

PENGGUNAAN KOMPATIBILISER KARET ALAM TEREPOKSIDASI (ENR) PADA KOMPON TELAPAK BAN RAMAH LINGKUNGAN

The Compatibilizer Application of Epoxidized Natural Rubber on Eco-Friendly Tire Tread Compound

Mohamad Irfan FATHURROHMAN¹, Norma A. KINASIH^{1*}, Santi PUSPITASARI¹, dan Dewi Kusuma ARTI²

¹Unit Riset Bogor Getas-Pusat Penelitian Karet, Jalan Salak No. 1 Bogor, Jawa Barat

²Pusat Riset Material Maju-Badan Riset dan Inovasi Nasional, Gedung 224,
KST BJ Habibie, Serpong, Tangerang Selatan

*Email: norma.kinasih88@gmail.com

Diterima: 17 Juli 2023 / Disetujui: 4 Maret 2024

Abstract

Tread compound formulation is needed to optimize the Eco-Friendly Tire (ECO tire) performance. The tread formulation is carried out on silica filled-non-polar rubber with or without using an epoxidized natural rubber (ENR) compatibilizer. The utilization of the ENR compatibilizer on the ECO tire tread increased the filler dispersion, wherein shown in decreasing value of the Payne effect value on compound B. The better filler dispersion further improved the physical interaction between the filler and the rubber-filler, curing characteristics, tensile strength, abrasion resistance, and wet grip of ECO tire treads vulcanized. However, it slightly decreased the chemical interaction of the rubber filler, thus lowering apparent crosslink density, hardness, young modulus, elongation at break, and tear resistance, and increasing rolling resistance of the ECO B tread tire vulcanizate. Hence, the compound B formula must be improved to enhance the vulcanizate mechanical properties and vehicle fuel efficiency.

Keywords: tire treads; ECO tires, formulations, silica, compatibilizers, epoxidized natural rubber

ABSTRAK

Formulasi kompon telapak ban perlu dilakukan untuk mengoptimalkan kinerja ban ramah lingkungan (ban ECO). Formulasi telapak ban dilakukan pada karet non-polar berbahan pengisi silika dengan dan atau tanpa menggunakan kompatibiliser karet alam terepoksidasi (ENR). Penggunaan kompatibiliser ENR pada telapak ban ECO mampu meningkatkan dispersi bahan pengisi, yang ditandai dengan menurunnya nilai *payne effect* kompon B. Dispersi bahan pengisi yang baik lebih lanjut dapat meningkatkan interaksi fisik antar bahan pengisi dan bahan pengisi karet, karakteristik pematangan, kuat tarik, ketahanan kikis, dan cengkraman basah vulkanisat telapak ban ECO. Namun, sedikit menurunkan interaksi kimia bahan pengisi-karet sehingga menurunkan *apparent crosslink density* kekerasan, *young modulus*, perpanjangan putus, dan ketahanan sobek dan meningkatkan ketahanan gelinding vulkanisat telapak ban ECO B. Maka formula kompon B perlu ditingkatkan untuk meningkatkan sifat mekanik vulkanisat dan efisiensi bahan bakar kendaraan.

Kata kunci: telapak ban; ban ECO, formulasi, silika, kompatibiliser, karet alam epoksi

PENDAHULUAN

Ban ramah lingkungan (Ban ECO) merupakan ban yang efisien dalam konsumsi bahan bakar. Kinerja ban ECO ditentukan berdasarkan ketahanan gelinding (*rolling resistance*), kemampuan cengkeram basah (*wet grip*), dan kemampuan meredam kebisingan eksternal (*external noise*). Desain struktur dan karakteristik kompon telapak ban mempengaruhi kinerja ban ECO. Telapak ban (*tire tread*) adalah bagian terluar dari struktur penyusun ban yang bersentuhan langsung dengan permukaan jalan, sehingga diharapkan telapak ban tidak hanya memiliki ketahanan gelinding rendah, namun juga kuat untuk menghindari sobek dan abrasi agar tidak mudah gundul. Perkembangan pasar *green tire* hingga tahun 2020 telah mencapai 77,4 M USD dan diperkirakan meningkat dengan nilai *Compounded Annual Growth Rate* (CAGR) pada tahun 2021-2027 sebesar 11,38% (W. Li, Peng, Ren, & He, 2019). Hal ini menunjukkan bahwa market pada pasar global cenderung memproduksi dan menggunakan ramah lingkungan.

Formulasi kompon telapak ban perlu dilakukan untuk mengoptimalkan kinerja ban ECO. Secara umum kompon telapak ban terdiri dari karet, bahan pengisi, dan bahan aditif. Karet alam (NR), karet butadiena (BR) dan *Styrene-butadiene rubber* (SBR) adalah karet non-polar yang banyak digunakan dalam industri ban. Selain itu, bahan pengisi jenis penguat seperti arang hitam dan silika

paling banyak digunakan oleh industri ban. Penggunaan silika sebagai bahan pengisi pada kompon telapak lebih banyak diminati, mengingat silika dapat disintesis dari biomasa seperti sekam padi sehingga dapat mensubsitisi karbon hitam yang berasal dari minyak bumi, dan mengurangi jumlah emisi gas rumah kaca (Wieczorek & Jackowski, 2018). Selain itu, telapak ban dengan bahan pengisi silika memiliki ketahanan gelinding lebih rendah hingga 30% (Sattayanurak et al., 2020) dan kemampuan cengkraman basah dan abrasi yang lebih baik dibandingkan telapak ban dengan bahan pengisi karbon hitam (Y. Li et

al., 2013). Penurunan 30% ketahanan gelinding dapat menghemat 5% pemakaian bahan bakar di ban penumpang (Noordermeer, 1998).

Penggunaan bahan pengisi silika pada karet non polar dapat mempengaruhi sifat pemasakan karet, dimana gugus fungsi polar dari permukaan silika dapat membentuk ikatan hidrogen dengan beberapa komponen polar dalam kompon karet seperti pencepat atau akselerator (Sengloyluan, Sahakaro, Dierkes, & Noordermeer, 2012). Selain itu, kandungan protein dan lipid pada karet alam dapat menghambat reaksi silanisasi (Dierkes et al., 2019; S. S. Sarkawi, Dierkes, & Noordermeer, 2015). Kendala tersebut dapat diatasi dengan menambahkan bahan penghubung silan (*silane coupling agent*) seperti *bis(triethoxysilylpropyl) tetrasulfide* (TESPT). Beberapa karet polar juga telah dicoba digunakan sebagai bahan komplatibiliser (Choi, 2001; Das, Debnath, De, & Basu, 2004), salah satunya yaitu karet alam terepoksidasi (ENR) (Sengloyluan et al., 2012; Sengloyluan, Sahakaro, Dierkes, & Noordermeer, 2014; Xu, Jia, Luo, Jia, & Peng, 2015).

ENR memiliki gugus epoksida dalam strukturnya, sehingga polaritas ENR lebih tinggi dibandingkan karet alam. ENR berinteraksi dengan gugus hidroksil pada permukaan silika melalui gugus fungsi polarnya (Sengloyluan et al., 2012). Lebih lanjut, ikatan hydrogen akan menyebabkan ENR berinteraksi dengan permukaan silika (Cataldo, 2002). Interaksi ENR dan silika tersebut menyebabkan pencampuran bahan pengisi silika pada matriks ENR memiliki sifat mekanis yang lebih baik dibanding NR tanpa silan (TESPT), namun tidak lebih baik dibandingkan dengan NR dengan silan (TESPT) (Cataldo, 2002). Penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa kompatibilitas NR dan silika dengan komplatibiliser ENR dilaporkan meningkat seiring dengan kandungan epoksidasi ENR (Sengloyluan et al., 2012, 2014). Namun, sifat mekanis dan dinamis NR/ENR/silika tidak lebih baik dibandingkan NR/TESPT/silika. Hasil penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa bahan penghubung silan sangat berpengaruh pada

peningkatan kompatibilitas karet dengan bahan pengisi silika dan belum dapat digantikan secara keseluruhan dengan ENR, hanya sebagian saja (Ryu et al., 2021). Maka pada penelitian ini diformulasikan komponen telapak ban ECO dengan mengkombinasikan bahan penghubung silan dengan atau tanpa kompatibiliser ENR pada paduan karet non-polar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kombinasi TESPT dan atau tanpa ENR pada sifat pemasakan, mekanis dan dinamisnya. Formulasi komponen telapak ban terbaik diharapkan dapat memenuhi beberapa kriteria kinerja ban ECO.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Pabrik Percobaan Unit Riset Bogor Getas PT RPN dan Pusat Riset Material Maju - Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dalam kurun waktu 6 bulan.

Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam pembuatan komponen telapak ban ECO yaitu; karet, bahan pengisi dan bahan kimia karet lainnya. Kombinasi dua jenis karet yang digunakan yaitu karet alam jenis *Ribbed Smoked Sheet* (RSS) yang disuplai dari PT. Tjibodas dan karet polibutadiena (BR) Nd-BR CB 24 diperoleh dari Lanxess – Jerman. Bahan pengisi berupa *highly dispersible silica* (HD silica) (Zeosil 1165 MP, Solvay, China) dan karbon hitam CB N330 (OCI, Korea). Kompatibiliser berupa *Bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide* (TESPT) (JHS69, Jiangnan Fine Chemical Co.Ltd, China) dan ENR dengan kandungan epoksi sebesar 50 % (MRB, Malaysia). *Naphthenic oil* (NO) (Nytex 840, Nynas, Swedia) digunakan sebagai pelunak. Bahan akselerator menggunakan *N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide* (CBS OCP, Kemai Chemical Co.Ltd, Cina), *diphenyl guanidine* (DPG, Kemai Chemical Co.Ltd, Cina), dan *Tetrabenzylthiuram disulphide* (Rhenogran TBzTd-70, Rhein Chemie Rheinau Mannheim GmbH, Jerman). Bahan anti-ozon berupa *2,2,4-trimethyl-1,2-*

dihydroquinoline (TMQ Vulkanox HS/LG, Rhein Chemie Rheinau Mannheim GmbH, Jerman), *p-phenylenediamine* (6PPD, Sirantox Vulkanox 4020, Lanxess, Deutschland GmbH, Jerman), dan wax (Antilux 654, Lanxess, Deutschland GmbH, Jerman). Asam stearat (AS) (Aflux 52, Rhein Chemie Rheinau Mannheim GmbH, Jerman) and zinc oxide (ZnO, Lanxess, Deutschland GmbH, Jerman) digunakan sebagai aktivator, and sulfur (Midas SP-325, Miwon Chemicals Co., Ltd, Korea) digunakan sebagai bahan pemvulkanisasi. Toluene (Merck, Jerman) toluene digunakan dalam pengujian derajat ikatan silang dan ammonia teknis digunakan pada analisis ikatan karet total dan kimia.

Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain; mesin *banbury mixer* (David Bridge Co.Ltd, Manchester, England) kapasitas 1500 ml, mesin giling terbuka (*open mill*- Berstorf), *compression molding* (Kobe Machiery Co.Ltd, Jepang), dan beberapa alat untuk karakterisasi komponen dan vulkanisat. Interaksi antar bahan pengisi diuji menggunakan *Rubber Processing Analyzer* (RPA Elite, TA Instrument, USA), sedangkan kandungan ikatan karet diuji menggunakan desikator dan lembar saringan kawat stainless steel 325 mesh. Pengujian karakteristik pematangan menggunakan *Moving Die Rheometer* (MDR 2000) Alpha Technology, USA. Pengujian sifat-sifat mekanis menggunakan Shore A durometer (Karl Frank GMBH, Jerman), *universal testing machine* (MTS, USA), DIN abrader (Karl Frank GMBH Tipe 11565, Jerman). Sifat dinamik vulkanisat dianalisa menggunakan *Dynamic Mechanical Analysis* (DMA 7100, Toshiba, Jepang).

Formulasi Kompon Telapak Ban ECO

Kompon telapak ban ECO diformulasikan dengan menggunakan karet alam dan sintesis (NR dan BR) dengan bahan pengisi penguat (silika HD dan karbon hitam) dan atau tanpa kompatibiliser karet alam epoksi (ENR). Kedua formula tersebut dinyatakan sebagai komponen A dan B secara

berturut-turut. Formulasi kompon telapak ban ECO ditabulasikan pada Tabel 1. Kompon tersebut digiling menggunakan mesin *banbury mixer* (David Bridge Co.Ltd,

Manchester, Inggris), dengan tiga tahap pencampuran. Tahapan pencampuran bahan kompon telapak ban ECO ditabulasikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Formulasi kompon telapak ban ECO dengan dan tanpa kompatibeliser
Table 1. Formulation of ECO tire tread compound with and without compatibilizer

No No	Bahan Materials	Bobot (phr) Weight (phr)	
		A	B
1	NR	70	70
2	BR	30	30
3	Silica HD	60	60
4	CB N330	5	5
5	TESPT	4,5	4,5
6	ENR 50	-	5
7	Naftenik Oil	10	10
8	ZnO	3	3
9	AS	2	2
10	TMQ	1,5	1,5
11	6PPD	2	2
12	Wax	2	2
13	DPG	2,5	2,5
14	CBS	1,6	1,6
15	TBZTD	0,2	0,2
16	Sulfur	2	2

Tabel 2. Tahapan pencampuran bahan kompon telapak ban ECO
Table 2. Mixing stage of ECO tire tread compound materials

No No	Bahan Materials	Waktu Pencampuran (menit) Mixing time (min)
Tahap 1 (Stage 1)		
1.	Karet NR dan BR	1
3.	½ silica + ½ silane + ½ oil	5
5.	½ silica + ½ silane + ½ oil + ZnO, As. Stearat, TMQ dan 6PPD	5
7.	Isothermal mixing (140 °C)	
8.	Dump, cek suhu dan berat	
Tahap 2 (Stage 2)		
1.	Tambahkan kompon dari tahap 1	1
3.	Tambahkan DPG	2
4.	Isothermal mixing (140°C)	
5.	Dump, cek suhu dan berat	
Tahap 3		
1.	Tambahkan kompon dari tahap 2	1
3.	Tambahkan CBS, TBzTD, Sulfur	2
5.	Dump, cek suhu dan berat	

Pada tahap awal pencampuran, karet dicampur dengan setengah porsi silika dan TESPT pada suhu 50°C, faktor pengisian 0,7, dan kecepatan rotor 80 rpm. Penginisiasian reaksi silanisasi dilakukan dengan peningkatan kecepatan menjadi 100 rpm untuk mencapai suhu 140°C pada bagian dalam banbury. Kemudian pada akhir pencampuran diukur suhu kompon dan kompon dihomogenkan dan dilembarkan dengan menggunakan gilingan terbuka. Lembaran kompon karet diturunkan suhunya selama 24 jam untuk meningkatkan interaksi antara bahan kimia karet dengan karet (Grunert, 2018). Pada tahap kedua, kompon dimasukkan kembali dalam banbury dan ditambahkan DPG pada suhu awal 50°C, kecepatan rotor 100 rpm dan faktor pengisian sebesar 0,7. Suhu pencampuran akan meningkat sampai dengan 140°C di dalam banbury sehingga akan terjadi reaksi silanisasi lanjut (Hayichelaeh et al., 2018). Pada tahap akhir, kecepatan rotor diset rendah untuk menjaga kenaikan suhu di dalam banbury sehingga mencegah pematangan dini (*scorch*). Kompon karet yang dingin dimasukkan ke dalam banbury pada suhu 50°C, faktor pengisian 0,65, dan kecepatan rotor 80 rpm. Kompon karet kemudian di homogenkan dan dilembarkan dengan menggunakan mesin gilingan terbuka. Kompon selanjutnya divulkanisasi menggunakan mesin press Kobe Machinery Co.Ltd, Jepang pada tekanan 100 kg/cm², suhu 150°C dan waktu pematangan sesuai dengan hasil karakterisasi pematangan yang didapat dari rheometer.

Karakterisasi Kompon Telapak Ban ECO

Interaksi antar bahan pengisi

Interaksi antar bahan pengisi (*filler-filler interaction*) menunjukkan perubahan *storage modulus* (G') pada tegangan (*strain*) yang berbeda dari kompon karet yang dianalisis dengan *Rubber Processing Analyzer* (RPA Elite, TA Instrument, USA) pada 100°C, frekuensi 0,5 Hz pada variasi regangan dari 0,07% hingga 100% (Fathurrohman, Rugmai, Hayemasae, & Sahakaro, 2020). Efek Payne (*Payne effect*) ditentukan dari G' pada regangan rendah dan tinggi, yaitu masing-masing pada 0,43% dan 100% untuk sampel A dan 0,59% dan 100% untuk sampel B.

