

PENGARUH VARIASI JUMLAH BAHAN PENGISI *CARBON BLACK* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN KARAKTERISTIK KARET ALAM PENGINGAT BENTUK

Noor Maryam Setyadewi*, Endang Susiani, Efa Radnawati
Balai Besar Kulit, Karet dan Plastik, Jl. Sokonandi 9, Yogyakarta, Indonesia
*email: nmsetyadewi@gmail.com

Received 7 October 2020

Accepted 3 December 2020

Abstrak

Penelitian ini mengembangkan material pintar dari bahan baku karet alam, yaitu material *shape memory* atau penguingat bentuk. Material penguingat bentuk memiliki kemampuan mengingat bentuk permanen, diprogram untuk menjadi bentuk tertentu dibawah lingkungan tertentu (seperti suhu dan pH), dan mampu kembali ke bentuk awalnya. Material penguingat bentuk berpotensi untuk diaplikasikan menjadi sensor, aktuator, alat kesehatan maupun *spare part* alat transportasi. Karet alam penguingat bentuk dibuat dengan metode *swelling cross linked* vulkanisat karet alam di dalam larutan asam stearat dengan suhu 75°C - 80°C dalam *waterbath* selama 1 jam. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh variasi jumlah bahan pengisi (*carbon black filler*) pada 5 sampel (C1, C2, C3, C4, C5) terhadap sifat mekanik dan parameter penguingat bentuk. Hasil pengujian kuat tarik menunjukkan vulkanisat blanko memiliki kecenderungan nilai kuat tarik yang lebih tinggi dibandingkan vulkanisat yang mengalami treatment dengan asam stearat. Nilai *shape recovery* vulkanisat karet alam penguingat bentuk berkisar 76,9- 95,8% dan nilai *shape fixity* sebesar 14,8-26,1%.

Kata kunci: *asam stearate, carbon black, karet alam, material penguingat bentuk, sifat mekanik.*

Abstract

This study develops smart materials from natural rubber, namely shape memory material. Shape memory material has the ability to remember permanent shapes, is programmed to become a certain shape under a certain environment (such as temperature and pH), and can return to its original form. Shape memory materials have the potential to be applied to sensors, actuators, medical devices, and transportation equipment spare parts. Natural rubber as a shape memory was made by swelling cross-linked natural rubber vulcanisate is a stearic acid solution with a temperature of 75°C - 80°C in a water bath for 1 hour. The purpose of this study was to study the effect of variations in the amount of filler (carbon black filler) in 5 samples (C1, C2, C3, C4, C5) on mechanical properties and shape memory parameters. The results of the tensile strength test showed that the blank vulcanisate tended to have a higher tensile strength value than the vulcanizate treated with stearic acid. The value of shape recovery for shape memory natural rubber vulcanisate ranged from 76.9 to 95.8% and the shape fixity value was 14.8-26.1%.

Keywords: *stearic acid, carbon black, natural rubber, shape memory material, mechanical properties.*

Pendahuluan

Salah satu sumber daya alam yang dapat terbarukan dan memiliki potensi yang melimpah adalah karet alam, yang disadap dari pohon karet. Charles Goodyear mengembangkan proses ikatan silang, yang disebut vulkanisasi, yaitu proses untuk mengubah senyawa yang bersifat lengket menjadi material elastomer. Sifat material yang terbentuk dari vulkanisasi sangat tergantung dari derajat ikatan silangnya, maka pemanfaatan karet alam sebagai elastomer ini sangatlah luas. Sebagian besar elastomer dimanfaatkan untuk komponen otomotif, seperti ban.

Karakteristik karet alam belum mampu disaingi oleh karet sintesis karena jangkauan kekuatannya yang lebar hingga 300 Mpa, dan elastisitasnya yang tinggi. Karet alam bersifat amorf pada suhu kamar dan berubah menjadi kristalin ketika diberikan regangan, sehingga mampu menghasilkan efek *self reinforcing*.

