

## POTENSI IRADIASI ELEKTRON BEAM DALAM VULKANISASI KARET ALAM: SOLUSI RAMAH LINGKUNGAN UNTUK INDUSTRI KARET

*The Potential of Electron Beam Irradiation in Natural Rubber Vulcanization:  
An Environmentally Friendly Solution for the Rubber Industry*

**Mili Purbaya**

Pusat Penelitian Karet, Jl. Palembang – Pangkalan Balai Km.29, Banyuasin 30953, Indonesia  
Email: milipurbaya3107@gmail.com

Diterima 29 April 2025 / Direvisi 1 Juli 2025 / Disetujui 19 Agustus 2025

### **Abstrak**

Karet alam merupakan material polimer yang banyak digunakan dalam berbagai industri karena sifat mekaniknya yang unggul, seperti elastisitas dan kekuatan tarik yang tinggi. Namun, material ini memiliki kelemahan, seperti sensitivitas terhadap suhu (mudah menjadi lunak pada suhu tinggi dan keras pada suhu rendah), kandungan protein alergen, serta dampak lingkungan dari proses vulkanisasi konvensional. Secara global, sekitar 12 juta ton karet alam diproduksi setiap tahun, dengan lebih dari 90% berasal dari negara-negara Asia Tenggara, sementara permintaan terhadap karet bebas alergen dan ramah lingkungan semakin meningkat, terutama di sektor medis. Proses vulkanisasi konvensional berbasis sulfur dan akselerator dapat menghasilkan senyawa berbahaya, seperti N-nitrosamin, yang memiliki potensi risiko bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Alternatif yang lebih ramah lingkungan adalah vulkanisasi menggunakan iradiasi, khususnya dengan teknologi elektron *beam*. Teknologi ini memungkinkan pembentukan ikatan silang tanpa memerlukan bahan kimia tambahan, sehingga mengurangi emisi polutan, meningkatkan ketahanan termal, dan menurunkan kandungan protein dalam karet alam. Vulkanisasi berbasis iradiasi telah terbukti meningkatkan sifat mekanik karet tanpa perlu penggunaan sulfur atau bahan kimia dalam jumlah besar. Meskipun iradiasi sinar gamma dan elektron *beam* dapat

membentuk ikatan silang dalam karet, dosis yang diperlukan cukup tinggi, sehingga efisiensi proses perlu ditingkatkan. Berbagai pendekatan telah dikembangkan, termasuk kombinasi iradiasi dengan gelombang mikro serta penggunaan *sensitizer* untuk menurunkan dosis iradiasi yang diperlukan. Namun, pemilihan *sensitizer* harus mempertimbangkan aspek keamanan dan dampak lingkungan. Kajian ini membahas mekanisme interaksi elektron *beam* dengan polimer, pembentukan ikatan silang, efektivitas elektron *beam* dalam mengurangi kandungan protein lateks karet alam, serta evaluasi vulkanisasi dengan dan tanpa *sensitizer*. Dengan perkembangan teknologi dan meningkatkan kesadaran terhadap lingkungan, vulkanisasi elektron *beam* memiliki potensi besar dalam mengatasi tantangan industri karet alam saat ini, menawarkan solusi yang lebih aman dan berkelanjutan dibandingkan metode konvensional.

Kata kunci: vulkanisasi, karet alam, elektron *beam*, ikatan silang, alergi protein, *sensitizer*

### **Abstract**

*Natural rubber is a polymer material widely used in various industries due to its excellent mechanical properties, such as elasticity and high tensile strength. However, it also has several drawbacks, including temperature sensitivity (it becomes soft at high temperature and hard at low temperature), allergenic protein content, and environmental*

concerns associated with conventional vulcanization processes. Globally, around 12 million tons of natural rubber are produced annually, with more than 90% originating from Southeast Asian countries. Meanwhile, the demand for allergen-free and environmentally friendly rubber is steadily increasing, especially in the medical sector. Conventional sulfur-based vulcanization methods, which involve accelerators, can produce harmful compounds such as N-nitrosamines, posing potential risks to human health and the environment. A more environmentally friendly alternative is vulcanization through irradiation, particularly using electron beam technology. This method enables crosslink formation without additional chemical agents, thereby reducing pollutant emissions, improving thermal stability, and lowering protein content in natural rubber. Irradiation-based vulcanization has been proven to improve the mechanical properties of rubber without requiring large amounts of sulfur or chemical additives. Although both gamma-ray and electron beam irradiation can induce crosslinking in rubber, high irradiation doses are often required, necessitating improvements in process efficiency. Several approaches have been explored, including combining irradiation with microwave treatment and utilizing sensitizers to reduce the required radiation dose. However, selecting an appropriate sensitizer must consider safety and environmental impact. This study discusses the interaction mechanisms between electron beam and polymers, the crosslinking process, the effectiveness of electron beam in reducing protein content in natural rubber latex, and an evaluation of vulcanization with and without sensitizers. With advancements in technology and increasing environmental awareness, electron beam vulcanization has great potential to address the challenges of natural rubber industry today, offering a safer and more sustainable solution compared to conventional methods.

**Keywords:** vulcanization, natural rubber, electron beam, crosslinking, protein allergy, sensitizer

## Pendahuluan

Karet alam merupakan salah satu jenis polimer yang telah banyak digunakan untuk menunjang kehidupan manusia di antaranya

untuk pembuatan ban kendaraan bermotor dan pesawat, sarung tangan, bantal, jas hujan, kondom, dan berbagai produk lainnya. Karet alam diperoleh dari pohon *Hevea brasiliensis* melalui proses penyadapan lateks. Komposisi kimia karet alam tersusun dari molekul *cis-1,4-poliisoprena*, yang memberikan sifat mekanik unggul seperti elastisitas dan kekuatan tarik yang tinggi (Manaila *et al.*, 2016; Phetarporn *et al.*, 2019; Sukthawon *et al.*, 2020). Karet alam memiliki *glass transition temperature* (Tg) yang sangat rendah, yaitu -73 °C, sehingga sangat sensitif terhadap perubahan suhu. Pada suhu yang panas, karet akan menjadi lembut dan lengket, sedangkan pada suhu dingin, karet menjadi keras dan kehilangan elastisitasnya. Untuk menjadikannya produk yang stabil dan fungsional, karet alam harus melalui proses vulkanisasi terlebih dahulu.

Proses vulkanisasi secara konvensional menggunakan berbagai bahan kimia penunjang seperti sulfur, akselerator (misalnya sulfenamide atau tiokarbamat), antioksidan, *filler* dan lain-lain. Penggunaan bahan-bahan ini dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia, seperti emisi senyawa volatil berbahaya dan residu toksik dalam produk (Makuuchi & Cheng, 2012). Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan sistem vulkanisasi yang lebih ramah lingkungan menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa teknologi pengolahan karet tetap aman dan berkelanjutan.

Vulkanisasi karet alam dengan sulfur merupakan metode yang paling umum digunakan di industri. Metode ini pertama kali ditemukan oleh Charles Goodyear, yang menemukan bahwa pemanasan karet dengan penambahan sulfur membentuk ikatan silang antar molekul karet, mengubah sifatnya dari termoplastik menjadi termoset. Proses ini menghasilkan tiga jenis ikatan silang, yaitu mono-sulfidik (C-S-C), di-sulfidik (C-S<sub>2</sub>-C) dan poli-sulfidik (C-S<sub>x</sub>-C), yang memberikan sifat mekanik dan sifat dinamik unggul (Kruželák *et al.*, 2016). Akan tetapi, proses ini memerlukan waktu vulkanisasi yang cukup lama. Untuk meningkatkan efisiensi,

ditambahkan akselerator yang mempercepat pematangan kompon. Komposisi dan jenis akselerator, serta rasio sulfur/akselerator, dapat disesuaikan untuk mencapai karakteristik karet yang optimal. Namun, beberapa jenis akselerator diketahui dapat menghasilkan produk samping berupa *N*-nitrosamin selama proses vulkanisasi, yang bersifat karsinogenik. Studi oleh *Finnish Institute of Occupational Health* (2009) menemukan bahwa pekerja industri karet di Swedia Selatan terpapar *N*-nitrosamin dalam kadar tinggi, yang berpotensi meningkatkan risiko kanker (Jönsson *et al.*, 2009). Hasil penelitian menunjukkan bahwa para pekerja pabrik tersebut terpapar *N*-nitrosamin tingkat tinggi, yang berpotensi meningkatkan risiko kanker. Bahkan meniup balon juga dapat melepaskan *N*-nitrosamin meskipun dalam jumlah yang relatif (SCCP *et al.*, 2007). Senyawa ini terbentuk dari reaksi antara akselerator berbasis sulfenamida atau ditiokarbamat dengan nitrogen oksida. Untuk itu, penting dilakukan penggantian sistem vulkanisasi atau pemilihan akselerator non-amin seperti *dibenzyl amine* atau amine yang terhambat secara sterik (*sterically hindered amines*), sebagai bagian dari upaya mitigasi risiko kesehatan tersebut. Sehingga perlu pengembangan alternatif sistem vulkanisasi yang lebih aman.

