

STUDI SIFAT MEKANIK VULKANISAT KARET NITRIL PADA BERBAGAI SISTEM VULKANISASI DAN DOSIS SILIKA DIOKSIDA

Study of Vulcanized Nitrile Rubber Mechanical Properties on Various Vulcanization Systems and Silica Dioxide Levels

Andri SAPUTRA^{1*}, Mertza Fitra AGUSTIAN¹, Puji ATMOKO¹, dan Rizka Silvi SAFITRI¹

¹Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta. Jalan Ateka, Bangunharjo, Sewon, Bantul, 55187 Yogyakarta
Email: andri.saputra@atk.ac.id

Diterima: 1 Maret 2023 / Disetujui: 18 Juli 2023

Abstract

The level of silica dioxide and sulphur vulcanization system in various types of rubber gives different characteristics of the mechanical properties of the vulcanizate. This study aims to study the mechanical properties of nitrile rubber vulcanizate at various levels of silica dioxide and sulphur vulcanization the system was established by adjusting the ratio of sulfur to the accelerator. The chemicals were added in scale of per hundred rubber (phr). The manufacture of vulcanized nitrile rubber consists of mastication and compounding using a two-roll mill machine, and molding using a hot press molding machine. The mechanical properties of vulcanized nitrile rubber studied included hardness, tensile strength, elongation at break, tear strength, and abrasion index. The results showed that nitrile rubber vulcanizates using an efficient vulcanization the system had higher mechanical properties (tensile strength, elongation, tear strength, and abrasion index) than those using a semi-efficient vulcanization system. The addition of sulfur from 0.625 phr to 2.5 phr can reduce tensile strength (15.02 to 4.60 N/mm²), elongation at break (627.14 to 206.05%), tear strength (15.41 to 4.68 N/mm), and abrasion index (106.84 to 61.52%). The addition of silica level from 19.5 phr to 58.5 phr could improve hardness (63.50 to 72.92 Shore A), tensile strength (8.29 to 14.64 N/mm²), elongation at break (317.34 to 470.30%), tear strength (8.46 to 14.68 N/mm), and abrasion index (70.32 to 101.62%).

Keyword: nitrile rubber; silica dioxide; sulphur; vulcanizate; vulcanization system

Abstrak

Dosis silika dioksida dan sistem vulkanisasi sulfur pada berbagai jenis karet memberikan karakteristik sifat mekanik vulkanisat yang berbeda-beda. Studi ini bertujuan untuk mempelajari sifat mekanik vulkanisat karet nitril pada berbagai dosis silika dioksida dan sistem vulkanisasi sulfur yang ditetapkan dengan mengatur rasio sulfur dengan bahan pencepat. Semua bahan kimia yang ditambahkan dalam satuan satuan bagian seratus karet (bsk). Tahapan pembuatan vulkanisat karet nitril terdiri atas mastikasi dan komponding menggunakan mesin *two-roll mill*, dan pencetakan menggunakan mesin *hot press molding*. Sifat mekanis vulkanisat karet nitril yang diuji antara lain kekerasan, kuat tarik, kemuluran, kuat sobek, dan indeks abrasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa vulkanisat karet nitril yang menggunakan sistem vulkanisasi efisien memiliki sifat mekanik (kuat tarik, kemuluran, kuat sobek, dan indeks abrasi) yang lebih tinggi dibandingkan sistem vulkanisasi semi efisien. Penambahan dosis sulfur dari 0,625 bsk hingga 2,5 bsk dapat menurunkan kuat tarik (15,02 menjadi 4,60 N/mm²), kemuluran (627,14 menjadi 206,05%), kuat sobek (15,41 menjadi 4,68 N/mm), dan indeks abrasi (106,84 menjadi

61,52%). Penambahan dosis silika dari 19,5 bsk hingga 58,5 bsk meningkatkan kekerasan (63,50 hingga 72,92 Shore A), kuat tarik (8,29 hingga 14,64 N/mm²), kemuluran (317,34 hingga 470,30%), kuat sobek (8,46 hingga 14,68 N/mm), dan indeks abrasi (70,32 hingga 101,62%).

Kata kunci: karet nitril; silika dioksida; sistem vulkanisasi; sulfur; vulkanisat

PENDAHULUAN

Karet nitril atau akronitril butadiena (NBR) merupakan karet sintetis yang penggunaannya sangat luas. Umumnya karet nitril digunakan pada produk atau barang-jadi karet dengan ketahanan yang baik terhadap air, minyak, dan pelarut hidrokarbon, abrasi, serta permeabilitas gas yang rendah, seperti produk karet perapat (*seal*), gasket, selang bensin, karet bantalan, karet membran, dan sebagainya. Modifikasi sifat fisik dan mekanik sesuai spesifikasi produk dengan biaya produksi rendah menjadi keharusan dalam memproduksi barang-jadi (vulkanisat) karet nitril. Salah satu cara untuk mencapai hal tersebut adalah dengan penambahan bahan aditif ke dalam karet nitril, seperti bahan pengisi (*filler*) dan bahan pemvulkanisasi (*vulcanizing agent*) (Gheller et al., 2016). Besarnya jumlah atau dosis bahan aditif yang ditambahkan dalam karet dinyatakan dalam satuan bagian seratus karet (bsk) atau *per hundred rubber* (phr).

Bahan pengisi merupakan bahan aditif yang ditambahkan dalam jumlah besar pada pembuatan vulkanisat karet. Bahan pengisi diklasifikasikan menjadi bahan pengisi penguat (*reinforcing filler*) dan non penguat (*non-reinforcing filler*). Selain karbon (*carbon black*), bahan pengisi yang umumnya digunakan dalam industri karet adalah silika. Silika digunakan terutama untuk produk yang tidak berwarna hitam (*non black goods*). Silika tergolong ke dalam bahan pengisi penguat yang dapat meningkatkan sifat mekanik dan memperbaiki karakteristik pengolahan. Selain itu, penambahan bahan pengisi (seperti silika) dalam kompon karet juga dimaksudkan untuk menekan atau mengurangi biaya produksi karena

harganya lebih murah dibandingkan harga karet nitril sendiri. Penguatan silika dalam kompon karet ditentukan oleh kehalusan butir, jumlah, keadaan permukaan, dan ukuran. Penambahan optimum bahan pengisi akan meningkatkan kuat tarik, modulus, ketahanan sobek, dan ketahanan kikis (Daud, 2015).