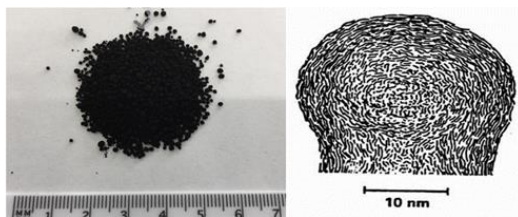
Proses pembuatan vulkanisat menggunakan beberapa bahan aditif seperti akselerator, bahan pengisi, aktivator, bahan pemvulkanisasi, dan pelunak. Fungsi akselerator untuk mempercepat proses dan mempengaruhi sifat fisis dan kimia vulkanisat. Penggunaan dua atau lebih akselerator secara bersama-sama lebih menguntungkan untuk aplikasi teknologi, karena sistem kombinasi akselerator menunjukkan aktivitas vulkanisasi yang lebih tinggi (sinergisme). Akselerator dikelompokkan menjadi beberapa kelompok, diantaranya Guanidine (DPG, DOTG), Thiazole (MBT, MBTS, ZMBT), Sulfenamide (CBS, TBBS, MBS, DCBS), Thiuram (TMTM, TMTD, DPTT), Dithiocarbamate (ZDMC, ZDEC, ZDBC, ZBEC).

Penggunaan aktivator dan akselerator secara bersamaan membentuk sistem aktivator yang akan memicu proses percepatan pembentukan ikatan silang pada saat proses vulkanisasi berlangsung. Aktivator adalah bahan yang digunakan untuk mengaktifkan akselerator. Aktivator

yang sering digunakan adalah kombinasi asam stearat, asam palmitat dan ZnO.

Bahan pengisi memegang peran penting pada proses pembuatan produk karet. Bahan pengisi diklasifikasikan menjadi dua, yaitu carbon black dan bahan pengisi non-black seperti silika. *Carbon black* (CB) merupakan bahan pengisi yang banyak digunakan dalam industri karet, karena bersifat sebagai penguat dan untuk memperbaiki sifat komposit karet (Song *et al*, 2019). Beberapa penelitian telah membahas pengaruh carbon black pada komposit karet, antara lain Salaeh *et al*, menunjukkan bahwa jenis carbon black berpengaruh besar terhadap interaksi fisik dan kimiawi bahan pengisi dengan matriks karet karena perbedaan strukturnya. Carbon black yang memiliki interaksi *interfacial* yang lebih tinggi pada matriks karet menunjukkan nilai modulus Young yang lebih tinggi, nilai kekuatan tarik yang lebih rendah, dan perpanjangan putus. Penelitian Song *et al*, menjelaskan bahwa luas permukaan carbon black sangat penting untuk ikatan silang fisik monomer, karena dengan bertambahnya luas permukaan, jumlah rantai karet yang berikatan dengan agregat carbon black dan nilai ikatan silang meningkat.

Carbon black tersusun lebih dari 90% unsur murni karbon, yang terdiri dari atom karbon kecil yang sebagian besar berbentuk bola yang bergabung bersama dalam kelompok yang disebut sebagai agregat. Beberapa agregat kemudian dikelompokkan menjadi aglomerat yang pecah selama periode pencampuran karet. Dalam kondisi normal, agregat dianggap sebagai unit kerja dispersibel terkecil pada matriks karet. Sehingga, agregat sering dianggap sebagai objek penguat yang sebenarnya. (Fan *et al*, 2020). Diameter partikel carbon black beragam antara 10 nm hingga 500 nm. Hasil pengamatan menggunakan TEM, struktur carbon black ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur carbon black (Fan *et al*, 2020)

Bahan pemvulkanisasi yang digunakan adalah sulfur yang dapat bereaksi dengan gugus aktif molekul karet yang pada proses vulkanisasi membentuk ikatan silang antar molekul karet sehingga terbentuk jaringan tiga dimensi. Sulfur lebih banyak digunakan karena harganya lebih ekonomis dan lebih ramah lingkungan. Bahan aditif lainnya adalah *anti degradant* (*anti oksidan* dan *anti ozonan*), yaitu bahan yang digunakan untuk melindungi dari proses oksidasi, seperti 6PPD dan TMQ. Sedangkan bahan pemlastis juga digunakan untuk mempermudah proses komponding, seperti paraffinic oil.

