

KARET ALAM HIDROGENASI SEBAGAI MATRIKS POLIMER ALTERNATIF PADA KOMPOSIT ELASTOMER BANTALAN JEMBATAN

Hydrogenated Natural Rubber as Alternative Polymer Matrix for Elastomeric Bridge Bearing Pads Composite

Santi PUSPITASARI^{1*}, Mochamad CHALID², Asron Ferdian FALAAH¹, dan
Adi CIFRIADI¹

¹ Unit Riset Bogor Getas, Pusat Penelitian Karet. Jalan Salak No 1 Bogor 16128 Jawa Barat

²Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Depok 16424 Jawa Barat

*Email : puspitasari.santi@puslitkaret.co.id

Diterima: 10 Februari 2023 / Disetujui: 23 Maret 2023

Abstract

Hydrogenated natural rubber (HNR) synthesized by catalytic transfer hydrogenation of natural rubber latex is highly potential to be used as an alternative polymer matrix for bridge bearing pads. The research aimed to study the possibility of HNR usage in the production of bridge bearing pads. HNR used in the research was synthesized at various concentrations of hydrazine hydrate (40 and 42.5 phr) and hydrogen peroxide (30 and 35 phr) at 40°C and 50°C. The experiment began with the preparation of rubber compound by using an open mill, followed, by the manufacture of vulcanizate in a hydraulic press machine. Property testing was referred to SNI 3967:2013. SIR 20 was used as a comparison. The test result showed that HNR prepared from 40 phr hydrazine hydrate and 35 phr hydrogen peroxide at 40°C was determined as the most promising alternative polymer matrix for bridge bearing pads since it has physical and mechanical properties in accordance with the requirement of SNI 3967:2013. Furthermore, the retention percentage was also higher compared to bridge-bearing pads from SIR 20.

Keywords: bridge bearing pads; hydrogenation; natural rubber; polymer matrix

Abstrak

Karet alam hidrogenasi yang terbuat melalui modifikasi kimiawi lateks karet alam

secara transfer hidrogenasi katalitik berpotensi digunakan sebagai matriks polimer alternatif pada karet bantalan jembatan. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji peluang pemanfaatan karet alam hidrogenasi pada pembuatan karet bantalan jembatan. Karet alam hidrogenasi yang digunakan pada penelitian ini disintesis pada variasi konsentrasi hidrasin hidrat (40 dan 42,5 bsk) terhadap hidrogen peroksida (30 dan 35 bsk) suhu 40°C dan 50°C. Eksperimen diawali dengan persiapan komponen karet menggunakan mesin giling terbuka dilanjutkan dengan pembuatan vulkanisat karet pada mesin cetak hidrolik. Vulkanisat karet dikarakterisasi sifat fisik dan mekanik mengikuti parameter yang tercantum dalam SNI 3967:2013. Karet SIR 20 digunakan sebagai pembanding. Hasil pengujian menunjukkan bahwa karet alam hidrogenasi yang diolah dari 40 bsk hidrasin hidrat dan 35 bsk hidrogen peroksida pada suhu 40°C ditetapkan sebagai matriks polimer alternatif yang paling menjanjikan untuk produk karet bantalan jembatan. Vulkanisat karet bantalan jembatan dari karet alam hidrogenasi tersebut memiliki sifat fisik dan mekanik yang sesuai dengan persyaratan SNI 3967:2013 dan persentase retensi yang lebih tinggi daripada vulkanisat karet bantalan jembatan dari SIR 20.

Kata kunci: hidrogenasi; karet alam; karet bantalan jembatan; matriks polimer

PENDAHULUAN

Karet alam hidrogenasi merupakan salah satu bentuk karet alam keperluan khusus (*specialty natural rubber*). Karet alam hidrogenasi dibuat melalui proses modifikasi kimiawi lateks karet alam secara hidrogenasi katalitik maupun non katalitik (Mahittikul et al., 2007; Mahittikul et al., 2009; Arayaprane dan Rempel, 2009). Pada reaksi hidrogenasi, bahan penghidrogenasi akan mengkonversi ikatan rangkap tak jenuh C=C menjadi ikatan jenuh C-C pada rantai molekul karet alam (poliisoprena). Dengan demikian, struktur rantai molekul karet alam hidrogenasi akan menyerupai struktur rantai molekul karet sintetik tipe *Ethylene Propylene Diene Monomer* (EPDM) (Inoue dan Nishio, 2007; Piya-areetham et al., 2013). Struktur rantai lurus dengan sedikit kandungan ikatan rangkap C=C memberikan keunikan pada karet alam hidrogenasi yang dicirikan dengan ketahanan karet tersebut terhadap proses oksidasi termal. Oleh karena itu, karet alam hidrogenasi berpotensi digunakan sebagai matriks polimer alternatif pada suatu sistem komposit untuk substitusi karet sintetik EPDM, kloroprena (CR), dan *isobutyl isoprene rubber* (IIR) (Piya-areetham et al., 2013). Ketiga karet sintetik tersebut umumnya digunakan sebagai matriks polimer pada produk karet untuk aplikasi luar ruangan yang sangat mungkin terpapar oleh oksigen dan panas dari sinar matahari sehingga mengalami proses oksidasi termal.

Salah satu produk hilir karet pada bidang teknik yang diaplikasikan di luar ruangan dan saat ini banyak diproduksi di dalam negeri adalah karet bantalan jembatan tipe berlapis (*steel laminated elastomeric bridge bearing pads*, EBB). EBB berfungsi untuk memfasilitasi pergerakan horizontal jembatan dan memindahkan beban dari bagian geladak ke pondasi jembatan. Selain itu EBB juga berperan mengisolasi getaran dari bagian pondasi menuju geladak jembatan sehingga dapat menjaga keutuhan pilar jembatan saat terjadi gempa bumi (Dolati et al., 2021). EBB tersusun atas lapisan komposit karet dan piringan logam secara berselang-seling

(Othman, 2001). Komposit karet penting sebagai penyerap energi/getaran dan menahan deformasi. Sementara lapisan piringan logam untuk memfasilitasi kelenturan lateral dari jembatan (Gu dan Itoh, 2012; Choun et al., 2014). Jenis karet yang paling banyak digunakan sebagai karet matriks pada komposit material karet EBB adalah karet alam dan kloroprena. Karet alam memberikan keunggulan sifat mekanik, sedangkan karet kloroprena dari segi ketahanan terhadap oksidasi termal. Proses oksidasi termal menjadi salah satu penyebab utama kerusakan fungsi EBB (Jun et al., 2017). Oleh karena itu penting digunakan polimer yang memiliki sifat mekanik unggul sekaligus didukung dengan ketahanan oksidasi yang baik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi penggunaan karet alam hidrogenasi yang telah dibuat melalui mekanisme reaksi transfer hidrogenasi katalitik pada skala semi pilot berkapasitas 2,5 Kg lateks pekat per *batch* sebagai matriks polimer pada komposit vulkanisat karet bantalan jembatan. Dari hasil kajian yang telah dilakukan diharapkan dapat diketahui kelayakan karet alam hidrogenasi sebagai matriks polimer alternatif untuk menggantikan karet alam dan/atau kloroprena pada matriks polimer EBB.