Kandungan karet terikat

Kandungan karet terikat menganalisa ikatan karet total (*total bond rubber*), dan ikatan kimia karet (*chemical bond rubber*). Ikatan fisik antara karet dan silika diputus menggunakan amonia, untuk menentukan kandungan kimia yang terikat pada karet (Wolff, Wang, & Tan, 1993). 0,2 g kompon karet tanpa bahan pemvulkanisasi dan bahan pencepat dipotong kecil-kecil, dimasukkan ke dalam wadah berbentuk kubus, yang dibentuk dari lembar saringan kawat stainless steel 325 mesh, kemudian direndam dalam toluena dengan dan tanpa amonia selama 7 hari. Selanjutnya, sampel dikeringkan pada suhu 105°C selama 24 jam. Kandungan karet yang terikat ditentukan berdasarkan berat sampel sebelum dan sesudah ekstraksi menggunakan persamaan (1) (Wolff et al., 1993).

$$\text{Kandungan karet terikat (\%)} = \frac{m - m_s}{m_r} \times 100 \quad (1)$$

Dimana m , m_s , dan m_r adalah berat sampel setelah ekstraksi, berat bahan pengisi di sampel, dan berat karet di sampel, secara berturut-turut.

Karakterisasi pematangan

Masing-masing kompon tersebut diuji pada suhu 150°C. Pengujian rheometer tersebut menyajikan karakteristik pematangan pada masing-masing kompon yang meliputi; torsi maksimum (M_H) dan minimum (M_L), delta torsi ($M_H - M_L$), waktu

$$CRI = \frac{100}{t_{90} - t_{s2}} \quad (2)$$

Karakterisasi Vulkanisat Telapak Ban ECO

Apparent crosslink density

Metode pengembangan (*swelling*) sampel vulkanisat digunakan untuk mengukur nilai *apparent crosslink density*, dihitung dari 1/nilai *swelling* (S. Sarkawi, Dierkes, & Noordermeer, 2014). Sampel

$$Q = \frac{W_1 \times FK}{W_2 - W_3} \quad (3)$$

Dimana Q adalah *apparent crosslink density*, W_1 adalah berat awal vulkanisat, W_2 adalah berat awal setelah perendaman dalam toluene pada suhu ruang selama 72 jam, W_3 adalah berat vulkanisat karet setelah dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam, dan FK adalah fraksi karet yang dihitung dengan membagi bobot total karet (phr) dengan bobot total (phr).

Kekerasan

Uji kekerasan diukur dengan menggunakan Shore A durometer (Karl Frank GMBH, Jerman) sesuai dengan ISO 48-4: 2018. Lima spesimen uji diukur dan hasil uji dihitung menggunakan nilai median dari 5 pengukuran.

Sifat kuat tarik, perpanjangan putus, dan young modulus

Vulkanisat karet dengan ketebalan 2 mm dipotong dengan menggunakan pisau dumbbell ISO 37: 2015 tipe 2 dan sifat kuat tarik diukur menggunakan *universal testing machine* (MTS, USA) dengan kecepatan 500 mm/menit pada suhu ruang sesuai dengan ISO 37: 2015. Tiga spesimen uji diukur dan hasil uji dihitung menggunakan nilai median dari 3 pengukuran. Nilai tegangan (*stress*) pada beberapa regangan (*strain*) pada pengukuran kuat tarik dan perpanjangan putus selanjutnya diploting untuk

scorch (t_{s2}) dan optimum vulkanisasi (t_{90}), dan indeks kecepatan reaksi (*Cure Rate Index/ CRI*). CRI dihitung berdasarkan perbedaan t_{90} dan t_{s2} dengan persamaan berikut (persamaan 2) (Chonkaew, Minghvanish, Kungliean, Rochanawipart, & Brostow, 2011).

vulkanisat karet sebanyak 0,2 g dikembangkan dalam toluene pada suhu ruang selama 72 jam. Kemudian sampel ditimbang dan dikeringkan untuk menguapkan toluene yang terserap di dalam vulkanisat karet pada suhu ruang selama 24 jam. Nilai *swelling* merupakan berat toluene yang terserap per berat karet. Nilai *Apparent crosslink density* dihitung dengan rumus sebagai berikut;

mengetahui kurva liniernya. Slop kurva linier tersebut merupakan nilai *young modulus*.

Kekuatan Sobek

Uji ketahanan sobek diukur pada suhu ruang dengan *Universal Testing Machine* (MTS, USA) pada kecepatan 500 mm/menit menggunakan spesimen uji berbentuk angle sesuai dengan ISO 34(2): 2015. Tiga spesimen uji diukur dan hasil uji dihitung menggunakan nilai median dari 3 pengukuran.

Ketahanan Kikis

Ketahanan kikis dari vulkanisat karet merupakan kehilangan volume karet yang terkikis oleh mesin DIN abrader (Karl Frank GMBH Tipe 11565, Jerman) sesuai dengan ASTM D5963. Tiga spesimen uji diukur dan hasil uji dihitung menggunakan nilai median dari 3 pengukuran.

Sifat Dinamik Vulkanisat Karet

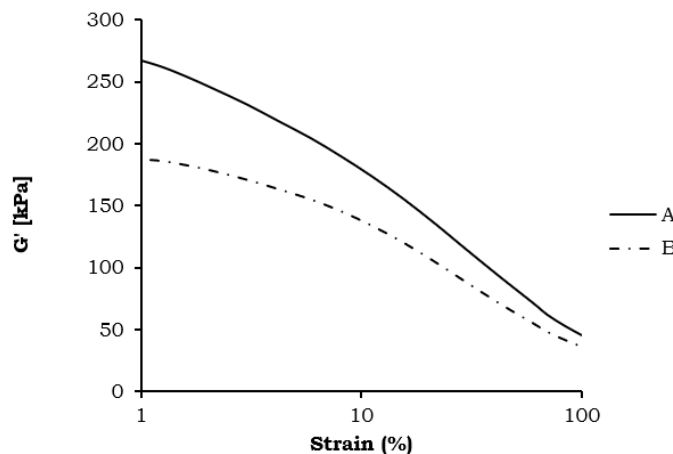
Sifat dinamik vulkanisat karet dianalisa dengan menggunakan *Dynamic Mechanical Analyzer* (DMA 7100, Toshiba, Jepang). Sampel vulkanisat yang digunakan berukuran p x l x t sebesar 50 x 10 x 2 mm. Pengujian dilakukan pada mode tension dengan tekanan 0,1 N, amplitude 5 m, frekuensi 10 Hz, regangan 0,1%, dan laju pemanasan (N_2) 2°C/min pada variasi suhu -80 C sampai 80 C. Pengujian DMA akan menampilkan nilai modulus hilang (*loss modulus, G''*), modulus simpan (*storage modulus, G'*) yang terolah selanjutnya sebagai Tan δ . Nilai Tan δ pada 0°C dan 60°C masing-masing mengindikasikan nilai cengkeram basah (*wet grip*) dan ketahanan gelinding (*rolling resistance*) telapak ban (Noordermeer, 1998).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Kompon Telapak Ban ECO

Interaksi antar bahan pengisi

Interaksi antar bahan pengisi (*filler-filler interaction*) ditunjukkan dengan perubahan *storage modulus (G')* pada strain yang berbeda (Gambar 1), yang diindikasikan dengan nilai *payne effect* (Tabel 3). Gambar 1 menunjukkan bahwa kompon B memiliki nilai G' yang lebih kecil dibandingkan dengan kompon A, dengan nilai *payne effect* 80,60 poin lebih rendah dibandingkan dengan nilai kompon A (Tabel 3). Nilai *payne effect* kompon B yang lebih rendah tersebut mengindikasikan bahwa dispersi bahan pengisi dalam matriks karet lebih baik. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan ENR sebagai kompatibiliser dalam kompon ban ECO membantu proses dispersi bahan pengisi dalam matriks karet.