Material baru yang sedang berkembang adalah komposit penguat bentuk (*shape memory composites /SMC*) yang meliputi *shape memory polymer (SMP)*, alloy, hibrid, keramik, dan gel. SMP menarik dikembangkan karena sifat yang dimilikinya, seperti densitas rendah, berpotensi untuk dapat di daur ulang dengan biaya yang rendah, memiliki sifat *recoverable strain* yang baik dengan berbagai stimulus lingkungan, mampu dimodifikasi secara kimia, lebih mudah diproses, biokompatibel dan biodegradabel dengan laju degradasi yang dapat diatur.

SMP juga dapat diprogram untuk sensitif terhadap berbagai stimulan pada setiap perubahan bentuknya, seperti panas, radiasi, laser, gelombang mikro, tekanan, kelembaban, pelarut, dan pH (Pilate *et al*, 2016). SMP dapat diaplikasikan untuk komponen pesawat ruang angkasa, solar sel, tekstil cerdas, robot bionik dan lainnya. Aplikasi material SMP di bidang industri terutama di bidang otomotif, antara lain menjadi material untuk bodi, kursi, seal,

perangkat pengontrol udara. (Pilate *et al*, 2016).

Karet alam penguat bentuk (SMNR) dapat dibuat dengan berbagai metode, diantaranya adalah dengan membuat derajat ikatan silang yang sangat rendah, membuat program untuk suhu trigger (T_{trig}), perendaman di dalam asam lemak (Brostowitz *et al*, 2014) (Huang *et al*, 2012), melalui pembentukan ikatan silang dengan reaksi Oxa-Michael (Lin, Ma, Lu, & Guo, 2014), pencampuran zink stearat pada EPDM (Dong & Weiss, 2013).

Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk membuat material SMNR adalah dengan metode *swelling* menggunakan asam stearat dengan komposisi variasi bahan pengisi untuk mengetahui pengaruh jumlah bahan pengisi carbon black pada sifat mekanik dan karakteristik dari SMNR yang dibuat.

Metode Penelitian

Alat dan Bahan

Bahan-bahan yang digunakan meliputi karet alam, zink oksida, sulfur, akselerator dari golongan sulfenamide, asam stearat, *paraffinic oil*, *antidegradant*. Alat yang dipakai antara lain neraca analitik, *two roll mill*, *hydraulic press*, *beaker glass*, *waterbath*, *calliper*, *permanent set* dan alat-alat uji seperti *Moving Die Rheometer* Gotech, *Universal Testing Machine*, *Durometer shore A* merk Teclock.

Prosedur

Tahapan awal dalam pembuatan karet alam penguat bentuk adalah dengan membuat kompon karet sesuai dengan formulasi pada Tabel 1. Karet alam (*Natural Rubber/NR*) serta bahan tambahan ditimbang sesuai dengan formulasi pada Tabel 1. Tahapan berikutnya dilakukan proses pencampuran karet dengan *two-roll mill* sistem terbuka skala laboratorium. Setelah kompon yang dibuat selesai, dilakukan pengkondisian selama 24 jam untuk dilakukan pengujian menggunakan *Moving Die Rheometer (MDR)* Gotech untuk mengetahui waktu

vulkanisasi yang menjadi acuan dalam proses vulkanisasi dengan alat *compression molding* (Toyoseiki A-652 200 500 hidrolik pres) pada suhu 150 °C dan tekanan 150 kg/cm².

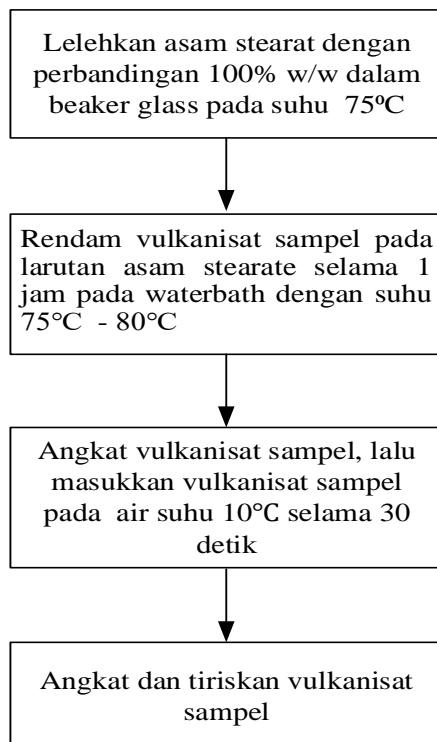
SMNR dibuat dengan metode *swelling cross linked* karet alam di dalam asam stearat. Kristal mikroskopik mampu