BAHAN DAN METODE

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas delapan jenis karet alam hidrogenasi (*hydrogenated natural rubber*, HNR) yang telah disintesis oleh Unit Riset Bogor Getas (URBG) dengan spesifikasi seperti tercantum dalam Tabel 1. Karet alam hidrogenasi dibuat melalui reaksi transfer hidrogenasi katalitik menggunakan senyawa diimida sebagai donor hidrogen pada fasa lateks karet alam pada skala semi pilot. Senyawa diimida dihasilkan dari reaksi antara hidrasin hidrat (40 dan 42,5 bagian seratus karet (bsk) dan hidrogen peroksida (30 dan 35 bsk) pada suhu 40°C dan 50°C selama 6 jam dengan katalis asam borat. Lateks hidrogenasi yang diperoleh diakhir

reaksi, digumpalkan dengan CaCl_2 kemudian digiling sehingga menjadi berbentuk lembaran. Lembaran karet hidrogenasi lalu dikeringkan sehingga diperoleh karet alam hidrogenasi yang siap digunakan dalam pembuatan kompon karet.

Kondisi reaksi hidrogenasi dan dosis bahan pereaksi yang ditetapkan dalam penelitian ini didasarkan pada penelitian sebelumnya yang telah dilaksanakan pada skala laboratorium.

Tabel 1. Spesifikasi karet alam hidrogenasi hasil sintesis URBG
 Table 1. Specification of hydrogenated natural rubber was synthesized by URBG

Suhu <i>Temperature</i> (°C)	Konsentrasi (bagian seratus karet) <i>Concentration (per hundred rubber)</i>		Derajat hidrogenasi <i>Hydrogenation degree</i> (%)
	Hidrazine hidrate	Hidrogen peroksida	
40	40,00	30,00	60,11
40	40,00	35,00	60,48
40	42,50	30,00	59,75
40	42,50	35,00	60,38
50	40,00	30,00	59,48
50	40,00	35,00	59,78
50	42,50	30,00	61,11
50	42,50	35,00	60,48

Sumber (Source) : Puspitasari dan Cifriadi (2017)

Karet alam mentah tingkatan mutu SIR 20 diperoleh dari Koperasi Karyawan INIRO Bogor, Jawa Barat. Lebih lanjut, dalam percobaan digunakan juga bahan kimia kompon karet yang terdiri atas ZnO dan asam stearat sebagai bahan pengaktif, *paraffin wax* sebagai bahan anti ozon, *polymeric antioxidant*, 6PPD (*N-(1,3-dimethylbutyl)-N-phenyl-p-phenylenediamine*), dan TMQ (*2,2,4-trimethyl 1-1,2-dihydroquinoline*) sebagai bahan anti oksidasi, *carbon black N220* sebagai bahan pengisi penguat, minyak parafinik sebagai bahan pelunak, CBS (*N-Cyclohexyl-2-benzothiazole Sulfenamide*), dan TMTD (*Tetra methyl thiuram disulphide*) sebagai bahan pencepat, serta sulfur sebagai bahan pemvulkanisasi. Seluruh bahan kimia kompon karet pada spesifikasi teknis dan diperoleh dari supplier lokal. Formulasi kompon karet dirancang seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Kompon karet yang dibuat dengan karet SIR 20 digunakan sebagai pembanding. Seluruh rangkaian

percobaan mulai dari pembuatan kompon hingga pengujian dilaksanakan di Unit Riset Bogor Getas, Kota Bogor, Jawa Barat.

Prosedur pembuatan kompon karet bantalan jembatan mengikuti tahapan yang diuraikan dalam ASTM 3182, sementara untuk tahapan persiapan contoh uji mengacu pada ASTM 3183. Pembuatan kompon karet bantalan jembatan menggunakan mesin giling terbuka (*open mill*) diawali dengan proses mastikasi karet hingga karet menjadi lunak dan plastis. Selanjutnya ke dalam karet yang telah lunak ditambahkan dengan bahan pengaktif, bahan antidegradasi, bahan pengisi, bahan pelunak, bahan pencepat, dan terakhir bahan pemvulkanisasi. Setelah seluruh bahan kimia kompon karet ditambahkan ke dalam matriks karet, kompon karet terus digiling hingga diperoleh kompon karet yang homogen. Kompon karet didiamkan selama sekitar 24 jam sebelum dilakukan pengujian.

Tabel 2. Desain formulasi kompon karet untuk bantalan jembatan
 Table 2. Design of rubber compound formulation for elastomeric bridge bearing pads

Bahan <i>Materials</i>	Komposisi (bagian seratus karet, bsk) <i>Composition (per hundred rubber, phr)</i>	
Karet alam, SIR 20	100,0	
Karet alam modifikasi, HNR		100,0
ZnO	5,0	5,0
Asam stearat	2,0	2,0
<i>Paraffin wax</i>	2,0	2,0
<i>Polymeric antioxidant</i>	10,8	10,8
6PPD	3,0	3,0
TMQ	1,5	1,5
<i>Carbon black N220</i>	45,0	45,0
Minyak parafinik	13,0	13,0
CBS	0,5	0,5
TMTD	2,5	2,5
Sulfur	0,4	0,4

Kompon karet dicuplik sebanyak 5 gram untuk uji karakteristik vulkanisasi pada suhu 150°C selama 30 menit menggunakan instrument *Moving Die Rheometer* (MDR) Alpha 2000 dari Alpha Technologies. Sisa kompon kemudian dicetak menjadi pelat vulkanisat dan akan digunakan sebagai spesimen pengujian sifat fisika dan mekanik yang meliputi parameter seperti dipersyaratkan dalam SNI 3967:2013. Parameter tersebut sebagai berikut kekerasan (ASTM D 2240-05) menggunakan Frank Durometer, kuat tarik dan perpanjangan putus (ASTM D 412) menggunakan instrument UTM Llyod, pampatan tetap (ASTM D 395-03) pada

penekanan 25% suhu 70°C selama 22 jam, dan ketahanan ozon (ASTM D 1149-07) pada paparan konsentrasi ozon 25 pphm dan regangan 20% selama 48 jam pada suhu ± 37,7°C. Pola retakan pada permukaan vulkanisat karet diamati menggunakan mikroskop stereo pada perbesaran 100 kali. Untuk pengujian kekerasan, kuat tarik, dan perpanjangan putus dilakukan pada kondisi sebelum dan setelah pengusangan pada suhu 70°C selama 168 jam. Perbedaan hasil pengujian sebelum dan setelah pengusangan menunjukkan retensi yang dihitung berdasarkan rumus yang dikembangkan oleh Noriman dan Ismail (2012) berikut :

$$\text{Retensi (\%)} = \frac{\text{Nilai setelah pengusangan}}{\text{Nilai sebelum pengusangan}} \times 100\% \quad (1)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Vulkanisasi

