dan 70 menit. Produk hasil vulkanisasi ini disebut vulkanisat karet (sampel) untuk dianalisis derajat ikatan silang.

Pengujian densitas ikatan silang

Densitas ikatan silang sampel dihitung menggunakan Persamaan 1 yang dikembangkan oleh Flory-Rehner (Hiranobe *et al.*, 2021). Sampel ditimbang sekitar $0,25 \pm 0,05$ g dan direndam dalam larutan toluena pada lingkungan gelap selama 5 hari hingga kondisi seimbang (*equilibrium*). Sampel dipisahkan dan dikeringkan dari sisa larutan toluena, kemudian ditimbang. Sampel dimasukkan dalam oven pada suhu 80° C selama 24 jam, kemudian ditimbang.

$$v = \frac{-((\ln(1-V_B) + V_B + \chi \cdot (V_B)^2)}{\rho_B \cdot V_0 \cdot \left(\frac{1}{V_B} - \frac{V_B}{2}\right)} \quad (1)$$

Keterangan:

- v : Densitas ikatan silang (mol/cm³)
- χ : Parameter interaksi polimer-pelarut (Flory-Huggins) (0,39)

ρ_B : Densitas karet/sampel (g/cm³)

V_0 : Volume molar toluena (106,4 cm³/mol)

V_B : Fraksi volume molar saat karet mengembang (swelling) (cm³/mol)

Fraksi volume molar saat karet mengembang (V_B) dihitung dari peningkatan berat karena mengembang (*swelling*) menggunakan Persamaan 2.

$$V_B = \frac{m_2 - m_1}{\rho_B} \quad (2)$$

m_1 : Massa karet/sampel sebelum mengembang (*swelling*) dalam toluena (g)

m_2 : Massa karet/sampel setelah mengembang (*swelling*) dalam toluena (g)

Densitas karet ditentukan mengikuti standar ASTM D297-15 menggunakan larutan etanol dan dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$\rho_B = \frac{\rho_L \cdot m_A}{m_A - m_B} \quad (3)$$

ρ_L : Densitas etanol (0,79 g/cm³)

m_A : Massa karet/sampel di udara (g)

m_B : Massa karet/sampel di larutan etanol (g)

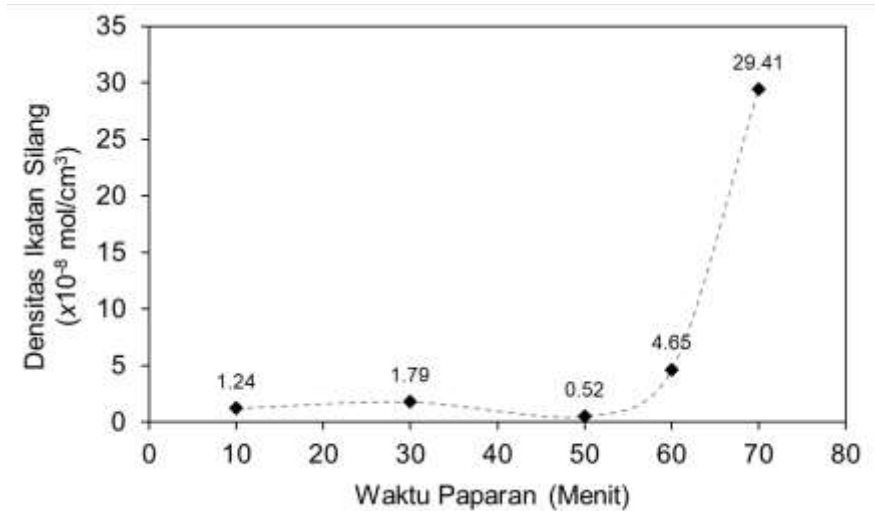
Hasil dan Pembahasan

Kompon yang dihasilkan dari proses komponding masih memiliki densitas ikatan silang yang rendah. Bahan pemvulkanisasi (seperti sulfur) belum mengikat silang rantai molekul karet secara utuh karena bahan tersebut memiliki reaktivitas rendah pada suhu rendah (seperti suhu kamar) (Liu *et al.*, 2018). Oleh karena itu, kompon diberi tekanan dan panas saat pencetakan pada umumnya (seperti teknik cetak tekan). Pada penelitian ini, panas bersumber dari *microwave* dengan

memanfaatkan radiasi elektromagnetik dalam frekuensi mikro (Formela *et al.*, 2019).

