

## VULKANISASI LATEKS KARET ALAM DENGAN RADIASI ELEKTRON BEAM DENGAN PENAMBAHAN SENSITIZER MALEIK ANHIDRIDA

*Natural Rubber Latex Vulcanization by Using an Electron Beam with the Addition of Maleic Anhydride Sensitizer*

Mili Purbaya

Pusat Penelitian Karet, Jalan Palembang – Pangkalan Balai Km.29,  
Banyuasin 30953, Indonesia  
E-mail: milipurbaya3107@gmail.com

Diterima: 27 Februari 2025 / Disetujui: 11 November 2025

### Abstract

The vulcanization of natural rubber latex is a crucial process for enhancing the mechanical properties and thermal stability of rubber products. This study aims to investigate the effect of electron beam irradiation on the vulcanization of natural rubber latex with the addition of maleic anhydride as a sensitizer. The application of electron beam irradiation as an alternative crosslinking method is expected to improve vulcanization efficiency while reducing the use of conventional chemical vulcanizing agents. This research employed a laboratory experimental method with a quantitative analytical approach. The independent variables included electron beam irradiation doses of 10, 30, 50, 100, 150, and 200 kGy, as well as maleic anhydride concentrations of 1 and 2 phr. For comparison, natural rubber latex without maleic anhydride was also vulcanized under identical irradiation conditions. The vulcanization performance was evaluated based on swelling ratio, crosslink density, gel fraction, and mechanical properties, including tensile strength, tear strength, 300% modulus, and elongation at break. The results demonstrated that the addition of maleic anhydride significantly enhanced crosslink density, which directly correlated with improved tensile strength, tear strength, and modulus of vulcanized rubber. An optimum electron beam irradiation dose of 150 kGy combined with 1 phr maleic anhydride provided the best balance between mechanical strength and elasticity. These findings highlight the role of maleic anhydride as an effective sensitizer in electron beam-induced vulcanization,

enabling more efficient crosslink formation at lower irradiation doses. The study provides important insights into the radiation-induced crosslinking mechanism of natural rubber and offers a promising, environmentally friendly alternative to conventional sulfur-based vulcanization processes for advanced rubber material applications.

**Keywords:** natural rubber; electron beam irradiation; maleic anhydride; vulcanization; mechanical properties

### Abstrak

Vulkanisasi lateks karet alam merupakan proses penting untuk meningkatkan sifat mekanik dan stabilitas termal produk karet. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh radiasi elektron beam terhadap proses vulkanisasi lateks karet alam dengan penambahan maleik anhidrida sebagai *sensitizer*. Penggunaan elektron beam sebagai metode pembentukan ikatan silang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi vulkanisasi sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia vulkanisasi konvensional. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Variabel bebas yang diuji meliputi dosis radiasi elektron beam sebesar 10, 30, 50, 100, 150, dan 200 kGy serta konsentrasi maleik anhidrida sebesar 1 dan 2 bsk. Sebagai pembandingan, lateks karet alam tanpa penambahan maleik anhidrida juga divulkanisasi pada kondisi iradiasi yang sama. Kinerja vulkanisasi dievaluasi melalui pengujian derajat *swelling*, densitas ikatan

silang, fraksi gel, serta sifat mekanik karet vulkanisat yang meliputi kuat tarik, kuat sobek, modulus pada regangan 300%, dan perpanjangan putus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan maleik anhidrida secara signifikan meningkatkan densitas ikatan silang, yang berkorelasi langsung dengan peningkatan kuat tarik, kuat sobek, dan modulus karet vulkanisat. Kombinasi dosis iradiasi elektron beam sebesar 150 kGy dengan konsentrasi maleik anhidrida 1 bsk memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan mekanik dan elastisitas karet. Temuan ini menegaskan peran maleik anhidrida sebagai *sensitizer* yang efektif dalam proses vulkanisasi berbasis iradiasi elektron beam, karena mampu mempercepat pembentukan radikal bebas dan meningkatkan efisiensi pembentukan ikatan silang pada dosis iradiasi yang lebih rendah. Secara teoritis, penelitian ini memperkaya pemahaman mekanisme pembentukan jaringan ikatan silang karet alam akibat radiasi, sementara secara praktis menawarkan pendekatan vulkanisasi yang lebih ramah lingkungan sebagai alternatif terhadap proses vulkanisasi konvensional berbasis sulfur.

Kata kunci: karet alam; radiasi elektron beam; maleik anhidrida; vulkanisasi; sifat mekanik

## PENDAHULUAN

Karet alam merupakan salah satu bahan baku yang memiliki peran penting dalam berbagai industri, seperti otomotif, kesehatan, dan manufaktur. Keunggulan karet alam, seperti elastisitas tinggi, daya tahan terhadap keausan, dan sifat mekanik yang baik, menjadikannya bahan yang sangat diminati. Namun, karet alam dalam bentuk aslinya memiliki beberapa kelemahan, seperti mudah terdegradasi oleh panas, oksigen, dan sinar ultraviolet. Oleh karena itu, diperlukan proses modifikasi untuk meningkatkan sifat fisik dan kimia karet alam, salah satunya melalui proses vulkanisasi.

Vulkanisasi adalah proses kimia yang bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik karet dengan membentuk ikatan silang antar rantai polimer. Secara konvensional, proses ini dilakukan menggunakan bahan kimia seperti belerang. Namun, perkembangan teknologi telah

memungkinkan penggunaan metode alternatif seperti vulkanisasi dengan radiasi elektron beam. Metode ini memiliki beberapa keunggulan, seperti ramah lingkungan, efisiensi tinggi, dan tidak memerlukan bahan kimia tambahan dalam jumlah besar.

Dalam vulkanisasi menggunakan metode iradiasi, biasanya ditambahkan zat aditif untuk meningkatkan efisiensi proses. Aditif ini dikenal sebagai *sensitizer* atau promotor iradiasi, yang berfungsi untuk mengurangi dosis iradiasi yang dibutuhkan, meningkatkan densitas ikatan silang, dan memperbaiki sifat fisik vulkanisat karet. *Sensitizer* umumnya dikategorikan menjadi dua kelompok: (1) promotor ikatan silang langsung, yang berperan langsung dalam pembentukan ikatan silang, dan (2) promotor ikatan silang tidak langsung, yang mendukung pembentukan radikal tanpa berpartisipasi langsung dalam reaksi ikatan silang (Bohm & Tveekrem, 1982).