Salah satu sistem vulkanisasi alternatif adalah vulkanisasi menggunakan peroksida. Sistem ini menghasilkan ikatan silang tipe karbon-karbon (C–C) yang memiliki energi disosiasi tinggi (~348 kJ/mol), sehingga lebih stabil pada suhu tinggi dibandingkan ikatan silang yang terbentuk dari sistem sulfur (Kruželák *et al.*, 2019). Oleh karena itu, vulkanisasi peroksida menghasilkan produk yang memiliki ketahanan panas yang baik dan cocok untuk aplikasi teknik berat. Namun, sistem ini juga memerlukan suhu vulkanisasi tinggi (biasanya >160 °C), sehingga kurang sesuai untuk produk yang rentan terhadap panas. Dalam beberapa studi, penggunaan kombinasi sistem vulkanisasi sulfur dan peroksida pada karet EPDM menunjukkan peningkatan sifat kuat tarik dan peregangan

putus, meskipun terjadi penurunan indeks ketahanan abrasi dan peningkatan kompresi set (Kruželák *et al.*, 2022; Parathodika *et al.*, 2022).

Pada awal tahun 2023, beberapa negara bagian di Amerika Serikat mulai melarang penggunaan sarung tangan medis berbahan dasar lateks alam karena kandungan proteinnya yang dapat menyebabkan reaksi alergi tipe 1 (Perez, 2023). Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan menggunakan teknologi iradiasi elektron *beam* yang tidak hanya mampu menurunkan kandungan protein alergenik dalam karet alam, tetapi juga dapat digunakan sebagai metode vulkanisasi tanpa bahan kimia tambahan. Iradiasi elektron *beam* bekerja dengan membentuk ikatan silang antar rantai polimer melalui eksitasi energi tinggi, tanpa memerlukan suhu tinggi maupun bahan kimia tambahan (Manaila *et al.*, 2016). Teknologi ini menawarkan sejumlah keunggulan, antara lain efisiensi proses, waktu pemrosesan yang singkat, serta rendahnya risiko degradasi dan oksidasi selama proses. Selain itu, ikatan silang C–C yang dihasilkan oleh iradiasi elektron *beam*, memberikan stabilitas termal yang baik dan menjadikan produk lebih tahan terhadap suhu tinggi. Vulkanisasi dengan iradiasi juga telah diterapkan pada berbagai produk medis dan otomotif, seperti sarung tangan bebas alergen, gasket tahan panas, dan seal berbasis bio-rubber (Craciun *et al.*, 2016).

Tulisan ini akan membahas secara mendalam tentang teknologi iradiasi elektron *beam*, interaksi elektron *beam* dengan polimer, serta perkembangan penelitian terkait vulkanisasi karet alam menggunakan elektron *beam*. Selain itu akan dibahas pula potensi pemanfaatan teknologi ini dalam mengatasi tantangan vulkanisasi konvensional, serta prospek dan tantangan yang dihadapi dalam penerapannya di industri karet.

### Radiasi Elektron *Beam*

Radiasi merupakan bentuk energi yang dipancarkan oleh berbagai sumber, termasuk sinar gamma, gelombang mikro (*microwaves*),

sinar ultraviolet, infra merah (*infrared*), sinar X, and elektron *beam* (Chen *et al.*, 2017; Hansupalak *et al.*, 2016; Moustafa *et al.*, 2016; Chirinos *et al.*, 2003). Jenis radiasi ini telah dimanfaatkan dalam proses iradiasi karet alam, khususnya untuk tujuan vulkanisasi, dan memberikan berbagai keuntungan, seperti eliminasi nitrosamine, toksisitas yang rendah, berkurangnya risiko alergi protein, sifat biodegradabilitas yang baik, emisi SO<sub>2</sub> yang rendah, serta kadar abu produk yang rendah. Selain itu, metode ini juga menghindari kontaminasi ZnO dalam limbah cair (Stelescu *et al.*, 2018).

Sinar gamma dan elektron *beam* merupakan dua teknik iradiasi yang umum digunakan dalam vulkanisasi karet. Dibandingkan sinar gamma, iradiasi elektron *beam* lebih hemat biaya karena waktu pemrosesan yang lebih singkat. Perbedaan antara kedua jenis iradiasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 1. Meskipun elektron *beam* memiliki keterbatasan dalam kapasitas penetrasi (Akhtar *et al.*, 1996), teknik ini sangat ideal untuk vulkanisasi karet alam karena konsumsi energinya yang rendah, minim polusi, serta kemampuannya dalam menghasilkan kepadatan ikatan silang yang merata. Sebagai perbandingan, proses vulkanisasi konvensional dengan sulfur umumnya dilakukan pada suhu sekitar 140–160 °C selama 10-30 menit, sedangkan vulkanisasi menggunakan elektron *beam* dapat dilakukan pada suhu ruang (25–30 °C) hanya dalam waktu 1-2 menit (Manaila *et al.*, 2016; Kruželák *et al.*, 2016). Iradiasi dengan elektron

*beam* telah diterapkan dalam berbagai aplikasi, seperti pembentukan ikatan silang karet alam (Craciun *et al.*, 2016), karet alam epoksi (Ratnam *et al.*, 2000a; Ratnam *et al.*, 2000b), campuran karet (Chong *et al.*, 2010; Manshaie *et al.*, 2011), dan komposit karet (Manaila *et al.*, 2016; Phetarporn *et al.*, 2019; Reowdecha *et al.*, 2021; Senna *et al.*, 2012; Stelescu *et al.*, 2014).

Untuk menghasilkan elektron *beam*, aliran kontinu elektron dipercepat melalui medan elektromagnetik atau elektrostatik. Intensitas radiasi dapat disesuaikan dengan mengatur tegangan dan arus. Sebagai contoh, aliran sebesar satu ampere (1 A) setara dengan aliran sekitar  $6,3310 \times 10^{18}$  elektron per detik. Energi elektron umumnya berkisar antara 100 KeV hingga 10 MeV, dengan daya berkas antara 0,5 hingga 200 kW (Drobny, 2013).

### Interaksi Elektron *Beam* dengan Polimer

Ketika elektron berenergi tinggi dari elektron *beam* melewati suatu material, energinya akan mengalami penurunan secara bertahap akibat berbagai interaksi fisik. Secara umum, transfer energi dari elektron ke polimer berlangsung melalui dua mekanisme utama (Drobny, 2013). Pertama, tabrakan antara elektron dan atom dari material, yang menyebabkan ionisasi (pelepasan elektron dari atom atau molekul) dan eksitasi (kenaikan energi elektron ke tingkat lebih tinggi). Kedua, melalui interaksi dengan inti atom, yang dapat menghasilkan emisi foton sinar-X.