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, lama paparan *microwave* mempengaruhi jumlah ikatan silang antar karet. Pengaruh paparan *microwave* terhadap jumlah ikatan silang antar karet ditampilkan seperti dalam

Gambar 1. Lama paparan *microwave* dari 10 menit hingga 70 menit dapat meningkatkan densitas ikatan silang karet. Densitas ikatan silang karet mengalami fluktuasi nilai dan cenderung meningkat perlahan dari awal paparan *microwave* hingga pada waktu 60 menit. Peningkatan densitas ikatan silang yang



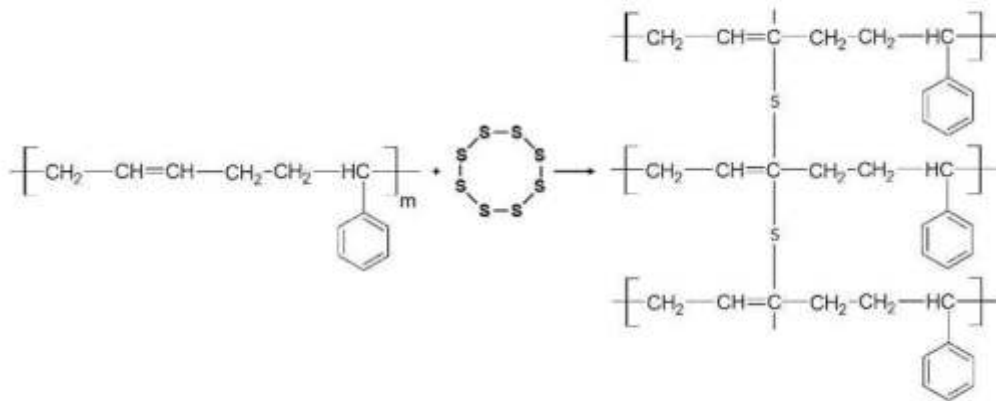
Gambar 1. Pengaruh lama paparan *microwave* terhadap densitas ikatan silang karet

signifikan terjadi dari waktu paparan *microwave* 60 menit menuju 70 menit.

Hasil penelitian ini dalam Gambar 1 memperlihatkan bahwa lama paparan radiasi elektromagnetik dari *microwave* meningkatkan jumlah ikatan silang antar karet. Hal ini terjadi karena semakin lama paparan radiasi elektromagnetik menyebabkan peningkatan akumulasi panas yang diterima oleh senyawa sulfur dan rantai molekul karet. Tentunya, peningkatan akumulasi panas yang diterima tersebut menyebabkan senyawa sulfur dan molekul karet menjadi lebih reaktif. Peningkatan reaktivitas suatu senyawa dapat meningkatkan laju reaksi (Hasan *et al.*, 2013, 2018). Hal ini tergambar dari densitas ikatan silang karet mengalami fluktuasi nilai dan cenderung meningkat perlahan dari awal paparan *microwave* hingga pada waktu 60 menit dan densitas ikatan silang karet meningkat signifikan hingga pada waktu 70 menit. Hasil penelitian terdahulu yang

dilakukan oleh Makul dan Rattanadecho (2010) menyatakan bahwa lama paparan *microwave* sebanding dengan peningkatan suhu pada spesimen karet. Peningkatan suhu vulkanisasi ini jugalah yang menyebabkan jumlah ikatan silang antar karet meningkat.

Radiasi elektromagnetik dari *microwave* menyebabkan suatu senyawa bergetar (bervibrasi) (Horikoshi dan Serpone, 2014), sehingga meningkatkan reaktivitas suatu senyawa seperti yang dinyatakan oleh Horikoshi dan Serpone (2014) Dalam kasus vulkanisasi karet, radiasi elektromagnetik dari *microwave* menyebabkan senyawa sulfur menerima panas dan bervibrasi lebih reaktif. Selain sulfur, radiasi elektromagnetik dari *microwave* membuat rantai molekul karet juga mengalami vibrasi menjadi lebih reaktif juga. Jika mengacu pada reaksi kimia vulkanisasi pada umumnya, panas dari cetakan (*mold*) menyebabkan ikatan hidrogen pada salah satu sisi rangkap karbon terlepas dan tergantikan