Gambar 1. Kurva *storage modulus (G')* kompon A dan B pada berbagai regangan yang berbeda

Figure 1. *Storage modulus (G')* curve at various strain on compounds A and B

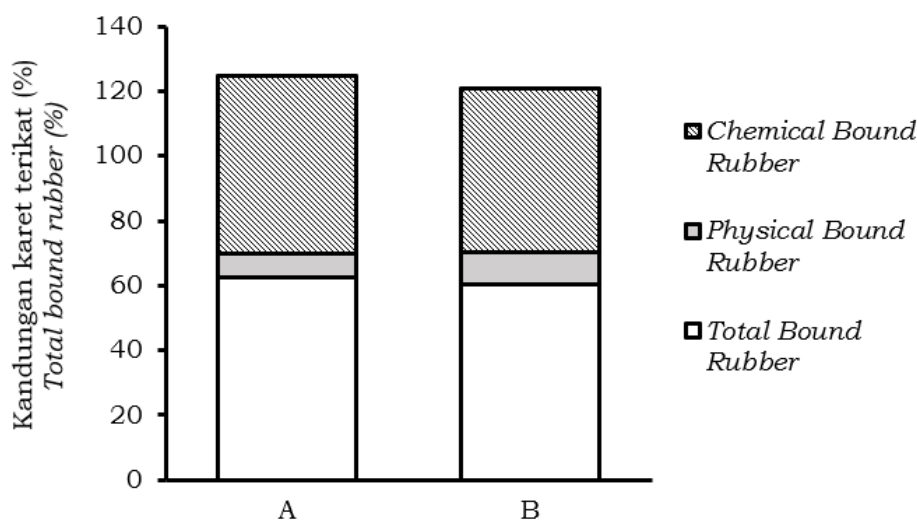
Kandungan karet terikat

Peningkatan interaksi antara silika dan karet juga dapat dilihat dari besarnya kandungan karet terikat. Pengujian kandungan karet terikat mengetahui adsorpsi fisik dan kimia silika dalam matriks karet NR/BR. *Total bound rubber* mengindikasikan interaksi fisika dan kimia antara karet dan silika. Tabel 3 dan Gambar

2 menunjukkan jumlah *chemical bound rubber*, *physical bound rubber*, dan *total bound rubber* pada kompon A dan B. *Total bound rubber* kompon A sedikit lebih besar dibandingkan kompon B. Kompon A memiliki nilai 4 poin *chemical bound rubber* yang lebih besar dan 3 poin *physical bound rubber* yang lebih kecil dibandingkan kompon B.

Tabel 3. Karakteristik interaksi antar bahan pengisi dan kandungan karet terikat
 Table 3. Interaction characteristic between filler and bound rubber

Parameter Parameter	A	B
<i>Payne effect</i> (kPa)	235,31	154,71
<i>Chemical Bound Rubber</i> (%)	54,70	50,43
<i>Physical Bound Rubber</i> (%)	7,63	10,02
<i>Total Bound Rubber</i> (%)	62,33	60,45



Gambar 2. Komposisi kandungan karet terikat pada kompon A dan B
 Figure 2. The composition of bound rubber on compounds A and B

Kandungan *chemical bound rubber* mengindikasikan interaksi antara karet, silika, dan TESPT. Nilai *payne effect* yang rendah mengindikasikan sedikitnya aglomerasi bahan pengisi pada matriks karet dan baiknya interaksi antar ketiga komponen tersebut. Kompon B memiliki nilai *payne effect* yang lebih rendah dibandingkan kompon A (Tabel 3), namun memiliki kandungan *chemical bound rubber* yang lebih rendah dibandingkan kompon A (Tabel 3 dan Gambar 2). ENR merupakan hasil modifikasi kimia karet alam melalui reaksi epoksidasi. Kandungan protein dan lipid pada karet alam dapat menghambat reaksi silanisasi (Dierkes et al., 2019; S. S. Sarkawi et al., 2015). Terhambatnya reaksi silanisasi menyebabkan *chemical bound rubber* kompon B lebih kecil dibandingkan kompon A. Lebih lanjut, ENR berikatan dengan silika melalui ikatan hidrogen dan atau terjadinya ikatan silang sendiri (*self-cross linking*) melalui terbukanya cincin

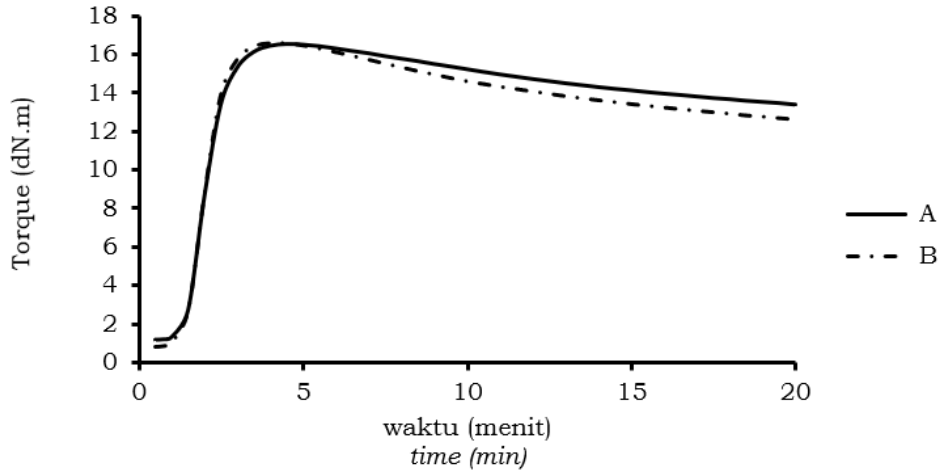
oksiran (epoksi) (Kaewsakul, Sahakaro, Dierkes, & Noordermeer, 2014; Y. Wang et al., 2016), besarnya kandungan epoksi pada ENR yang digunakan semakin memperbesar kemungkinan terbukanya cincin oksiran yang dapat berdampak pula pada penurunan kandungan *chemical bound rubber*. Maka nilai kandungan *chemical bound rubber* kompon B lebih rendah dibandingkan kompon A.

Interaksi fisik antara karet dan silika tidak hanya disebabkan oleh interaksi antara partikel silika tetapi juga karena adsorpsi fisik karet ke partikel silika dengan adanya agen penghubung silan (TESPT) (Clement, Bokobza, & Monnerie, 2005). Penggunaan kompatibiliser ENR pada kompon B semakin meningkatkan adsorpsi fisik karet ke partikel silika dibandingkan hanya dengan menggunakan TESPT, sehingga nilai kandungan *physical bound rubber* kompon B meningkat.

Karakterisasi pematangan

Gambar 3 dan Tabel 4 memperlihatkan karakteristik pematangan kompon A dan kompon B. Pada kurva karakteristik pematangan (Gambar 3) menunjukkan bahwa kompon B memiliki nilai maximum

torque (MH) yang sedikit lebih tinggi dan minimum torque (ML), waktu optimum vulkanisasi (t_{90}), *scorch time* (t_{s2}) dan indeks kecepatan reaksi (CRI) yang lebih singkat dibandingkan kompon A, dengan nilai karakterisasi yang tertabulasi pada Tabel 4.



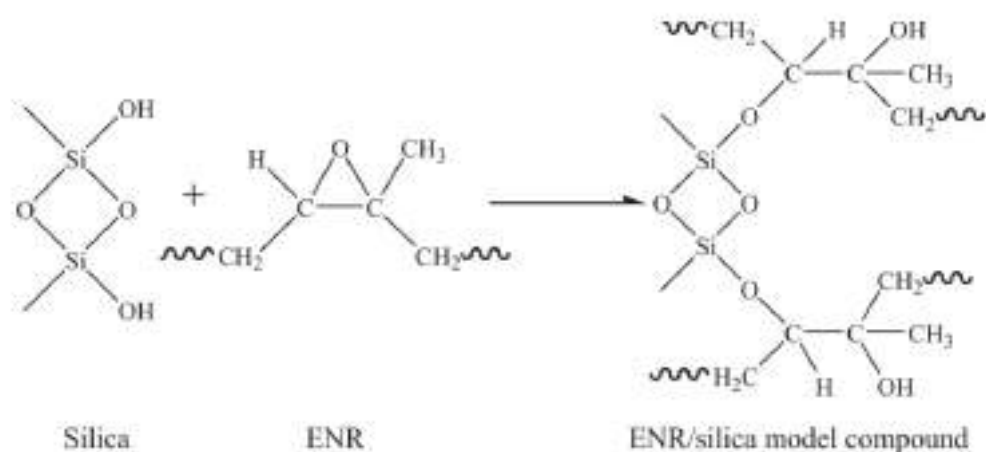
Gambar 3. Kurva karakterisasi pematangan vulkanisat telapak ban ECO A dan B
 Figure 3. Curing characteristics curve of ECO tire tread vulcanizates A and B

Tabel 4. Nilai karakterisasi pematangan vulkanisat telapak ban ECO A dan B
 Table 4. Curing characteristics value of ECO tire tread vulcanizates A and B

Parameter Parameter	A	B
MH, dN.m	16,56	16,61
ML, dN.m	1,16	0,53
MH-ML, dN.m	15,40	16,08
t_{90} , menit	2,53	2,44
t_{s2} , menit	1,34	1,28
CRI	84,03	86,21

ENR merupakan karet yang memiliki polaritas yang tinggi sehingga dapat berinteraksi dengan permukaan silika melalui gugus hidroksilnya (Sengloyluan et al., 2012). Keduanya dapat berinteraksi dengan baik meskipun tanpa adanya silan melalui mekanisme berikut (Gambar 4) —(Y. Wang et al., 2016). Penambahan kompatibiliser ENR pada kompon B semakin meningkatkan interaksi silika dengan matriks karet sehingga ikatan silang yang

terbentuk semakin banyak, dimana nilai MH kompon B lebih besar dibanding kompon A (Gambar 3). Lebih lanjut, penambahan kompatibiliser ENR mempercepat waktu pematangan dan *scorch time*. Gugus epoksidasi ENR dapat menurunkan energi aktivasi ikatan rangkap karet (Poh & Tan, 1991), sehingga waktu optimum vulkanisasi (t_{90}), *scorch time* (t_{s2}) dan indeks kecepatan reaksi (CRI) lebih singkat(Tabel 4).