Studi pengaruh variasi dosis bahan pengisi berbasis silika terhadap sifat mekanik vulkanisat karet telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Rahmaniari (2016) telah melakukan studi karakteristik karet perapat (*seal*) pada berbagai dosis bahan pengisi dari pasir kuarsa (50, 55, 60 bsk) dalam karet compo 4 (karet alam). Semakin besar dosis pasir kuarsa menyebabkan vulkanisat karet compo 4 memiliki kuat tarik yang semakin turun, namun kekerasan, kemuluran, dan pampatan tetap yang semakin meningkat. Studi karakterisasi sifat mekanik vulkanisat karet alam menggunakan berbagai dosis nanosilika dari sekam padi (10, 20, 30, 40, 50 bsk) menunjukkan bahwa kekerasan dan modulus tertinggi ketika menggunakan dosis nanosilika sebesar 30 bsk dan semakin tinggi dosis nanosilika sekam padi menyebabkan nilai pampatan tetap semakin rendah (Marllina dan Prasetya, 2019). Bach et al. (2020) melakukan penelitian menggunakan nanosilika untuk meningkatkan sifat mekanik dan stabilitas termal karet campuran karet alam dan karet stirena-butadiena (SBR). Rahmaniari et al., (2020) melakukan studi karakteristik karet bantalan sepeda motor pada berbagai dosis bahan pengisi dari pasir kuarsa (60, 65, 70, 75 bsk) dalam SIR 20 (karet alam). Semakin besar dosis pasir kuarsa menyebabkan vulkanisat SIR 20 memiliki kekerasan dan kemuluran yang meningkat secara linier. Kuat tarik vulkanisat SIR 20 juga meningkat seiring meningkatnya dosis pasir kuarsa dari 60 bsk hingga 75 bsk. Peningkatan kuat tarik vulkanisat SIR 20 yang signifikan ketika menggunakan pasir kuarsa dengan dosis dari 70 bsk hingga 75 bsk.

Di sisi lain, penambahan sejumlah tertentu *vulcanizing agent* pada kompon karet dapat mengubah sifat mekanik vulkanisat karet yang dihasilkan. Elastisitas vulkanisat dapat ditingkatkan dengan menambah ikatan silang hingga mencapai tingkat kerapatan tertentu (Daud, 2015).

Cara untuk menambahkan ikatan silang antar karet dilakukan dengan penambahan *vulcanizing agent*, seperti sulfur, hingga jumlahnya optimal. Karet nitril umumnya divulkanisasi (ikatan silang) oleh *vulcanizing agent* berupa sulfur. Besarnya sulfur yang ditambahkan ke dalam kompon karet akan memengaruhi jenis sistem vulkanisasi. Jenis sistem vulkanisasi tersebut antara lain konvensional, semi efisien, dan efisien. Sistem vulkanisasi tersebut dibedakan berdasarkan rasio bahan pencepat (*accelerator*) terhadap sulfur seperti terlihat pada Tabel 1 (Boonkerd et al., 2016). Pengaruh sistem vulkanisasi terhadap sifat mekanik vulkanisat alam seperti terlihat pada Tabel 2 (Boonkerd et al., 2016). Rasio sulfur terhadap *accelerator* akan menentukan jenis ikatan silang yang terbentuk antara sulfur dan elastomer karet nitril. Jenis ikatan silang tersebut antara lain monosulfida, disulfida, polisulfida, *pendant* sulfur, dan *intramolecul linkages*. Pada akhirnya jenis ikatan sulfur tersebut akan menyebabkan sifat mekanik yang bervariasi pada vulkanisat karet nitril.

Hendrawan dan Purboputro (2015) telah melakukan penelitian tentang karakteristik sifat mekanik ban luar yang dibuat dari berbagai variasi dosis sulfur (3; 3,5; 4 bsk) dan bahan pengisi karbon (50, 55,

60 bsk) menggunakan karet alam tingkatan mutu *ribbed smoked sheet* (RSS) dan karet sintetis tipe karet stirena-butadiena (SBR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis sulfur dan karbon berbanding linier terhadap nilai kekerasan dan kuat tarik, namun berbanding terbalik terhadap nilai ketahanan abrasi. Kekerasan vulkanisat karet alam juga sebanding dengan jumlah sulfur yang ditambahkan dalam kompon karet (Tamási dan Kollár, 2018).

Berdasarkan studi literatur sebelumnya, terlihat bahwa dosis sulfur dan silika pada berbagai jenis karet memberikan karakteristik sifat mekanik vulkanisat yang berbeda-beda. Sebagai tambahan, penelitian tentang pengaruh dosis sulfur dan silika terhadap sifat mekanik vulkanisat karet nitril belum pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan investigasi pengaruh sistem vulkanisasi (dosis sulfur) dan silika terhadap sifat mekanik vulkanisat karet nitril. Data yang dihasilkan dalam penelitian ini menjadi penting untuk digunakan sebagai literatur bagi industri karet dalam mengembangkan produk karet berbasis karet nitril dengan bahan pengisi silika dan sistem vulkanisasi sulfur, seperti produk perapat (*seal*), karet bantalan, karet membran, dan sol sepatu.

Tabel 1. Rasio *accelerator* dan sulfur pada berbagai sistem vulkanisasi
Table 1. Ratio of accelerator and sulphur in various vulcanization systems

No.	Sistem vulkanisasi <i>Vulcanization system</i>	Rasio <i>accelerator</i> terhadap sulfur <i>Accelerator to sulfur ratio</i> (A/S)
1	Konvensional	0,1-0,6
2	Semi efisien	0,7-2,5
3	Efisien	2,5-12,0

Tabel 2. Pengaruh sistem vulkanisasi pada sifat karet alam
Table 2. Effect of vulcanization system to natural rubber properties

No.	Sifat <i>Characteristic</i>	Konvensional <i>Conventional</i>	Semi efisien <i>Semi efficient</i>	Efisien <i>Efficient</i>
1	Ketahanan reversi	rendah	sedang	tinggi
2	Ketahanan penuaan	rendah	sedang	tinggi
3	Ketahanan <i>fatigue</i>	tinggi	sedang	rendah
4	Ketahanan sobek	tinggi	sedang	rendah
5	<i>Compression set</i> (%)	tinggi	sedang	rendah

BAHAN DAN METODE

Bahan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Workshop Karet dan Laboratorium Pengujian Fisis Politeknik ATK Yogyakarta. Bahan baku pembuatan vulkanisat karet yaitu karet, bahan pengisi dan bahan kimia karet lainnya. Karet nitril 6240 disuplai dari Hebei Bona Co., Ltdk. Bahan pengisi berupa silika dioksida Zeosil 175MP dari Solvay. Aktivator seperti zink oksida (ZnO) C041605 (HM Chemical Technology Co., Ltd) dan asam stearat DK-1838 (Henan Yeedok Industry Co., Ltd.). *Accelerator* berupa *Mercaptobenzothiazole disulfide* (MBTS) CAS 120-78-5 (QNS Industry Co., Ltd) dan *Tetramethylthiuram disulfide* (TMTD) S2431 (Selleckchem). Sedangkan bahan *vulanizing agent* adalah sulfur CAS No. 1326-66-7 (OEM)

Peralatan Penelitian

Secara garis besar peralatan yang digunakan dalam studi ini antara lain neraca analitik, mesin *two-roll mill* Y315H-6 LEADGO, moving die rheometer Gotech GT-M2000-AN, mesin *hot press molding* USMC CO KR, durometer hardness tester shore A Teclock GS-719G, termometer, universal testing machine ETM-D, din abrasion tester DECCA DC-5611, thickness gauge digital TF-TGD030, dan gunting.

Pembuatan Vulkanisat Karet Nitril

Bahan baku ditimbang sesuai dengan formulasi kompon yang tertera pada Tabel 3. Jumlah dari setiap bahan dalam formula dinyatakan dalam bagian seratus karet (bsk).