Tabel 1. Perbedaan sinar gamma dan elektron *beam* (Woo & Sandford, 2002)

Sinar Gamma	Elektron <i>Beam</i>
Dihasilkan dari peluruhan radioaktif (kobalt-60) yang memancarkan foton.	Dihasilkan oleh mesin yang mempercepat elektron berenergi tinggi.
Foton bermassa sangat kecil, memungkinkan penetrasi tinggi melalui material. Cocok untuk produk berdensitas menengah hingga tinggi.	Elektron bermassa tertentu, penetrasi terbatas oleh energi. Ideal untuk produk berdensitas rendah hingga menengah.
Dosis diberikan perlahan, umumnya dalam hitungan jam.	Dosis diberikan cepat, umumnya dalam hitungan detik hingga menit.



Interaksi ini selanjutnya menyebabkan pembentukan radikal bebas dan ion, yang menjadi pemicu berbagai reaksi dalam polimer. Terdapat tiga jenis interaksi utama antara polimer dan elektron *beam* yang mengawali proses tersebut, yaitu ionisasi, eksitasi, dan penangkapan elektron.

Ionisasi terjadi ketika elektron *beam* mentransfer energi lebih besar dari ikatan elektron dalam molekul polimer. Hasilnya, molekul kehilangan satu atau lebih elektron, menghasilkan ion dan radikal bebas. Reaksi-reaksi ionisasi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

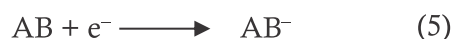


Eksitasi terjadi ketika elektron dalam molekul menyerap energi dan berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi (*excited state*). Molekul tereksitasi ( $AB^*$ ) bersifat tidak stabil dan mengalami dekomposisi menjadi radikal bebas:



Reaksi pada Persamaan (3) dan (4) menunjukkan bahwa meskipun tidak terjadi ionisasi, energi yang diserap cukup untuk mendorong molekul menuju keadaan tereksitasi, yang kemudian dapat terfragmentasi menjadi dua radikal bebas. Radikal ini sangat reaktif dan akan memulai reaksi kimia lanjutan seperti pembentukan ikatan silang atau degradasi.

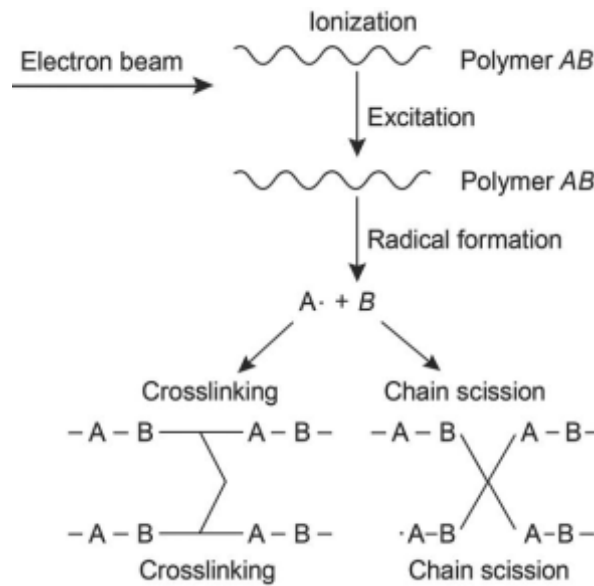
Penangkapan elektron terjadi ketika suatu molekul menangkap elektron bebas dari lingkungan, membentuk anion radikal (AB) yang tidak stabil dan kemudian terfragmentasi:



Mekanisme-mekanisme tersebut menghasilkan radikal bebas sebagai produk utama, yang kemudian dapat melanjutkan ke berbagai reaksi sekunder. Tabel 2 mengelompokkan reaksi-reaksi akibat paparan elektron *beam* ke dalam dua kategori utama yaitu reaksi utama dan reaksi sekunder. Gambar 1 menunjukkan tahapan mekanisme interaksi antara elektron *beam* dan rantai polimer.

Tabel 2. Reaksi-reaksi yang dapat terjadi akibat elektron *beam* (Sumber: Drobny (2013), dimodifikasi)

Jenis Reaksi	Keterangan Singkat	Kategori
Radikal polimerisasi	Radikal bebas memulai reaksi polimerisasi pada monomer atau oligomer	Reaksi utama
<i>Crosslinking</i>	Penggabungan antar rantai polimer yang menghasilkan struktur tiga dimensi	Reaksi utama
<i>Main-chain scission</i>	Pemutusan rantai utama akibat energi tinggi, menyebabkan degradasi	Reaksi sekunder
<i>Grafting</i>	Polimerisasi monomer yang mencangkok pada rantai utama polimer dasar	Reaksi sekunder
<i>Long-chain braching</i>	Pembentukan cabang panjang pada rantai utama yang mempengaruhi viskositas	Reaksi sekunder
<i>Radiation curing</i>	Kombinasi ikatan silang dan polimerisasi dalam sistem monomer tertentu (UV/EB <i>curing</i> )	Reaksi sekunder



Gambar 1. Mekanisme interaksi electron *beam* dengan polimer

### Vulkanisasi dengan Iradiasi untuk Mengurangi Kandungan Protein pada Karet Alam

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan sarung tangan lateks telah dilarang di sejumlah negara bagian di Amerika Serikat, seperti California, Arizona, Rhode Island, Ohio, Connecticut, Oregon, Hawaii, dan Illinois (Perez, 2023). Larangan ini diberlakukan karena risiko reaksi alergi yang dapat ditimbulkan produk tersebut. Kondisi ini menjadi tantangan besar bagi industri produk berbasis lateks karet alam.

Reaksi alergi akibat penggunaan sarung tangan dari lateks karet alam umumnya diklasifikasikan sebagai reaksi alergi tipe I atau tipe IV:

- Reaksi tipe I muncul dalam waktu 5 hingga 60 menit setelah kontak, ditandai dengan gatal lokal, sensasi terbakar, urtikaria, hingga gejala sistemik seperti rinitis, asma, dan pada kasus yang lebih parah, anafilaksis. Reaksi ini terutama dipicu oleh sisa protein ekstrak dalam produk lateks.
- Reaksi tipe IV muncul dalam waktu 48 hingga 96 jam, ditandai dengan eksim akibat hipersensitivitas terhadap residu bahan kimia vulkanisasi, seperti

ditiokarbamat, tiuram, dan merkaptobenzotiazol (Makuuchi, 2003).

Karena kandungan protein dalam lateks merupakan salah satu pemicu utama reaksi alergi tipe I, teknik vulkanisasi dengan iradiasi telah diteliti sebagai metode untuk menurunkan kadar protein dalam lateks.

Soebianto *et al.* (2000) meneliti metode vulkanisasi berbasis iradiasi untuk mengurangi protein dalam lateks karet alam. Mereka menemukan bahwa penambahan 3 phr (*per hundred rubber*) larutan *water-soluble protein* (WSP) berkonsentrasi 10%, diikuti proses sentrifugasi, dapat menurunkan kadar protein ekstrak (*extracted protein/EP*) hingga batas deteksi minimum. Penurunan ini terjadi akibat terbentuknya kompleks larut air antara protein dan WSP, yang kemudian dapat dihilangkan dengan mudah melalui sentrifugasi.

Penelitian lanjutan oleh Rogero *et al.* (2003) menunjukkan bahwa dosis iradiasi berpengaruh terhadap kadar EP. Meskipun konsentrasi EP sempat meningkat pada dosis iradiasi tertentu, kandungan EP secara keseluruhan dapat ditekan hingga 80% dari nilai awal.

Parra *et al.* (2005) juga mengevaluasi efek vulkanisasi dengan iradiasi dalam mengurangi

EP. Dengan menambahkan aditif polimer selama proses bi-sentrifugasi (dua tahap sentrifugasi), sebagian besar protein dalam material berhasil dihilangkan. Kandungan EP pada sarung tangan lateks hasil perlakuan ini berkurang hingga 40% dibandingkan dengan sarung tangan komersial yang beredar di pasaran.

Berdasarkan berbagai hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa vulkanisasi lateks karet alam dengan metode iradiasi merupakan pendekatan yang efektif dalam menurunkan kadar protein ekstrak, sehingga berpotensi besar dalam mengurangi risiko alergi yang selama ini menjadi tantangan pada produk berbahan dasar lateks.