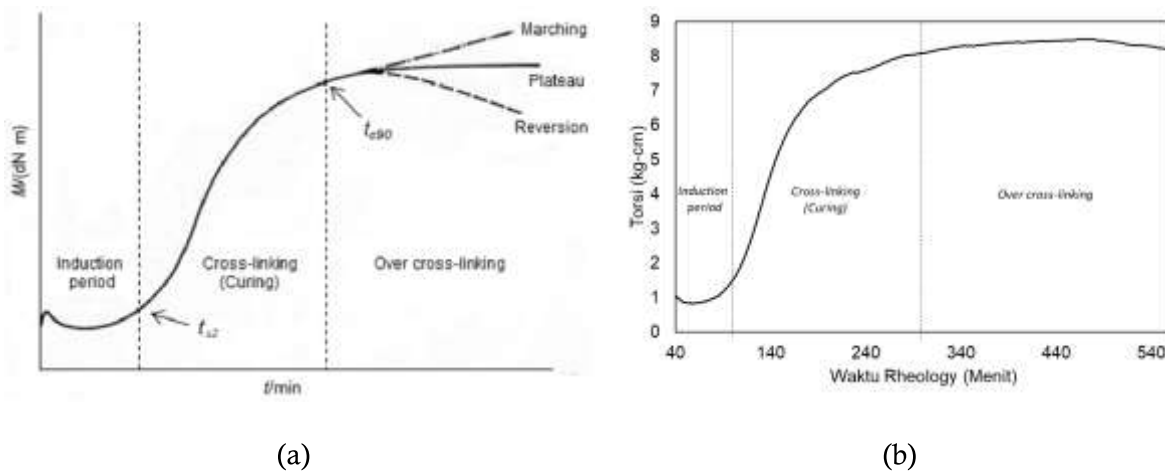
Gambar 2. Reaksi vulkanisasi karet SBR oleh sulfur (Andriyanti & Faisal, 2010)

oleh sulfur (Andriyanti dan Faisal, 2010). Mekanisme reaksi yang sama diduga berlaku atau terjadi saat kompon dikenai paparan radiasi elektromagnetik dari *microwave* seperti diilustrasikan dalam Gambar 2.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Aboelkheir *et al.*, 2021; Liao *et al.*, 2014) menyatakan hal yang sama, yaitu paparan radiasi elektromagnetik menyebabkan sulfur mengikat silang rantai molekul karet.

Berdasarkan pada kemiripan karakteristik kurva vulkanisasi yang dihasilkan dari uji *rheology* pada umumnya, Gambar 2 memberikan pemahaman bahwa terjadi dua fenomena tahapan ketika karet dikenai

paparan radiasi elektromagnetik dari *microwave*, yaitu induksi dan vulkanisasi. Tahap induksi merupakan tahap awal terjadinya proses vulkanisasi. Pada kurva *rheology* umumnya, tahap ini ditandai dengan nilai torsi terendah saat waktu terendah hingga waktu induksi (t_{i2}) seperti terlihat dalam Gambar 3a (Kruzelač dan Hudec, 2018). Kerapatan ikatan silang karet meningkat perlahan pada periode induksi (Liao *et al.*, 2014). Jika berdasarkan pada Gambar 1, tahap induksi diperkirakan terjadi dari menit ke-50 hingga ke-60. Grafik *rheology* kompon pada Gambar 3b juga menunjukkan karakteristik yang mirip dengan tahap induksi pada Gambar



Gambar 3. (a) Kurva umum *rheology* vulkanisasi (Kruzelač & Hudec, 2018) dan (b) Kurva *rheology* kompon dalam penelitian ini

1 dan Gambar 3a. Setelah tahap induksi, pada kurva *rheology* biasanya ditandai dengan peningkatan torsi secara signifikan hingga torsi maksimum. Hal ini menandakan bahwa tahap vulkanisasi sedang berlangsung atau pembentukan ikatan silang antar karet oleh sulfur (Liao *et al.*, 2014). Jika berdasarkan pada Gambar 1, tahap vulkanisasi diperkirakan terjadi mulai dari menit ke-60 hingga ke-70. Hal ini ditandai dengan peningkatan jumlah ikatan silang antar karet yang signifikan ada selang waktu tersebut. Namun, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui waktu maksimal vulkanisasi. Jika melihat tren peningkatan ikatan silang pada Gambar 1, diperkirakan paparan radiasi elektromagnetik dari *microwave* lebih lanjut (di atas menit ke-70) masih dapat menyebabkan terbentuknya ikatan silang antar karet. Oleh karena itu, dengan mengetahui waktu maksimal vulkanisasi maka dapat ditentukan secara tepat waktu induksi dan dapat juga ditentukan laju vulkanisasi dengan model kinetika.