Gambar 4. Mekanisme interaksi ENR dan silika (Sengloyluan et al., 2014; Xu et al., 2015)
 Figure 4. Interaction mechanisms of ENR and silica (Sengloyluan et al., 2014; Xu et al., 2015)

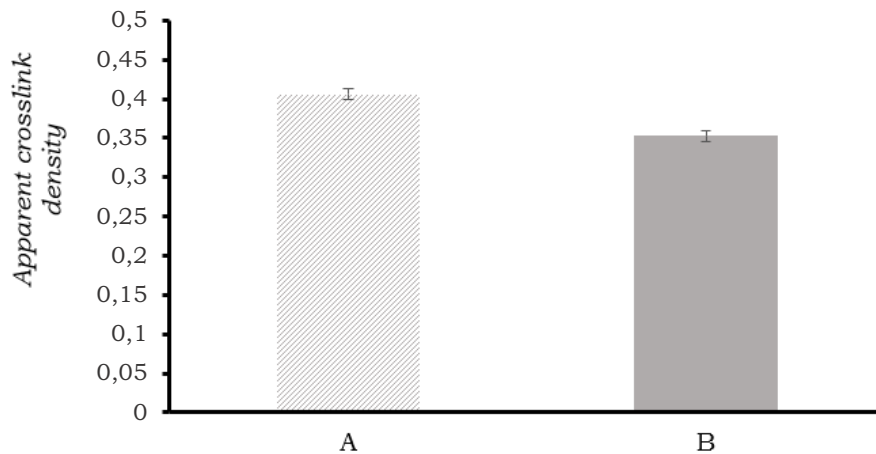
Karakterisasi Vulkanisat Telapak Ban ECO

Apparent crosslink density

Nilai *apparent crosslink density* dianalisa menggunakan metode *swelling* dalam toluene dan dihitung menggunakan persamaan 3. *Apparent crosslink density* kedua kompon ditampilkan pada Gambar 5. Kompon B memiliki nilai *apparent crosslink density* lebih kecil dibandingkan kompon A. Penggunaan kompatibiliser ENR pada kompon B meningkatkan dispersi silika pada matriks karet dan interaksi antar bahan pengisinya, yang berturut-turut ditandai dengan rendahnya nilai *payne effect* (Gambar 1) dan nilai *physical bound rubber* (Tabel 3).

Tingginya interaksi antar bahan pengisi cenderung meningkatkan jumlah karet yang terjebak (M.-J. Wang, 1999) dan terbentuknya ikatan (baik fisik maupun

kimia) (Mandal et al., 2018) sehingga molekul karet tidak dapat kontak dengan toluene, menurunkan nilai *swelling*, dan lebih lanjut meningkatkan *crosslink density* – (Bokobza, Leroy, & Lalanne, 2009; Sedov et al., 2018). Namun, kompon B memiliki nilai *apparent crosslink density* yang lebih kecil dibandingkan kompon A meskipun nilai *payne effect* nya lebih kecil dibandingkan kompon A. Pada campuran sulika, karet non polar (seperti NR), dan silane terdapat persaingan antara silane dengan protein sehubungan dengan hidrofobikasi pada permukaan silika, khususnya pada grup *siloxane* (Si-O) (Goswami et al., 2020). Penggunaan ENR sebagai kompatibiliser pada kompon B memungkinkan semakin meningkatkan persaingan antara silane dan protein, sehingga jumlah karet yang terjebak kecil. Lebih lanjut, molekul karet mudah kontak dengan toluene sehingga menurunkan nilai *swelling* dan menurunkan *crosslink density*.

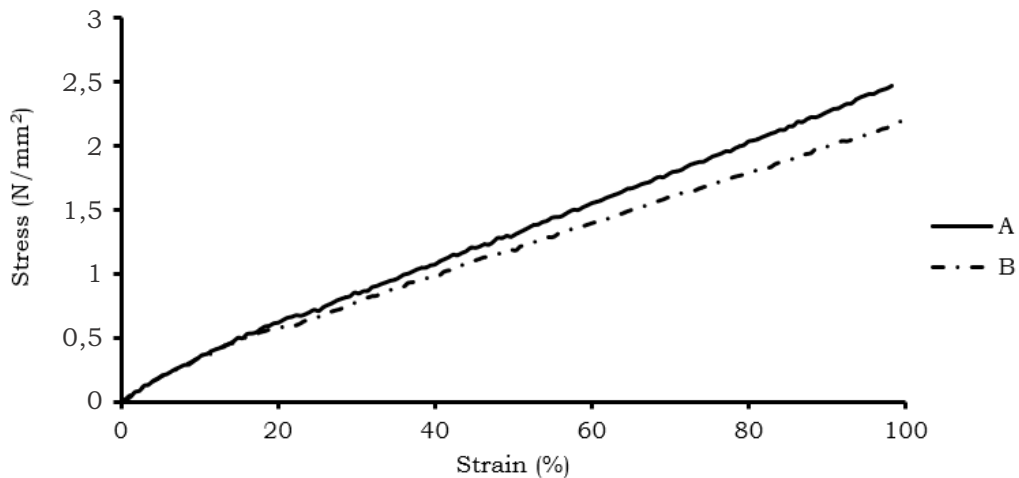


Gambar 5. Nilai *apparent crosslink density* vulkanisat telapak ban ECO A dan B
Figure 5. *Apparent crosslink density* value of ECO tire tread vulcanizates A and B

Kekerasan dan *young modulus*

Kurva tegangan (*stress*)-regangan(*strain*) vulkanisat telapak ban ECO A dan B diperlihatkan pada Gambar 6. *Young modulus* merupakan slop kurva linier

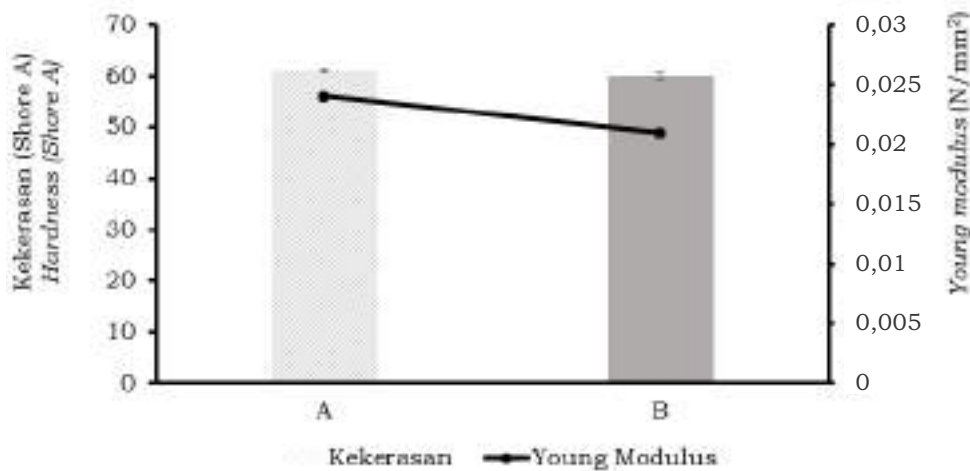
tersebut. Vulkanisat telapak ban ECO B memiliki nilai *young modulus* yang lebih rendah dibandingkan kompon A, yang disebabkan oleh rendahnya *crosslink density* B (Gambar 5) (Ryu et al., 2021).



Gambar 6. Kurva tegangan-regangan vulkanisat telapak ban ECO A dan B
Figure 6. *Stress and strain* curve of ECO tire tread vulcanizates A and B

Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan kekerasan dan modulus elastisitas (*young modulus*) vulkanisat telapak ban ECO A dan B. Kekerasan dan *young modulus* vulkanisat telapak ban ECO B sedikit lebih kecil dibandingkan A. Pada persamaan teoretis dan empiris, kekerasan karet berhubungan dengan *young modulus* — (Murali Manohar, Chakraborty, &

Shamshath Begum, 2021), yang ditentukan pada regangan rendah menggunakan *Universal Testing Machine*. Pada kondisi ini, efek penguatan terjadi akibat terbentuknya jaringan pengisi (Sahakaro, 2017). Oleh karena itu penurunan nilai *payne effect* cenderung menurunkan kekerasan dan *young modulus* pada kompon B.