Karet nitril dimastikasi (pelemasan) selama 10-15 menit menggunakan mesin giling terbuka (*two-roll mill*) hingga karet lunak. Karet yang telah lunak ditambahkan silika dioksida sedikit demi sedikit. Lembaran karet yang ada di dinding mesin giling disobek dan digulung di beberapa sisi agar silika dioksida terdispersi dan terdistribusi lebih optimal pada lembaran karet. Karet ditambahkan zink oksida dan asam stearat sedikit demi sedikit sambil digiling hingga tercampur homogen. Lembaran karet yang ada pada dinding mesin giling disobek dan digulung kembali di beberapa sisi agar bahan terdispersi dan terdistribusi lebih optimal pada lembaran karet. Lembaran karet ditambahkan MBTS, sulfur, dan TMTD sedikit demi sedikit sambil lembar karet terus digiling, disobek, dan digulung kembali pada mesin giling hingga diperoleh kompon karet yang homogen. Selama proses komponding suhu dijaga tidak lebih dari 80°C untuk menghindari terjadinya pengusangan dini (*scorching*). Lalu, kompon karet didinginkan pada suhu ruang.

Kompon karet dilakukan uji rheologi menggunakan mesin rheometer untuk mengetahui waktu dan suhu pencetakan. Uji rheologi terhadap kompon karet dilakukan mengacu pada prosedur operasi standar yang ditetapkan oleh produsen Gotech untuk rheometer GT-M2000-AN. Kompon karet dicetak menggunakan plat tipis (tebal 2 mm) dan plat tebal (tebal 16 mm) dalam mesin cetakan tekan panas (*hot press molding*) menggunakan parameter waktu dan suhu seperti yang tertera pada Tabel 4. Plat tipis digunakan untuk menghasilkan vulkanisat karet nitril untuk spesimen uji kuat tarik, kuat sobek, dan kemuluran. Sedangkan plat tebal digunakan

Tabel 3. Formula kompon karet nitril
Table 3. Nitrile rubber compound formula

No	Bahan Material	Formula kompon (bsk) Compound formula (phr)				
		A	B	C	D	E
			Semi efisien <i>Semi efficient</i>			Efisien <i>Efficient</i>
1	Karet nitril 6240	100	100	100	100	100
2	Silika	58,5	39	19,5	39	39
3	ZnO.	5	5	5	5	5
4	Asam stearat.	1	1	1	1	1
5	(MBTS) .	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
6	TMTD	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
7	Sulfur	1,25	1,25	1,25	2,5	0,625

Tabel 4. Parameter pencetakan kompon karet
 Table 4. Molding parameters of rubber compound

No.	Kode kompon <i>Compound code</i>	Plat tebal <i>Thick plate</i>		Plat tipis <i>Thin plate</i>	
		Suhu (°C)	Waktu (menit)	Suhu (°C)	Waktu (menit)
		<i>Temperature (°C)</i>	<i>Time (minute)</i>	<i>Temperature (°C)</i>	<i>Time (minute)</i>
1	A	160	9	140	6
2	B	160	9	140	6
3	C	160	9	140	6
4	D	160	7	140	5
5	E	160	21	140	12

untuk menghasilkan vulkanisat karet nitril untuk spesimen uji kekerasan dan indeks abrasi.

Pengujian Sifat Mekanik Vulkanisat Karet Nitril

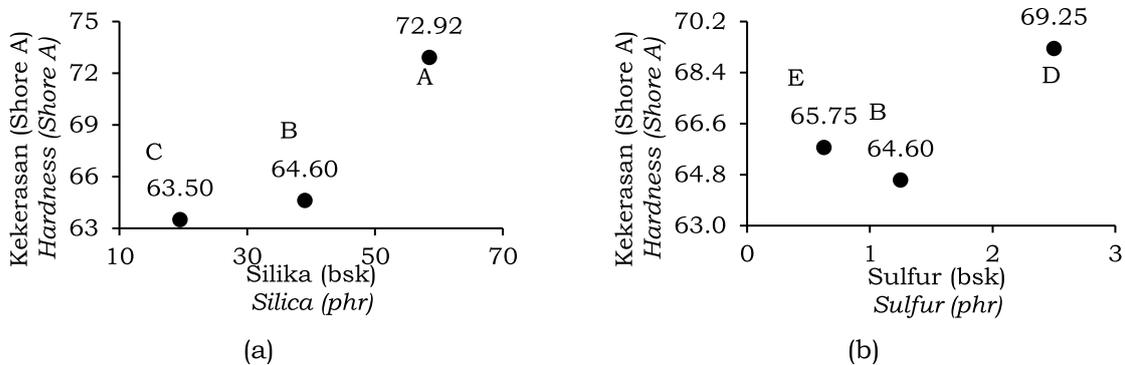
Uji kuat tarik dan kemuluran vulkanisat karet nitril menggunakan mesin *universal testing machine* (UTM) mengacu pada SNI 778:2017. Uji kuat sobek vulkanisat karet nitril menggunakan mesin *universal testing machine* (UTM) mengacu pada ISO 34-1-2015. Pengukuran indeks abrasi vulkanisat karet nitril menggunakan *din abrasion tester* mengacu pada ISO 4649-2010. Pengukuran kekerasan vulkanisat karet nitril menggunakan durometer shore A mengacu pada ASTM D2240. Data yang dihasilkan pada penelitian ini merupakan nilai rata-rata dari replikasi 3 kali percobaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Selain jenis karet, faktor lain yang memengaruhi kuat tarik vulkanisat atau produk karet adalah *filler* dan sistem pemvulkanisasi (sulfur). Jumlah *filler* dan sulfur pada setiap jenis karet tertentu akan berbeda-beda pengaruhnya terhadap sifat mekanik vulkanisat yang dihasilkan. Pengaruh dosis silika dan sulfur pada karet nitril terhadap sifat mekanik vulkanisat karet nitril secara detail dibahas pada sub-bab berikut.

Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengukur besarnya nilai kekerasan vulkanisat karet. Nilai kekerasan semakin besar menunjukkan bahwa karet semakin tidak elastis (Daud, 2015). Hasil penelitian yang disajikan dalam Gambar 1 membuktikan bahwa dosis silika dan sistem



Gambar 1. Pengaruh dosis silika dan sulfur terhadap kekerasan vulkanisat karet nitril
 Figure 1. Effect of level of silica and sulfur on the hardness of vulcanized nitrile rubber

vulkanisasi memengaruhi kekerasan vulkanisat karet nitril.