Umumnya waktu vulkanisasi di industri karet dibuat singkat sekitar hitungan menit saja supaya pencetakan kompon lebih efisien dan volume produksi meningkat (Sarfranz *et al.*, 2021). Namun, hasil dalam penelitian pendahuluan ini berbanding terbalik dengan kebutuhan industri tersebut. Tahap awal vulkanisasi (induksi) baru terjadi pada menit ke-50 hingga ke-60. Hal ini tentunya kurang efisien jika diterapkan di industri. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk melihat laju vulkanisasi karet oleh radiasi elektromagnetik dari *microwave* pada daya atau energi (W) yang lebih tinggi dari yang dilakukan dalam penelitian ini (> 100 W). Penelitian tentang vulkanisasi karet alam menggunakan *microwave* yang pernah dilakukan oleh Makul dan Rattanadecho (2010) menyatakan bahwa *microwave* energi 1000 W mampu menghasilkan ikatan silang parsial di bawah suhu vulkanisasi termal biasanya. Penelitian yang Penulis lakukan saat ini memang menggunakan skala pengaturan daya terendah yang ada pada oven *microwave* sebagai kajian awal.

Kesimpulan

Tahap induksi vulkanisasi karet stirena butadiena menggunakan paparan radiasi elektromagnetik dari *microwave* pada daya 100 W membutuhkan durasi paparan yang lama sekitar 50 menit dengan derajat ikatan silang sebesar $0,52 \times 10^{-8}$ mol/cm³. Lama paparan *microwave* berbanding lurus dengan nilai derajat ikatan silang karet stirena butadiene. Derajat ikatan silang karet stirena butadiene pada waktu 50, 60, dan 70 menit secara berurutan adalah $0,52 \times 10^{-8}$ mol/cm³, $4,65 \times 10^{-8}$ mol/cm³, dan $29,41 \times 10^{-8}$ mol/cm³. Paparan *microwave* di atas menit ke-70 diperkirakan masih dapat menyebabkan terbentuknya ikatan silang antar karet stirena butadiene hingga titik maksimum pada menit tertentu. Laju vulkanisasi dan derajat ikatan silang karet menggunakan daya *microwave* yang lebih tinggi dari > 100 W perlu diteliti lebih lanjut.

Daftar Pustaka

- Aboelkheir, M. G., Lima Junior, J. G., Toledo Filho, R. D., Souza Junior, F. G., & dos Santos Siqueira, C. Y. (2021). Thermo-oxidative degradation of vulcanized SBR: A comparison between ultraviolet (UV) and microwave as recovery techniques. *Journal of Polymer Research*, 28(4). <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02497-y>.
- Andriyanti, W., & Faisal, W. (2010). Kajian metode vulkanisasi lateks karet alam bebas nitrosamin dan protein alergen. *Prosiding PPI-PDIPTN*, 161–169.
- Aoudia, K., Azem, S., Aït Hocine, N., Gratton, M., Pettarin, V., & Seghar, S. (2017). Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. *Waste Management*, 60, 471–481. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.051>.