Berbagai penelitian telah mengeksplorasi penggunaan *sensitizer* dalam vulkanisasi karet alam menggunakan teknik iradiasi. Misalnya, penelitian oleh Makuuchi menunjukkan bahwa penambahan 5 bagian per seratus karet (bsk) 2-ethylhexyl acrylate (2-EHA) dan 1 bsk karbon tetraklorida ( $\text{CCl}_4$ ) pada vulkanisasi dengan radiasi gamma menghasilkan sarung tangan karet dengan emisi sulfur dioksida yang lebih rendah dan residu abu yang lebih sedikit dibandingkan produk komersial (Makuuchi *et al.*, 1990). Penelitian lain oleh Haque menunjukkan bahwa penambahan 5 bsk nonane-diol-diacrylate (NDDA) atau normal butyl acrylate (n-BA) pada vulkanisasi menggunakan elektron beam menghasilkan vulkanisat dengan kekuatan tarik tinggi (Haque *et al.*, 2005).

Penelitian lainnya menggunakan monomer polifungsional sebagai *sensitizer* dalam vulkanisasi karet dengan elektron beam pada dosis 50-200 kGy. Manaila *et al.* (2014) menemukan bahwa penambahan 3 bsk trimethylolpropane trimethacrylate (TMPT) menghasilkan kekuatan tarik sebesar 8 MP. Sementara itu, Craciun *et al.* (2016) melaporkan bahwa penggunaan monomer polifungsional meningkatkan densitas ikatan silang vulkanisat pada dosis radiasi 75-300 kGy untuk aplikasi medis. Meskipun demikian, monomer polifungsional umumnya memiliki harga relatif mahal dan berpotensi menimbulkan isu kesehatan, sehingga diperlukan

alternatif *sensitizer* yang lebih efektif, ekonomis, dan aman. Salah satu alternatif yang berpotensi dikembangkan adalah maleik anhidrida.

Maleik anhidrida merupakan salah satu bahan kimia yang berpotensi digunakan sebagai *sensitizer* dalam vulkanisasi karet menggunakan elektron beam. Hingga saat ini, maleik anhidrida lebih banyak dilaporkan berperan sebagai kompatibilizer atau agen modifikasi dalam berbagai sistem karet. Balachandrakurup *et al.* (2021) menunjukkan bahwa karet alam yang digrafting dengan maleik anhidrida (MA-g-NR) mampu meningkatkan interaksi antarmuka antara karet alam dan selulosa nanofiber, yang ditunjukkan oleh peningkatan signifikan pada kekuatan tarik, modulus dan ketahanan sobek komposit (Balachandrakurup *et al.*, 2021). Wongthong *et al.* (2013) melaporkan bahwa grafting maleik anhidrida pada karet alam terdeproteinasi meningkatkan efisiensi grafting serta menurunkan fraksi gel, sehingga menghasilkan struktur karet termodifikasi yang lebih terkendali (Wongthong *et al.*, 2013). Selain itu, Zhang *et al.* (2010) melaporkan bahwa penggunaan elastomer yang dimodifikasi maleik anhidrida sebagai agen kompatibilisasi pada campuran NR/BR/EPDM mampu memperbaiki distribusi fase dan *filler*, yang berdampak pada peningkatan sifat mekanik dan pembentukan ikatan ionik tambahan. (Zhang *et al.*, 2010). Beberapa metode grafting maleik anhidrida pada karet alam telah dikembangkan, antara lain melalui reaksi termal dengan inisiator benzoyl peroxide (Nakason *et al.*, 2004) maupun melalui iradiasi energi gamma (Pongsathit & Pattamaprom, 2018). Penelitian yang dilakukan oleh Srirachya *et al.* (2017) juga menunjukkan bahwa maleik anhidrida dapat berperan sebagai agen ikatan silang pada karet alam epoksi melalui vulkanisasi termal (Srirachya *et al.*, 2017).

Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada pemanfaatan maleik anhidrida sebagai kompatibilizer atau agen grafting melalui proses termal dan iradiasi gamma, sementara perannya sebagai *sensitizer* dalam proses vulkanisasi menggunakan elektron beam belum banyak dikaji. Selain itu, pengaruh langsung penambahan maleik anhidrida terhadap pembentukan jaringan ikatan silang, densitas ikatan silang, serta

keterkaitannya dengan sifat mekanik vulkanisat karet alam pada proses iradiasi elektron beam belum dilaporkan secara sistematis.

Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang secara khusus mengevaluasi peran maleik anhidrida dalam meningkatkan efisiensi vulkanisasi karet alam menggunakan metode elektron beam. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis penggunaan maleik anhidrida sebagai *sensitizer* dalam vulkanisasi karet alam menggunakan metode elektron beam.

Penelitian ini difokuskan pada evaluasi pengaruh penambahan maleik anhidrida terhadap karakteristik jaringan ikatan silang vulkanisat yang meliputi daya serap pelarut (*swelling*), fraksi gel, dan densitas ikatan silang, serta terhadap sifat fisik mekanik vulkanisat seperti kuat tarik, kuat sobek, modulus 300%, dan perpanjangan putus. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman baru mengenai peran maleik anhidrida dalam sistem iradiasi elektron beam serta berkontribusi pada pengembangan teknologi vulkanisasi karet alam yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah lateks karet alam pekat dengan kadar karet kering (KKK) 60% dan maleik anhidrida. Maleik anhidrida digunakan dalam bentuk larutan dengan konsentrasi 10%. Seluruh bahan digunakan tanpa proses pemurnian lebih lanjut.

### Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Rancangan percobaan yang digunakan adalah *one-variable-at-a-time* (OVAT), di mana pengaruh penambahan maleik anhidrida terhadap proses vulkanisasi karet alam dievaluasi pada berbagai tingkat dosis radiasi elektron beam.

Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi dosis radiasi elektron beam (10, 30, 50, 100, 150, dan 200 kGy), dan konsentrasi maleik anhidrida (0, 1, dan 2 bsk (bagian seratus karet)). Variabel terikat yang diamati meliputi derajat *swelling*, fraksi gel, densitas

ikatan silang, serta sifat mekanik vulkanisat karet alam, yaitu kuat tarik, kuat sobek, modulus pada regangan 300%, dan perpanjangan putus.

Penelitian ini bersifat eksploratif-komparatif. Data hasil pengujian dianalisis secara deskripsi dan komparatif untuk mengamati tren pengaruh dosis radiasi dan penambahan maleik anhidrida terhadap karakteristik vulkanisat karet alam.