#### Vulkanisasi dengan Iradiasi tanpa *Sensitizer*

Berbagai penelitian telah menyelidiki proses vulkanisasi karet alam menggunakan metode iradiasi tanpa penambahan sensitizer. Salah satu tantangan utama dalam pendekatan ini adalah kebutuhan akan dosis radiasi yang relatif tinggi, yang umumnya berada pada kisaran 150 hingga 500 kGy, untuk mencapai tingkat ikatan silang (*crosslinking*) yang optimal, tergantung pada jenis radiasi, material dan dosis radiasi yang digunakan (Tabel 3). Dosis tinggi diperlukan karena tidak

adanya zat penginduksi reaksi (*sensitizer*) yang dapat mempercepat atau menurunkan ambang energi proses pengikatan silang.

Minoura dan Asao (1961) meneliti pengaruh dosis radiasi terhadap sifat karet yang divulkanisasi menggunakan sinar gamma pada rentang 50-500 kGy, tanpa penambahan *sensitizer*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik optimal sebesar 17,7 MPa dicapai pada dosis 500 kGy.

Pada tahun 1996, Akhtar *et al.* melakukan penelitian terhadap vulkanisasi lateks karet alam (NRL) menggunakan elektron *beam* berenergi rendah dengan akselerator bertegangan 300, 250, dan 175 keV. Lateks disinari dalam reaktor berbahan baja tahan karat dengan pengaduk di bagian bawah. Mereka menemukan bahwa dosis iradiasi 250 kGy diperlukan untuk memvulkanisasi lateks tanpa *sensitizer*. Akselerator dengan tegangan 300 dan 250 keV efektif dalam proses iradiasi, sedangkan 175 keV tidak mencukupi untuk mencapai vulkanisasi.

Martin *et al.* (2002) mengusulkan pendekatan baru dengan mengkombinasikan iradiasi elektron *beam* dan radiasi gelombang mikro (*microwave*). Mereka meneliti efek kombinasi ini pada lembaran karet yang terdiri atas karet alam, karet polibutadiena, karbon

Tabel 3. Penelitian tentang vulkanisasi dengan iradiasi tanpa *sensitizer*

Peneliti	Jenis Radiasi	Material	Dosis (kGy)	Hasil Utama
Minoura & Asao (1961)	Gamma	NRL	50-500	Kekuatan tarik optimal 17,7 MPa pada 500 kGy
Akhtar <i>et al.</i> (1996)	Elektron <i>beam</i>	NRL	250	Efektif pada 250 keV, tidak efektif pada 175 keV
Martin <i>et al.</i> (2002)	EB + Microwave	NR blend	200-250 → 30-125	Dosis dan waktu iradiasi berkurang signifikan
Basfar <i>et al.</i> (2002)	Electron <i>beam</i>	SBR, NR	20-200	Sifat mekanik optimal pada 150–200 kGy
Chirinos <i>et al.</i> (2003)	Electron <i>beam</i>	NRL	250 kV, 5 min	Swelling & kekuatan tarik meningkat
Espósito dan Marzocca (2018, 2020)	Electron <i>beam</i>	NR, SSBR blend	60-100	Pre-vulkanisasi: scorch & energi aktivasi menurun, crosslink meningkat
Reowdecha <i>et al.</i> (2021)	Electron <i>beam</i>	NR/Silika	150-250	Kekuatan tarik naik, elongasi turun

hitam, dan aditif lainnya. Hasilnya menunjukkan bahwa tanpa *microwave*, dibutuhkan dosis elektron *beam* sebesar 200-250 kGy untuk mencapai tingkat *crosslinking* yang tinggi. Namun, kombinasi dengan *microwave* memungkinkan pengurangan dosis iradiasi hingga 2-6 kali lipat, sekaligus mempersingkat waktu iradiasi secara signifikan.

Basfar *et al.* (2002) meneliti sifat mekanik karet styrene-butadiene rubber (SBR) dan karet alam yang mengandung karbon hitam HAF dan ko-agen dalam berbagai sistem vulkanisasi. Mereka membandingkan hasil antara vulkanisasi menggunakan peroksida, sulfur, dan iradiasi, dengan variasi dosis antara 20-200 kGy. Hasilnya, senyawa SBR yang divulkanisasi melalui iradiasi pada dosis 150-200 kGy menunjukkan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Namun, untuk dosis yang lebih rendah (60-100 kGy), penambahan ko-agen diperlukan. Pada karet alam, penambahan ko-agen selalu dibutuhkan untuk menghasilkan sifat mekanik yang superior dibandingkan vulkanisasi dengan sulfur atau peroksida.

Chirinos *et al.* (2003) mengevaluasi vulkanisasi lateks karet alam dengan iradiasi elektron *beam* pada tegangan 250 keV. Mereka menganalisis sifat seperti rasio *swelling*, fraksi gel, dan kekuatan mekanik. Hasilnya menunjukkan bahwa sebagian besar sifat meningkat seiring dengan peningkatan arus (*currents*) dan waktu iradiasi, kecuali perpanjangan putus dan rasio *swelling*. Perpanjangan putus optimal tercapai ketika lateks disinari menggunakan elektron *beam* berarus 2,5 mA selama 5 menit.

Espósito dan Marzocca (2018) meneliti pengaruh iradiasi elektron *beam* terhadap vulkanisasi termal karet alam. Mereka menemukan bahwa seng stearat terbentuk dari reaksi ZnO dan asam stearat berfungsi sebagai plastisator, sehingga menurunkan modulus penyimpanan saat pre-vulkanisasi. Pre-vulkanisasi dengan iradiasi ini juga menurunkan waktu *scorch* dan energi aktivasi. Pada penelitian lanjutan tahun 2020, mereka mengkaji efek iradiasi elektron *beam* terhadap

komposit SSBR/NR/BR yang diperkuat silika sebelum vulkanisasi. Hasilnya, pre-vulkanisasi dengan iradiasi menurunkan waktu *scorch*, waktu *curing* optimal, dan energi aktivasi, serta meningkatkan densitas *crosslink*, yang berdampak pada peningkatan sifat mekanik akhir.

Reowdecha *et al.* (2021) mengevaluasi efek iradiasi elektron *beam* terhadap proses vulkanisasi komposit karet alam yang diperkuat silika. Dua metode persiapan sampel digunakan (lateks dan film), dengan variasi dosis 150-250 kGy. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik meningkat pada sampel berbentuk lateks, namun perpanjangan putus menurun seiring peningkatan dosis iradiasi dari 150 menjadi 200 kGy.

Berdasarkan berbagai studi tersebut, dapat disimpulkan bahwa vulkanisasi dengan metode iradiasi, baik dengan sinar gamma maupun elektron *beam*, efektif dalam meningkatkan sifat mekanik karet alam dan karet sintesis. Akan tetapi, dosis radiasi yang dibutuhkan bervariasi tergantung pada jenis karet, sistem vulkanisasi, dan metode yang digunakan. Kombinasi iradiasi dengan teknik lain, seperti *microwave* atau penambahan ko-agen, berpotensi mengurangi kebutuhan dosis dan meningkatkan efisiensi proses vulkanisasi.

### **Vulkanisasi dengan Iradiasi dan Penambahan Sensitizer**

Beberapa bahan kimia atau *sensitizer* dapat digunakan untuk meningkatkan reaksi pembentukan ikatan silang, meningkatkan kepadatan ikatan silang, serta memperbaiki sifat mekanik karet. Selain itu, penggunaan *sensitizer* juga dapat mengurangi dosis radiasi yang diperlukan dalam proses vulkanisasi. Promotor pembentukan ikatan silang dalam polimer dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu promotor tidak langsung dan promotor langsung.

- Promotor ikatan silang tidak langsung berfungsi dengan membantu pembentukan spesies reaktif, seperti radikal bebas, yang kemudian menghasilkan ikatan silang melalui reaksi sekunder. Contoh dari



promotor jenis ini meliputi sulfur monoklorida, halida, nitrous oksida, amina, amonia, dan air.

- Promotor ikatan silang langsung terlibat secara aktif dalam reaksi ikatan silang dengan bertindak sebagai molekul penghubung antar rantai polimer. Beberapa contoh promotor langsung adalah akrilat, tiol (*polimercaptan*), maleimida, dan senyawa alilik (Böhm & Tveekrem, 1982).