- Ariff, Z. M., Afolabi, L. O., Salmazo, L. O., & Rodriguez-Perez, M. A. (2020). Effectiveness of microwave processing approach and green blowing agents usage in foaming natural rubber. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 9929–9940. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.096>
- Chen, H. L., Li, T., Liang, Y., Sun, B., & Li, Q. L. (2017). Experimental study of temperature distribution in rubber material during microwave heating and vulcanization process. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 53(3), 1051–1060. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1877-3>.
- Cifriadi, A., Falaah, A. F., & Puspitasari, S. (2021). Korelasi antara sistem vulkanisasi dengan sifat mekanis dan sifat redaman vulkanisat karet butil tanpa pengisi. *Majalah Kulit, Karet, Dan Plastik*, 37(2), 77. <https://doi.org/10.20543/mkcp.v37i2.7042>.
- Formela, K., Hejna, A., Zedler, Colom, X., & Cañavate, J. (2019). Microwave treatment in waste rubber recycling – Recent advances and limitations. *Express Polymer Letters*, 13(6), 565–588. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.48>.
- Handayani, H., Cifriadi, A., Puspitasari, S., Ramadhan, A., Darsono, D., & Nuraini, E. (2020a). Pengaruh vulkanisasi lateks karet alam dengan cara radiasi menggunakan mesin berkas elektron (MBE) terhadap sifat mekanik barang jadinya. *Jurnal Penelitian Karet*, 32(2), 207–216. <https://doi.org/10.22302/ppk.jpk.v37i2.661>.
- Handayani, H., Cifriadi, A., Puspitasari, S., Ramadhan, A., Darsono, D., & Nuraini, E. (2020b). Pengaruh vulkanisasi lateks karet alam dengan cara radiasi menggunakan mesin berkas elektron (MBE) terhadap sifat mekanik dan kadar protein barang jadinya. *Jurnal Penelitian Karet*, 207–216. <https://doi.org/10.22302/ppk.jpk.v37i2.661>.
- Hasan, A., Rochmadi, Sulisty, H., & Honggokusumo, S. (2013). Vulcanization Kinetics Of Natural Rubber Based On Free Sulfur Determination. *Indo. J. Chem*, 13(1), 21–27.
- Hasan, A., Rochmadi, Sulisty, H., & Honggokusumo, S. (2018). The effect of ingredients mixing sequence in rubber compounding upon vulcanization kinetics of natural rubber: An autocatalytic model study. *Indonesian Journal of Chemistry*, 18(4), 709–717. <https://doi.org/10.22146/ijc.25707>
- Hiranobe, C. T., Ribeiro, G. D., Torres, G. B., Dos Reis, E. A. P., Cabrera, F. C., Job, A. E., ... Dos Santos, R. J. (2021). Cross-linked density determination of natural rubber compounds by different analytical techniques. *Materials Research*, Vol. 24. Universidade Federal de Sao Carlos. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0041>.
- Horikoshi, S., & Serpone, N. (2014). Role of microwaves in heterogeneous catalytic systems. *Catalysis Science and Technology*, 4(5), 1197–1210. <https://doi.org/10.1039/c3cy00753g>.
- Ibrahim, S., Badri, K., Ratnam, C. T., & Ali, N. H. M. (2018). Enhancing mechanical properties of prevulcanized natural rubber latex via hybrid radiation and peroxidation vulcanizations at various irradiation doses. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 173(5–6), 427–434. <https://doi.org/10.1080/10420150.2018.1462366>.
- Kruzelák, J., & Hudec, I. (2018, January 1). Vulcanization systems for rubber compounds based on IIR and halogenated IIR: An overview. *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 91, pp. 167–183. Rubber Division of the American Chemical Society. <https://doi.org/10.5254/rct-18-82609>

- Liao, L. S., Liao, J. H., Li, Y. M., Chen, Y. P., Zhao, Y. F., & He, C. Z. (2014). Curing kinetics and properties of natural rubber coagulated using microwave radiation. *Rubber Chemistry and Technology*, 87(1), 43 – 52 .
<https://doi.org/10.5254/rct.13.87932>
- Liu, S., Yu, J., Bikane, K., Chen, T., Ma, C., Wang, B., & Sun, L. (2018). Rubber pyrolysis: Kinetic modeling and vulcanization effects. *Energy*, 155, 215–225.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.146>.
- Makul, N., & Rattanadecho, P. (2010). Microwave pre-curing of natural rubber-compounding using a rectangular wave guide. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(7), 914–923.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.03.001>
- Martin, D., Ighigeanu, D., Mateescu, E., Craciun, G., & Ighigeanu, A. (2002). Vulcanization of rubber mixtures by simultaneous electron beam and microwave irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 65, 63–65.
- Reowdecha, M., Dittanet, P., Sae-oui, P., Loykulnant, S., & Prapainainar, P. (2021). Film and latex forms of silica-reinforced natural rubber composite vulcanized using electron beam irradiation. *Heliyon*, 7(6).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07176>
- Rimjaem, S., Kongmon, E., Rhodes, M. W., Saisut, J., & Thongbai, C. (2017). Electron linear accelerator system for natural rubber vulcanization. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 406 (part A), 233 – 238 .
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.11.016>.
- Rodgers, B. (2004). *Rubber Compounding: Chemistry and Applications* (1st ed.). New York: CRC Press.
- Saputra, A. (2021). Review: application of irradiation technology in natural rubber vulcanization process. *Jurnal Forum Nuklir*, 15(1), 1–12.
- Sarfraz, M. S., Hong, H., & Kim, S. S. (2021). Recent developments in the manufacturing technologies of composite components and their cost-effectiveness in the automotive industry: A review study. *Composite Structures*, 266 .
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113864>.
- Sombatsompop, N., & Kumnuantip, C. (2006). Comparison of physical and mechanical properties of NR/carbon black/reclaimed rubber blends vulcanized by conventional thermal and microwave irradiation methods. *Journal of Applied Polymer Science*, 100 (6) , 5039 – 5048 .
<https://doi.org/10.1002/app.23472>.
- Vijayaram, T. R. (2009). A technical review on rubber. *International Journal on Design and Manufacturing Technologies*, 3(1), 25–37.
R e t r i e v e d f r o m
<https://www.researchgate.net/publication/267398132>.



PUSAT PENELITIAN KARET