### Persiapan Sampel dan Proses Radiasi Elektron Beam

Lateks karet alam dengan KKK 60% diencerkan hingga mencapai KKK 50% dengan penambahan air deionisasi. Maleik anhidrida ditambahkan ke dalam lateks dengan variasi konsentrasi 1 dan 2 bsk, kemudian campuran diaduk menggunakan pengaduk mekanik selama 30 menit pada kecepatan 80 rpm (rotasi per menit) hingga homogen. Kode sampel dapat dilihat pada Tabel 1.

Campuran lateks selanjutnya dituangkan ke dalam cetakan kaca untuk

membentuk film karet dengan ketebalan  $\pm 1$  mm. Ketebalan film dikontrol dengan menuangkan volume campuran yang sama pada setiap cetakan. Sampel kemudian dikeringkan pada suhu ruang ( $\pm 25$  °C) selama 24 jam hingga terbentuk film karet. Film karet yang telah kering selanjutnya divulkanisasi menggunakan iradiasi elektron beam. Proses iradiasi dilakukan menggunakan akselerator elektron berenergi 10 MeV (MB10-50, Mevex Corp., Kanada) dengan energi 10 MeV, arus beam 5000 A, dan daya maksimum 50 kW. Sampel ditempatkan pada baki aluminium berukuran 80 cm x 80 cm dan diiradiasi pada variasi dosis 10, 30, 50, 100, 150, 200 kGy. Rentang dosis iradiasi tersebut dipilih untuk mencakup kondisi pra-vulkanisasi hingga pembentukan jaringan ikatan silang yang lebih intensif, sebagaimana umum digunakan dalam proses vulkanisasi karet berbasis iradiasi elektron beam. Setelah iradiasi, sampel disimpan pada suhu ruang selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian sifat fisik dan karakteristik jaringan ikatan silang.

Tabel 1. Kode sampel penelitian  
Table 1. Research sample code

| Kode Sample<br>Sample code | Keterangan<br>Description       |
|----------------------------|---------------------------------|
| EB                         | Lateks tanpa maleik anhidrida   |
| EB + 1 MA                  | Lateks + 1 bsk maleik anhidrida |
| EB + 2 MA                  | Lateks + 2 bsk maleik anhidrida |

### Pengujian Swelling, Fraksi Gel, dan Densitas Ikatan Silang

Pengujian *swelling*, densitas ikatan silang dan fraksi gel pada sampel karet tervulkanisasi dilakukan menggunakan toluena sebagai medium perendaman. Prosedur mengacu pada prinsip uji perendaman cairan (ISO 1817/ASTM D471) serta persamaan Flory-Rehner.

Sampel dimasukkan ke dalam vial berisi 10 ml toluena dan disimpan pada suhu kamar (25 °C) selama satu minggu. Berat sampel ditimbang sebelum

perendaman ( $w_i$ ) dan setelah perendaman ( $w_s$ ) untuk menghitung *swelling*. Kemudian sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 70 °C selama 24 jam (Dominic C.D. et al., 2020). Sampel kemudian ditimbang beratnya setelah dioven ( $w_d$ ). *Swelling* dan fraksi gel dihitung dengan persamaan 1 dan 2.

Densitas ikatan silang dihitung berdasarkan data *swelling* pada kondisi kesetimbangan menggunakan persamaan Flory-Rehner.

$$Swelling = \frac{(w_s - w_i)}{w_i} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Fraksi\ gel = \frac{w_d}{w_i} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$V_r = \frac{w_1/\rho_1}{w_1/\rho_1 + w_2/\rho_2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Fraksi volume polimer dalam keadaan *swelling* ( $V_r$ ) dihitung menggunakan massa dan densitas masing-masing fase : dengan  $w_1 = w_d$  adalah massa karet kering,  $w_2 = w_s - w_d$  adalah massa pelarut yang terserap,  $\rho_1 = 0.92 \text{ g/cm}^3$  densitas karet alam, dan  $\rho_2 = 0.87 \text{ g/cm}^3$  densitas toluena. Volume molar toluena ( $V_d$ ) menggunakan nilai 106,4

$\text{cm}^3/\text{mol}$ , dan parameter interaksi polimer-pelarut untuk sistem karet alam-toluena ditetapkan sebesar  $\chi = 0,393$ , sebagaimana digunakan pada penelitian sebelumnya (Flory & Rehner, 1943; Purbaya *et al.*, 2023). Densitas ikatan silang dihitung dengan persamaan berikut:

$$X_c = \frac{-\ln(1-V_r) + V_r + \chi V_r^2}{2V_d(V_r^{1/3} - V_r/2)} \dots\dots\dots (4)$$

### Pengujian Sifat Mekanik Vulkanisat

Pengujian sifat mekanik dilakukan menggunakan Tinius Olsen Universal Testing Machine. Pengujian kuat tarik mengikuti ISO 37, sedangkan pengujian kekuatan sobek mengikuti ISO 34-1. Spesimen uji potong menggunakan dumbbell cutter tipe 1 (ISO 37 tipe 1) untuk uji kuat tarik dan spesimen trouser/angle-cut sesuai ISO 34-1 (tipe C) untuk uji sobek. Dimensi spesimen untuk uji kuat tarik adalah panjang total  $115 \pm 2 \text{ mm}$ , panjang bagian sempit  $33 \pm 1 \text{ mm}$ , lebar bagian sempit  $6 \pm 0,1 \text{ mm}$ , serta ketebalan sampel sesuai material yang disiapkan. Untuk pengujian kuat sobek ISO 34-1 type C, spesimen memiliki lebar bagian dalam  $10 \pm 0,5 \text{ mm}$ , panjang keseluruhan  $110 \text{ mm}$  dan notch sesuai geometri standard. Kecepatan crosshead ditetapkan pada  $500 \text{ mm/menit}$  dan setiap sampel diuji dengan lima specimen. Parameter mekanik yang dievaluasi meliputi kuat tarik, kuat sobek, perpanjangan putus dan modulus pada regangan 300%.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Swelling, Fraksi Gel dan Densitas Ikatan Silang

Pada penelitian ini, vulkanisasi karet alam dilakukan menggunakan iradiasi elektron beam pada variasi dosis 10, 30, 50, 100, 150, dan 200 kGy dengan penambahan maleik anhidrida masing-masing sebesar 1 dan 2 bsk. Sebagai pembanding, karet alam tanpa penambahan maleik anhidrida juga divulkanisasi pada dosis elektron yang sama.