Karakteristik vulkanisasi memberikan gambaran terjadinya reaksi vulkanisasi antar rantai molekul karet (poliisoprena) yang dijematani oleh sulfur. Seperti pada reaksi kimia umumnya, reaksi vulkanisasi karet oleh sulfur dipengaruhi oleh struktur molekul karet (kandungan ikatan rangkap C=C) pada rantai molekul karet, rasio antara bahan pemvulkanisasi, dan bahan pencepat, serta waktu dan suhu reaksi. Pada riset ini dipilih menggunakan sistem vulkanisasi efisien dengan rasio bahan pencepat (CBS dan TMTD) terhadap

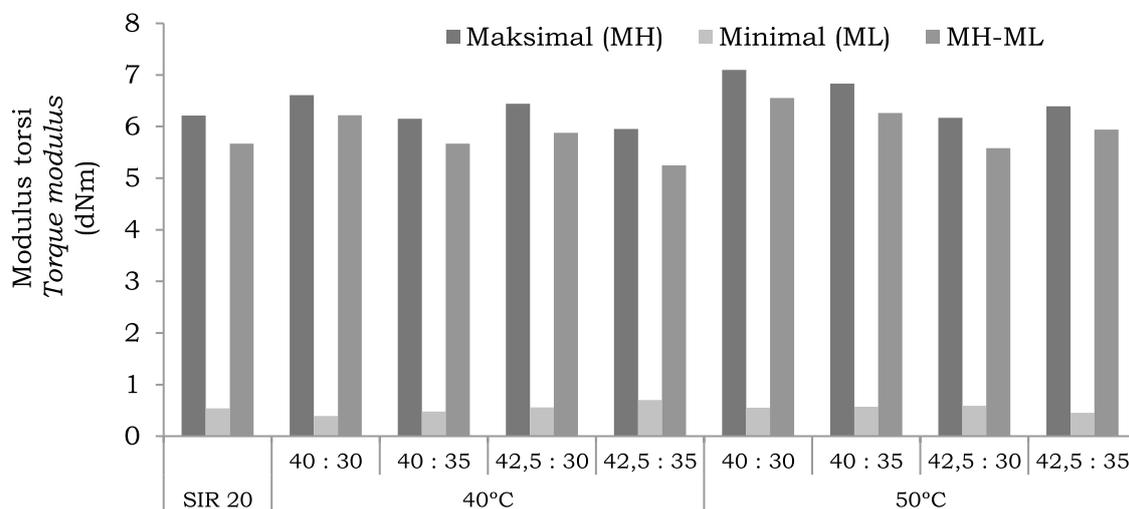
bahan pemvulkanisasi (Sulfur) sebesar 7,5 dengan tujuan diperoleh vulkanisat karet yang memiliki ketahanan terhadap oksidasi termal yang baik (Larpkasemsuk et al., 2019). Rasio bahan pencepat/bahan pemvulkanisasi dan suhu ditetapkan sama untuk seluruh kondisi percobaan, sehingga reaksi vulkanisasi hanya dipengaruhi oleh konsentrasi ikatan rangkap C=C pada rantai molekul karet alam hidrogenasi yang diindikasikan oleh besarnya nilai derajat hidrogenasi. Reaksi vulkanisasi menyebabkan putusnya ikatan rangkap C=C pada rantai molekul karet yang diikuti dengan terbentuknya ikatan monosulfida, disulfida, dan polisulfida. Pada sistem vulkanisasi efisien, ikatan monosulfida yang

tahan terhadap oksidasi termal lebih dominan daripada ikatan disulfida maupun polisulfida (Gonzalez et al., 2005; Pimolsiriphol et al., 2007).

Modulus torsi yang dihasilkan dari pengujian karakteristik vulkanisasi merupakan fungsi dari waktu vulkanisasi. Terdapat tiga nilai modulus torsi yaitu torsi maksimal (MH) yang berkorelasi dengan kekakuan dan modulus geser vulkanisat karet, torsi minimal (ML) yang berkaitan dengan kemampuan pemrosesan kompon karet, dan selisih torsi (MH-ML) yang berkaitan dengan nilai derajat ikatan silang pada vulkanisat karet (Formela et al., 2015). Ketiga kategori nilai modulus torsi hasil pengujian karakteristik vulkanisasi kompon karet bantalan jembatan ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1 dapat diketahui bahwa karet SIR 20 menghasilkan nilai modulus torsi yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan karet alam hidrogenasi meskipun karet SIR 20 memiliki kandungan C=C yang lebih banyak. Modulus torsi yang tinggi pada kompon karet yang dibuat dari karet alam hidrogenasi diperkirakan akibat dari terbentuknya ikatan silang yang dipicu oleh

terjadinya reaksi vulkanisasi peroksida. Dengan demikian pada kompon karet alam hidrogenasi terjadi reaksi vulkanisasi kombinasi antara sulfur dan peroksida.

Peroksida sebagai bahan pembentuk ikatan silang pada reaksi vulkanisasi peroksida tersebut diduga berasal dari sisa hidrogen peroksida yang tidak bereaksi dan tidak dipisahkan dari karet alam hidrogenasi. Selain vulkanisasi sulfur, vulkanisasi peroksida cukup umum dijumpai pada reaksi vulkanisasi karet. Vulkanisasi peroksida yang berlangsung dengan mekanisme radikal bebas dan terjadi pada ikatan rangkap C=C maupun ikatan tunggal C-C dapat menghasilkan ikatan C-C yang kaku sehingga menyebabkan nilai modulus torsi yang tinggi saat pengujian karakteristik vulkanisasi (Zhao et al., 2001; Kruzalak et al., 2015; Thitithammawong et al., 2012). Soebianto dan Sundardi (1989) dalam Saputra (2021) telah mempelajari vulkanisasi lateks karet alam menggunakan hidrogen peroksida secara radiasi. Hasil penelitian tersebut menemukan bahwa keberadaan hidrogen peroksida dapat menurunkan dosis radiasi sinar gama menjadi sebesar 10 kGy. Seperti pada nilai