Gambar 1a memperlihatkan bahwa kekerasan vulkanisat karet nitril mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan dosis silika. Ketika dosis silika ditingkatkan dua kali lipat dari formula C (19,5 bsk) menjadi formula B (39 bsk) menyebabkan kekerasan vulkanisat karet nitril meningkat secara tidak signifikan. Namun, kekerasan vulkanisat karet nitril meningkat secara signifikan terjadi ketika dosis silika ditingkatkan lebih lanjut dari formula B (39 bsk) menjadi formula A (58,5 bsk). Penambahan *reinforcing filler*, seperti silika, dapat meningkatkan interaksi fisis (gaya Van der Waals) dan kimia pada partikel karet (silika -OH dengan molekul karet) sehingga akan menghasilkan produk karet dengan sifat mekanik optimal (Sreelekshmi et al., 2017). Gugus -OH dari silika akan bereaksi dengan gugus O, OH, maupun C yang terdapat pada karet, sehingga memungkinkan terjadinya interaksi yang baik dengan molekul karet, baik secara fisis maupun kimia, yang dapat meningkatkan kekerasan karet. Menurut Blow (2001) silika mempunyai sifat padat, sehingga makin banyak ditambahkan akan meningkatkan kekerasan. Hasil studi dalam penelitian ini mendukung beberapa hasil studi sebelumnya yang menjelaskan pengaruh dosis bahan pengisi berbasis silika terhadap sifat mekanis vulkanisat beberapa jenis karet lainnya, seperti pada karet alam SIR 20 (Rahmaniar et al., 2020; Prasetya dan Marlina, 2021) dan karet alam compo 4 (Rahmaniar, 2016). Jika melihat Gambar 1a kekerasan vulkanisat karet nitril kemungkinan masih bisa ditingkatkan dengan menambah bsk silika, namun hal ini perlu diteliti lebih lanjut.

Berbeda dengan pengaruh dosis silika, hasil penelitian yang disajikan dalam Gambar 1b memperlihatkan bahwa peningkatan dosis sulfur menyebabkan penurunan dan peningkatan kekerasan vulkanisat pada dosis tertentu. Ketika dosis sulfur ditingkatkan dari formula E (0,625 bsk) menjadi formula B (2,25 bsk) menyebabkan kekerasan vulkanisat karet nitril turun secara tidak signifikan. Ketika dosis sulfur ditingkatkan dua kali lipat dari formula B (1,25 bsk) menjadi formula D (2,5 bsk) menyebabkan kekerasan vulkanisat

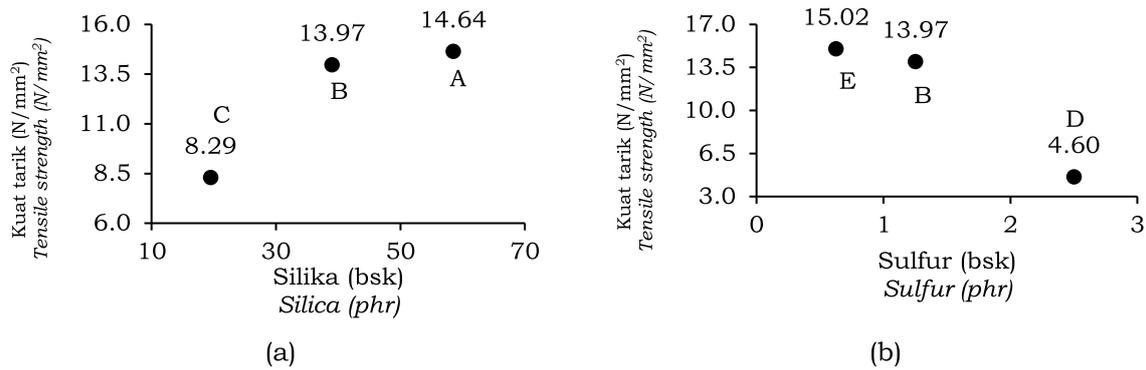
karet nitril meningkat secara signifikan. Namun, secara garis besar kekerasan vulkanisat karet nitril pada Gambar 1b mengalami kecenderungan peningkatan. Hasil studi ini mendukung hasil studi sebelumnya yang menjelaskan pengaruh dosis sulfur terhadap sifat mekanis vulkanisat beberapa jenis karet lainnya, seperti campuran karet alam RSS dan karet sintetis SBR (Hendrawan dan Purboputro, 2015) serta karet alam (Tamási dan Kollár, 2018). Hasil studi ini juga mendukung hasil studi sebelumnya yang menggunakan bahan pengisi karbon pada karet nitril (Alshabat dan Abouel-Kasem, 2021).

Peningkatan sulfur dalam vulkanisat karet menyebabkan intensitas terbentuknya ikatan silang antar karet juga meningkat. Hal ini menyebabkan kekerasan vulkanisat karet juga mengalami peningkatan. Jika melihat Gambar 1b kekerasan vulkanisat karet nitril kemungkinan masih bisa ditingkatkan dengan menambah dosis sulfur, namun hal ini perlu diteliti lebih lanjut karena jumlah sulfur yang berlebih dapat menyebabkan terbentuknya bercak (*bloom*) pada permukaan vulkanisat karet. Timbulnya *bloom* ini berupa bintik-bintik putih pada produk karet yang dapat menyebabkan cacatan produksi. Hal ini tentunya dihindari.

Penurunan kekerasan yang tidak signifikan pada titik B Gambar 1b bisa disebabkan oleh waktu pematangan kompon yang kurang tepat, seperti yang disampaikan oleh (Rahmaniar et al., 2021). Penyebab lain terjadinya penurunan di titik B Gambar 1b adalah kehilangan sejumlah tertentu bahan baku serbuk, seperti sulfur, ketika proses komponding menggunakan mesin *two-roll mill*. Mesin *two-roll mill* termasuk dalam mesin giling tipe terbuka, sehingga rentan terhadap kehilangan sejumlah tertentu bahan baku, baik karena melayang di udara maupun terjatuh di bawah rol ketika proses komponding berlangsung.

Kuat tarik

Kuat tarik menunjukkan besarnya gaya yang dapat ditahan karet sebelum karet tersebut putus (SNI 778:2017). Hasil penelitian yang disajikan dalam Gambar 2 membuktikan bahwa dosis silika dan sulfur



Gambar 2. Pengaruh dosis silika dan sulfur terhadap kuat tarik vulkanisat karet nitril
 Figure 2. Effect of level of silica and sulfur on the tensile strength of vulcanized nitrile rubber

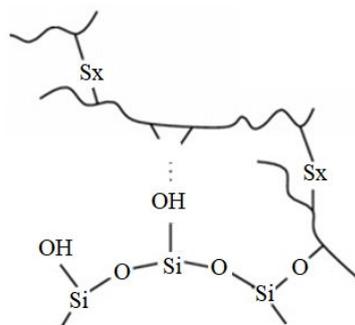
memengaruhi kuat tarik vulkanisat karet nitril.

Gambar 2a memperlihatkan bahwa kuat tarik vulkanisat karet nitril mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan dosis silika. Peningkatan kuat tarik vulkanisat karet nitril yang signifikan terjadi ketika dosis silika ditingkatkan dua kali lipat dari formula C (19,5 bsk) menjadi formula B (39 bsk). Namun, peningkatan dosis silika lebih lanjut dari formula B (39 bsk) menjadi formula A (58,5 bsk) menyebabkan kuat tarik vulkanisat karet nitril tidak meningkat secara signifikan.

Besarnya ikatan silang yang terbentuk dipengaruhi oleh interaksi antara *filler*-karet. Interaksi *filler*-karet lebih besar dari interaksi *filler*-*filler* menyebabkan *crosslink density* tinggi, sehingga meningkatkan sifat mekanik vulkanisat karet (Fröhlich et al., 2005; Qu et al., 2010; Herminiwati dan Yuniari, 2010). Penambahan *reinforcing filler*, seperti silika, dapat meningkatkan interaksi fisis (gaya Van

der Waals) dan kimia pada partikel karet (silika –OH dengan molekul karet) sehingga akan menghasilkan produk karet dengan sifat mekanik optimal (Sreelekshmi et al., 2017). Skema interaksi antara silika dan karet seperti terlihat pada Gambar 3. Gugus –OH dari silika akan bereaksi dengan gugus O, OH, maupun C yang terdapat pada karet. Peningkatan *crosslink density* karet mengarah pada penurunan mobilitas rantai karet, penurunan regangan, dan meningkatkan kuat tarik karet (Alshabatat dan Abouel-Kasem, 2021).