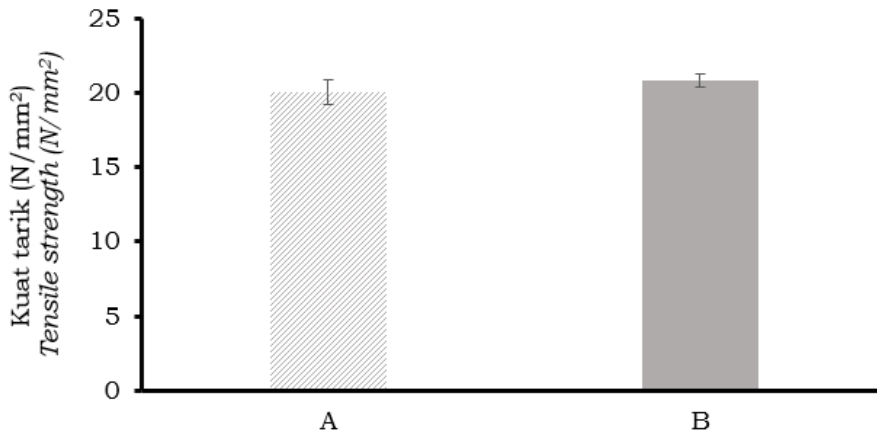
Gambar 7. Grafik hubungan kekerasan dan *young modulus* vulkanisat telapak ban ECO A dan B

Figure 7. Correlation hardness and young modulus graph of ECO tire tread vulcanizates A and B

Kuat tarik

Nilai kuat tarik vulkanisat telapak ban ECO A dan B ditampilkan pada Gambar 8. Vulkanisat telapak ban ECO B memiliki nilai kuat tarik lebih tinggi dibanding vulkanisat telapak ban ECO A. Nilai kuat tarik yang tinggi pada vulkanisat telapak

ban ECO B disebabkan baiknya interaksi antar bahan pengisi dan bahan pengisi-karet (Sattayanurak et al., 2020), yang ditandai rendahnya nilai *payne effect* (Gambar 1). Hasil ini selaras dengan hasil penelitian Sengloyluan et al. (2014), dimana penggunaan kompatibiliser ENR mampu meningkatkan kuat tarik vulkanisat.

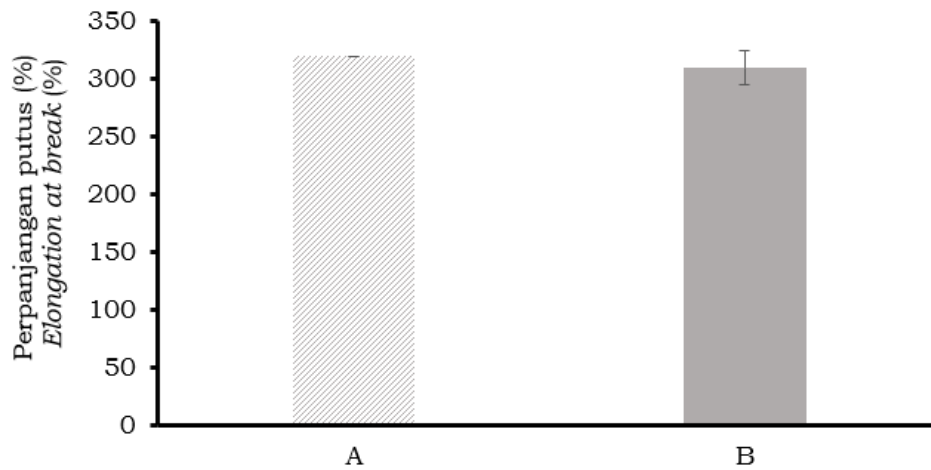


Gambar 8. Nilai kuat tarik vulkanisat telapak ban ECO A dan B
Figure 8. Tensile strength value of ECO tire tread vulcanizates A and B

Perpanjangan putus

Nilai perpanjangan putus vulkanisat telapak ban ECO A dan B ditampilkan pada Gambar 9. Vulkanisat telapak ban ECO B memiliki nilai perpanjangan putus lebih

rendah dibanding vulkanisat telapak ban ECO A. Rendahnya nilai perpanjangan putus vulkanisat telapak ban ECO B dikarenakan oleh rendahnya jumlah karet yang terikat (Gambar 2 dan Tabel 3)(Sengloyluan et al., 2014).

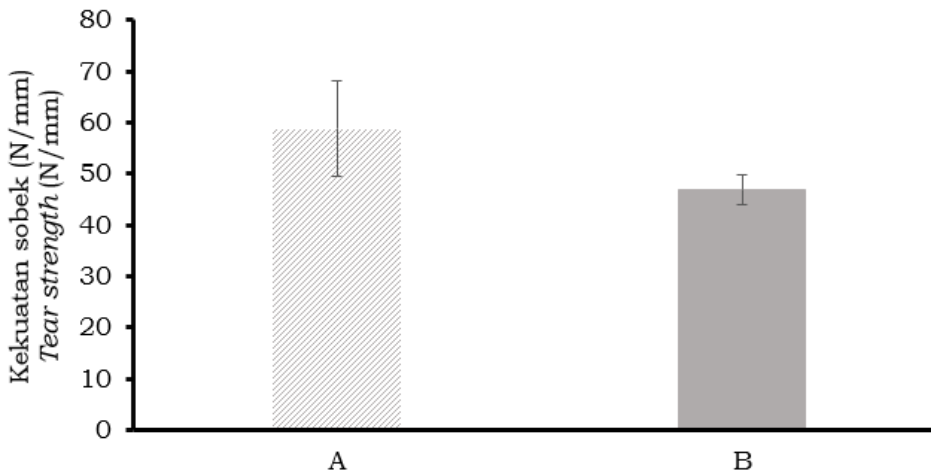


Gambar 9. Nilai perpanjangan putus vulkanisat telapak ban ECO A dan B
Figure 9. Elongation at break value of ECO tire tread vulcanizates A and B

Kekuatan sobek

Penggunaan kompatibiliser ENR mempengaruhi dispersi bahan pengisi pada vulkanisat telapak ban ECO. Peningkatan

interaksi antar bahan pengisi dan bahan pengisi-karet menyebabkan kekakuan (*stiffness*) vulkanisat (Sattayanurak et al., 2020), sehingga vulkanisat telapak ban ECO B lebih rentan untuk sobek (Gambar 10).

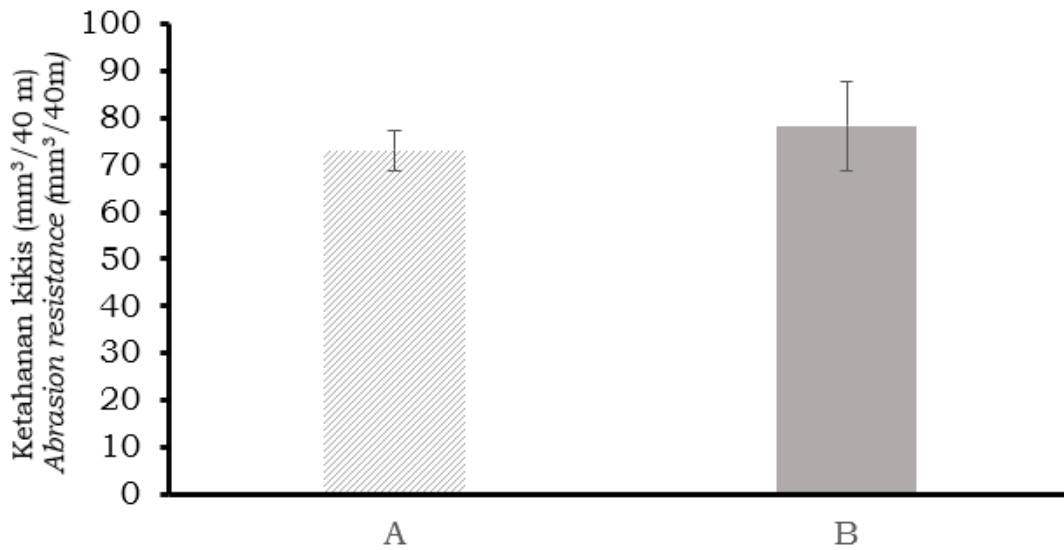


Gambar 10. Nilai kekuatan sobek vulkanisat telapak ban ECO A dan B
Figure 10. Tear strength value of ECO tire tread vulcanizates A and B

Ketahanan kikis

Dispersi bahan pengisi yang baik pada memberikan efek positif pada ketahanan kikisnya (Gambar 11). Kompatibiliser ENR pada karet non polar NR/BR, dapat berhubungan dengan silika melalui melalui ikatan hidrogen dan atau terjadinya ikatan silang sendiri (*self-cross*

linking) melalui terbukanya cincin oksiran (epoksi)—(Kaewsakul et al., 2014; Y. Wang et al., 2016). Baiknya interaksi antar bahan pengisi dan bahan pengisi-karet membuat karet sedikit terkikis (Sattayanurak et al., 2020). Gambar 11 menunjukkan bahwa vulkanisat telapak ban ECO B memiliki nilai ketahan kikis yang lebih besar dibandingkan A.