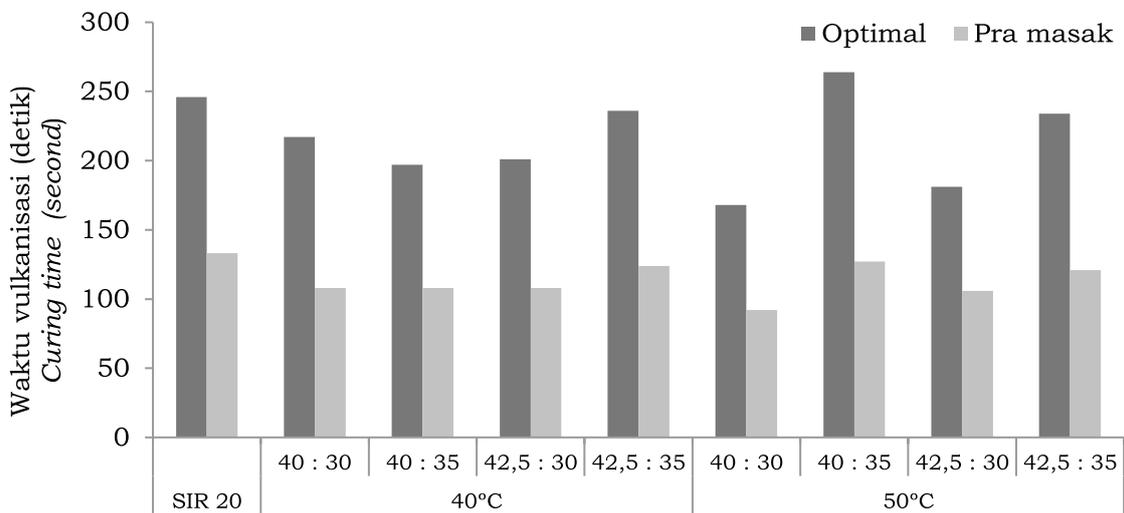
Gambar 1. Modulus torsi kompon karet bantalan jembatan
 Figure 1. Torque modulus of elastomeric bridge bearing pads compound

modulus torsi, derajat ikatan silang yang dicerminkan dari nilai MH-ML yang tinggi pada kompon karet bantalan yang diolah dari karet alam hidrogenasi juga terbentuk akibat reaksi vulkanisasi sulfur/peroksida.

Waktu pra masak (*scorch time*) mengindikasikan waktu yang diperlukan oleh kompon karet masih dapat diproses pada suhu tertentu sebelum terjadinya vulkanisasi. Pada percobaan ini, waktu pra masak (*ts2*) ditetapkan pada waktu yang ditunjukkan oleh dua unit modulus torsi di atas torsi minimal (ML). Sementara waktu vulkanisasi optimal (*tc90*) adalah waktu yang diperlukan oleh kompon karet mencapai 90% vulkanisasi. *tc90* sangat bergantung pada jenis kompon karet dan ketebalan dari produk (Ngamsurat et al., 2011). Hasil pengukuran *ts2* dan *tc90* kompon karet bantalan jembatan dari SIR 20 dan karet alam hidrogenasi disajikan pada Gambar 2. Dari Gambar 2 terlihat bahwa mekanisme reaksi vulkanisasi sulfur/peroksida turut berpengaruh terhadap waktu reaksi vulkanisasi karet alam hidrogenasi yang cenderung lebih singkat daripada karet SIR 20. Radikal bebas yang berasal dari dekomposisi peroksida sangat mudah bereaksi dengan ikatan

rangkap C=C dari rantai molekul karet membentuk ikatan silang antar molekul karet tersebut. Selain itu, jumlah ikatan rangkap C=C pada rantai molekul karet alam hidrogenasi yang lebih sedikit daripada karet SIR 20 karena sebagian telah bereaksi dengan senyawa diimida turut berpengaruh terhadap waktu reaksi vulkanisasi.

Lebih lanjut, formula kompon pada riset ini dirancang menggunakan bahan pencepat yang merupakan campuran antara tipe thiuram (TMTD) dan sulfeamida (CBS). Kombinasi bahan pencepat TMTD/CBS banyak digunakan pada sistem vulkanisasi efisien pada polimer karet alam dan karet sintetik (salah satunya tipe EPDM) karena antara polimer dengan bahan pencepat memiliki kompatibilitas yang baik. Kompatibilitas antar polimer dan bahan pencepat berpengaruh signifikan terhadap meningkatnya laju reaksi vulkanisasi (Poschl et al., 2022). Karet EPDM memiliki kemiripan struktur dengan karet alam hidrogenasi. Dengan demikian, dianggap karet alam hidrogenasi juga memiliki kompatibilitas yang baik dengan TMTD/CBS sehingga laju reaksi vulkanisasinya menjadi cepat dan waktu vulkanisasi menjadi lebih singkat.

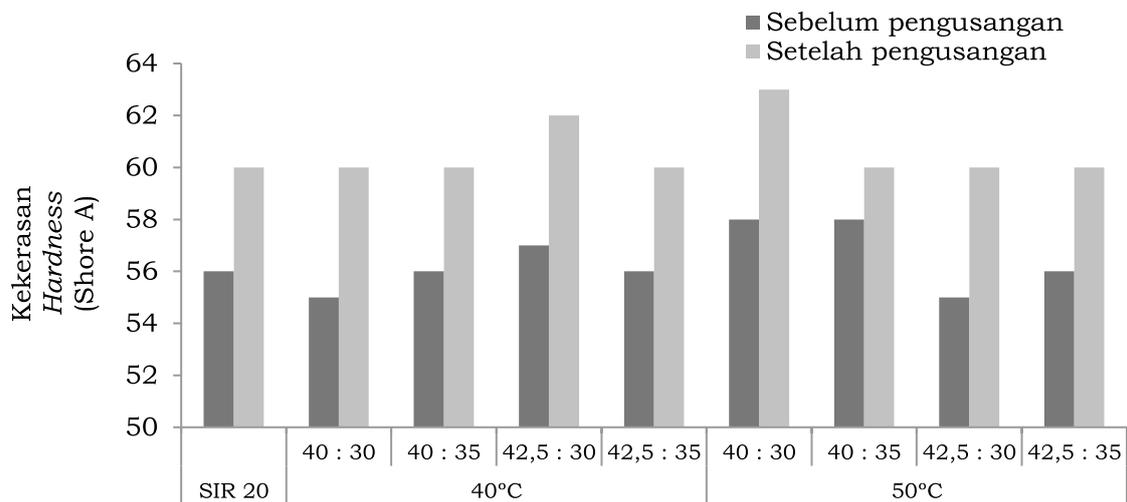


Gambar 2. Waktu vulkanisasi kompon karet bantalan jembatan
 Figure 2. Curing time of elastomeric bridge bearing pads compound

Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan vulkanisat karet bantalan jembatan pada kondisi sebelum dan setelah pengusangan diperlihatkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3 dapat diketahui bahwa kekerasan vulkanisat karet bantalan jembatan sebelum kondisi pengusangan berada pada rentang 55–58 Shore A, dan meningkat menjadi 60–63 Shore A pada kondisi setelah pengusangan. Kondisi pengusangan yang menyebabkan vulkanisat karet terpapar oleh oksigen berakibat pada naiknya kekerasan vulkanisat karet. Oksigen menyerang permukaan vulkanisat karet, kemudian secara bertahap menembus ke bagian dalam vulkanisat karet tersebut dan bereaksi dengan C=C pada rantai molekul karet (poliisoprena) (Hamaguchi et al.,