membentuk jaringan sementara dan ikatan silang karet jaringan permanen. Kedua jaringan tersebut dapat membuat siklus pengingat bentuk terinduksi panas dengan proses deformasi dan recovery diatas suhu leleh asam stearat, serta fiksasi di bawah suhu tersebut. (Brostowitz et al, 2014).

Tabel 1. Formulasi penelitian

Fungsi	Bahan	Berat (phr)				
		C1	C2	C3	C4	C5
Elastomer	NR	100	100	100	100	100
Activa-tor	ZnO	5	5	5	5	5
	Asam Stearat	2	2	2	2	2
Filler	CB N550	10	20	30	40	50
Anti degradant	TMQ	1	1	1	1	1
	6 PPD	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Processing oil	Parafinic	5	5	5	5	5
Accelerator	CBS	1	1	1	1	1
Vulc. Agent	Sulfur	2	2	2	2	2

Langkah treatment swelling dengan asam stearat disajikan pada Gambar 2. berikut ini.



Gambar 2. Proses *treatment swelling* dengan asam stearat

Pengujian sifat mekanik

Kekerasan, kuat tarik dan elongation adalah salah satu yang terpenting sifat mekanik material berbasis karet. Pada penelitian ini, kekuatan tarik dan elongation sampel diuji dengan mesin kuat tarik Universal Testing Machine merk Tinius Olsen H25K. Nilai kekerasan vulkanisat diukur dengan alat uji kekerasan Type A Teclock.

Pengujian Shape Memory

Metode yang digunakan untuk mengukur nilai fixity recovery berdasarkan penelitian (Chen et al, 2015) dengan modifikasi menggunakan *permanent set*. Langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut; (1) buat dua garis berjarak 35 mm pada tengah dumbell, yang ditandai sebagai p₀; (2) dumbell kemudian dipanaskan pada suhu 75°C selama 30 detik; (3) tarik dumbell hingga perpanjangannya 100%; (4) spesimen yang telah diregang kemudian didinginkan dengan mencelupkan spesimen pada air bersuhu 10°C (*quenching*), lalu pasang kembali dumbell

pada permanent set selama 1 jam, jarak teregang diukur dan ditandai sebagai p_1 ; (5) lepaskan spesimen dari permanent set dan biarkan selama 30 detik pada suhu kamar, dan ukur kembali panjang antar dua garis, tandai dengan p_2 ; (6) spesimen kemudian dipanaskan kembali pada suhu 75°C dan dibiarkan selama 5 menit, kemudian jaraknya diukur sebagai p_3 . *Shape fixity rasio* (SF) dan *shape recovery rasio* (SR) dihitung sesuai dengan persamaan:

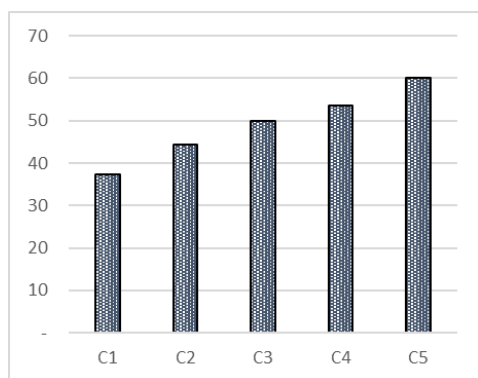
$$SF = \frac{p_2 - p_0}{p_1 - p_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$SR = \frac{p_2 - p_3}{p_2 - p_0} \times 100\% \quad (2)$$

Hasil dan Pembahasan

Kekerasan (Shore A)

Nilai kekerasan menunjukkan besarnya kekerasan vulkanisat karet yang dapat mengindikasikan bahwa vulkanisat karet tersebut tidak elastis/keras. (Maryanti et al, 2018). Hasil pengujian kekerasan pada vulkanisat karet alam penguat bentuk disajikan pada Gambar 3 berikut.