Berdasarkan jenis reaksi yang ditimbulkan, *sensitizer* atau ko-agen dalam vulkanisasi berbasis radiasi dibagi menjadi dua jenis, yaitu ko-agen tipe I dan ko-agen tipe II:

- Ko-agen tipe I berperan dalam reaksi adisi dan abstraksi hidrogen. Ko-agen ini memiliki molekul polar dengan berat molekul rendah serta ikatan rangkap aktif. Mereka bereaksi sangat cepat dengan radikal bebas, menghasilkan waktu scorch yang singkat. Namun, efek ini juga bisa menjadi kelemahan karena proses vulkanisasi dapat berlangsung terlalu cepat. Vulkanisasi yang terlalu cepat dapat menyebabkan berkurangnya waktu untuk pembentukan struktur fisik yang optimal sehingga dapat menurunkan sifat mekanik akhir dan mempersulit proses pencetakan atau pembentukan produk. Penggunaan ko-agen tipe I tidak hanya mempercepat proses curing tetapi juga meningkatkan kepadatan ikatan silang. Sayangnya, polaritas tinggi dari ko-agen ini dapat membatasi kompatibilitasnya dengan matriks polimer tertentu. Contoh ko-agen tipe I termasuk bismaleimida, metakrilat, akrilat, dan garam seng (Manaila *et al.*, 2012).
- Ko-agen tipe II bekerja melalui reaksi tambahan dan terdiri dari molekul yang kurang polar, menghasilkan radikal bebas yang lebih stabil dibandingkan ko-agen tipe I. Hal ini membantu memperlambat proses scorch. Namun, tidak seperti ko-agen tipe I, ko-agen tipe II tidak mempercepat *curing* tetapi lebih berfokus pada peningkatan kepadatan ikatan silang. Karena polaritasnya yang rendah, ko-agen tipe II memiliki kompatibilitas yang lebih baik dengan berbagai jenis elastomer.

Contohnya termasuk 1,2-polibutadiena dengan kandungan vinil tinggi, divinilbenzena, serta ester alil dari sianurat dan isosianurat (Manaila *et al.*, 2012).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengeksplorasi proses vulkanisasi berbasis radiasi yang melibatkan berbagai *sensitizer*. Makuuchi *et al.* (1990) meneliti vulkanisasi sarung tangan karet dengan paparan radiasi menggunakan *sensitizer*. Mereka menambahkan 5 phr 2-etilheksil akrilat (2-EHA) dan 1 phr karbon tetraklorida ( $\text{CCl}_4$ ) untuk meningkatkan efisiensi vulkanisasi. Hasilnya, sarung tangan yang dihasilkan memiliki sifat mekanik yang memenuhi standar sarung tangan pelindung di Jepang, serta menghasilkan lebih sedikit gas sulfur dioksida dan residu abu dibandingkan sarung tangan karet konvensional. Namun,  $\text{CCl}_4$  diketahui bersifat toksik dan memiliki ketahanan buruk terhadap asam, sementara 2-EHA dapat menyebabkan iritasi kulit (Makuuchi & Tsushima, 1988).

Haque *et al.* (2005) meneliti vulkanisasi lateks karet alam menggunakan elektron *beam* berenergi rendah. Mereka menggunakan n-butil akrilat (n-BA) dan nonana-diol-diakrilat (NDDA) sebagai akselerator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik tertinggi diperoleh dengan penggunaan 5 phr NDDA atau n-BA. Namun, n-BA memiliki beberapa kelemahan, seperti bau yang menyengat dan kecenderungan menyebabkan penggumpalan pada lateks (Varghese *et al.*, 2021).

Manaila *et al.* (2014) melakukan studi tentang vulkanisasi berbasis iradiasi menggunakan elektron *beam* dan monomer polifungsional (PFM), seperti triallil sianurat (TAC), triallilisianurat (TAIC), trimetilolpropana trimetakrilat (TMPT), etilen glikol dimetakrilat (EDMA), dan seng diakrilat (ZDA). Dosis radiasi yang digunakan berkisar antara 50–200 kGy. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanik dan kepadatan ikatan silang karet meningkat seiring dengan peningkatan dosis radiasi dan jenis PFM yang digunakan.

Hansupalak *et al.* (2016) meneliti pra-vulkanisasi lateks karet alam menggunakan

radiasi ultraviolet dengan foto-inisiator 2-hidroksi-2-metil-1-fenilpropanon dan ko-agen 1,9-bis(akrilooksil)nonan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa film PVNR yang dihasilkan memiliki kekuatan tarik 10–12 MPa dan kepadatan ikatan silang 0,17 mmol/cm<sup>3</sup>.

Ibrahim *et al.* (2018) mempelajari kombinasi vulkanisasi peroksida dan radiasi gamma. Mereka menggunakan heksanediol diakrilat (HDDA) dan tert-butyl hidroperoksida, dengan dosis radiasi 2–12 kGy. Dengan penambahan antioksidan, mereka berhasil meningkatkan kekuatan tarik hingga 27 MPa dengan tingkat kepadatan ikatan silang yang tinggi (94%).

Stelescu *et al.* (2018) meneliti komposit EPDM/karet butil yang divulkanisasi dengan elektron *beam*. Hasilnya menunjukkan bahwa dosis radiasi yang meningkat menaikkan kekerasan, kandungan gel, dan modulus elastisitas, tetapi menurunkan kekuatan tarik dan perpanjangan putus.

Daftar *sensitizer* yang telah digunakan dalam beberapa penelitian terdahulu telah di rangkum pada Tabel 4. Berbagai jenis *sensitizer* telah digunakan dalam vulkanisasi karet alam menggunakan radiasi gamma dan elektron *beam*. Namun, sebagian besar *sensitizer* memiliki efek samping, seperti toksisitas, iritasi kulit, alergi, atau ketahanan asam yang buruk. Sehingga pemilihan *sensitizer* harus mempertimbangkan efek samping serta efektivitas dalam proses vulkanisasi.

Penggunaan radiasi untuk vulkanisasi menawarkan potensi peningkatan sifat mekanik tanpa penambahan bahan kimia berbahaya dalam jumlah besar. Namun, pemilihan *sensitizer* harus mempertimbangkan efektivitas dan dampak lingkungan /kesehatan. Oleh karena itu, riset untuk menemukan *sensitizer* yang aman dan ramah lingkungan masih sangat dibutuhkan.

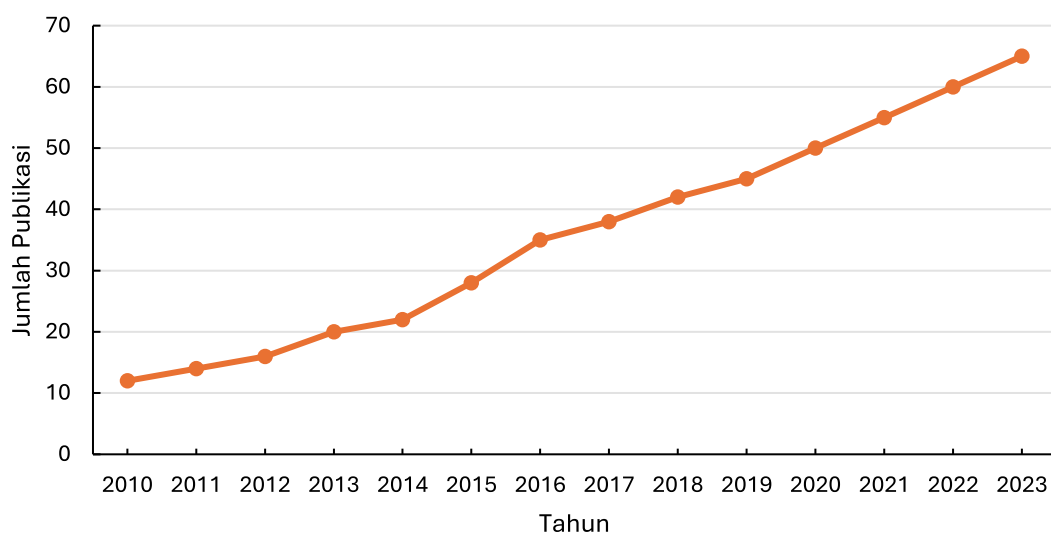
Tabel 4. *Sensitizer* yang telah digunakan dalam proses vulkanisasi karet alam dengan sistem radiasi gamma dan elektron *beam*