2009). Selain itu, pada kondisi pengusangan yang dijalankan pada suhu 70°C diperkirakan terjadi reaksi vulkanisasi lanjut yang berakibat bertambahnya jumlah ikatan silang antar molekul karet. Peningkatan jumlah ikatan jenuh C-C mengakibatkan berkurangnya fleksibilitas (semakin kaku) pergerakan rantai molekul karet sehingga meningkatkan kekerasan dan berkurangnya perpanjangan putus (Araypranee dan Rempel, 2009). Secara umum, karet alam hidrogenasi menghasilkan kekerasan vulkanisat karet bantalan jembatan yang lebih tinggi daripada karet SIR 20. Susunan struktur rantai molekul karet alam hidrogenasi yang lebih rapat sebagai akibat dari terbentuknya ikatan silang hasil dari reaksi vulkanisasi sulfur/peroksida.



Gambar 3. Kekerasan vulkanisat karet bantalan jembatan
 Figure 3. Hardness of elastomeric bridge bearing pad vulcanizate

Kuat Tarik dan Perpanjangan Putus

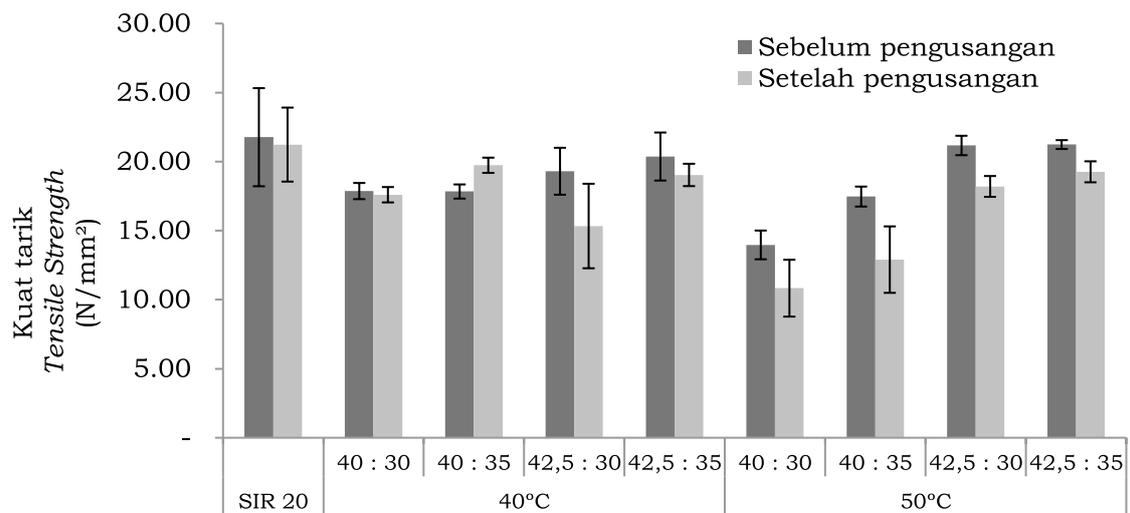
Gambar 4 dan 5 secara berurutan menyajikan data hasil pengujian kuat tarik dan perpanjangan putus vulkanisat karet bantalan jembatan pada kondisi sebelum dan setelah pengusangan. Vulkanisat karet bantalan jembatan dari karet SIR 20 memiliki kuat tarik tertinggi daripada vulkanisat dari karet alam hidrogenasi. Pada saat diregangkan, rantai molekul karet SIR 20 akan mengalami kristalisasi yang dikenal dengan “*strain induced*

crystallization”. Kristalisasi rantai molekul karet SIR 20 tersebut menyebabkan rantai molekul karet SIR 20 tidak mudah terputus saat ditarik atau diregangkan sehingga menghasilkan kuat tarik yang tinggi. Fenomena *strain induced crystallization* pada karet SIR 20 ini tidak ditemukan pada karet alam hidrogenasi. Dengan demikian nilai kuat tarik vulkanisat karet bantalan jembatan yang dibuat dari karet alam hidrogenasi menjadi lebih rendah (Araypranee dan Rempel, 2009; Ikeda et al., 2008).

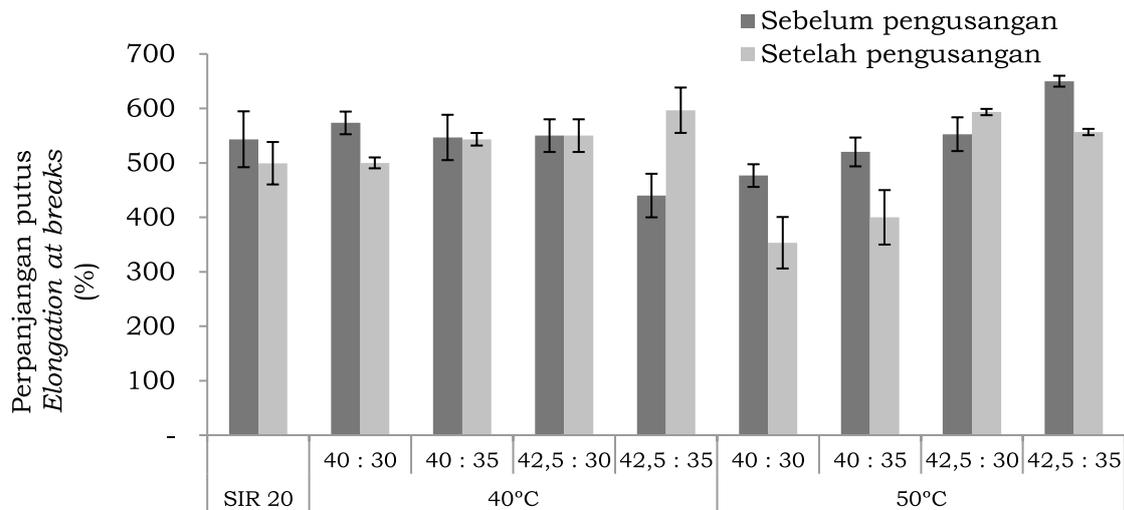
Pada kondisi setelah pengusangan seperti terlihat pada Gambar 4, nilai kuat tarik vulkanisat karet bantalan jembatan mengalami penurunan kecuali vulkanisat karet yang terbuat dari karet alam hidrogenasi 40 bsk hidrasin hidrat/35 bsk hidrogen peroksida. Penurunan kuat tarik disebabkan karena vulkanisat karet yang terpapar oleh oksigen dan panas (*thermal oxidative aging*) menjadi bersifat semakin keras namun rapuh (*brittle*) (Sanchez et al., 2021). Pengaruh pengusangan pada sifat vulkanisat karet ditentukan oleh dua mekanisme, yaitu pembentukan ikatan silang karena reaksi vulkanisasi lanjut dan pemutusan ikatan silang akibat diserang oleh oksigen. Pemutusan ikatan silang inilah yang mengindikasikan terjadinya degradasi termal pada vulkanisat karet (Yahya et al., 2011). Peluang terjadinya pemutusan ikatan silang pada karet alam terhidrogenasi semakin besar karena dalam karet alam hidrogenasi mengandung sisa hidrogen

peroksida yang dapat menghasilkan radikal hidroksil. Radikal hidroksil ini bersifat oksidator kuat.

