

Pengaruh Waktu dan Suhu Penyimpanan Kompon Karet terhadap Karakteristik Vulkanisasi

Muh. Wahyu Syabani^{1,3*}, Suharyanto^{1,3}, Mertza Fitra Agustian^{1,3}, Lestari Hetalesi Saputri²

¹Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta, Yogyakarta

²Program Studi Teknologi Kimia, Politeknik LPP Yogyakarta

³Grup Riset Teknologi Karet, Politeknik ATK Yogyakarta

*Corresponding author: mwsyabani@atk.ac.id

Abstract

A rubber compound is a product obtained by mixing rubber with additive materials before the vulcanization process. A time gap often exists between the compounding and vulcanization processes, making proper storage methods crucial. The presence of vulcanizing agents, activating agents, and accelerators in the compound allows the vulcanization reaction to continue during storage. This research aims to study the influence of time and storage temperature on the vulcanization characteristics of rubber compounds. The rubber composite resulting from the compounding process is stored at different room temperatures, namely 25°C, and 32°C. On the 1st, 3rd, and 5th day of storage, the compounds are tested using a rheometer to obtain vulcanization parameter data. The observed parameters include MH, ML, ts2, tc90, cure rate index (CRI), and effective torque for each treatment. The results show that the storage time of the rubber compound affects each observed parameter. Over a 5-day storage period, prolonged storage time leads to the formation of polysulfide cross-links in the rubber polymer network. Higher storage temperatures also accelerate the vulcanization reaction during the storage period. Increased cross-linking results in longer induction periods and vulcanization times, while the CRI and effective torque values decrease.

Abstrak

Kompon karet merupakan produk antara pencampuran karet dengan bahan aditif sebelum proses vulkanisasi. Seringkali terdapat jeda antara proses komponding dan vulkanisasi, sehingga tata cara penyimpanan yang benar menjadi penting. Keberadaan agen pemvulkanisasi, bahan pengaktif, dan bahan pencepat dalam kompon memungkinkan reaksi vulkanisasi tetap berlangsung selama masa penyimpanan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh waktu dan suhu penyimpanan kompon karet terhadap karakteristik vulkanisasi. Komposit karet hasil proses komponding disimpan pada suhu ruangan yang berbeda yaitu 25°C dan 32°C. Pada hari penyimpanan ke-1, ke-3, dan ke-5, kompon tersebut diuji menggunakan rheometer untuk mendapatkan data parameter vulkanisasi. Parameter yang diamati meliputi nilai MH, ML, ts2, tc90, cure rate index (CRI), dan torsi efektif dari masing-masing perlakuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu penyimpanan kompon karet mempengaruhi setiap parameter yang diamati. Dalam rentang waktu 5 hari, semakin lama waktu penyimpanan, terjadi pembentukan ikatan silang polisulfida pada jejaring rantai polimer karet. Suhu penyimpanan yang lebih tinggi juga mempercepat reaksi vulkanisasi selama masa penyimpanan. Penambahan jumlah ikatan silang menyebabkan periode induksi dan waktu vulkanisasi menjadi lebih lama, sementara nilai CRI dan torsi efektif menjadi lebih rendah.

Keywords: *vulcanization characteristic, rubber, storage, temperature, time*

PENDAHULUAN

Karet merupakan sumber daya alam yang penting dan banyak digunakan pada berbagai aplikasi karena daya elastisitasnya serta ketahanan *flexing* yang baik [1]. Bahan aditif pada umumnya ditambahkan ke dalam karet untuk mendapatkan sifat yang lebih baik lagi serta memudahkan proses selanjutnya. Proses pencampuran karet dan aditifnya disebut sebagai komponding dan menghasilkan kompon karet. Kompon karet yang telah mengalami reaksi vulkanisasi memiliki dimensi lebih stabil dan sifat mekanis lebih baik dibandingkan dengan kondisi sebelumnya [2]. Kompon karet yang sudah dihasilkan tapi belum divulkanisasi perlu disimpan secara baik. Oleh karena itu, produsen produk karet perlu memperhatikan masa penyimpanan dari kompon karet. Hal ini dikarenakan kualitas kompon dipengaruhi oleh jenis bahan baku, formulasi serta masa penyimpanannya [3].

Masa penyimpanan merupakan waktu jeda antara proses komponding dengan tahapan berikutnya yaitu vulkanisasi. Proses produksi yang berjalan secara terus-menerus tanpa kendala memerlukan waktu jeda yang pendek untuk melakukan pengujian kualitas kompon seperti tes rheometer. Akan tetapi, kadangkala waktu penyimpanan yang lebih lama tidak dapat dihindari, diantaranya karena perlunya menyimpan stok di dalam gudang maupun terjadinya kendala pada proses berikutnya. Oleh karena itu, penyimpanan kompon perlu mendapatkan perhatian khusus dikarenakan reaksi vulkanisasi akan tetap berjalan secara lambat sehingga dapat mempengaruhi kualitas dari kompon karet [1]. Pengaruh penyimpanan terhadap kualitas karet diantaranya berubahnya nilai viskositas *Mooney* [4], [5], kestabilan dan karakteristik fisis [6], terjadinya fenomena *bloom* dari sulfur pada permukaan kompon [7], *thermo-oxidative aging* [8], re-aglomerasi *filler* pada kompon [9], maupun permasalahan dispersi aditif pada proses berikutnya [3].