<i>Sensitizer</i>	Jenis Radiasi	Referensi	Catatan
CCl <sub>4</sub>	Gamma, 1–100 kGy	Minoura & Asao, 1961	Toksik, ketahanan asam buruk
2EHA	Gamma, 15–60 kGy	Makuuchi & Tsushima, 1988	Iritasi kulit, ketahanan asam buruk
n-BA	Gamma, 12 kGy	Tsushima et al., 1990	Alergi kulit, sakit kepala, mual, dan muntah. n-BA juga dapat menurunkan stabilitas lateks dan menyebabkan penggumpalan lateks
PEA	Gamma, 15-40 kGy	Jayasuriya et al., 2001	Toksik, alergi kulit
NDDA	EB, 5 phr	Haque et al., 2005	Meningkatkan kekuatan tarik, tetapi dapat meningkatkan penggumpalan lateks
HDDA	Gamma, 2–12 kGy	Ibrahim et al., 2018	Bersifat moderat toksik, menyebabkan sensitisasi pada kulit

### Potensi Pemanfaatan Teknologi Elektron *Beam* untuk Vulkanisasi Karet Alam

Teknologi iradiasi elektron *beam* memiliki potensi besar dalam vulkanisasi karet alam, terutama dalam mengatasi berbagai masalah yang dihadapi pada metode vulkanisasi konvensional. Seiring meningkatnya kebutuhan akan proses produksi yang ramah lingkungan dan efisien, teknologi ini mendapatkan perhatian luas. Berdasarkan data dari Scopus (gambar 2), jumlah publikasi

ilmiah yang membahas penggunaan elektron *beam* untuk vulkanisasi karet meningkat secara signifikan dalam dekade terakhir, yaitu dari 12 publikasi pada tahun 2010 menjadi lebih dari 65 publikasi pada tahun 2023. Selain itu, negara-negara seperti Jepang, Korea Selatan dan Thailand menempati posisi teratas dalam jumlah paten terkait aplikasi ini, menunjukkan peningkatan minat secara global terhadap penerapan teknologi ini dalam industri karet.



Gambar 2. Tren publikasi tentang penggunaan elektron *beam* untuk vulkanisasi karet alam selama tahun 2010-2023

Beberapa keunggulan utama teknologi elektron *beam*:

#### 1. Mengurangi Kandungan Protein

Salah satu tantangan utama dalam penggunaan karet alam adalah kandungan protein alergenik yang dapat menyebabkan reaksi alergi tipe I. Proses iradiasi dengan elektron *beam* telah terbukti secara signifikan menurunkan kadar protein ekstrak (*extractable protein*, EP). Studi oleh Rogero *et al.* (2003) menunjukkan penurunan EP hingga mencapai 80% dari nilai awal. Hal ini menjadikan karet alam lebih aman untuk aplikasi medis seperti sarung tangan bedah dan alat kesehatan lainnya.

#### 2. Mengurangi Ketergantungan terhadap Bahan Kimia Beracun

Vulkanisasi konvensional secara umum menggunakan bahan kimia seperti sulfur (0-4 phr), akselerator berbasis ditiokarbamat (0,5-3 phr), dan antioksidan. Akselerator jenis ditiokarbamat diketahui dapat menghasilkan residu beracun, yaitu senyawa N-nitrosamine yang bersifat karsinogenik. Teknologi elektron *beam* memungkinkan proses vulkanisasi berlangsung tanpa atau dengan jumlah yang jauh lebih sedikit dari bahan-bahan tersebut. Namun, perlu dicatat bahwa beberapa *sensitizer* yang digunakan dalam sistem iradiasi juga memiliki potensi toksik.

Oleh karena itu pemilihan dan pengembangan *sensitizer* yang lebih aman dan ramah lingkungan tetap menjadi aspek penting dalam optimalisasi teknologi ini.

### 3. Menghemat Energi dan Waktu

Vulkanisasi konvensional memerlukan suhu pemrosesan 140-160 °C selama 10-30 menit tergantung pada formula. Sebaliknya, vulkanisasi dengan elektron *beam* dapat dilakukan pada suhu ruang (25-30 °C) hanya dalam waktu 1-2 menit, dengan dosis iradiasi sekitar 100-250 kGy. Dengan demikian, proses ini dapat menghemat energi hingga 60-70%, serta memangkas waktu produksi secara drastis. Efisiensi ini menjadikannya sangat kompetitif untuk aplikasi industri skala besar dan berkelanjutan.

### 4. Meningkatkan Sifat Mekanik Karet

Penggunaan elektron *beam* telah terbukti mampu meningkatkan kepadatan ikatan silang dan sifat mekanik karet seperti kekuatan tarik (*tensile strength*), elongasi, dan modulus. Penelitian oleh Reowdecha *et al.* (2021) menunjukkan bahwa kekuatan tarik karet alam meningkat dari 14,8 MPa menjadi 20,2 MPa setelah iradiasi 200 kGy, dengan penurunan elongasi yang masih dalam batas aplikasi industri. Peningkatan ini sangat berguna untuk produk teknis seperti gasket, seal, dan bantalan anti-getar.

### 5. Kemungkinan Reduksi Dosis Radiasi dengan *Sensitizer*

Salah satu keterbatasan utama proses vulkanisasi menggunakan elektron *beam* adalah kebutuhan akan dosis tinggi, yang berdampak pada biaya dan risiko degradasi sifat elastis. Namun, penggunaan *sensitizer* seperti TMPTA (trimethylolpropane triacrylate) atau maleimida dapat menurunkan kebutuhan dosis sebesar 30-50%, tanpa menurunkan kualitas ikatan silang. Ini membuka peluang lebih lanjut untuk optimalisasi proses di industri.

## Tantangan dan Prospek

Meskipun teknologi vulkanisasi karet alam dengan elektron *beam* memiliki banyak keunggulan, terdapat sejumlah tantangan yang masih harus diatasi, antara lain:

### 1. Biaya Investasi Tinggi

Peralatan elektron *beam* memerlukan investasi awal yang cukup besar. Sebagai ilustrasi, sistem akselerator elektron dengan kapasitas industri dapat menelan biaya antara USD 500.000 hingga lebih dari USD 3 juta, tergantung pada tegangan, arus, dan kapasitas produksi. Selain itu, infrastruktur pendukung seperti sistem pendingin, ruang pelindung radiasi (*radiation shielding*), serta perizinan operasional menambah beban biaya awal yang cukup signifikan, dibandingkan dengan peralatan vulkanisasi konvensional.

### 2. Efisiensi Proses

Dosis radiasi harus dikontrol secara tepat untuk menghindari degradasi karet. Tidak semua jenis karet cocok divulkanisasi dengan elektron *beam* tanpa bahan tambahan seperti *sensitizer*, dan setiap formulasi memiliki ambang dosis optimal yang berbeda-beda.

### 3. Penggunaan *Sensitizer*

Beberapa jenis *sensitizer* diketahui dapat meningkatkan efisiensi pembentukan ikatan silang, namun masih ada tantangan terkait toksisitas, kecocokan dengan lateks, serta kestabilan sistem. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menemukan kandidat *sensitizer* yang aman dan tidak mempengaruhi performa akhir karet.

### 4. Skalabilitas Produksi

Saat ini, teknologi elektron *beam* lebih banyak digunakan untuk produk bernilai tinggi atau berskala terbatas. Contoh produk karet yang telah divulkanisasi dengan elektron *beam* seperti sarung tangan medis bebas alergen, gasket presisi, serta tabung elastomer untuk perangkat elektronik dan laboratorium. Tantangan dalam produksi massal terletak pada



konsistensi dosis, kecepatan proses, dan integrasi dengan lini produksi konvensional

#### 5. Regulasi dan Keamanan

Penggunaan sumber radiasi membutuhkan kepatuhan terhadap standar keselamatan kerja dan radiasi ionisasi yang ketat. Hal ini bisa menjadi kendala terutama bagi industri kecil dan menengah yang belum memiliki infrastruktur atau tenaga ahli untuk mengelola sistem iradiasi.