Silika yang ditambahkan pada jenis karet yang berbeda akan memberikan nilai kuat tarik yang berbeda. Hasil studi ini berbeda dengan yang dilakukan sebelumnya oleh Prasetya dan Marlina (2021). Karet alam SIR 20 yang menggunakan silika 40 bsk (optimal) memiliki kuat tarik tertinggi sekitar 12,5 N/mm². Namun, kuat tarik vulkanisat karet alam tersebut mengalami penurunan setelah ditambahkan silika di atas dosis optimal (40 bsk) (Prasetya dan Marlina, 2021).



Gambar 3. Skema interaksi silika dan karet (Pongdong et al., 2015)
 Figure 3. Schematic interaction of silica and rubber

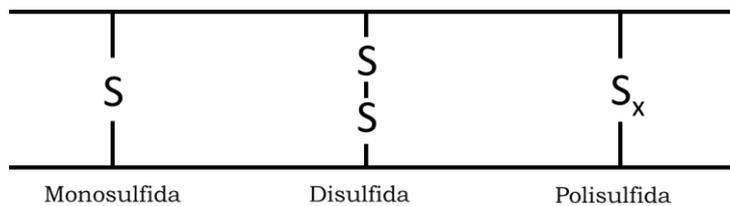
Di sisi lain, kuat tarik vulkanisat karet nitril mengalami penurunan seiring dengan peningkatan jumlah dosis sulfur seperti yang terlihat pada Gambar 2b. Ketika dosis sulfur ditingkatkan dari formula E (0,625 bsk) menjadi formula B (2,25 bsk) menyebabkan kuat tarik vulkanisat karet nitril turun secara tidak signifikan. Namun, penurunan kuat tarik vulkanisat karet nitril yang signifikan terjadi ketika dosis sulfur ditingkatkan dua kali lipat dari formula B (1,25 bsk) menjadi formula D (2,5 bsk).

Jika dilihat rasio *accelerator* (MBTS dan TMTD) terhadap sulfur, formula B dan D termasuk dalam jenis sistem vulkanisasi semi efisien, sedangkan E termasuk dalam jenis sistem vulkanisasi efisien (Tabel 3). Mengacu pada jenis ikatan silang yang terbentuk dalam Tabel 5, sistem vulkanisasi efisien memiliki ikatan silang monosulfida yang lebih banyak dibandingkan sistem vulkanisasi semi efisien dan konvensional. Hal ini menyebabkan rantai molekul karet yang berikatan silang oleh sulfur jumlahnya lebih banyak. Ikatan silang monosulfida yang lebih banyak menyebabkan vulkanisat karet nitril lebih elastis dan memiliki kuat tarik yang lebih tinggi. Ilustrasi ikatan silang monosulfida, disulfida, dan polisulfida antar rantai molekul karet seperti terlihat pada

Gambar 4. Hasil studi dalam Gambar 2b membuktikan bahwa kuat tarik titik E (efisien) lebih tinggi dibanding titik B dan D (semi efisien). Hal yang sama seperti disampaikan oleh (Fröhlich et al., 2005). Nilai kuat tarik juga dapat menjadi gambaran tidak langsung seberapa besarnya ikatan silang karet yang dapat terjadi. Umumnya karet dengan *crosslink density* yang tinggi akan menghasilkan kompon dengan kuat tarik yang tinggi juga karena partikel karet yang dapat membentuk ikatan silang tiga dimensi dengan bantuan sulfur dapat meningkatkan sifat kuat tarik karet (Fröhlich et al., 2005).

Kemuluran

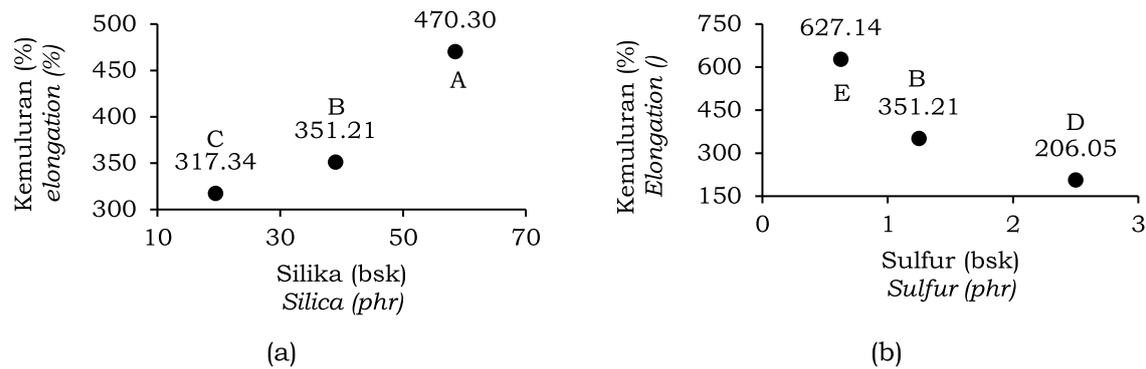
Kemuluran menggambarkan besarnya pertambahan panjang suatu material yang dapat dicapai sebelum material tersebut putus (SNI 778:2017). Hasil penelitian yang disajikan dalam Gambar 5 membuktikan bahwa bsk silika dan sulfur memengaruhi kemuluran vulkanisat karet nitril. Tren grafik perubahan kemuluran yang dihasilkan dari berbagai dosis silika dan sulfur adalah mirip seperti tren grafik perubahan kuat tarik yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya.



Gambar 4. Ilustrasi jenis ikatan silang sulfur pada karet
 Figure 4. *Illustration of sulphur crosslink type in rubber rubber*

Tabel 5. Jenis ikatan silang pada sistem vulkanisasi karet (Datta, 2002)
 Table 5. *Crosslink type in rubber vulcanization systems*

No.	Jenis ikatan silang <i>Cross link type</i>	Konvensional <i>Conventional</i>	Semi efisien <i>Semi efficient</i>	Efisien <i>Efficient</i>
1	Polisulfida dan disulfida	95%	50%	20%
2	Monosulfida	5%	50%	80%



Gambar 5. Pengaruh dosis silika dan sulfur terhadap kemuluran vulkanisat karet nitril
Figure 5. Effect of level of silica and sulfur on the elongation at break of vulcanized nitrile rubber