Tahapan vulkanisasi merupakan proses kimia penting dalam mendapatkan produk karet seperti ban mobil, selang, dan komponen karet lainnya sesuai dengan karakteristik yang diinginkan. Proses kimia tersebut melibatkan pembentukan ikatan silang antara rantai individu polimer sehingga merubah karet menjadi polimer termoset [10]. Pembentukan ikatan silang merupakan reaksi kimia yang kompleks dan melibatkan berbagai faktor seperti suhu, waktu, dan konsentrasi agen pemvulkanisasi. Reaksi yang terjadi akan menentukan karakteristik akhir dari produk karet yang dihasilkan. Oleh karena itu, tulisan ini akan membahas karakteristik vulkanisasi karet yang dipengaruhi oleh waktu dan suhu penyimpanannya, sehingga diharapkan diperoleh informasi untuk mengetahui kondisi penyimpanan kompon optimal yang tidak mengganggu proses berikutnya.

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Bahan digunakan merupakan grade komersial yang diperoleh dari suplier lokal dan terdiri dari *butadiene rubber* (BR 10), *styrene butadiene rubber* (SBR), karet alam SIR 3L, silika (solvay zeosil), minyak parafin, *zinc oxide*, asam stearat, *2-mercaptobenzothiazole* (MBT), *benzothiazyl disulfide* (MBTS), *tetramethylthiuram disulfide* (TMTD) serta sulfur. Semua bahan digunakan sesuai dengan kondisi saat diterima tanpa proses pemurnian lebih lanjut. Jenis dan jumlah bahan yang digunakan saat komponding disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Formulasi Kompon Karet

No	Material	Phr*	Keterangan
1	BR 10	30,00	Karet sintetis
2	SBR	35,00	Karet sintetis
3	SIR 3L	35,00	Karet alam
4	Silika	30,00	<i>Filler</i>
5	Minyak parafin	4,50	<i>Plasticizer</i>
6	<i>Zinc oxide</i>	5,00	Penggiat
7	Asam stearat	1,00	Penggiat
8	MBT	1,00	Pencepat Primer
9	MBTS	1,00	Pencepat Primer
10	TMTD	0,05	Pencepat Sekunder
11	Sulfur	2,50	<i>Vulcanizing Agent</i>
Total		145,05	

* Phr (*parts per hundred rubber*) : jumlah bahan setiap 100 bagian karet

Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah neraca analitik (Ohaus Carat Series), *press cutting machine*, *two roll mill* (Qingdao Rubber Machinery XK-560), *moving die rheometer* (Gotech GT-M2000).

Prosedur penelitian

Pencampuran karet dan bahan aditif mengikuti ASTM D1394 dengan formulasi kompon karet pada Tabel 1 di atas. Bahan baku karet (SIR 3L, BR10 dan SBR) dimastikasi terlebih dahulu menggunakan *two roll mill* selama 5 menit, kemudian ditambahkan bahan non-pemvulkanisasi secara berurutan diawali dari silika, minyak parafin, *zinc oxide*, dan asam stearat sampai homogen selama 10 menit dan suhu dijaga tidak lebih dari 80°C. Selanjutnya campuran karet tersebut ditambahkan bahan pemvulkanisasi MBT, MBTS, TMTD, dan sulfur secara berurutan sampai homogen selama 5 menit. Kompon karet yang dihasilkan selanjutnya dibentuk menjadi lembaran menggunakan *two roll mill*. Lembaran kompon yang dihasilkan disimpan dalam gudang dengan kondisi penyimpanan sesuai Tabel 2. Suhu 32°C merupakan suhu rerata di ruang penyimpanan tanpa adanya pendinginan, sedangkan suhu 25°C merupakan suhu rerata penyimpanan di gudang yang dilengkapi dengan alat pendingin ruangan. Sedangkan waktu penyimpanan 1, 3 dan 5 hari dipilih menyesuaikan formulasi kompon yang digunakan terutama jenis bahan pencepat yaitu ultra fast-cure (TMTD) dan semi ultra fast-cure (MBT dan MBTS).