Prospek pengembangan teknologi elektron *beam* untuk vulkanisasi karet alam, diantaranya:

##### 1. Vulkanisasi Ramah Lingkungan

Tidak memerlukan bahan kimia seperti sulfur atau peroksida yang dapat mencemari lingkungan. Mengurangi emisi gas beracun yang biasanya dihasilkan dalam proses vulkanisasi konvensional.

##### 2. Kualitas Produk Lebih Baik

Produk karet yang divulkanisasi dengan elektron *beam* memiliki sifat mekanik yang lebih unggul, seperti ketahanan aus dan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Dapat menghasilkan karet dengan fleksibilitas yang lebih baik dan ketahanan terhadap suhu ekstrem.

##### 3. Aplikasi di Industri Spesifik

Cocok untuk industri yang membutuhkan karet berkualitas tinggi, seperti medis, otomotif, dan elektrolit. Dapat digunakan dalam produksi sarung tangan medis atau komponen otomotif yang memerlukan ketahanan tinggi.

##### 4. Pengembangan *Sensitizer* yang Lebih Aman

Penelitian terus dilakukan untuk menemukan *sensitizer* yang lebih aman dan tidak beracun, sehingga meningkatkan efisiensi tanpa dampak buruk.

##### 5. Kemajuan Teknologi Elektron *Beam*

Inovasi dalam sistem radiasi elektron *beam* dapat menurunkan biaya operasional dan meningkatkan efisiensi proses.

Meskipun vulkanisasi karet alam dengan elektron *beam* memiliki tantangan seperti biaya tinggi, kebutuhan akan *sensitizer*, dan regulasi ketat, prospeknya tetap menjanjikan sebagai alternatif ramah lingkungan dengan kualitas produk yang lebih baik. Dengan riset dan

pengembangan lebih lanjut, metode ini dapat menjadi pilihan yang lebih efisien dan aman di masa depan.

### Kesimpulan

Teknologi vulkanisasi karet alam menggunakan elektron *beam* menawarkan solusi inovatif yang lebih efisien dan ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional berbasis sulfur dan akselerator. Vulkanisasi dengan EB memungkinkan pembentukan ikatan silang pada suhu ruang tanpa memerlukan bahan kimia tambahan, sehingga mengurangi emisi polutan seperti N-nitrosamin dan menekan dampak negatif terhadap lingkungan serta kesehatan manusia.

Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa vulkanisasi elektron *beam* dapat menurunkan kadar protein ekstrak dalam lateks, yang berkaitan erat dengan risiko alergi tipe I pada pengguna produk lateks. Penurunan ini menjadi keunggulan signifikan dalam pengembangan produk bebas alergen.

Secara umum, proses vulkanisasi elektron *beam* mampu menghasilkan produk dengan sifat mekanik yang kompetitif, seperti kekuatan tarik yang tinggi, meskipun efisiensi proses sangat bergantung pada dosis radiasi dan keberadaan *sensitizer*. Untuk mengoptimalkan hasil, diperlukan formulasi sistem dan parameter iradiasi yang sesuai.

Namun, tantangan dalam penerapan teknologi EB masih perlu diperhatikan, seperti kebutuhan dosis radiasi yang optimal, biaya investasi awal peralatan yang tinggi, serta pemilihan *sensitizer* yang aman dan kompatibel dengan matriks karet. Kombinasi metode, seperti radiasi dengan gelombang mikro atau penggunaan *sensitizer*, berpotensi meningkatkan efisiensi proses dengan mengurangi dosis radiasi yang diperlukan tanpa mengorbankan sifat elastisitas karet.

Dengan berbagai keunggulan tersebut, teknologi vulkanisasi berbasis radiasi elektron *beam* memiliki potensi besar untuk menjadi alternatif berkelanjutan dalam industri karet alam. Penggunaan material bebas N-nitrosamin sangat penting khususnya di

sektor-sektor seperti industri medis (sarung tangan, keteter, alat kesehatan sekali pakai), industri makanan dan minuman (seal, gasket food grade), serta industri mainan dan alat tulis anak-anak, di mana keamanan terhadap residu kimia berbahaya menjadi syarat utama. Dengan dukungan riset dan investasi teknologi yang tepat, metode ini dapat menjadi solusi yang lebih hijau, efisien, dan aman untuk masa depan industri karet

### Daftar Pustaka

- Akhtar, F., Makuuchi, K., & Yoshii, F. (1996). Radiation vulcanization of natural rubber latex (NRL) using low energy electron beam accelerator. Proceedings of the Second International Symposium on RVNRL (Radiation Vulcanisation of Natural Rubber Latex), Malaysia.
- Basfar, A.A., Abdel-Aziz, M.M., & Mofti, S. (2002). Influence of different curing systems on the physico-mechanical properties and stability of SBR and NR rubbers. *Radiation Physics and Chemistry*, 63(1), 81-87.
- 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.
- Chen, H.-l., Li, T., Xing, K., Li, K.-l., Zhang, M.-d., & Li, Q.-l. (2017). Experimental investigation of technological conditions and temperature distribution in rubber material during microwave vulcanization process. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 130(3), 2079-2091. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6601-0>
- Chirinos, H., Yoshii, F., Makuuchi, K., & Lugao, A. (2003). Radiation vulcanization of natural rubber latex using 250 keV electron beam machine. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 208, 256-259. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01114-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01114-5)
- Chong, E. L., Ahmad, I., Dahlan, H. M., & Abdullah, I. (2010). Reinforcement of natural rubber/high density polyethylene blends with electron beam irradiated liquid natural rubber-coated rice husk. *Radiation Physics and Chemistry*, 79(8), 906-911. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.02.011>
- Craciun, G., Manaila, E., & Stelescu, M. D. (2016). New elastomeric materials based on natural rubber obtained by electron beam irradiation for food and pharmaceutical use. *Materials*, 9(12), 999. <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/12/999>
- Drobny, J. G. (2013). Fundamentals of radiation chemistry and physics. In J. G. Drobny (Ed.), *Ionizing Radiation and Polymers* (pp. 11-26). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7881-2.00002-X>
- Espósito, L.H. & Marzocca, A.J. (2018). Effect of electron-beam irradiation on the thermal vulcanization of a natural rubber compound. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(13), 47216.
- Espósito, L.H. & Marzocca, A.J. (2020). Effect of electron beam irradiation on aging time, thermal vulcanization kinetic and mechanical properties of SSBR/NR/BR compounds filled with silica. *Radiation Physics and Chemistry*, 170, 108651.
- Hansupalak, N., Srisuk, S., Wiroonpochit, P., & Chisti, Y. (2016). Sulfur-free prevulcanization of natural rubber latex by ultraviolet irradiation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(14), 3974-3981. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00076>
- 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>