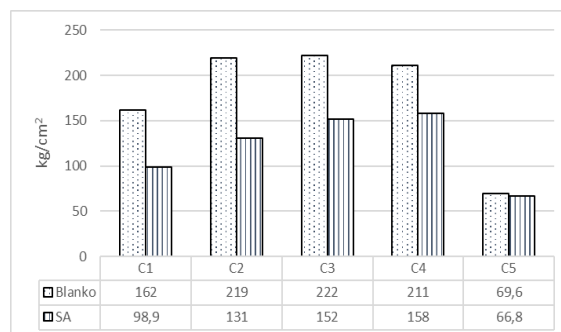
Gambar 3. Nilai kekerasan vulkanisat berdasarkan jumlah carbon black

Gambar 3. menunjukkan bahwa semakin banyak penambahan carbon black akan menaikkan sifat kekerasan vulkanisat, hal ini ditunjukkan pada vulkanisat kode C1-C5 yang memiliki

kecenderungan nilai kekerasan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah bahan pengisi. Semakin banyak partikel bahan pengisi yang masuk ke dalam karet, elastisitas rantai karet berkurang, sehingga vulkanisasi menjadi lebih kaku dan bersifat keras. (Marković et al, 2007).

Kuat Tarik

Pengujian kuat tarik merupakan pengujian mekanis secara statik pada sampel dengan cara penarikan dengan dikenai beban hingga putus. Hasil pengujian kuat Tarik pada sampel blanko dan sampel yang telah ditreatment swelling menggunakan asam stearat disajikan pada Gambar 4.



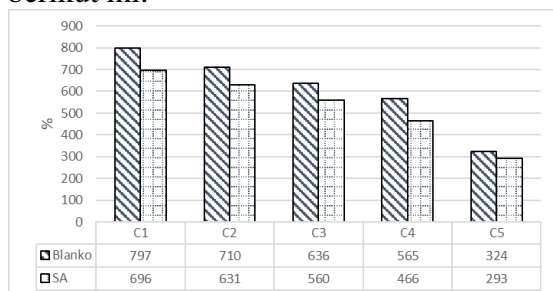
Gambar 4. Nilai kuat tarik karet alam penguat bentuk blanko dan treatment swelling asam stearat

Pada umumnya nilai kekuatan tarik meningkat dengan meningkatnya *crosslink density* akibat adanya ikatan silang antara bahan pengisi dengan karet alam tetapi cenderung mendatar pada konsentrasi ikatan silang tertentu. Kekuatan tarik meningkat dengan menurunnya ukuran partikel pengisi. (Dijkhuis et al, 2009). Hal ini menunjukkan bahwa bahan pengisi carbon black memiliki efek penguatan pada sifat fisik, terutama carbon black yang berukuran butiran kecil. (Farida et al, 2019)

Kekuatan tarik meningkat dengan penambahan bahan pengisi carbon black, tetapi pada jumlah tertentu, nilai kuat tarik akan menurun. Menambah derajat ikatan

silang antara carbon black dan molekul karet dapat meningkatkan kekuatan tarik dan peningkatan kekerasan dapat menurunkan kekuatan tarik vulkanisat (Mayasari & Yuniari, 2016).

Dari Gambar 4. tersebut terlihat bahwa vulkanisat blanko memiliki kecenderungan nilai kuat tarik yang lebih tinggi. Nilai kuat tarik vulkanisat yang mengalami treatment dengan asam stearat mengalami penurunan dibandingkan dengan blanko. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan swelling dengan asam stearat sangat berpengaruh terhadap ikatan silang vulkanisat karet alam pengingat bentuk. Vulkanisat karet alam pengingat bentuk yang dikenai treatment swelling dengan asam stearate mempunyai karakteristik vulkanisat yang lebih lunak dan getas yang mengakibatkan penurunan sifat mekanik (Setyadewi & Indrajati, 2019). Hal ini juga terjadi pada nilai elongation yang disajikan pada Gambar 5. berikut ini.