Tabel 2. Waktu dan Suhu Penyimpanan

Sampel	Waktu, hari	Suhu, °C
K1	1	
K3A	3	25
K3B	3	32
K5A	5	25
K5B	5	32

Karakterisasi Curing

Sampel yang telah disiapkan sesuai dengan kondisi penyimpanan selanjutnya diuji menggunakan *moving die rheometer* (Gotech GT-M2000). Masing-masing sampel dipotong dengan panjang 150 mm dan ketebalan 2 mm, kemudian dipanaskan pada suhu vulkanisasi 160°C untuk mendapatkan kurva rheometer berupa hubungan torsi dan waktu. Data yang diperoleh dari pengujian ini adalah nilai *scorch time* (ts_2), waktu *curing* optimum (tc_{90}), torsi maksimum (MH) dan minimum (ML). Sedangkan nilai *cure rate index* (CRI) dapat dihitung sesuai persamaan (1) sebagai berikut [11].

$$CRI = \frac{100}{tc_{90} - ts_2} \quad (1)$$

Untuk menentukan ketahanan aging dari vulkanisat pada suhu tinggi maka pendekatan R_{300} digunakan [12]. Ketahanan reversi (R_{300}) merupakan nilai persentase penurunan torsi setelah 300 detik setelah nilai torsi maksimum tercapai. R_{300} dihitung menggunakan persamaan (2) berikut [11].

$$R_{300} = \frac{MH - M_{300}}{MH} \times 100\% \quad (2)$$

Dengan M_{300} adalah torsi pada waktu 300 detik setelah nilai MH tercapai.

Sedangkan nilai *relative crosslink density* dari karet dapat didekati melalui selisih modulus MH dan ML yang dihasilkan oleh rheometer [13], [14]. Nilai ini menunjukkan pembentukan ikatan silang selama reaksi vulkanisasi dan dihitung sesuai dengan persamaan (3).

$$\Delta M = MH - ML \quad (3)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, kompon karet hasil dari proses komponding disimpan pada gudang dengan dua perlakuan yang berbeda yaitu pada suhu rerata 25°C dan 32°C dan waktu 1, 3, 5 hari. Kompon karet pada masing-masing variabel penyimpanan kemudian diujikan kematangannya menggunakan *moving die rheometer* dengan suhu *curing* 160°C.

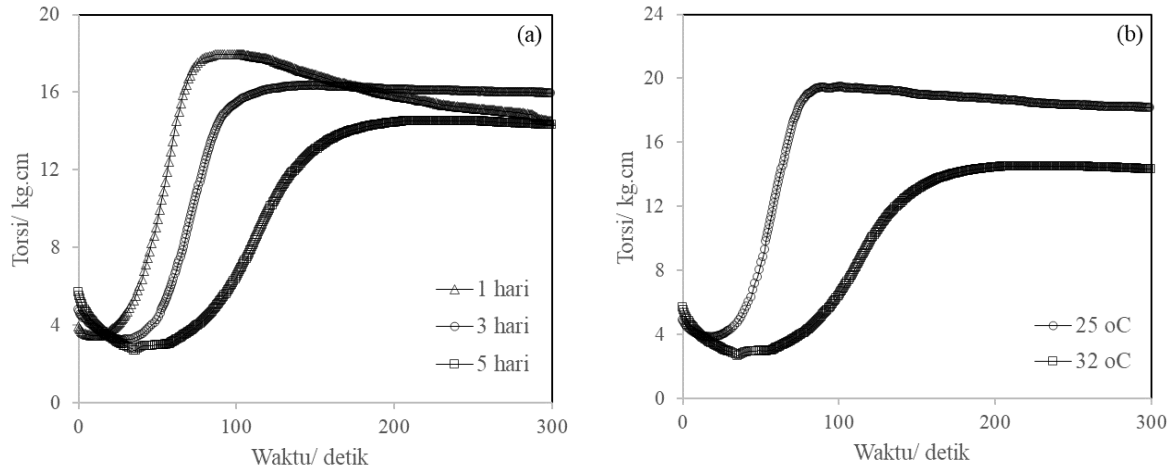


Gambar 1. Tahapan Penelitian (a) Komponding (b) Pengujian Rheometer

Kurva rheometer

Vulkanisasi secara umum didefinisikan sebagai suatu perlakuan yang akan menurunkan kemampuan alir elastomer, menaikkan nilai kuat tarik dan modulus, tetapi dengan mempertahankan kemampuan perpanjangannya [2]. Gambar 2 berikut memperlihatkan kurva rheometer dari kompon karet pada variasi waktu dan suhu penyimpanan kompon. Suhu vulkanisasi sebesar 160°C dipilih pada pengujian ini karena bahan pencepat yang digunakan

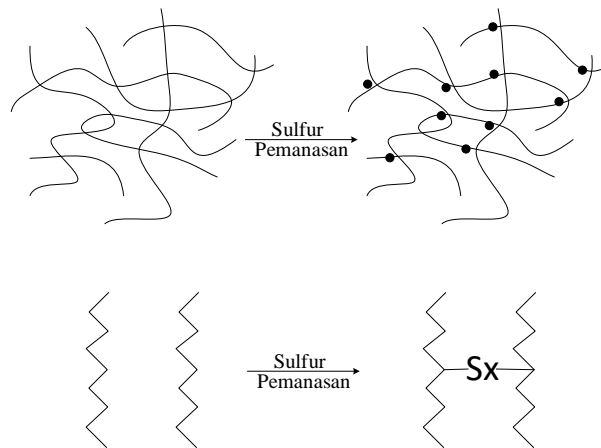
memiliki ikatan -S-N- yang hanya akan terdisosiasi secara cepat pada suhu di atas 140°C supaya dapat membentuk radikal [15]. Nilai torsi yang diperoleh dari kurva berhubungan dengan *crosslink density* dari jejaring karet yang terbentuk. Kurva *curing* untuk reaksi vulkanisasi sulfur terdiri atas tiga daerah, yaitu periode induksi (*scorch*), periode *crosslinking* dan periode reversi yang selaras dengan tahapan reaksi yang berbeda pada proses vulkanisasi [2]. Sulfur biasanya digunakan bersama dengan satu atau lebih bahan pencepat dan bahan pengaktif serta asam lemak. Pada penelitian ini digunakan pengaktif Zn yang dapat menaikkan efisiensi pembentukan ikatan silang secara baik.