Seperti pada sifat kuat tarik, kecenderungan yang sama juga terlihat pada sifat perpanjangan putus vulkanisat karet bantalan jembatan. Perpanjangan putus vulkanisat karet bantalan jembatan dari karet alam hidrogenasi relatif lebih rendah dibandingkan dengan vulkanisat karet bantalan jembatan dari karet SIR 20. Ikatan silang kompleks yang terdapat pada struktur vulkanisat karet bantalan jembatan yang terbuat dari karet alam hidrogenasi yang dihasilkan dari vulkanisasi sulfur/peroksida yaitu -Sx- dan C-C menjadi salah satu faktor penyebab rendahnya perpanjangan putus vulkanisat karet alam terhidrogenasi selain tidak terjadinya *strain induced crystallization* (Kruzalak et al., 2020).



Gambar 4. Kuat tarik vulkanisat karet bantalan jembatan
 Figure 4. Tensile strength of elastomeric bridge bearing pad vulcanizate

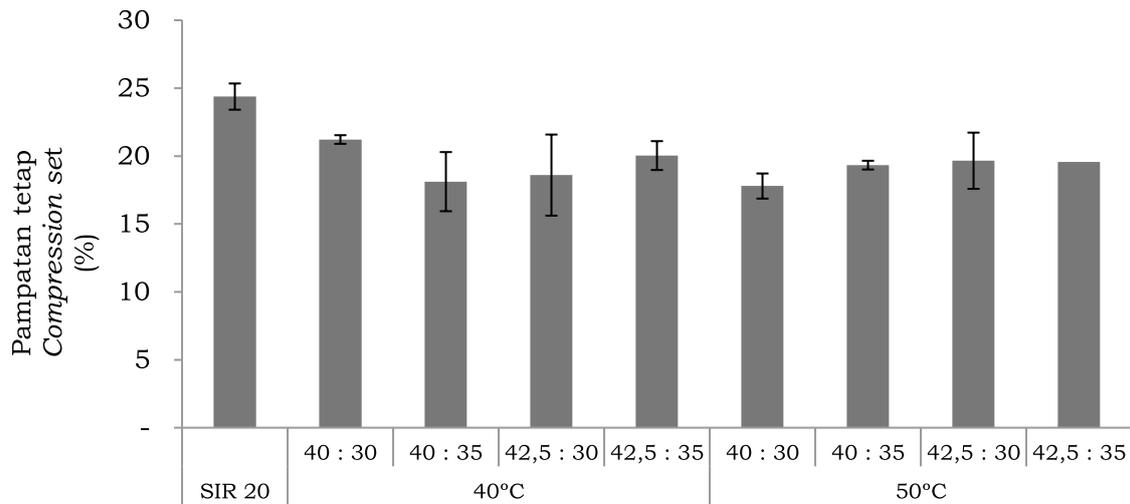


Gambar 5. Perpanjangan putus vulkanisat karet bantalan jembatan
 Figure 5. Elongations at breaks of elastomeric bridge bearing pad vulcanizate

Pampatan Tetap

Pampatan tetap menjadi salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja produk karet bantalan jembatan. Mengacu pada definisi pampatan tetap seperti yang diutarakan oleh Rajan et al. (2012) yaitu kemampuan vulkanisat karet kembali ke bentuk atau dimensi semula setelah terkena beban atau penekanan pada suhu dan defleksi tertentu. Maka, melalui pengujian pampatan tetap dapat diketahui kemampuan produk karet bantalan jembatan dalam memulihkan dimensinya setelah menerima beban statis dari yang berasal dari struktur bagian atas jembatan. Pada Gambar 6 tampak bahwa vulkanisat karet bantalan jembatan dari karet alam

hidrogenasi menghasilkan nilai pampatan tetap yang lebih rendah daripada karet SIR 20. Data tersebut berarti bahwa vulkanisat karet alam hidrogenasi yang bersifat lebih kaku memiliki kemampuan lebih baik dalam menahan beban statis atau kompresi (Jovanovic et al., 2019; Sanchez et al., 2021). Zhao et al (2001) menyatakan bahwa pada pengujian pampatan tetap vulkanisat karet maka stress relaksasi fisik dan kimiawi terjadi secara simultan. Pada suhu ruang, relaksasi fisik mendominasi daripada relaksasi kimiawi. Pada struktur yang kaku seperti karet alam hidrogenasi, relaksasi fisik berjalan lambat sehingga kemampuan menahan penekatan menjadi lebih besar akibatnya menghasilkan nilai pampatan tetap yang rendah.



Gambar 6. Pampatan tetap vulkanisat karet bantalan jembatan
 Figure 6. Compression set of elastomeric bridge bearing pad vulcanizate

Ketahanan Ozon

Pengujian ketahanan ozon dianalisis secara kualitatif dengan memeriksa timbulnya retakan pada permukaan vulkanisat karet. Pola retakan pada permukaan vulkanisat karet bantalan jembatan disajikan pada Gambar 7. Ozon yang menyerang permukaan vulkanisat karet akan membentuk senyawa ozonida dan pada akhirnya menyebabkan terjadinya kerapuhan dan timbulnya retak makroskopik pada permukaan vulkanisat karet tersebut (Hinchiranan et al., 2009). Sebagaimana terlihat pada Gambar 7, pola dan intensitas retakan pada permukaan vulkanisat karet bantalan jembatan dari

karet SIR 20 berbeda dengan karet alam hidrogenasi. Keretakan akibat ozonolisis lebih sedikit timbul pada permukaan vulkanisat karet dari karet alam hidrogenasi. Hidrogenasi dan vulkanisasi sulfur/peroksida menyebabkan berkurangnya ikatan rangkap C=C pada rantai molekul karet (poliisoprena). Kedua mekanisme reaksi yang mereduksi C=C tersebut berperan penting dalam meningkatkan ketahanan ozon vulkanisat karet bantalan jembatan yang terbuat dari karet alam hidrogenasi. Fenomena tersebut juga dikonfirmasi oleh hasil penelitian yang dilakukan oleh Arayapraneer dan Rempel (2009).