Keberhasilan proses vulkanisasi dapat dievaluasi melalui parameter rasio *swelling*, fraksi gel dan densitas ikatan silang, yang mencerminkan terbentuknya

jaringan ikatan silang dalam matriks karet. Karet yang telah tervulkanisasi tidak larut dalam pelarut organik, melainkan mengalami pengembangan (*swelling*) akibat masuknya molekul pelarut ke dalam jaringan polimer.

Sampel yang diiradiasi pada dosis rendah (10 dan 30 kGy) larut sepenuhnya dalam toluena sehingga tidak dapat dianalisa lebih lanjut. Hal ini menunjukkan bahwa pada dosis tersebut energi radiasi belum cukup untuk menghasilkan jumlah radikal bebas yang memadai guna membentuk ikatan silang antar rantai poliisoprena.

Gambar 1a menunjukkan bahwa peningkatan dosis elektron beam menyebabkan penurunan derajat *swelling* pada seluruh sistem karet yang diuji. Penurunan *swelling* ini berbanding terbalik dengan peningkatan densitas ikatan silang, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1b. Densitas ikatan silang menggambarkan tingkat keterikatan rantai polimer dalam jaringan tiga dimensi, dimana nilai yang lebih tinggi menunjukkan struktur karet yang lebih rapat dan stabil.

Penambahan maleik anhidrida sebesar 1 bsk secara konsisten menghasilkan densitas ikatan silang yang lebih tinggi dibandingkan karet tanpa maleik anhidrida dan karet dengan penambahan 2 bsk maleik anhidrida.

Hasil ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi tertentu, maleik anhidrida mampu berperan sebagai *sensitizer* yang meningkatkan efisiensi pembentukan ikatan silang selama proses iradiasi elektron beam. Sebaliknya, penambahan maleik anhidrida hingga 2 bsk tidak memberikan peningkatan densitas ikatan silang yang signifikan dan cenderung menurunkannya pada beberapa dosis.

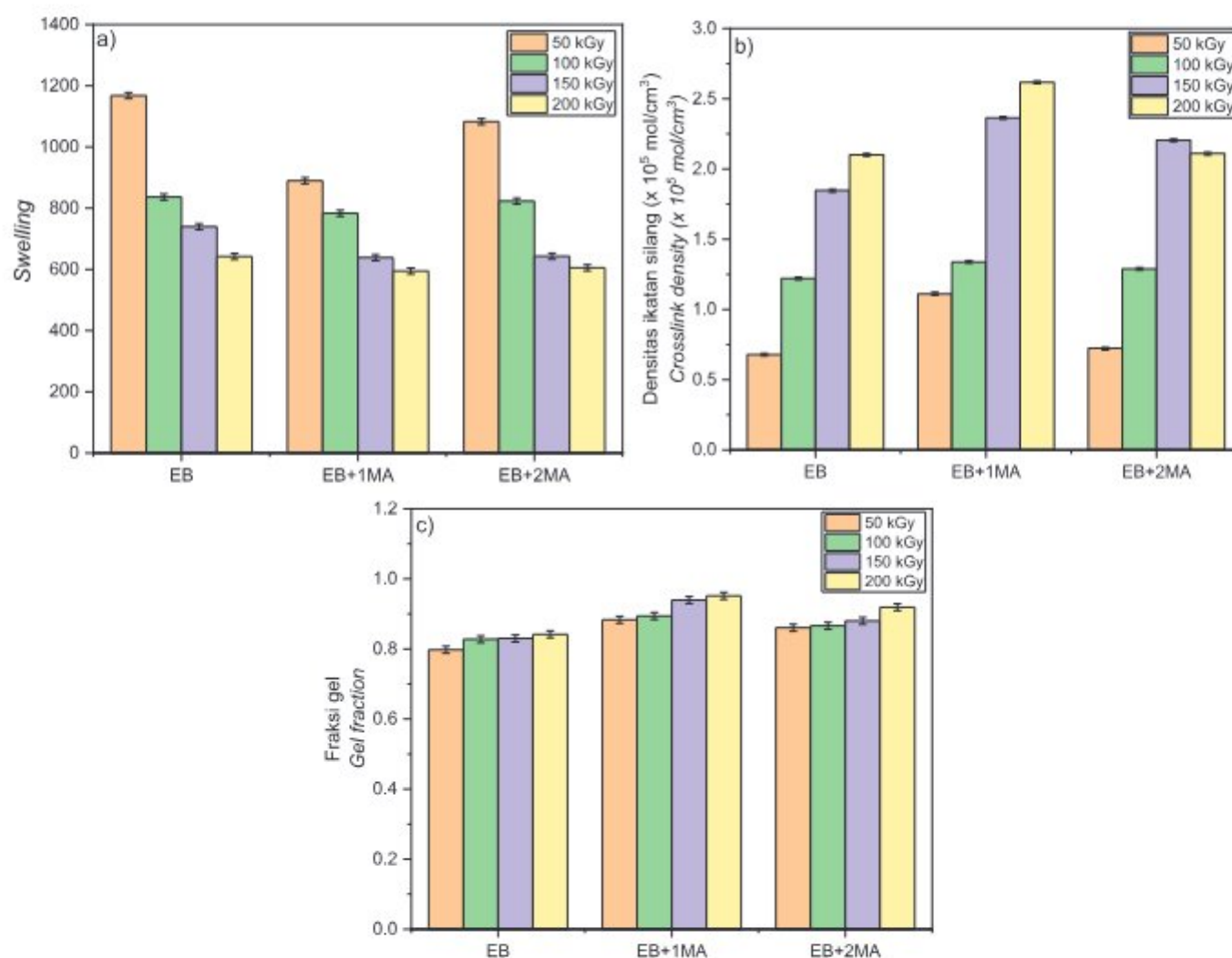
Fraaksi gel yang ditampilkan pada Gambar 1c menunjukkan tren peningkatan seiring dengan bertambahnya dosis elektron beam. Nilai fraksi gel tertinggi diperoleh pada sistem EB+1MA, yang mengindikasikan terbentuknya jaringan ikatan silang yang lebih permanen dan tidak larut. Kesesuaian antara hasil swelling, densitas ikatan silang dan fraksi gel menunjukkan konsistensi mekanisme vulkanisasi yang terjadi.