Gambar 2. Kurva Rheometer Komposit Karet Pada Variasi (a) Waktu (b) Suhu

Sebelum reaksi *crosslinking* terjadi yaitu selama periode induksi sampai titik ts_2 (*scorch time*), reaksi yang terjadi adalah antara sulfur, bahan pencepat dan bahan pengaktif Zn untuk membentuk *curing agent complex* A-Sx-Zn-Sx-A yang pada tahapan berikutnya akan bereaksi dengan situs aktif rantai polimer karet [16]. Reaksi tersebut menghasilkan prekursor *crosslink* jenis R-Sx-A dimana R menunjukkan rantai polimer dari karet. Pada periode ini, pada umumnya belum terjadi pembentukan ikatan silang, sehingga nilai torsi akan relatif rendah dan sedikit menurun. Kondisi tersebut memungkinkan pemrosesan yang aman saat pencetakan, dimana kompon dapat mengalir mengisi *cavity* dari cetakan dengan baik.

Pada periode kedua sampai dengan waktu *curing* optimum (tc_{90}), prekursor *crosslink* yang terbentuk sebelumnya mulai beraksi dengan site aktif dari rantai karet lainnya dengan membentuk ikatan polisulfida R-Sx-R. Polisulfida akan bereaksi lebih lanjut membentuk ikatan monosulfida, disulfida dan siklis selama vulkanisasi melalui disosiasi, penggabungan kembali maupun pengaturan ulang ikatan sulfur [15]. Terlihat di kurva rheometer pada gambar 2 terdapat kenaikan torsi yang sebanding dengan pembentukan *crosslink* sampai nilai maksimumnya [17]. Periode ketiga adalah reversi sebagai akibat putusnya sebagian *crosslink* polisulfida tidak stabil yang terbentuk saat vulkanisasi. Kondisi ini menyebabkan sifat fisis vulkanisat karet secara umum mengalami penurunan, terutama ketika waktu *curing* melewati titik optimum [18]. Reversi juga dapat diakibatkan dari transformasi unit cis isomer dari karet alam menjadi struktur trans yang memiliki ketahanan suhu lebih rendah dibandingkan isomer cis maupun dikarenakan suhu *curing* terlalu tinggi [2], [19]. Ilustrasi pembentukan ikatan silang pada reaksi vulkanisasi dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3 Reaksi vulkanisasi dengan sulfur

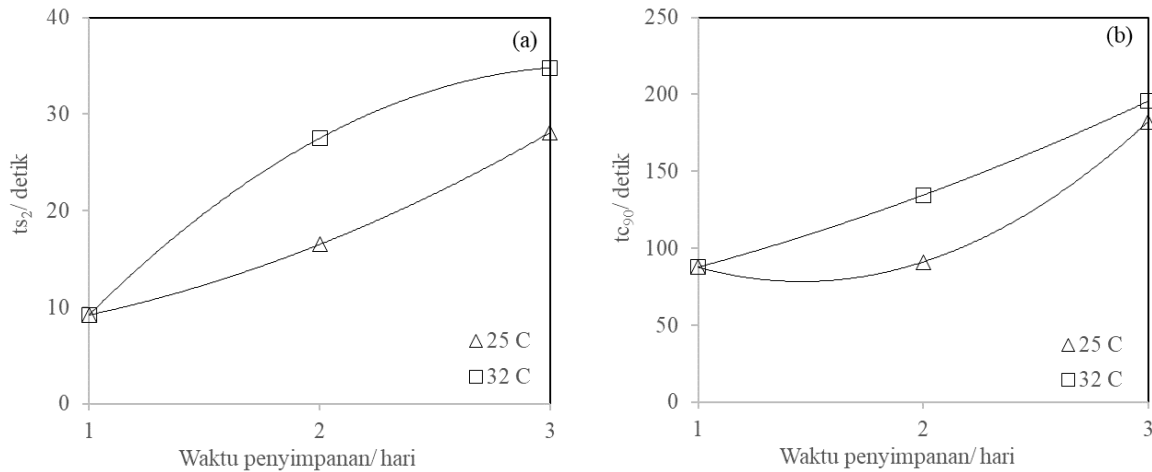
Scorch time, optimum curing time dan cure rate index

Karakteristik curing dari karet berperan penting dalam pemrosesan karet karena sifat curing tergantung pada jenis karet dan aditif yang digunakan. *Scorch time* (ts_2) menunjukkan bahwa kompon karet masih bisa dicampur pada suhu proses sebelum reaksi vulkanisasi terjadi. Sedangkan optimum curing time (tc_{90}) merupakan waktu vulkanisasi yang dibutuhkan untuk mendapatkan karakteristik produk akhir yang optimum [14].