- Haque, M. E., Dafader, N. C., Akhtar, F., & Ahmad, M. U. (1996). Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. *Radiation Physics and Chemistry*, 48(4), 505-510. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(96\)00002-3](https://doi.org/10.1016/0969-806X(96)00002-3)
- 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>
- Jayasuriya, M. M., Makuuchi, K., & Yoshi, F. (2001). Radiation vulcanization of natural rubber latex using TMPTMA and PEA. *European Polymer Journal*, 37(1), 93-98. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(00\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(00)00091-4)
- Jönsson, L. S., Lindh, C. H., Bergendorf, U., Axmon, A., Littorin, M., & Jönsson, B. A. (2009). N-nitrosamines in the southern Swedish rubber industries – exposure, health effects, and immunologic markers. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*(3), 203-211. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1323>
- Kruželák, J., Kvasniáková, A., Medlenova, E., Dosoudil, R., & Hudec, I. (2019). Application of peroxide curing systems in cross-linking of rubber magnets on NBR and Barium Ferrite. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1640548. <https://doi.org/10.1155/2019/1640548>
- Kruželák, J., Kvasniáková, A., Hložeková, K., Gregorová, J., & Džuganová, M. (2022). Influence of mixed sulfur and peroxide curing systems on cross-linking and properties of rubber compounds based on EPDM. *Macromolecular Symposia*, 404(1), 2100395. <https://doi.org/10.1002/masy.202100395>
- Kruželák, J., Sýkora, R., & Hudec, I. (2016). Sulphur and peroxide vulcanisation of rubber compounds – overview. *Chemical Papers*, 70(12), 1533-1555. <https://doi.org/doi:10.1515/chempap-2016-0093>
- Makuuchi, K. (2003). An introduction to radiation vulcanization of natural rubber latex. TRI Global Co., Bangkok.
- Makuuchi, K., & Cheng, S. (2012). Radiation processing of polymer materials and its industrial applications. John Wiley & Sons.
- Makuuchi, K., & Hagiwara, M. (1984). Radiation vulcanization of natural rubber latex with polyfunctional monomers. *Journal of Applied Polymer Science*, 29(3), 965-976. <https://doi.org/10.1002/app.1984.070290324>
- Makuuchi, K., & Tsushima, K. (1988). Radiation vulcanization of natural rubber latex with monofunctional acrylic monomers. *Nippon Gomu Kyokaishi*, 61(7), 478-482.
- 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), 54-157.
- Manaila, E., Stelescu, M.D., & Craciun, G. (2012). Aspects Regarding Radiation Crosslinking of Elastomers, in *Advanced Elastomers*, B. Anna, Editor. 2012, IntechOpen: Rijeka. p. 3-34.
- Manaila, E., Craciun, G., Stelescu, M.-D., Ighigeanu, D., & Ficai, M. (2014). Radiation vulcanization of natural rubber with polyfunctional monomers. *Polymer Bulletin*, 71(1), 57-82. <https://doi.org/10.1007/s00289-013-1045-6>

- Manaila, E., Stelescu, M. D., Craciun, G., & Ighigeanu, D. (2016). Wood sawdust/natural rubber ecocomposites cross-linked by electron beam irradiation. *Materials*, 9 ( 7 ) , 5 0 3 . <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/7/503>
- Manshaie, R., Nouri Khorasani, S., Jahanbani Veshare, S., & Rezaei Abadchi, M. (2011). Effect of electron beam irradiation on the properties of natural rubber (NR)/styrene-butadiene rubber (SBR) blend. *Radiation Physics and Chemistry*, 8 0 ( 1 ) , 1 0 0 - 1 0 6 . <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.08.015>
- 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(1), 63-65.
- Minoura, Y., & Asao, M. (1961). Studies on the  $\gamma$ -irradiation of natural rubber latex. The effects of organic halogen compounds on crosslinking by  $\gamma$ -irradiation. *Journal of Applied Polymer Science*, 5(16), 401-407. <https://doi.org/10.1002/app.1961.070051605>
- Moustafa, A. B., Mounir, R., El Miligy, A. A., & Mohamed, M. A. (2016). Effect of gamma irradiation on the properties of natural rubber/styrene butadiene rubber blends. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S 1 2 4 - S 1 2 9 . <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.02.020>
- Parathodika, A. R., Raju, A. T., Das, M., Bhattacharya, A. B., Neethirajan, J., & Naskar, K. (2022). Exploring hybrid vulcanization system in high-molecular weight EPDM rubber composites: A statistical approach. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(31), e52721. <https://doi.org/10.1002/app.52721>
- Parra, D.F., Lugão, A.B., Yoshii, F. & Makuuchi, K. (2003). Extractable proteins from irradiated field natural rubber latex. *Radiation Physics and Chemistry*, 67(3), 5 0 1 - 5 0 3 . <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.04.028>
- Perez, P.J. (2023). Illinois bans latex gloves, market bank on alternative sources for consumption, in *Chemanalyst.news*.
- Phetarporn, V., Loykulnant, S., Kongkaew, C., Seubsai, A., & Prapainainar, P. (2019). Composite properties of graphene-based materials/natural rubber vulcanized using electron beam irradiation. *Materials Today Communications*, 19, 413-424. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.03.007>
- Ratnam, C. T., Nasir, M., Baharin, A., & Zaman, K. (2000a). Electron beam irradiation of epoxidized natural rubber. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1 7 1 ( 4 ) , 4 5 5 - 4 6 4 . [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(00\)00301-3](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(00)00301-3)
- Ratnam, C. T., Nasir, M., Baharin, A., & Zaman, K. (2000b). Electron beam irradiation of epoxidized natural rubber: FTIR studies. *Polymer International*, 4 9 ( 1 2 ) , 1 6 9 3 - 1 7 0 1 . [https://doi.org/10.1002/1097-0126\(200012\)49:12<1693::AID-PI595>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/1097-0126(200012)49:12<1693::AID-PI595>3.0.CO;2-K)
- 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), e 0 7 1 7 6 . <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07176>



- Rogero, S.O., Lugão, A.B., Yoshii, F., Makuuchi, K., (2003). Extractable proteins from irradiated field natural rubber latex. *Radiation Physics and Chemistry*. 67(3): p. 501-503
- SCCP, (Scientific, Committee, on, Consumer, & Products. (2007). Opinion on the presence and release of nitrosamines and nitrosatable compounds from rubber balloons (SCCP/1132/07, Issue.
- Senna, M. M., Mohamed, R. M., Shehab-Eldin, A. N., & El-Hamouly, S. (2012). Characterization of electron beam irradiated natural rubber/modified starch composites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(5), 1654-1661. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.03.004>
- Soebianto, Y.S., Ratnayake, U.M., Makuuchi, K., Yoshii, F., Kume, T., (2000). Extractable protein of radiation vulcanized natural rubber latex. 2000: Japan. p.49-55.
- Stelescu, M.-D., Manaila, E., Craciun, G., & Dumitrascu, M. (2014). New green polymeric composites based on hemp and natural rubber processed by electron beam irradiation. *The Scientific World Journal*, 2014, 684047. <https://doi.org/10.1155/2014/684047>
- Stelescu, M.D., Airinei, A., Manaila, E., Craciun, G., Fifer, N., Varganici, C., Pamfil, D., & Doroftei, F. (2018). Effects of electron beam irradiation on the mechanical, thermal, and surface properties of some EPDM/butyl rubber composites. *Polymers*, 10(11), 1206.
- Sukthawon, C., Dittanet, P., Saeoui, P., Loykulnant, S., & Prapainainar, P. (2020). Electron beam irradiation crosslinked chitosan/natural rubber -latex film: Preparation and characterization. *Radiation Physics and Chemistry*, 177, 109159. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109159>
- Tsushima, K., Makuuchi, K., Yoshii, F., & Ishigaki, I. (1990). Commercialization of protective rubber gloves by radiation vulcanization. [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:21083295](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:21083295)
- Varghese, N., Varghese, S., Shybi, A., & Kurian, T. (2021). Enhanced mechanical properties of radiation vulcanized natural rubber latex by using t-butyl hydroperoxide. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 37(3), 203-215. <https://doi.org/10.1177/1477760620977501>
- Wiroonpochit, P., Uttra, K., Jantawatchai, K., Hansupalak, N., & Chisti, Y. (2017). Sulfur-Free Prevulcanization of Natural Rubber Latex by Ultraviolet Irradiation in the Presence of Diacrylates. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(25), 7217-7223. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b01133>
- Woo, L., & Sandford, C. L. (2002). Comparison of electron beam irradiation with gamma processing for medical packaging materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 63(3), 845-850. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(01\)00664-8](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00664-8)
- Zin, W. M. b. W., Mohid, N. b., Hasan, J. b., Noor, W. K. A. b. W. M., & Jaafar, Z. (1993). The preparation of RVNRL using Malaysian - produced latices. *Radiation Physics and Chemistry*, 42(1), 101-105. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(93\)90213-E](https://doi.org/10.1016/0969-806X(93)90213-E)



PUSAT PENELITIAN KARET