Nilai *swelling* yang rendah, densitas ikatan silang yang tinggi, dan fraksi gel yang besar pada sistem EB+1MA menunjukkan bahwa maleik anhidrida pada konsentrasi optimum dapat mempercepat pembentukan radikal bebas ketika karet terpapar iradiasi elektron beam. Radikal bebas tersebut

memfasilitasi reaksi ikatan silang antar rantai poliisoprena sehingga terbentuknya jaringan polimer yang lebih stabil (Purbaya *et al.*, 2024).

### Sifat Mekanik Vulkanisat

Pengujian sifat mekanik dari vulkanisat diperlukan untuk melihat apakah karet yang telah divulkanisasi dapat digunakan sesuai dengan spesifikasi produk yang diharapkan. Karet alam yang telah divulkanisasi akan memiliki sifat elastis dan plastis yang dapat tergambar dari pengujian *tensile properties*. Pengujian sifat mekanik vulkanisat pada penelitian ini meliputi pengujian kuat tarik, kuat sobek, modulus dan perpanjangan putus.



Gambar 1. a) *Swelling*, b) densitas ikatan silang, dan c) fraksi gel dari vulkanisat sampel setelah divulkanisasi dengan elektron beam

Figure 1. a) *Swelling*, b) *crosslink density*, and c) *gel fraction* of vulcanized samples after electron beam irradiation

### 1. Kuat Tarik Karet Vulkanisat

Kuat tarik (*tensile strength*) merupakan parameter utama yang menunjukkan kemampuan material menahan tegangan sebelum mengalami putus. Gambar 2 menunjukkan pengaruh dosis elektron beam dan penambahan maleik anhidrida terhadap kuat tarik karet vulkanisat. Pada dosis rendah (10 dan 30 kGy), penambahan maleik anhidrida tidak memberikan peningkatan kuat tarik yang berarti. Hal ini disebabkan oleh belum terbentuknya jaring ikatan silang yang memadai pada dosis tersebut. Tetapi pada dosis di atas 30 kGy, kuat tarik meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan dosis elektron beam, terutama pada sistem dengan penambahan maleik anhidrida. Peningkatan kuat tarik dengan meningkatnya dosis radiasi berkaitan erat dengan peningkatan densitas ikatan silang. Iradiasi elektron beam menghasilkan radikal bebas pada rantai poliisoprena, yang kemudian bereaksi membentuk ikatan silang antar rantai polimer. Semakin tinggi dosis radiasi, semakin banyak radikal bebas yang terbentuk sehingga jumlah ikatan silang meningkat dan jaringan polimer menjadi lebih kuat (Purbaya *et al.*, 2024).

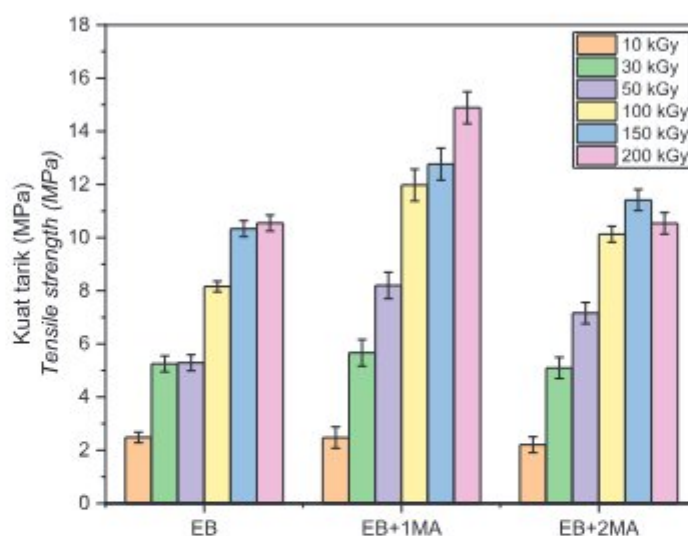
Sistem EB+1MA menunjukkan nilai kuat tarik tertinggi dibandingkan sistem lainnya. Maleik anhidrida pada konsentrasi 1 bsk berperan efektif sebagai *sensitizer* yang meningkatkan laju pembentukan radikal bebas serta memungkinkan terjadinya

reaksi *grafting* antara gugus anhidrida dan rantai poliisoprena (Nakason *et al.*, 2004; Said Siregar *et al.*, 2021). Reaksi ini meningkatkan polaritas dan interaksi antar rantai, sehingga memperkuat jaringan polimer secara keseluruhan.

Sebaliknya, pada sistem EB+2MA, peningkatan kuat tarik tidak sebanding dengan sistem EB+1MA. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya efek saturasi atau *over-crosslinking*, di mana kelebihan maleik anhidrida dapat bertindak sebagai penangkal radikal (*radical scavenger*) atau menyebabkan pembentukan jaringan yang kurang homogen. Akibatnya, meskipun densitas ikatan silang relatif tinggi, integritas mekanik tidak meningkat secara optimal (Kim *et al.*, 2020). Dengan demikian, sifat kuat tarik optimal diperoleh pada penambahan 1 bsk maleik anhidrida karena memberikan keseimbangan terbaik antara pembentukan ikatan silang dan fleksibilitas jaringan polimer.

### 2. Kekuatan Sobek Karet Vulkanisat

Kekuatan sobek menggambarkan ketahanan karet terhadap propagasi retakan saat diberi beban tarik. Gambar 3 menunjukkan bahwa penambahan maleik anhidrida secara signifikan meningkatkan kuat sobek karet vulkanisat, khususnya pada sistem EB+1MA. Tanpa penambahan maleik anhidrida, nilai kuat sobek karet vulkanisat hanya dapat mencapai 30 kN/m, tetapi setelah penambahan maleik anhidrida



Gambar 2. Pengaruh penambahan maleik anhidrida dan dosis elektron beam terhadap kuat tarik karet vulkanisat.

Figure 2. The effect of maleic anhydride addition and electron beam doses on the tensile strength of vulcanized rubber.

hanya dengan 1 bsk, nilai kuat sobek mampu mencapai lebih dari 45 kN/m.