Tabel 3. *Scorch Time, Optimum Curing Time dan Cure Rate* dari Kompon Karet

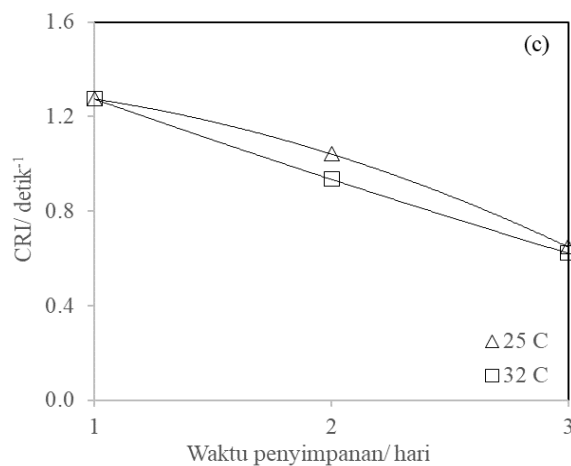
Sampel	ts_2 , detik	tc_{90} , detik	CRI, detik-1
K1	9.20	87.68	1.27
K3A	16.50	91.11	1.04
K3B	27.50	134.51	0.93
K5A	28.10	182.36	0.65
K5B	34.80	195.63	0.62

Pada Tabel 3 di atas terlihat bahwa waktu dan suhu penyimpanan mempengaruhi nilai ts_2 , tc_{90} maupun CRI dari kompon karet. Nilai *scorch time* terlihat berbanding lurus dengan waktu penyimpanan. Semakin lama kompon disimpan, maka *scorch time* juga akan semakin panjang. Kondisi ini dapat diakibatkan dari terjerapnya bahan aditif bahan pengaktif maupun bahan pencepat pada permukaan *filler* yang akan semakin banyak selama waktu penyimpanan. Bahan aditif ZnO sudah diketahui dapat terjerap pada permukaan silika. Padahal sebagaimana sudah dijelaskan sebelumnya, keberadaan bahan pengaktif ZnO akan menaikkan efisiensi pembentukan ikatan silang dikarenakan fungsinya dalam mengaktifkan bahan pencepat [15]. Oleh karena itu, aktivitas sistem *curing* pada periode ini mengalami kelambatan dan terlihat sebagai nilai *scorch time* yang semakin lama.



Gambar 4. Nilai ts_2 dan tc_{90} Pada Variasi (a) Waktu dan (b) Suhu Penyimpanan

Pada gambar 4(a) terlihat bahwa suhu penyimpanan juga memberikan pengaruh pada kompon karet. Sampel yang disimpan pada suhu 25°C memiliki nilai *scorch time* yang lebih pendek dibandingkan pada suhu 32°C. Kondisi ini dapat terjadi jika selama penyimpanan secara kumulatif terjadi reaksi pembentukan ikatan silang maupun putusnya ikatan yang sudah terbentuk [5], [6]. Pembentukan ikatan pada kompon ini dapat dilihat pada karet yang menjadi lebih keras dan kaku [4]. *Crosslink density* akan naik sampai dengan suhu penyimpanan 50°C, akan tetapi menunjukkan penurunan sampai dengan dengan suhu 80°C [1]. Ikatan silang yang terbentuk akan membuat pergerakan bahan pemvulkanisasi terhambat diantara jejaring karet yang ada. Semakin rendah frekuensi kontak antar reaktan akibat hambatan mobilitas akan mengakibatkan aktivitas bahan pencepat menurun sehingga *scorch time* pun semakin panjang. Lebih lanjut, pada suhu penyimpanan yang semakin tinggi maka reaksi yang terjadi juga semakin cepat sehingga ikatan silang yang terbentuk turut semakin banyak dan pada akhirnya hambatan yang diakibatkan juga semakin tinggi. Pengaruh hambatan akibat ikatan silang ini juga menjelaskan nilai tc_{90} yang lebih lama dengan bertambahnya waktu dan tingginya suhu penyimpanan sebagaimana terlihat pada gambar 4(b). Terhalangnya pergerakan agen pemvulkanisasi menyebabkan reaksi vulkanisasi berjalan lebih lambat sehingga waktu *curing* optimum juga lebih lama dicapai.