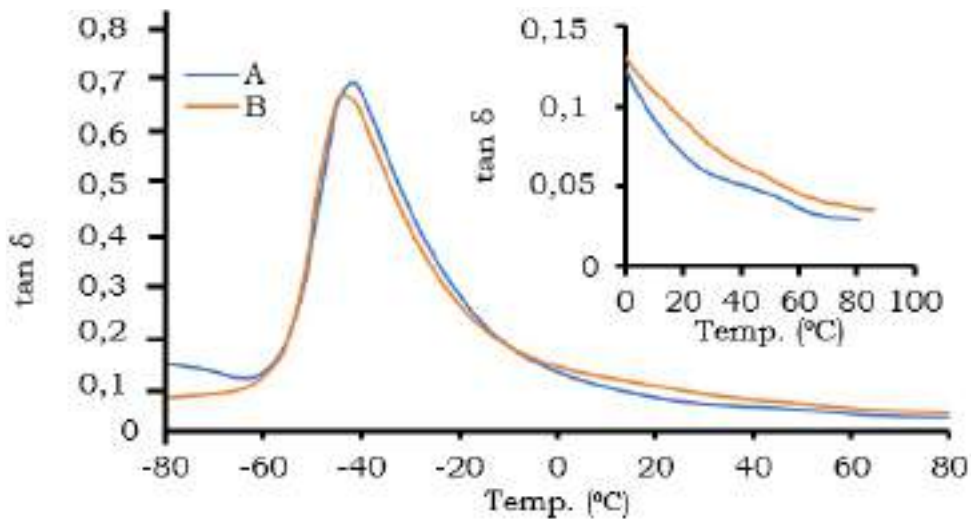


Gambar 11. Nilai ketahanan kikis vulkanisat telapak ban ECO A dan B
 Figure 11. Abrasion resistance value of ECO tire tread vulcanizates A and B

Sifat dinamik vulkanisat karet

Pengujian sifat dinamik menggunakan DMA dilakukan untuk mengetahui nilai cengkeram basah (*wet grip*) dan ketahanan gelinding (*rolling resistance*) telapak ban, yang diindikasikan dengan nilai *loss tan* ($\tan \delta$). Gambar 12 menampilkan

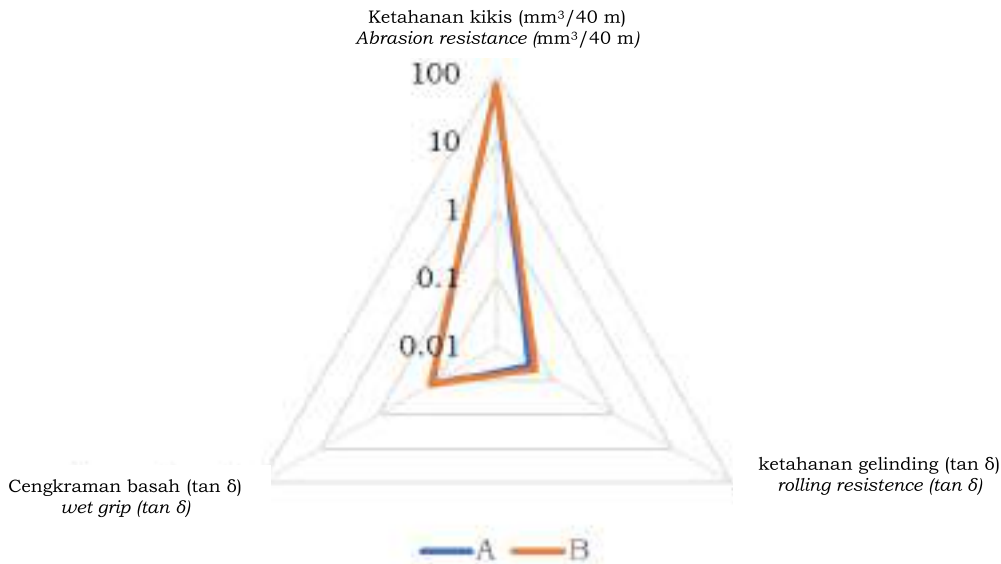
kurva *loss tan* vulkanisat telapak ban ECO A dan B pada berbagai temperatur. Nilai \tan pada 0°C dan 60°C masing-masing mengindikasikan nilai cengkeram basah (*wet grip*) dan ketahanan gelinding (*rolling resistance*) telapak ban (Noordermeer, 1998).



Gambar 12. Kurva *loss tan* ($\tan \delta$) vulkanisat telapak ban ECO A dan B
 Figure 12. Loss tan ($\tan \delta$) curve of ECO tire tread vulcanizates A and B

Vulkanisat telapak ban ECO B memiliki nilai $\tan \delta$ pada suhu 0°C dan 60°C yang lebih tinggi dibandingkan vulkanisat telapak ban ECO A. Kompatibiliser ENR berikatan dengan silika melalui ikatan hidrogen dengan gugus hidroksil pada permukaan silika. Interaksi keduanya menunjukkan bahwa interaksi fisik keduanya lebih tinggi dibandingkan secara kimia (Tabel 3). Senyawa dengan lebih banyak interaksi fisik ini menghasilkan kehilangan energi yang lebih tinggi di bawah kondisi deformasi dinamis (Sattayanurak et al., 2020) sehingga $\tan \delta$ vulkanisat telapak ban ECO B pada suhu 0°C dan 60°C lebih tinggi. Selain itu, penggunaan kompatibiliser ENR pada karet NR/BR merupakan penggabungan fasa polimer yang berbeda polaritas dengan matriksnya sehingga mengarah pada pemisahan fasa dan memiliki pengaruh pada sifat dinamis (Nakason, Kaesaman, Wongkul, & Kiatkamjornwong, 2001). Adhesi antarmuka yang lebih lemah menyebabkan lebih banyak kehilangan energi di bawah deformasi dinamis dan karenanya kehilangan tangen yang lebih tinggi.

Kinerja ban ramah lingkungan ditentukan berdasarkan ketahanan gelinding (*rolling resistance*), kemampuan cengkeram basah (*wet grip*), dan kemampuan meredam kebisingan eksternal (*external noise*), yang ketiganya disebut sebagai *magic triangle*. Telapak ban adalah bagian terluar dari struktur penyusun ban yang bersentuhan langsung dengan permukaan jalan, sehingga diharapkan telapak ban tahan abrasi (kikis) agar tidak mudah gundul, memiliki kemampuan cengkeram basah tinggi dan ketahanan gelinding rendah sehingga tidak selip, lebih mudah melaju/bergulir, dan lebih efisien dalam konsumsi bahan bakar. Ketiga kriteria ban ramah lingkungan yaitu kemampuan cengkeram basah, ketahanan gelinding, dan kikis vulkanisat ban ECO A dan B dirangkum dalam Gambar 13. Vulkanisat ban ECO B memiliki cengkraman basah dan ketahanan kikis yang lebih baik, namun memiliki ketahanan gelinding yang sedikit lebih tinggi dibandingkan vulkanisat ban ECO A. Maka formula kompon B perlu ditingkatkan untuk memberikan ketahanan gelinding yang rendah sehingga dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar kendaraan.