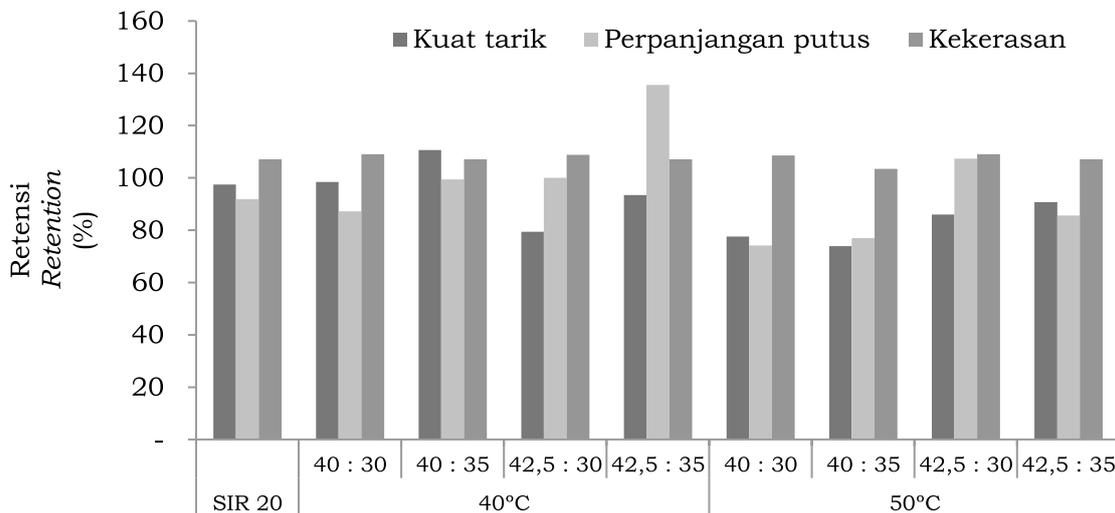


Gambar 7. Pola retakan pada permukaan vulkanisat karet bantalan jembatan karet alam SIR 20 (kiri) dan karet alam hidrogenasi (kanan)
 Figure 7. Stretch cracking surface pattern on elastomeric bridge bearing pad vulcanizate SIR 20 (left) and HNR (right)

Retensi

Persentasi retensi mengindikasikan ketahanan vulkanisat karet terhadap proses oksidasi termal dan menjadi salah satu tolak ukur dalam mengevaluasi mutu produk karet bantalan jembatan. Semakin tinggi nilai persentasi retensi maka semakin baik ketahanan vulkanisat karet terhadap proses oksidasi termal. Perhitungan persentasi retensi dilakukan pada parameter kuat tarik, perpanjangan putus, dan kekerasan. Hasil dari perhitungan persentasi retensi disajikan pada Gambar 8. Secara umum berdasarkan Gambar 8 terlihat bahwa persentasi retensi vulkanisat karet bantalan jembatan dari karet alam hidrogenasi tidak berbeda signifikan dengan vulkanisat dari

karet SIR 20. Vulkanisat karet bantalan jembatan yang terbuat dari karet alam hidrogenasi 40 bsk hidrasin hidrat dan 35 bsk hidrogen peroksida memiliki persentasi retensi pada ketiga parameter yang lebih tinggi dari vulkanisat karet bantalan jembatan dari karet SIR 20. Karet alam hidrogenasi tersebut memiliki ketahanan oksidasi yang baik dicirikan dengan nilai kuat tarik yang lebih tinggi, dan nilai kekerasan serta perpanjangan putus yang relatif tidak berubah setelah kondisi pengusangan atau proses oksidasi termal. Arayapraneer dan Rempel (2009) mengatakan bahwa ketahanan pengusangan merupakan kemampuan vulkanisat karet dalam mempertahankan karakteristiknya di bawah suhu tinggi.



Gambar 8. Retensi vulkanisat karet bantalan jembatan
 Figure 8. Retention of elastomeric bridge bearing pads vulcanizate

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat dirangkum berdasarkan uraian di atas adalah bahwa modifikasi kimiawi lateks karet alam secara hidrogenasi dapat mengubah karakter karet alam menjadi lebih tahan terhadap proses oksidasi termal. Keunggulan tersebut menyebabkan potensi penggunaan karet alam hidrogenasi sebagai matriks polimer alternatif pada produk karet bantalan jembatan menjadi lebih besar. Karet alam hidrogenasi yang dibuat dari 40 bsk hidrasin hidrat dan 35 bsk hidrogen peroksida pada

suhu 40°C ditetapkan sebagai karet alam hidrogenasi yang paling menjanjikan karena memiliki karakteristik vulkanisat karet bantalan jembatan yang memenuhi persyaratan SNI 3967:2013, diantaranya kekerasan 56 Shore A, kuat tarik 17,7 N/mm², perpanjangan putus 560%, pampatan tetap 18,3% dan tidak mengalami keretakan (*crack*) pada pengujian ketahanan ozon. Sementara kondisi setelah pengusangan menunjukkan perubahan kekerasan sebesar +4, perubahan kuat tarik sebesar 11,3% dan perubahan perpanjangan putus sebesar -1,8%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis memberikan penghargaan tinggi dan mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia atas dukungan pendanaan riset melalui mekanisme Insentif Sistem Inovasi Nasional (INSINAS) Gelombang 2 Tahun 2017 sesuai Kontrak Riset Nomor 10/INS-2/PPK/E/E4/2017. Penulis turut mengapresiasi keterlibatan Roy Krisna Perdana selaku Mahasiswa dari Institut Teknologi Kalimantan atas kontribusi yang telah diberikan selama pelaksanaan kegiatan riset.