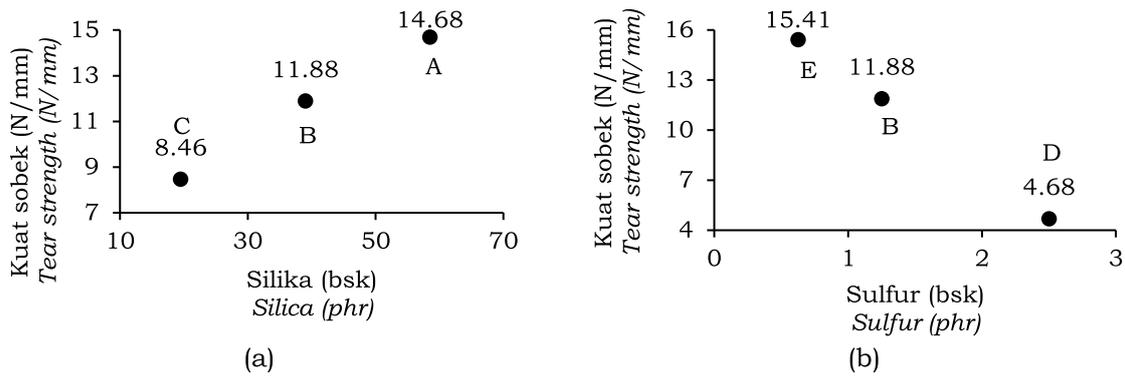
Gambar 5a memperlihatkan bahwa kemuluran vulkanisat karet nitril mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan dosis silika. Ketika dosis silika ditingkatkan dua kali lipat dari formula C (19,5 bsk) menjadi formula B (39 bsk) menyebabkan kemuluran vulkanisat karet nitril meningkat secara tidak signifikan. Namun, kemuluran vulkanisat karet nitril meningkat secara signifikan terjadi ketika dosis silika ditingkatkan lebih lanjut dari formula B (39 bsk) menjadi formula A (58,5 bsk).

Sama halnya dengan kuat tarik, meningkatnya bsk silika meningkatkan *crosslink density* yang disebabkan oleh interaksi filler-karet. Pada saat penambahan silika, terjadi interaksi silika-karet berupa ikatan fisika dan kimia. Ikatan fisika terjadi akibat daya absorpsi molekul karet terhadap silika yang didukung tenaga interaksi berupa gaya Van der Waals. Sedangkan ikatan kimia terjadi antara gugus fungsional permukaan silika -OH dengan molekul karet seperti terlihat pada Gambar 3 (Herminiwati dan Yuniari, 2010; Pongdong et al., 2015; Sreelekshmi et al., 2017). Oleh karena itu, dengan meningkatnya *crosslink density* menyebabkan sifat mekanik, seperti kemuluran, juga mengalami peningkatan. Meskipun pada jenis karet yang berbeda, silika memiliki pengaruh yang sama terhadap kemuluran vulkanisat karet alam. Studi yang dilakukan oleh Rattanasom et al. (2007) menyatakan bahwa kemuluran vulkanisat karet alam mengalami peningkatan seiring bertambahnya jumlah silika dari 20 bsk sampai 50 bsk.

Berbanding terbalik dengan pengaruh dosis silika, kemuluran vulkanisat karet nitril mengalami penurunan yang linier seiring dengan peningkatan jumlah dosis sulfur seperti yang terlihat pada Gambar 5b. Sama halnya seperti yang telah disampaikan pada sub-bab kuat tarik, penurunan kemuluran disebabkan oleh ikatan silang monosulfida pada titik E lebih banyak dibandingkan titik lainnya (B dan D). Ikatan monosulfida memiliki energi ikatan (284,7 kJ/mol) yang lebih tinggi dibandingkan ikatan disulfida (267,9 kJ/mol) dan polisulfida (<265 kJ/mol) (Tang, 2021). Energi ikatan yang relatif rendah membuat ikatan polisulfida mudah putus, sedangkan energi ikatan monosulfida yang lebih tinggi menyebabkan ikatan lebih susah putus. Ikatan silang monosulfida yang lebih banyak menyebabkan vulkanisat karet nitril lebih elastis dan memiliki kemuluran yang lebih tinggi. Temuan riset ini sama seperti disampaikan oleh Fröhlich et al. (2005).

Kuat Sobek

Ketahanan sobek merupakan besarnya gaya yang dibutuhkan untuk menyobek spesimen uji sampai putus (SNI 778:2017). Nilai ketahanan sobek semakin besar menunjukkan bahwa daya tahan terhadap sobekan karet semakin baik. Hasil penelitian yang disajikan dalam Gambar 6 membuktikan bahwa dosis silika dan sulfur memengaruhi kemuluran vulkanisat karet nitril. Tren grafik perubahan kuat sobek yang dihasilkan dari berbagai dosis silika dan sulfur adalah mirip seperti tren grafik perubahan kuat tarik dan kemuluran yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya.



Gambar 6. Pengaruh dosis silika dan sulfur terhadap kuat sobek vulkanisat karet nitril
 Figure 6. Effect of level of silica and sulfur on the tear strength of vulcanized nitrile rubber

Gambar 6a memperlihatkan bahwa kuat sobek vulkanisat karet nitril mengalami peningkatan yang linier seiring dengan peningkatan dosis silika. Silika termasuk dalam bahan pengisi bersifat penguat (*reinforcing filler*) dan akan memberikan kekuatan pada vulkanisat karet dan sifat mekanis yang lebih baik. *Reinforcing filler* dapat meningkatkan interaksi fisis (gaya Van der Walls) dan kimia pada partikel karet (silika -OH dengan molekul karet) sehingga akan menghasilkan produk karet dengan sifat mekanik optimal (Sreelekshmi et al., 2017). Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Vachlepi dan Suwardin (2015) serta Marlina dan Prasetya (2017) yang menyatakan bahwa kompon dengan dosis silika yang lebih tinggi memiliki ketahanan sobek yang lebih tinggi juga.

Di sisi lain, kuat sobek vulkanisat karet nitril mengalami penurunan seiring dengan peningkatan dosis sulfur seperti yang terlihat pada Gambar 6b. Menurut Nasruddin (2012) penambahan sejumlah ikatan silang mengakibatkan peningkatan energi pemutusan. Kuat sobek yang pada dasarnya berhubungan dengan energi pemutusan akan mengalami kenaikan hingga mencapai ikatan silang tertentu dan akhirnya akan turun kembali. Hal ini terlihat pada Gambar 5b bahwa energi pemutusan tertinggi ada pada titik E dan mengalami penurunan setelahnya. Faktor lain yang menyebabkan penurunan kuat sobek adalah jenis ikatan silang yang terbentuk. Sistem vulkanisasi efisien (titik E) memiliki ikatan silang monosulfida yang lebih banyak dibandingkan sistem

vulkanisasi semi efisien (titik B dan D). Sama halnya dengan kuat tarik dan kemuluran, ikatan silang monosulfida yang lebih banyak menyebabkan vulkanisat karet nitril lebih elastis dan memiliki kuat sobek yang lebih tinggi. Energi ikatan monosulfida yang lebih tinggi dibandingkan ikatan disulfide dan polisulfida menyebabkan ikatan lebih susah putus ketika disobek. Hal yang sama seperti disampaikan oleh Fröhlich et al. (2005).