Peningkatan ini disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya, interaksi kimia, peningkatan kompatibilitas, dan optimasi pembentukan ikatan silang. Maleik anhidrida dapat bereaksi dengan partikel karet membentuk ikatan silang yang lebih efektif di bawah radiasi elektron beam. Ikatan silang ini akan meningkatkan kekuatan sobek dari karet karena dengan ikatan silang yang optimal maka distribusi tegangan lebih merata ketika karet terkena gaya robekan. Maleik anhidrida juga dapat meningkatkan kompatibilitas bahan aditif di dalam matriks karet yang dapat meningkatkan sifat mekanik karet yang dihasilkan (Ujiyanto *et al.*, 2017).

Pada sistem EB+2MA, nilai kuat sobek menurun dibandingkan sistem EB+1MA. Hal ini dapat terjadi karena *over crosslinking* atau terbentuknya ikatan silang yang berlebih. Meskipun ikatan silang umumnya meningkatkan sifat material, terlalu banyak dapat menciptakan struktur yang kaku yang mengurangi fleksibilitas dan ketangguhan yang akhirnya mengarah pada penurunan kekuatan sobek (Kim *et al.*, 2020). Selain itu penambahan maleik anhidrida yang lebih banyak dapat menyebabkan pemisahan fase dalam matriks karet. Jika maleik anhidrida tidak terdispersi secara merata dalam lateks,

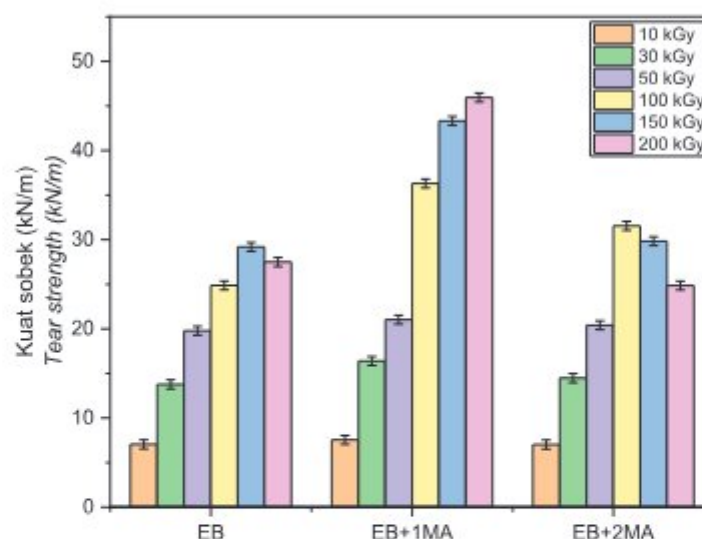
dapat terbentuk titik lemah pada material di mana robekan lebih mungkin terjadi.

### 3. Modulus pada Regangan 300%

Modulus pada regangan 300% merupakan tegangan (*stress*) yang diperlukan untuk meregangkan karet hingga tiga kali panjang aslinya (300% pemanjangan). Nilai modulus ini dapat bervariasi tergantung pada formulasi karet dan kondisi proses vulkanisasi. Modulus secara umum mencerminkan kekakuan dan elastisitas dari material.

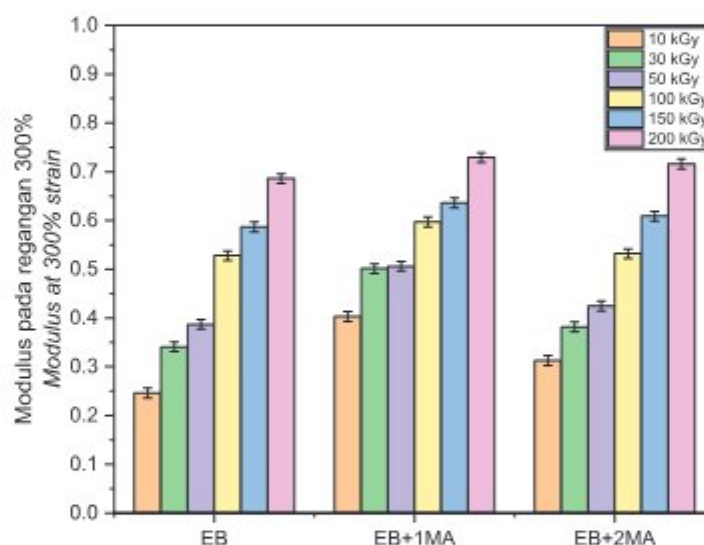
Gambar 4 menunjukkan perubahan modulus pada karet yang divulkanisasi dengan elektron beam tanpa dan dengan penambahan maleik anhidrida sebagai elektron beam promotor. Penambahan maleik anhidrida sebanyak 1 bsk meningkatkan nilai modulus dibandingkan tanpa penambahan maleik anhidrida. Hasil ini mendukung hasil pengujian kuat tarik dan kuat sobek karet sebelumnya. Maleik anhidrida dapat berfungsi sebagai *sensitizer* yang meningkatkan efisiensi pembentukan ikatan silang saat karet terkena radiasi elektron beam. Modulus meningkat karena modulus adalah ukuran kekakuan karet yang berbanding lurus dengan densitas ikatan silang.

Dengan lebih banyak ikatan silang, rantai poliisoprena menjadi lebih terikat dalam jaringan tiga dimensi, sehingga



Gambar 3. Pengaruh penambahan maleik anhidrida dan dosis elektron beam terhadap kuat sobek karet vulkanisat.

Figure 3. The effect of maleic anhydride addition and electron beam doses on the tear strength of vulcanized rubber.



Gambar 4. Pengaruh penambahan maleik anhidrida dan dosis elektron beam terhadap modulus karet vulkanisat.