Gambar 5. Nilai elongation karet alam pengingat bentuk blanko dan treatment swelling asam stearat

Dari Gambar 5. dapat dilihat bahwa nilai elongation vulkanisat blanko lebih tinggi dibandingkan vulkanisat yang mengalami treatment swelling asam stearate. Kecenderungan nilai elongation menurun seiring dengan penambahan jumlah bahan pengisi carbon black. Nilai elongation tertinggi pada sampel vulkanisat C1 blanko sebesar 797% dengan jumlah bahan pengisi carbon black terendah yaitu 10 phr.

Karakter karet alam pengingat bentuk

Karakteristik karet alam sendiri

bersifat amorf pada suhu kamar dan dapat berubah sifat menjadi kristal jika diberi regangan dan hal ini menghasilkan efek *self-reinforcing*. Saat gaya regangan dilepas, karet akan dapat kembali ke bentuknya semula (Katzenberg & Tiller, 2016).

Treatment swelling dengan menggunakan asam stearat mengakibatkan kristal mikroskopis dapat membentuk jaringan sementara dengan ikatan silang permanen dari senyawa karet. (Setyadewi et al, 2019). Kunci dari efek *shape memory* adalah titik leleh fase kristalisasi dari jaringan asam stearat dan *entropic recovery force* dari ikatan silang karet alam (Brostowitz et al, 2014). Hasil pengujian efek shape memory disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai shape fixity dan shape recovery karet alam pengingat bentuk

Treatment	Kode	SF (%)	SR (%)
Blanko	C1	5,09	93,73
	C2	4,81	103,03
	C3	4,77	81,82
	C4	7,42	58,85
	C5	10,86	89,55
Stearic Acid 100%	C1	28,21	91,35
	C2	20,91	76,90
	C3	16	94,45
	C4	14,90	95,81
	C5	26,10	92,58

Nilai shape fixity vulkanisat blanko lebih rendah daripada vulkanisat yang mengalami treatment swelling dengan asam stearate. Pengaruh banyaknya jumlah bahan pengisi carbon black tidak menunjukkan kecenderungan tertentu pada nilai shape fixity maupun shape recovery.

Treatment swelling asam stearate memberikan pengaruh, hal ini diindikasikan dengan adanya peningkatan

nilai shape fixity maupun shape recovery pada vulkanisat yang mengalami treatment

Kesimpulan

Material karet alam pengingat bentuk dapat dibuat metode swelling larutan asam stearate. Perbandingan sifat mekanik dari nilai kekerasan vulkanisat meningkat seiring dengan peningkatan jumlah bahan pengisi carbon black tetapi nilai kuat tarik dan elongation vulkanisat yang mengalami treatment dengan asam stearat mengalami penurunan dibandingkan dengan blanko. Pengaruh banyaknya jumlah carbon black tidak menunjukkan kecenderungan tertentu pada nilai shape fixity maupun shape recovery tetapi treatment swelling asam stearate memberikan pengaruh pada peningkatan nilai shape fixity maupun shape recovery vulkanisat yang mengalami treatment.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih diberikan kepada Balai Besar Kulit, Karet dan Plastik Yogyakarta – Badan Penelitian dan Pengembangan Industri, Kementerian Perindustrian yang telah mendanai penelitian ini dengan skema Litbangyasa Prioritas Tahun 2019. Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim penelitian, kepada F.X. Andri Wisnu Sulistyو dan Parsono untuk kerjasamanya saat proses komponding serta semua pihak yang terlibat dalam penelitian dan penulisan karya tulis ini.