Selain itu, fenomena kuat sobek yang semakin rendah seiring bertambahnya sulfur (Gambar 6b) bisa dijelaskan oleh kristalinitas vulkanisat karet. Perilaku kristalinitas biasanya dijelaskan menggunakan persamaan Avrami berikut (Qiye et al., 2010).

$$X_{c,t}^V = X_{c,\infty}^V (1 - e^{-kt^n}) \dots\dots\dots (1)$$

X merupakan derajat kristalinitas vulkanisat karet nitril, *k* menyatakan konstanta laju kristalisasi, *t* merupakan waktu kristalisasi, dan *n* merupakan indeks Avrami. Tidak ada penambahan agen (perantara) kristalisasi pada sistem (vulkanisat karet), sehingga bisa diasumsikan inti kristal karet nitril terbentuk secara homogen dan struktur kristal utama adalah kristal *oblique*. Nilai *n* adalah tetap sebesar 4 dalam sistem ini (Qiye et al., 2010). Dalam keadaan ini, hanya variabel *t* dan *k* yang menentukan derajat kristalinitas. Ketika *crosslink density* berada di luar kisaran tertentu, jarak antar kristal digantikan atau ditempati oleh ikatan silang ekstra dan nilai *k* akan menjadi lebih kecil. Waktu yang dibutuhkan oleh karet nitril

untuk mengkristal saat berada di bawah tekanan menjadi lebih lama, sehingga derajat kristalinitas berkurang dan akhirnya menurunkan kekuatan karet terhadap gaya tarik ketika disobek.

Indeks Abrasi

Pengujian indeks abrasi bertujuan untuk mengetahui ketahanan kikis dari vulkanisat karet yang digesekkan pada ampelas kikis. Vulkanisat dengan indeks abrasi tinggi berarti memiliki ketahanan abrasi yang tinggi juga. Sebaliknya jika indeks abrasi rendah maka produk yang dihasilkan akan mudah aus. Hasil penelitian yang disajikan dalam Gambar 7 memperlihatkan bahwa dosis silika dan sulfur memengaruhi indeks abrasi vulkanisat karet nitril.

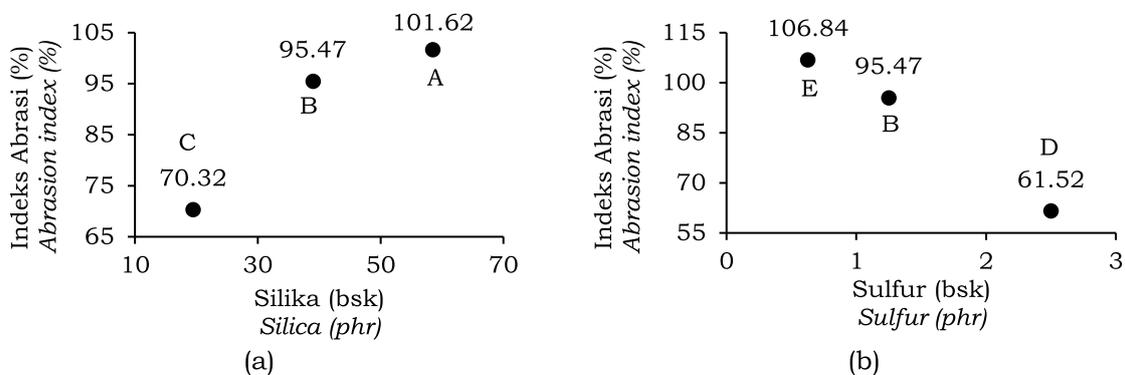
Indeks abrasi material memiliki korelasi terhadap nilai kekerasannya. Menurut Setiyana (2019) material yang memiliki kekerasan yang tinggi memiliki ketahanan abrasi yang tinggi juga. Gambar 1a memperlihatkan bahwa kekerasan vulkanisat karet nitril mengalami peningkatan seiring penambahan silika. Hasil yang sama juga diperoleh dalam Gambar 7a terkait pengaruh penambahan silika terhadap indeks abrasi vulkanisat karet nitril. Gambar 7a menampilkan bahwa indeks abrasi vulkanisat karet nitril mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan dosis silika.

Silika merupakan bahan pengisi penguat yang memungkinkan terjadinya interaksi yang baik dengan molekul karet

baik ikatan secara fisis (gaya Van der Waals) dan kimia pada partikel karet (silika –OH dengan molekul karet), sehingga hal ini meningkatkan *crosslink density* antara silika-karet (Herminiwati dan Yuniari, 2010; Pongdong et al., 2015) dan pada akhirnya menyebabkan sifat mekanik, seperti indeks abrasi, juga mengalami peningkatan (Sreelekshmi et al., 2017). Selain itu, silika mempunyai sifat padat (Blow, 2001), sehingga makin banyak ditambahkan akan meningkatkan kekerasan dan ketahanan abrasi.

Senyawa silika memiliki sifat ketahanan yang baik terhadap tekanan, suhu tinggi, dan abrasi. Keberadaan silika yang berikatan dengan karet akan meningkatkan ketahanan kikis karet tersebut. Ketahanan kikis karet akan meningkat seiring penambahan silika dalam jumlah optimum (Marliana dan Rahmaniari, 2012). Berbeda jenis karet, pengaruh silika terhadap ketahanan abrasi dalam studi ini berbanding terbalik dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan karet alam. Ketahanan abrasi vulkanisat karet alam mengalami penurunan seiring meningkatnya dosis silika dari 10 bsk sampai 50 bsk (Rattanasom et al., 2007). Karet alam dikenal memiliki elastisitas yang baik dan ketahanan abrasi yang rendah, sedangkan karet nitril memiliki ketahanan abrasi yang baik dan elastisitas yang lebih rendah dari karet alam (DLIKOREA, 2019).

Berbanding terbalik dengan pengaruh dosis silika, indeks abrasi vulkanisat karet nitril mengalami



Gambar 7. Pengaruh dosis silika dan sulfur terhadap indeks abrasi vulkanisat karet nitril
 Figure 7. Effect of level of silica and sulfur on the abrasion index of vulcanized nitrile rubber

penurunan seiring dengan peningkatan dosis sulfur seperti yang terlihat pada Gambar 7b. Studi yang dilakukan oleh Tang (2021) menyatakan bahwa volume relatif yang terabrasi mengalami peningkatan seiring meningkatnya jumlah sulfur dalam campuran karet alam dan karet stirena butadiena. Volume relatif yang terabrasi berbanding terbalik dengan indeks abrasi. Vulkanisat karet dengan volume relatif terabrasi yang tinggi memiliki indeks abrasi yang rendah (ISO 4649-2010). Meskipun menggunakan jenis karet yang berbeda dengan Tang (2021), karet nitril (karet nitril butadiena) dan karet stirena butadiena memiliki kemiripan yaitu tersusun atas karet butadiena. Oleh karena itu, diperkirakan memberikan pengaruh terhadap ketahanan abrasi yang mirip juga.

Fenomena indeks abrasi yang semakin rendah seiring bertambahnya sulfur (Gambar 6b) bisa dijelaskan oleh perilaku orientasi atau arah ikatan vulkanisat karet. Faktor orientasi (F) pada persamaan 2 menyatakan derajat orientasi ikatan karet (Qiye et al., 2010) dengan θ merupakan sudut antara jarak rantai karet dan jarak orientasi.

$$F = \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} \dots\dots\dots (2)$$

Umumnya orientasi atau arah rantai dalam karet bersifat acak. Meskipun demikian, rantai karet akan berorientasi ke arah yang sama dengan gaya tarik. Hal ini berarti θ akan mencapai atau bernilai 0 (F akan mencapai nilai 1). Ketika *crosslink density* terlalu pekat (banyak), jarak orientasi akan secara serius terganggu, nilai θ akan berubah dan F akan menjadi lebih kecil dari yang seharusnya. Oleh karena itu, kekuatan dan ketahanan abrasi vulkanisat karet akan menjadi lebih lemah (Tang, 2021).