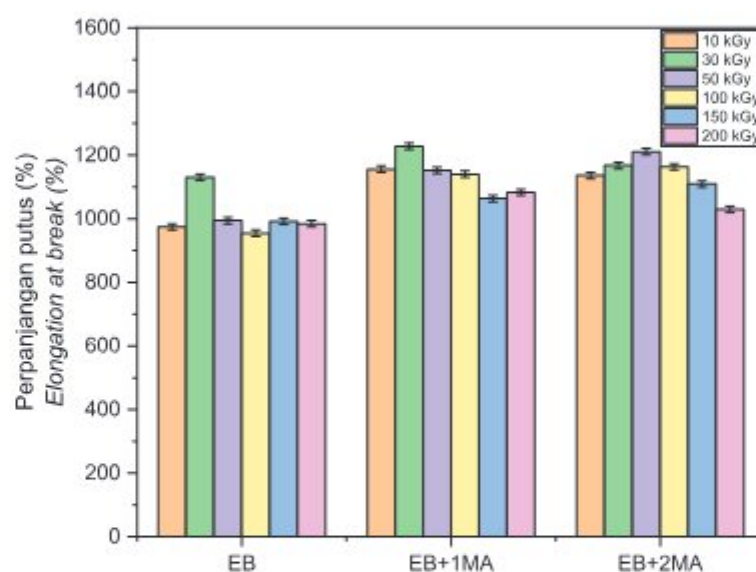
Figure 4. The effect of maleic anhydride addition and electron beam doses on the modulus of vulcanized rubber.

membutuhkan gaya yang lebih besar untuk meregangkan karet hingga 300%. Selain itu gugus anhidrida bersifat polar dan dapat meningkatkan interaksi antar poliisoprena melalui ikatan hidrogen atau gaya tarik polar (Nakason *et al.*, 2004; Pongsathit & Pattamaprom, 2018 ). Interaksi ini dapat mengurangi mobilitas rantai poliisoprena, membuat karet sulit untuk diregangkan, akibatnya modulus meningkat karena karet menjadi lebih kaku pada tingkat regangan tertentu.

#### 4. Perpanjangan Putus Karet Vulkanisat

Perpanjangan putus (*elongation at break*) merupakan kemampuan suatu material untuk dapat diregangkan hingga mencapai titik putus. Dalam pengujian sifat fisika karet alam, perpanjangan putus biasanya sangat tinggi, seringkali berkisar antara 600% hingga lebih dari 1000%. Kemampuan elongasi yang tinggi ini merupakan salah satu karakteristik khas karet alam, yang memungkinkannya untuk mengalami deformasi signifikan di bawah tegangan tarik sebelum mengalami kerusakan. Nilai perpanjangan putus dapat bervariasi tergantung pada faktor seperti formulasi, kondisi vulkanisasi dan bahan tambahan yang digunakan.

Gambar 5 menyajikan perpanjangan putus karet yang divulkanisasi dengan elektron beam dengan dan tanpa penambahan maleik anhidrida. Pada karet yang divulkanisasi tanpa penambahan maleik anhidrida nilai perpanjangan putus pada kisaran 954% s/d 1130%, sedangkan karet dengan penambahan maleik anhidrida nilai perpanjangan putusnya sedikit lebih tinggi, yaitu pada kisaran 1029% s/d 1227%. Nilai perpanjangan putus sampel maleik anhidrida sedikit lebih tinggi daripada sampel tanpa maleik anhidrida dapat terjadi karena maleik anhidrida dapat bereaksi dengan ikatan rangkap pada poliisoprena atau karet melalui mekanisme *grafting*. Proses ini dapat meningkatkan fleksibilitas karet. Gugus anhidrida yang terikat pada rantai polimer dapat memperbaiki kelenturan tanpa mengurangi kekuatan mekanik secara signifikan. Hal ini memungkinkan karet merengang lebih jauh sebelum putus. Gugus polar pada maleik anhidrida (C=O) dapat bertindak sebagai pelumas internal di antara rantai poliisoprena, mengurangi gesekan antar rantai saat karet meregang (Mahendra *et al.*, 2019). Efek ini memungkinkan rantai poliisoprena karet bergerak lebih bebas sebelum titik putus, meningkatkan perpanjangan putus.



Gambar 5. Pengaruh penambahan maleik anhidrida dan dosis elektron beam terhadap perpanjangan putus karet vulkanisat.

Figure 5. The effect of maleic anhydride addition and electron beam doses on elongation at break of vulcanized rubber.

#### Dosis dan Konsentrasi Optimum serta Implikasi Teoritis

Penentuan dosis elektron beam dan konsentrasi maleik anhidrida yang optimum dalam vulkanisasi karet alam dilakukan dengan mempertimbangkan kombinasi dosis dan konsentrasi yang memberikan keseimbangan terbaik antara sifat mekanik (kuat tarik, kuat sobek, modulus, dan perpanjangan putus) serta parameter struktur karet (derajat *swelling*, crosslink density, dan fraksi gel).

Dosis optimum adalah dosis yang menghasilkan sifat mekanik terbaik dan tingkat crosslinking yang maksimal. Berdasarkan data, kuat tarik tertinggi dicapai pada EB+1MA pada 200 kGy (14,9 MPa), kuat sobek tertinggi dicapai pada EB+1MA pada 200 kGy (45,95 kN/m), crosslink density tertinggi pada EB+1MA, 200 kGy (2,62), fraksi gel tertinggi pada EB+1MA pada 200 kGy (0,95), dan derajat *swelling* terendah pada EB+1MA pada 200 kGy (594,58). Meskipun sifat mekanik terus meningkat hingga 200 kGy, dosis yang lebih tinggi juga menyebabkan penurunan perpanjangan putus dan bisa menyebabkan kerapuhan. Oleh karena itu, dosis optimum diperkirakan berada pada 150 kGy, karena memberikan keseimbangan terbaik antara kuat tarik, kuat sobek, dan fleksibilitas material.

Pada perbandingan antara EB+1MA dan EB+2MA menunjukkan bahwa EB+1MA memiliki sifat mekanik yang lebih baik

dibandingkan EB+2MA, terutama pada kuat tarik dan kuat sobek. Crosslink density dan fraksi gel lebih tinggi pada EB+1MA dibandingkan EB+2MA, menunjukkan ikatan silang yang lebih optimal. EB+2MA memiliki perpanjangan putus yang lebih rendah dibandingkan EB+1MA, menunjukkan karet menjadi lebih kaku dan kurang elastis pada konsentrasi 2 bsk MA. Dari hasil ini, konsentrasi maleik anhidrida optimum adalah 1 bsk (EB+1MA) karena memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan mekanik, elastisitas, dan crosslink density. Secara teoritis, hasil penelitian ini menegaskan bahwa maleik anhidrida berperan sebagai *sensitizer* yang mempengaruhi kinetika reaksi radiasi.

Pada konsentrasi optimum, maleik anhidrida meningkatkan efisiensi pembentukan radikal bebas dan propagasi reaksi ikatan silang. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, peningkatan laju terminasi radikal dan pembentukan jaringan yang terlalu rapat menyebabkan penurunan sifat mekanik tertentu. Temuan ini menegaskan pentingnya keseimbangan antara pembentukan, propagasi, dan terminasi radikal dalam vulkanisasi karet alam berbasis iradiasi elektron beam.

#### KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa vulkanisasi lateks karet alam menggunakan radiasi elektron beam dengan

penambahan maleik anhidrida sebagai *sensitizer* merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan sifat mekanik karet alam. Dosis optimum yang diperoleh adalah 150 kGy dengan konsentrasi maleik anhidrida 1 bsk (EB+1MA). Pada kombinasi ini, vulkanisat karet menunjukkan kuat tarik tinggi (12,8 MPa), kuat sobek tinggi (43,33 kN/m), modulus yang baik (0,636 MPa), serta crosslink density dan fraksi gel tertinggi, yang menandakan ikatan silang optimal tanpa mengorbankan elastisitas. Sebagai pembanding, vulkanisasi dengan elektron beam tanpa penambahan maleik anhidrida (EB) menghasilkan sifat mekanik yang lebih rendah, dengan kuat tarik hanya mencapai 10,3 MPa dan kuat sobek 29,2 kN/m pada dosis yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan maleik anhidrida pada 1 bsk terbukti efektif dalam meningkatkan pembentukan ikatan silang sehingga menghasilkan material karet dengan kekuatan tarik, kekuatan sobek, modulus, dan perpanjangan putus yang lebih baik dibandingkan dengan vulkanisasi menggunakan elektron beam tanpa *sensitizer*.

Selain berperan sebagai *sensitizer*, maleik anhidrida juga dapat bereaksi dengan rantai poliisoprena melalui mekanisme *grafting*, yang berkontribusi pada peningkatan sifat mekanik secara keseluruhan. Dengan demikian, metode ini tidak hanya meningkatkan efisiensi proses vulkanisasi tetapi juga berpotensi sebagai alternatif yang lebih unggul dibandingkan dengan vulkanisasi elektron beam tanpa penambahan *sensitizer* dalam meningkatkan kualitas karet alam.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Balachandrakurup, V., George, N., & Gopalakrishnan, J. (2021). Effect of compatibiliser on the mechanical, rheological and thermal properties of natural rubber/Cellulose nanofibre composites. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5345-5350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.065>
- Bohm, G. G. A., & Tveekrem, J. O. (1982). The radiation chemistry of elastomers and its industrial applications. *Rubber Chemistry and Technology*, 55(3), 575-668. <https://doi.org/10.5254/1.3535898>
- Dominic C.D., M., Joseph, R., Begum, P. M. S., Joseph, M., Padmanabhan, D., Morris, L. A., Kumar, A. S., & Formela, K. (2020). Cellulose Nanofibers Isolated from the Cuscuta Reflexa Plant as a Green Reinforcement of Natural Rubber. *Polymers*, 12(4), 814. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/4/814>
- Flory, P. J., & Rehner, J., Jr. (1943). Statistical mechanics of crosslinked polymer networks I. rubberlike elasticity. *The Journal of Chemical Physics*, 11(11), 512-520. <https://doi.org/10.1063/1.1723791>
- Haque, M. D. E., Makuuchi, K., Mitomo, H., Yoshii, F., & Ikeda, K. (2005). A new trend in radiation vulcanization of natural rubber latex with a low energy electron beam. *Polymer Journal*, 37(5), 333-339. <https://doi.org/10.1295/polymj.37.333>
- Kim, D. Y., Park, J. W., Lee, D. Y., & Seo, K. H. (2020). Correlation between the Crosslink Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound via Accelerators and Reinforcement. *Polymers*, 12(9), 2020. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/9/2020>
- Mahendra, I. P., Wirjosentono, B., Tamrin, Ismail, H., Mendez, J. A., & Causin, V. (2019). The influence of maleic anhydride-grafted polymers as compatibilizer on the properties of polypropylene and cyclic natural rubber blends. *Journal of Polymer Research*, 26(9), 215. <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1878-2>

- Makuuchi, K., Yoshii, F., Ishigaki, I., Tsushima, K., Mogi, M., & Saito, T. (1990). Development of rubber gloves by radiation vulcanization. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*, 35(1), 154-157. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/1359-0197\(90\)90075-S](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/1359-0197(90)90075-S)
- Nakason, C., Kaesaman, A., & Supasanthitikul, P. (2004). The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. *Polymer Testing*, 23(1), 35-41. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(03\)00059-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0142-9418(03)00059-X)
- Pongsathit, S., & Pattamaprom, C. (2018). Irradiation grafting of natural rubber latex with maleic anhydride and its compatibilization of poly(lactic acid)/natural rubber blends. *Radiation Physics and Chemistry*, 144, 13-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.11.006>
- Purbaya, M., Kobayashi, T., Thamrongsiripak, N., Hayichelaeh, C., & Boonkerd, K. (2023). Electron beam irradiation for enhancing the properties of natural rubber latex. *Radiation Physics and Chemistry*, 212, 111193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111193>
- Purbaya, M., Kobayashi, T., Thamrongsiripak, N., Hayichelaeh, C., & Boonkerd, K. (2024). Sulfur as an effective sensitizer for natural rubber vulcanized via electron beam irradiation. *Polymers for Advanced Technologies*, 35(7), e6523. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pat.6523>
- Said Siregar, M., Ardilla, D., Eddiyanto, & Nasution, A. S. (2021). Grafting of Maleic Anhydride onto Cyclized Natural Rubber in the Melt Phase: the Effect of Trimethylol Propane Triacrylate. *Journal of Physics: Conference Series*, 1764(1), 012200. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1764/1/012200>
- Srirachya, N., Kobayashi, T., & Boonkerd, K. (2017). An alternative crosslinking of epoxidized natural rubber with maleic anhydride. *Key Engineering Materials*, 748, 84-90. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.748.84>
- Ujianto, O., Noviyanti, R., Wijaya, R., & Ramadhoni, B. (2017). Effect of maleated natural rubber on tensile strength and compatibility of natural rubber/coconut coir composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 223(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/223/1/012014>
- Wongthong, P., Nakason, C., Pan, Q., Rempel, G. L., & Kiatkamjornwong, S. (2013). Modification of deproteinized natural rubber via grafting polymerization with maleic anhydride. *European Polymer Journal*, 49(12), 4035-4046. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.09.009>
- Zhang, H., Datta, R. N., Talma, A. G., & Noordermeer, J. W. M. (2010). Maleic-anhydride grafted EPM as compatibilising agent in NR/BR/EPDM blends. *European Polymer Journal*, 46(4), 754-766. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2009.12.020>