Daftar Pustaka

- Brostowitz, N. R., Weiss, R. A., & Cavicchi, K. A. (2014). Facile fabrication of a shape memory polymer by swelling cross-linked natural rubber with stearic acid. *ACS Macro Letters*, 3(4), 374–377. <https://doi.org/10.1021/mz500131r>
- Chen, Y., Chen, K., Wang, Y., & Xu, C. (2015). Biobased Heat-Triggered Shape-Memory Polymers Based on Polylactide/Epoxidized Natural Rubber Blend System Fabricated via Peroxide-

Induced Dynamic Vulcanization: Co-continuous Phase Structure, Shape Memory Behavior, and Interfacial Compatibilization. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 54(35), 8723–8731. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02195>

- Dijkhuis, K. A. J., Noordermeer, J. W. M., & Dierkes, W. K. (2009). The relationship between crosslink system, network structure and material properties of carbon black reinforced EPDM. *European Polymer Journal*, 45(11), 3302–3312. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2009.06.029>
- Dong, J., & Weiss, R. A. (2013). Effect of crosslinking on shape-memory behavior of zinc stearate/ionomer compounds. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 214(11), 1238–1246. <https://doi.org/10.1002/macp.201200145>
- Fan, Y., Fowler, G. D., & Zhao, M. (2020). The past, present and future of carbon black as a rubber reinforcing filler – A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 247). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119115>
- Farida, E., Bukit, N., Ginting, E. M., & Bukit, B. F. (2019). The effect of carbon black composition in natural rubber compound. *Case Studies in Thermal Engineering*, 16(November), 100566. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100566>
- Huang, W. M., Zhao, Y., Wang, C. C., Ding, Z., Purnawali, H., Tang, C., & Zhang, J. L. (2012). Thermo / chemo-responsive shape memory effect in polymers: a sketch of working mechanisms, fundamentals and optimization. *Journal of Polymer Research*, 19(9952), 1–34. <https://doi.org/10.1007/s10965-012-9952-z>
- Katzenberg, F., & Tiller, J. C. (2016). Shape memory natural rubber. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 54(14), 1381–1388. <https://doi.org/10.1002/polb.24040>
- Lin, T. F., Ma, S. W., Lu, Y., & Guo, B. C. (2014). New Design of Shape Memory Polymers Based on Natural Rubber

- Crosslinked via Oxa-Michael Reaction. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 6(8), 5695–5703. <https://doi.org/10.1021/Am500236w>
- Marković, G., Marinović-Cincović, M., Radovanović, B., & Budinski-Simendić, J. (2007). Rheological and mechanical properties of wood flour filled polyisoprene/chlorosulphonated polyethylene rubber blends. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 13(4), 186–191. <https://doi.org/10.2298/CICEQ0704186M>
- Maryanti; Febrina, D. W. (2018). Pengaruh Ukuran Partikel dan Jumlah Carbon Black terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik Kompon Karet untuk Pembuatan Footstep Sepeda Motor The Effect of The Particle Size and Amount of Carbon Black to The Hardness and Tensile Strength of The Motorcycle Foo. *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Teknologi Pertanian*, 319–324.
- Mayasari, H. E., & Yuniari, A. (2016). Effect of vulcanization system and carbon black on mechanical and swelling properties of EPDM blends. *Majalah Kulit, Karet, Dan Plastik*, 32(1), 59. <https://doi.org/10.20543/mkqp.v32i1.706>
- Pilate, F., Toncheva, A., Dubois, P., & Raquez, J. M. (2016). Shape-memory polymers for multiple applications in the materials world. *European Polymer Journal*, 80, 268–294. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.05.004>
- Salaeh, S., & Nakason, C. (2012). Influence of Modified Natural Rubber and Structure of Carbon Black on Properties of Natural Rubber Compounds Subhan. *Polymer Composites*, 33(4), 489–500. <https://doi.org/10.1002/pc.22169>
- Setyadewi, N. M., & Indrajati, I. N. (2019). Shape Memory Behavior of Shape Memory Natural Rubber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 553(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/553/1/012050>
- Setyadewi, N. M., Indrajati, I. N., & Darmawan, N. (2019). Mechanical properties and curing characteristics of shape memory natural rubber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 541(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/541/1/012012>
- Song, J. ping, Tian, K. yan, Ma, L. xiang, Li, W., & Yao, S. chune. (2019). The effect of carbon black morphology to the thermal conductivity of natural rubber composites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.078>