DAFTAR PUSTAKA

- Arayaprane, W., & Rempel, G. L. (2009). Synthesis and mechanical properties of diimide hydrogenated natural rubber vulcanizates. *Journal of Applied Polymer Science*, 114(6) 4066 - 4075. doi: 10.1002/app.31132.
- Choun, Y. S., Park, J., & Choi, I. K. (2014). Effect of mechanical property variability in lead rubber bearings on the response of seismic isolation system for different ground motions. *Nuclear Engineering and Technology*, 46(5): 605 - 618. doi: 10.5516/NET.09.2014.718.
- Dolati, S. S. K., Mehrabi, A., & Dolati, S. S. K. (2021). Application of viscous damper and laminated rubber bearing pads for bridges in seismic regions. *Metals*, 11(11): 1666. doi: 10.3390/met11111666
- Formela, K., Wasowicz, D., Formela, M., Hejna, A., & Haponiuk, J. (2015). Curing characteristics, mechanical and thermal properties of reclaimed ground tire rubber cured with various vulcanizing systems. *Iranian Polymer Journal*, 24: 289-297. doi: 10.1007/s13726-015-0320-9
- Gonzalez, L., Rodriguez, A., Valentin, J. L., Marcos-Fernandez, A., & Posadas, P. (2005). Conventional and efficient crosslinking of natural rubber. *KGK Rubberpoint*, 58: 638-646.
- Gu, H. S., & Itoh, Y. (2012). Aging inside natural rubber bearings and prediction method. *Journal of Beijing University of Technology*, 38(2): 186-193.
- Hamaguchi, H., Samejima, Y., & Kani, N. (2009). A study of aging effect on rubber bearings after about twenty years in used. *Proceedings of 11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Guangzhou, China, November 17-21 2009.
- Hinchiranan, N., Lertweerasirikun, W., Poonsawad, W., Rempel, G. L., & Prasassarakich, P. (2009). Hydrogenated natural rubber blends: aspect on thermal stability and oxidative behaviour. *Journal of Applied Polymer Science*, 113(3): 1556-1575. doi: 10.1002/app.30034
- Ikeda, Y., Phinyocheep, P., Kittipoom, S., Ruancharoen, J., Kokubo, Y., Morita, Y., Hijikata, K., & Kohjiya, S. (2008). Mechanical characteristic of hydrogenated natural rubber vulcanizates. *Polymer for Advanced Technologies*, 19: 1608-1615. doi: 10.1002/pat.1176
- Inoue, S., & Nishio, T. (2007). Synthesis and properties of hydrogenated natural rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 103(6): 3957-3963. doi: 10.1002/app.25158

- Jovanovic, V., Budinski-Simendic, J., Koruguc-Karasz, L., Aroguz, A., Milic, J., Vukic, N., Markovic, G., & Dugic, P. (2019). Compression set and damping properties of oil-extended elastomer for sealant production. *Natural Science*, 9(1): 1-6. doi: 10.5937/UNIVTHO9-18802
- Jun, X., Zhang, Y., & Shan, C. (2017). Compressive behaviour of laminated neoprene bridge bearing pads under thermal aging condition. *AIP Conference Proceedings*, 1890, 040018. doi: 10.1063/1.5005220
- Kruzalak, J., Sykora, R., & Hudec, I. (2015). Influence of mixed sulfur/peroxide curing system and thermo-oxidative ageing on the properties of rubber magnetic composite. *Journal of Polymer Research*, 22: 636-645. doi: 10.1007/s10965-014-0636-8
- Kruzalak, J., Kvasnicakova, A., & Hudec, I. (2020). Peroxide curing system applied for cross-linking of rubber compounds based on SBR. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3: 120-128. doi: 10.1016/j.aiepr.2020.05.001
- Larpkasemsuk, A., Raksaksri, L., Chuayjuljit, S., Chaiwutthinan, P., & Boonmahitthisud, A. (2019). Effects of sulfur vulcanization system on cure characteristic, physical properties and thermal aging of epoxidized natural rubber. *Journal of Metals, Materials, and Minerals*, 29(1): 49-57.
- Mahittikul, A., Prasassarakich, P., & Rempel, G. L. (2007). Noncatalytic hydrogenation of natural rubber latex. *Journal of Applied Polymer Science*, 103(5): 2885-2895. doi: 10.1002/app.25449
- Mahittikul, A., Prasassarakich, P., & Rempel, G. L. (2009). Hydrogenation of natural rubber latex in the presence of [Ir(cod)(Pcy3)(py)]PF6. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 297(2): 135-141. doi: 10.1016/j.molcata.2008.09.006
- Ngamsurat, S., Boonkerd, K., Leela-adisorn, U., & Potiyaraj, P. (2011). Curing characteristic of natural rubber filled with gypsum. *Energy Procedia*, 9: 452-458. doi: 10.1016/j.egypro.2011.09.051
- Noriman, N. Z., & Ismail, H. (2012). Effect of epoxidized natural rubber on thermal properties, fatigue life, and natural weathering test of styrene butadiene rubber/recycled acrylonitrile-butadiene rubber (SBR/NBRr) blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 123(2): 779-787. doi: 10.1002/app.34501
- Othman, A. (2001). Property profile of a laminated rubber bearing. *Polymer Testing*, 20(2): 159-166. doi: 10.1016/S0142-9418(00)00017-9
- Pimolsiriphol, V., Saeoui, P., & Sirisinha, C. (2007). Relationship among thermal ageing degradation, dynamic properties, cure system and antioxidants in natural rubber vulcanizates. *Polymer - Plastic Technology and Engineering*, 46: 113-121. doi: 10.1080/03602550601152861
- Piya-areetham, P., Prasassarakich, P., & Rempel, G. L. (2013). Organic solvent-free hydrogenation of natural rubber latex and syntetic polyisoprene emulsion catalysed by water soluble rhodium complexes. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 372: 151-159. doi: 10.1016/j.molcata.2013.02.025

- Poschl, M., Sathi, S. G., & Stocck, R. (2022). Tuning the curing efficiency of conventional accelerated sulfur system for tailoring the properties of natural rubber/bromobutyl rubber blends. *Materials*, 15: 8466. doi: 10.3390/ma15238466
- Puspitasari, S., & Cifriadi, A. (2017). Katalitik hidrogenasi lateks karet alam dengan senyawa diimida pada skala semi pilot. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, 33(2): 85-92. doi: 10.20543/mkpk.v33i2.3327
- Rajan, R., Varghese, S., & George, K. E. (2012). Kinetics of peroxide vulcanization of natural rubber. *Progress in Rubber, Plastic and Recycling Technology*, 28(4): 201-220. doi: 10.1177/147776061202800405
- Sanchez, M. A. G., Giraldo-Vasquez, D. H., & Sanchez, R. M. (2021). The effect of thermal aging on the mechanical properties of natural rubber based compounds used for rubber bearings. *Journal of Engineering and Technological Science*, 53(3): 210310. doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.3.10
- Saputra, A. (2021). Review: Application of irradiation technology in natural rubber vulcanization process. *Jurnal Forum Nuklir*, 15(1): 1-11.
- Thitithammawong, A., Utaipan, N., & Rungvichaniwat, A. (2012). The effect of the ratios of sulfur to peroxide mixes vulcanization system on the properties of dynamic vulcanized natural rubber and polypropylene blends. *Songklanarin Journal of Science and Technology*, 34(6): 653-662.
- Yahya, Y. S. R., Azura, A. R., & Ahmad, Z. (2011). Effect of curing system on thermal degradation behaviour of natural rubber (SMR CV 60). *Journal of Physical Science*, 22(2): 1-14. doi: 10.13140/RG.2.1.1419.5683
- Zhao, J., Ghebremeskel, G., & Peasely, J. (2001). Properties of EPDM/SBR blends cured with peroxide and sulfur coagent. *Elastomer and Plastics*, 5: 223-228.