Gambar 5. *Cure Rate Index* Karet Pada Variasi Waktu dan Suhu Penyimpanan

Nilai CRI memperlihatkan kecepatan *curing* yang dihitung dari selisih antara waktu *curing* optimum (t_{c90}) dengan *scorch time* (t_{s2}) [20]. Berdasarkan Gambar 5 di atas dapat dilihat bahwa kedua sampel yang disimpan pada suhu berbeda memberikan kecenderungan nilai CRI yang sama. Kecepatan vulkanisasi akan semakin turun dengan naiknya waktu penyimpanan. Sementara itu, semakin tinggi suhu penyimpanan maka nilai CRI dari kompon cenderung semakin rendah, walaupun selisihnya tidak berbeda jauh. Kondisi ini juga disebabkan oleh terbentuknya ikatan silang selama penyimpanan sehingga menghambat mobilitas reaktan untuk reaksi lebih lanjut [6].

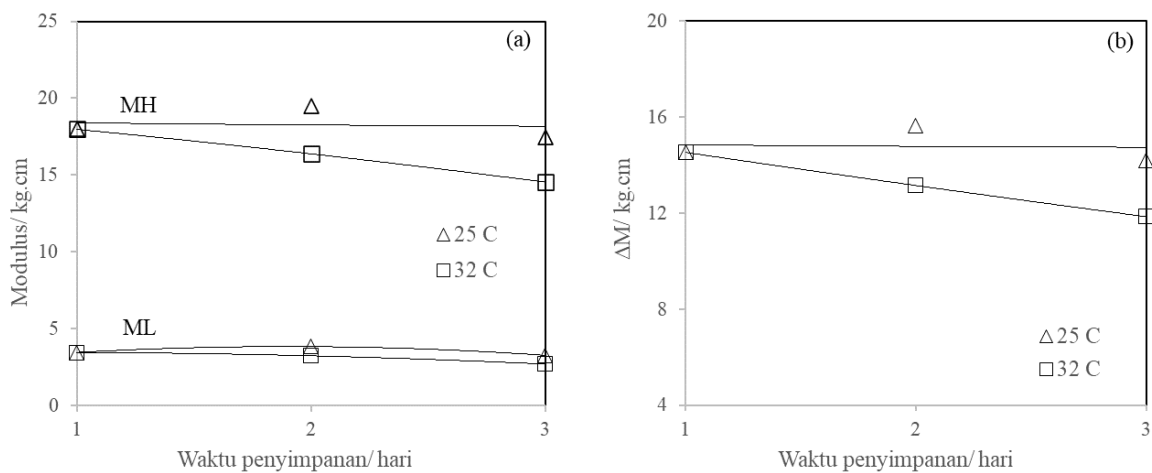
Torsi dan *relative crosslink density*

Nilai torsi yang diperoleh dari *moving die* rheometer selaras dengan tingkat kekakuan karet yang diakibatkan oleh pembentukan ikatan silang. Tabel 4 berikut menampilkan nilai torsi dan reversi dari sampel kompon karet.

Tabel 4. Nilai Torsi dan Reversi

Sampel	ML, kg.cm	MH, kg.cm	ΔM , kg.cm	R ₃₀₀ , %
K1	3.44	17.97	14.53	11.15
K3A	3.82	19.46	15.64	7.04
K3B	3.22	16.37	13.15	4.95
K5A	3.25	17.45	14.20	2.69
K5B	2.68	14.53	11.85	1.63

Secara umum, ML menunjukkan kekakuan dan viskositas dari bahan kompon bukan pemvulkanisasi. Saat reaksi vulkanisasi mulai terjadi torsi akan naik sampai nilai maksimum MH yang merefleksikan terjadinya jumlah ikatan silang [8]. Sedangkan nilai torsi efektif (ΔM) yang dihitung sebagai selisih nilai torsi maksimum (MH) dan minimum (ML) pada suhu *curing* tertentu dapat digunakan untuk mengevaluasi derajat vulkanisasi yang terjadi [8], [16].

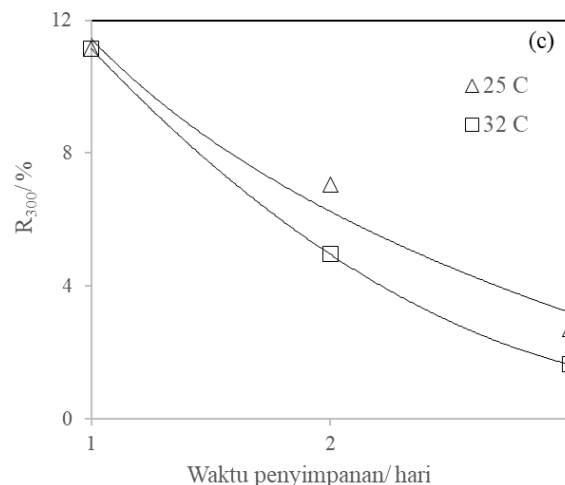


Gambar 6. Nilai Modulus Pada Variasi (a) Waktu dan (b) Suhu Penyimpanan

Pada Gambar 6(a) terlihat jika nilai ML sampel pada suhu dan waktu penyimpanan yang berbeda tidak berselisih terlalu jauh. Sebagaimana sudah dijelaskan sebelumnya, nilai ML berkaitan dengan bahan penyusun kompon yang bukan pemvulkanisasi. Pada penelitian ini,