Gambar 13. Ketiga kreteria ban ramah lingkungan vulkanisat ban ECO A dan B
Figure 13. Three criteria of ECO tire tread vulcanizates A and B

KESIMPULAN DAN SARAN

Penggunaan kompatibiliser ENR pada formulasi kompon telapak ban ECO mampu meningkatkan dispersi bahan pengisi, yang ditandai dengan menurunnya nilai *payne effect* kompon B. Dispersi bahan pengisi yang baik lebih lanjut dapat meningkatkan interaksi fisik antar bahan pengisi dan bahan pengisi karet, karakteristik pematangan, dan sifat mekanik vulkanisat terutama kuat tarik dan ketahanan kikisnya. Selain itu, penggunaan kompatibiliser ENR juga dapat meningkatkan cengkraman basah vulkanisat telapak ban ECO. Namun, sedikit menurunkan interaksi kimia bahan pengisi-karet sehingga nilai *apparent crosslink density* dan sifat mekanik (terutama kekerasan, young modulus, perpanjangan putus dan ketahanan sobek) sedikit menurun. Lebih lanjut, vulkanisat ban ECO B memiliki ketahanan gelinding yang sedikit lebih tinggi dibandingkan vulkanisat ban ECO A. Maka formula kompon B perlu ditingkatkan untuk memberikan ketahanan gelinding yang rendah sehingga dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar kendaraan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih diucapkan kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah memberikan pendanaan dalam kegiatan riset Riset Inovasi Indonesia Maju (RIIM).

DAFTAR PUSTAKA

- Bokobza, L., Leroy, E., & Lalanne, V. (2009). Effect of filling mixtures of sepiolite and a surface modified fumed silica on the mechanical and swelling behavior of a styrene-butadiene rubber. *European polymer journal*, 45(4), 996-1001.
- Cataldo, F. (2002). Preparation of silica-based rubber compounds without the use of a silane coupling agent through the use of epoxidized natural rubber. *Macromolecular Materials and Engineering*, 287(5), 348-352.
- Choi, S. S. (2001). Improvement of properties of silica filled styrene-butadiene rubber compounds using acrylonitrile-butadiene rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 79(6), 1127-1133.
- Chonkaew, W., Minghvanish, W., Kungliean, U., Rochanawipart, N., & Brostow, W. (2011). Vulcanization characteristics and dynamic mechanical behavior of natural rubber reinforced with silane modified silica. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 11(3), 2018-2024.
- Clement, F., Bokobza, L., & Monnerie, L. (2005). Investigation of the Payne effect and its temperature dependence on silica-filled polydimethylsiloxane networks. Part I: Experimental results. *Rubber Chemistry and Technology*, 78(2), 211-231.
- Das, A., Debnath, S. C., De, D., & Basu, D. K. (2004). Evaluation of physical properties and curing characteristics of silica filled ethylene-propylene-diene terpolymer in the presence of chloroprene rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(1), 196-200.
- Dierkes, W. K., Sengloyluan, K., Kaewsakul, W., Noordermeer, J. W., Sahakaro, K., & Blume, A. (2019). *New Approaches to Increase the Compatibility of Natural Rubber and Silica for Reduction of Rolling Resistance of Truck and Bus Tires*. Paper presented at the ITEC in Focus: Green Tire 2019.
- Fathurrohman, M. I., Rugmai, S., Hayemasae, N., & Sahakaro, K. (2020). Better balance of silica-reinforced natural rubber tire tread compound properties by the use of montmorillonite with optimum surface modifier content. *Rubber Chemistry and Technology*, 93(3), 548-566.

- Goswami, M., Ghosh, M. M., Dalmiya, M. S., Sharma, S., Ghorai, S. K., & Chattopadhyay, S. (2020). A finite element method based comparative fracture assessment of carbon black and silica filled elastomers: reinforcing efficacy of carbonaceous fillers in flexible composites. *Polymer testing*, 91, 106856.
- Grunert, F. (2018). *Analytical method development to predict the in-rubber dispersibility of silica*: University of Twente Enschede, The Netherlands.
- Hayichelaeh, C., Reuvekamp, L., Dierkes, W., Blume, A., Noordermeer, J., & Sahakaro, K. (2018). Enhancing the silanization reaction of the silica-silane system by different amines in model and practical silica-filled natural rubber compounds. *Polymers*, 10(6), 584.
- Kaewsakul, W., Sahakaro, K., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. (2014). Cooperative effects of epoxide functional groups on natural rubber and silane coupling agents on reinforcing efficiency of silica. *Rubber Chemistry and Technology*, 87(2), 291-310.
- Li, W., Peng, W., Ren, S., & He, A. (2019). Synthesis and characterization of trans-1, 4-poly (butadiene-co-isoprene) rubbers (TBIR) with different fraction and chain sequence distribution and its influence on the properties of natural rubber/TBIR/carbon black composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(24), 10609-10617.
- Li, Y., Han, B., Liu, L., Zhang, F., Zhang, L., Wen, S., . . . Shen, J. (2013). Surface modification of silica by two-step method and properties of solution styrene butadiene rubber (SSBR) nanocomposites filled with modified silica. *Composites Science and Technology*, 88, 69-75.
- Mandal, N., Datta, S., Manjaiah, K., Dwivedi, B., Kumar, R., & Aggarwal, P. (2018). Zincated nanoclay polymer composites (ZNCPCs): Synthesis, characterization, biodegradation and controlled release behaviour in soil. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(17), 1760-1770.
- Murali Manohar, D., Chakraborty, B. C., & Shamshath Begum, S. (2021). *Hardness-Elastic Modulus Relationship for Nitrile Rubber and Nitrile Rubber-Polyvinyl Chloride Blends*. Paper presented at the Advances in Design and Thermal Systems: Select Proceedings of ETDMMT 2020.
- Nakason, C., Kaesaman, A., Wongkul, T., & Kiatkamjornwong, S. (2001). Rheological and curing properties of reactive blending products of epoxidised natural rubber and cassava starch. *Plastics, rubber and composites*, 30(4), 154-161.
- Noordermeer, J. W. (1998). *Recent developments in rubber processing, leading to new applications such as the "green tyre"*. Paper presented at the Macromolecular symposia.
- Poh, B., & Tan, B. (1991). Mooney scorch time of epoxidized natural rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 42(5), 1407-1416.
- Ryu, G., Kim, D., Song, S., Hwang, K., Ahn, B., & Kim, W. (2021). Effect of epoxide content on the vulcanizate structure of silica-filled epoxidized natural rubber (Enr) compounds. *Polymers*, 13(11), 1862.
- Sahakaro, K. (2017). Mechanism of reinforcement using nanofillers in rubber nanocomposites. In S. Thomas & H. J. Maria (Eds.), *Progress in Rubber Nanocomposites* (pp. 81-113): Woodhead Publishing.

- Sarkawi, S., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. (2014). Elucidation of filler-to-filler and filler-to-rubber interactions in silica-reinforced natural rubber by TEM Network Visualization. *European polymer journal*, 54, 118-127.
- Sarkawi, S. S., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. (2015). Morphology of silica-reinforced natural rubber: The effect of silane coupling agent. *Rubber Chemistry and Technology*, 88(3), 359-372.
- Sattayanurak, S., Sahakaro, K., Kaewsakul, W., Dierkes, W. K., Reuvekamp, L. A., Blume, A., & Noordermeer, J. W. (2020). Synergistic effect by high specific surface area carbon black as secondary filler in silica reinforced natural rubber tire tread compounds. *Polymertesting*, 81, 106173.
- Sedov, I., Magsumov, T., Abdullin, A., Yarko, E., Mukhametzyanov, T., Klimovitsky, A., & Schick, C. (2018). Influence of the cross-link density on the rate of crystallization of poly (ϵ -Caprolactone). *Polymers*, 10(8), 902.
- Sengloyluan, K., Sahakaro, K., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. (2012). *Use of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in silica-filled natural rubber compounds*. Paper presented at the 28th International Conference of the Polymer Processing Society.
- Sengloyluan, K., Sahakaro, K., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. (2014). Silica-reinforced tire tread compounds compatibilized by using epoxidized natural rubber. *European polymer journal*, 51, 69-79.
- Wang, M.-J. (1999). The role of filler networking in dynamic properties of filled rubber. *Rubber chemistry and technology*, 72(2), 430-448.
- Wang, Y., Liao, L., Zhong, J., He, D., Xu, K., Yang, C., . . . Peng, Z. (2016). The behavior of natural rubber-epoxidized natural rubber-silica composites based on wet masterbatch technique. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(26).
- Wieczorek, M., & Jackowski, J. (2018). Car tyres with reduced energy consumption. *Journal of KONES*, 25(1), 447-456.
- Wolff, S., Wang, M.-J., & Tan, E.-H. (1993). Filler-elastomer interactions. Part VII. Study on bound rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 66(2), 163-177.
- Xu, T., Jia, Z., Luo, Y., Jia, D., & Peng, Z. (2015). Interfacial interaction between the epoxidized natural rubber and silica in natural rubber/silica composites. *Applied Surface Science*, 328, 306-313.