KESIMPULAN

Vulkanisat karet nitril yang menggunakan sistem vulkanisasi efisien memiliki sifat mekanik (kuat tarik, kemuluran, kuat sobek, dan indeks abrasi) yang lebih tinggi dibandingkan sistem

vulkanisasi semi efisien. Penambahan dosis sulfur dari 0,625 bsk hingga 2,5 bsk dapat menurunkan kuat tarik (15,02 N/mm² menjadi 4,60 N/mm²), kemuluran (627,14% menjadi 206,05%), kuat sobek (15,41 N/mm menjadi 4,68 N/mm), dan indeks abrasi (106,84% menjadi 61,52%). Selain itu, penambahan dosis silika dari 19,5 bsk hingga 58,5 bsk meningkatkan kekerasan (63,50 Shore A hingga 72,92 Shore A), kuat tarik (8,29 N/mm² hingga 14,64 N/mm²), kemuluran (317,34% hingga 470,30%), kuat sobek (8,46 N/mm hingga 14,68 N/mm), dan indeks abrasi (70,32% hingga 101,62%).

DAFTAR PUSTAKA

Alshabatat, N., & Abouel-Kasem, A. (2021). The effects of sulfur content on the mechanical properties of nitrile butadiene rubber with different aging conditions. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 15(4), 387-393.

Bach, Q. V., Cuong, M. V., & Huong, T. V. (2020). Effects of Co-silanzed silica on the mechanical properties and thermal characteristics of natural rubber/styrene-butadiene rubber blend. *Silicon*, 12, 1799-1809.

Blow, C. M. (2001). *Rubber Technology and Manufacture* (Second edition ed.). London: Butterworth Scientifics.

Boonkerd, K., Deeprasertkul, C., & Boonsomwong, K. (2016). Effect of sulfur to accelerator ratio on crosslink structure, reversion, and strength in natural rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 89(3), 450-464.

Datta, R. N. (2002). *Rubber Curing Systems - Rapra review reports 144*. Shawbury: Rapra Technology Ltd.

Daud, D. (2015). Kaolin sebagai bahan pengisi pada pembuatan kompon karet: Pengaruh ukuran dan jumlah terhadap sifat mekanik-fisik. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 26(1), 41-48.

- DLIKOREA. (2019). *Material properties by rubber type*. Diakses dari <http://dlikorea.com/article/referen ce/1002/65/>
- Fröhlich, J., Niedermeier, W., & Luginsland, H. D. (2005). The effect of filler–filler and filler–elastomer interaction on rubber reinforcement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(4), 449-460.
- Gheller, J. O., Manoela, V. E., & Oliviera, V. (2016). Polymer–filler interactions in a tire compound reinforced with silica. *Journal of Elastomer & Plastics*, 48(3), 217-226.
- Hendrawan, M. A., & Purboputro, P. I. (2015). Studi karakteristik sifat mekanik kompon karet dengan variasi komposisi sulfur dan carbon black sebagai bahan dasar ban luar. *Simposium Nasional Teknologi Terapan (SNTT) 3*. Solo: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Herminiwati, & Yuniari, A. (2010). Penggunaan Precipitated Calcium Carbonate (PCC) sebagai filler untuk sol karet sepatu olahraga. *Majalah Kulit, Karet dan Plastik*, 26(1), 25-32.
- Marlina, P., & Prasetya, H. A. (2017). Pengaruh abu sekam padi dan *coupling agent* terhadap ketahanan usang vulkanisat bantalan dermaga. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 28(1), 67-75.
- Marlina, P., & Rahmaniar, R. (2012). Penggunaan bahan pengisi nanokomposit silika karbida pada pembuatan kompon ban dalam kendaraan bermotor roda dua. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 23(2), 91-98.
- Marllina, P., & Prasetya, H. A. (2019). Komposit karet alam dan nanosilika sekam padi terhadap sifat mekanik dan reologi vulkanisat karet. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 30(1), 30-37.
- Nasruddin. (2012). Pemanfaatan silika abu sekam padi sebagai bahan pengisi rubber membrane filter press untuk memisahkan minyak inti sawit. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 23(2), 107-115.
- Pongdong, W., Nakason, C., Kummerlöwe, C., & Vennemann, N. (2015). Influence of filler from a renewable resource and silane coupling agent on the properties of epoxidized natural rubber vulcanizates. *Journal of Chemistry*, 1-15. doi: 10.1155/2015/796459
- Prasetya, H. A., & Marlina, P. (2021). Pengaruh Si-69 terhadap karakteristik vulkanisat karet alam dengan bahan pengisi silika. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 32(2), 127-133.
- Qiye, W., Ping, Z., Wenjun, Y., & Runxiong, L. (2010). *Polymer Physics*. Beijing: High Educational Press.
- Qu, L., Huang, G., Zhang, P., Nie, Y., Weng, G., & Wu, J. (2010). Synergistic reinforcement of nanoclay and carbon black in natural rubber. *Polymer International*, 59(10), 1397-1402.
- Rahmaniar, Hermiyati, I., Hasan, A., Kusumah, S. S., & Nasruddin. (2020). Karakteristik pematangan dan sifat mekanik karet bantalan kaki sepeda motor dengan bahan pengisi pasir kuarsa. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 31(1), 51-58.
- Rahmaniar, Susanto, T., Marlina, P., & Parasetya, H. A. (2021). Kajian pemanfaatan arang cangkang kemiri sebagai pengganti carbon black pada pembuatan kompon karet. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 31(2), 120-126.

- Rahmaniar. (2016). Karakteristik karet perapat pada katup tabung LPG menggunakan bahan pengisi dari pasir kuarsa. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 27(2), 103-109.
- Rattanasom, N., Saowapark, T., & Deeprasertkul, C. (2007). Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. *Polymer testing*, 26(3), 369-377.
- Setiyana, B. (2019). Identifikasi sifat tribologi dari karet vulkanisir dengan menggunakan metode uji pin on disc. *Prosiding SNST ke-10*. Semarang: Universitas Wahid Hasyim.
- Sreelekshmi, R. V., Brahmakumar, M., Sudha, J. D., & Ravindranatha Menon, A. R. (2017). Studies on natural rubber containing kaolin modified with hexamethylenediamine derivative of phosphorylated cashew nut shell liquid prepolymer. *Applied Clay Science*, 141, 171-179.
- Tamási, K., & Kollár, M. S. (2018). Effect of different sulfur content in natural rubber mixture on their thermo-mechanical and surface properties. *International Journal of Engineering Research & Science*, 4(2), 28-37.
- Tang, R. (2021). *Effects of Sulfur Curing Systems on Mechanical Properties of NR/SBR Rubber Blends*. Cambridge: Cambridge Open Engage.
- Vachlepi, A., & Suwardin, D. (2015). Kajian pembuatan kompon karet alam dari bahan pengisi abu briket batubara dan arang cangkang sawit. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 26(1), 1-19.