formulasi kompon yang digunakan sama dan sesuai Tabel 1 untuk semua sampel. Sementara itu, nilai MH pada cenderung sama pada suhu 25°C, akan tetapi menunjukkan penurunan nilai pada suhu penyimpanan 32°C. Fenomena ini dapat terjadi dikarenakan adanya ikatan silang tambahan yang terbentuk pada waktu penyimpanan [6]. Pembentukan ikatan silang ini akan semakin banyak pada suhu penyimpanan yang semakin tinggi. Keberadaan ikatan silang tambahan tersebut akan menghambat interaksi antara karet dan aditif pemvulkanisasi selama reaksi berlangsung. Akibatnya nilai MH pada suhu yang lebih tinggi akan terbaca semakin rendah dengan lamanya waktu penyimpanan. Hal ini tidak terlihat pada suhu penyimpanan yang rendah karena reaksi vulkanisasi selama penyimpanan pada suhu yang terkontrol juga akan lebih lambat sehingga kualitas kompon lebih terjaga.

Nilai torsi efektif (ΔM) dari vulkanisat karet juga turut terpengaruh sebagaimana terlihat pada gambar 6(b). Nilai torsi efektif yang diperoleh akan menunjukkan nilai *relative crosslink density* [16]. Pada kisaran suhu 25-32°C, semakin rendah suhu penyimpanan maka nilai torsi efektif akan semakin naik, sedangkan semakin lama waktu penyimpanan akan memberikan nilai yang semakin turun. Hasil ini sekaligus membuktikan pembahasannya sebelumnya, bahwa pembentukan ikatan silang pada saat penyimpanan akan mengganggu reaksi vulkanisasi sehingga nilai *crosslink density* dari produk karet akan menurun. Padahal *crosslink density* berpengaruh besar pada karakteristik fisis dan mekanik dari vulkanisat yang dihasilkan.



Gambar 7. Nilai Reversi Pada Variasi Waktu dan Suhu Penyimpanan

Reversi biasanya terjadi pada karet alam ketika terekspos pada suhu tinggi dalam waktu lama. Fenomena ini dapat dilihat pada kurva rheometer sebagai penurunan nilai torsi setelah melewati nilai maksimumnya [11]. Penurunan torsi tersebut mengindikasikan kualitas vulkanisat karet yang semakin rendah akibat naiknya *hysteresis loss* [8]. Reversi juga dapat digunakan untuk memprediksi ketahanan karet terhadap *heat aging*, yang sangat berguna saat karet diaplikasikan pada kondisi dengan suhu tinggi.

Pada gambar 7 di atas, terlihat jika semakin lama waktu penyimpanan akan memberikan nilai reversi yang semakin rendah, begitupula dengan semakin tingginya suhu penyimpanan. Hal ini dapat disebabkan karena pada tahap awal reaksi pembentukan ikatan silang polisulfida mendominasi, akan tetapi dengan bertambahnya waktu maka reaksi samping seperti putusnya jembatan sulfur semakin aktif menghasilkan ikatan mono dan disulfida. Ikatan sulfida yang lebih pendek memiliki ketahanan panas yang lebih baik dibandingkan polisulfida [8].

KESIMPULAN

Suhu dan waktu penyimpanan kompon karet dapat mempengaruhi karakteristik vulkanisasi. Semakin lama waktu penyimpanan pada rentang 5 hari, maka reaksi vulkanisasi dapat terjadi secara lambat sehingga terbentuk ikatan silang pada kompon karet. Fenomena yang sama juga teramati pada penyimpanan pada suhu yang lebih tinggi pada rentang 25-32°C. Pembentukan ikatan silang selama periode penyimpanan ini akan menghambat mobilitas dari aditif yang ditambahkan pada kompon sehingga mengganggu reaksi vulkanisasi. Hambatan tersebut menyebabkan nilai *scorch time* (ts_2), waktu *curing* optimum (tc_{90}), *cure rate index* (CRI) lebih rendah sehingga memperlama waktu vulkanisasi. Sedangkan nilai torsi maksimum dan torsi efektif yang dihasilkan juga akan lebih rendah sehingga dapat menurunkan karakteristik mekanik dari produk karet yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Workshop Karet dan UP2M Politeknik ATK Yogyakarta yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. C. Zhao *et al.*, "Accelerated natural rubber ageing: an effect of storage temperature on molecular structure and properties," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 479, p. 012102, Mar. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/479/1/012102.
- [2] G. Milani and F. Milani, "Effective closed form starting point determination for kinetic model interpreting NR vulcanized with sulphur," *J Math Chem*, vol. 52, no. 2, pp. 464–488, Feb. 2014, doi: 10.1007/s10910-013-0272-2.
- [3] A. Limper, *Mixing of rubber compounds*. Munich : Cincinnati, Ohio: Hanser Publishers ; Hanser Publications, 2012.
- [4] S.-N. Gan, "Storage Hardening of Natural Rubber," *Journal of Macromolecular Science, Part A*, vol. 33, no. 12, pp. 1939–1948, Dec. 1996, doi: 10.1080/10601329608011018.
- [5] J. Yunyongwattanakorn, Y. Tanaka, S. Kawahara, W. Klinklai, and J. Sakdapipanich, "Effect of Non-Rubber Components on Storage Hardening and Gel Formation of Natural Rubber During Accelerated Storage under Various Conditions," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 76, no. 5, pp. 1228–1240, Nov. 2003, doi: 10.5254/1.3547799.
- [6] K. K. Sasidharan, R. Joseph, S. Palaty, K. S. Gopalakrishnan, G. Rajammal, and P. V. Pillai, "Effect of the vulcanization time and storage on the stability and physical properties of sulfur-prevulcanized natural rubber latex," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 97, pp. 1804–1811, 2005.
- [7] B. Jurkowski and B. Jurkowska, "On the mechanism of sulfur behavior in rubber compounds," *Journal of Macromolecular Science, Part B*, vol. 37, no. 2, pp. 135–142, Mar. 1998, doi: 10.1080/00222349808220461.
- [8] A. Yuniari, D. W. Nurhajati, I. R. Dewi, and I. Setyorini, "Reologi, sifat aging, termal, dan swelling dari campuran EPDM/NR dengan bahan pengisi carbon black N220," *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, vol. 32, no. 1, pp. 13–20, Jun. 2016, doi: 10.20543/mkcp.v32i1.905.

- [9] J. S. Dick and R. A. Annicelli, *Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance*. Hanser Publishers, 2001.
- [10] Muh. W. Syabani, Y. Suwarno, and M. F. Agustian, "Effect of UV Aging on Physical Properties of Vulcanized Rubber with the Addition of Reclaimed Rubber | Logic : Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi," *Logic : Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, vol. 19, no. 3, pp. 155–161, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.31940/logic.v19i3.1469>.
- [11] K. Formela, D. Wąsowicz, M. Formela, A. Hejna, and J. Haponiuk, "Curing characteristics, mechanical and thermal properties of reclaimed ground tire rubber cured with various vulcanizing systems," *Iran Polym J*, vol. 24, no. 4, pp. 289–297, Apr. 2015, doi: 10.1007/s13726-015-0320-9.
- [12] T. H. Khang and Z. M. Ariff, "Vulcanization kinetics study of natural rubber compounds having different formulation variables," *J Therm Anal Calorim*, vol. 109, no. 3, pp. 1545–1553, Sep. 2012, doi: 10.1007/s10973-011-1937-3.
- [13] M. W. Syabani, M. F. Agustian, W. Pambudi, Suharyanto, Warmiati, and M. Ikhwan, "Pengaruh Geothermal Silica terhadap Ketahanan Pelarut dari Komposit Karet Ditinjau dari Karakteristik Swelling dan Crosslink Density," *Berkala Penelitian Teknologi Kulit, Sepatu, dan Produk Kulit*, vol. 21, no. 1, Jan. 2022.
- [14] D. Y. Kim, J. W. Park, D. Y. Lee, and K. H. Seo, "Correlation between the Crosslink Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound via Accelerators and Reinforcement," *Polymers*, vol. 12, no. 9, p. 2020, Sep. 2020, doi: 10.3390/polym12092020.
- [15] S.-H. Chough and D.-H. Chang, "Kinetics of sulfur vulcanization of NR, BR, SBR, and their blends using a rheometer and DSC," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 61, no. 3, pp. 449–454, Jul. 1996, doi: 10.1002/(SICI)1097-4628(19960718)61:3<449::AID-APP7>3.0.CO;2-I.
- [16] S. Rabiei and A. Shojaei, "Vulcanization kinetics and reversion behavior of natural rubber/styrene-butadiene rubber blend filled with nanodiamond - The role of sulfur curing system," *European Polymer Journal*, vol. 81, May 2016, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2016.05.021.
- [17] G. Milani and F. Milani, "Fast and reliable meta-data model for the mechanistic analysis of NR vulcanized with sulphur," *Polymer Testing*, vol. 33, pp. 64–78, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.polymertesting.2013.11.003.
- [18] G. Milani, E. Leroy, F. Milani, and R. Deterre, "Mechanistic modeling of reversion phenomenon in sulphur cured natural rubber vulcanization kinetics," *Polymer Testing*, vol. 32, no. 6, pp. 1052–1063, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.polymertesting.2013.06.002.
- [19] G. Sui, W. H. Zhong, X. P. Yang, and Y. H. Yu, "Curing kinetics and mechanical behavior of natural rubber reinforced with pretreated carbon nanotubes," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 485, no. 1–2, pp. 524–531, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.09.007.
- [20] I. Surya, L. Sukeksi, and N. Hayemasae, "Studies on cure index, swelling behaviour, tensile and thermooxidative properties of natural rubber compounds in the presence of alkanolamide," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 309, p. 012060, Feb. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/309/1/012060.