

Kajian Penggunaan Carbon Black N990 sebagai Bahan Pengisi Kompon Karet Alam: Sifat Dinamik, Kestabilan Termal, dan Ketahanan Panas

Adi Cifriadi^{1,2}, Purwantiningsih Sugita^{1*}, Tetty Kemala¹, Siti Nikmatin³

¹Departmen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

²Pusat Penelitian Karet, Palembang, Indonesia

³Departmen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

Corresponding Author:
Purwantiningsih Sugita
purwantiningsih@apps.ipb.ac.
id

Received: October 2022
Accepted: February 2023
Published: March 2023

©Purwantiningsih Sugita et al.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Abstract

The manufacture of vibration damping material from natural rubber (NR) required an increase in dynamic properties, thermal stability, and resistance to heat. Using the Carbon Black N990 as a filler in NR vulcanizates can potentially increase on these properties. This research aims to study the effect of using Carbon Black N990 on dynamic properties, thermal stability, and aging resistance to heat in NR vulcanizates. The dynamic properties of NR vulcanizates were determined by Rubber Process Analyzer (RPA), while the thermal stability properties were studied by TGA, and heat resistance was determined by the thermal aging test. The RPA test results showed that adding 50 phr Carbon Black N990 in the NR compound could increase the value of the complex shear modulus to 65%. Furthermore, the results of the TGA test showed that the thermal stability properties of unfilled NR vulcanizates were better than that of NR vulcanizates containing Carbon Black N990. Unfilled NR vulcanizates were heat stable up to 353°C, while NR vulcanizates containing 15, 30, and 50 parts per hundred rubber (phr) Carbon Black N990, respectively, were heat stable up to 348.1°C, 348°C, and 349°C. Based on the requirements of ISO 4632-1, it showed that the NR compound containing Carbon Black N990 has good heat resistance properties. The NR compound formula contains 30 phr Carbon Black N990 showing good dynamic properties and heat resistance in accordance with EN 15129 requirements so that it has the potential to be used as a vibration damping material for earthquake-resistant structures.

Keywords: *Rubber; Carbon Black N990, dynamic, thermal stability, heat resistance*

Pendahuluan

Pada pembuatan barang jadi karet, bahan pengisi merupakan salah satu jenis bahan kimia kompon karet yang sangat mempengaruhi sifat fisika, mekanik, ataupun sifat dinamik vulkanisat karet^[1]. *Carbon black* (CB) N990

adalah bahan pengisi kompon karet dari golongan CB yang memiliki ukuran partikel besar dan struktur rendah dibandingkan dengan jenis CB yang lainnya. Sebagai akibat dari ukuran partikel yang besar dan struktur yang rendah maka secara umum akan berdampak pada sifat penguatan CB N990

terhadap matriks karet yang tergolong kurang baik. Namun, terdapat beberapa keuntungan pada penggunaan CB N990 diantaranya adalah kemampuan jumlah pemuatan yang tinggi sehingga berpotensi dapat menghasilkan penghematan biaya pembuatan kompon karet^[2]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dikaji pengaruh penggunaan CB N990 terhadap sifat dinamik, kestabilan termal, dan ketahanan terhadap panas pada kompon NR untuk pembuatan produk karet peredam getaran, khususnya material peredam getaran untuk rumah tahan gempa sesuai dengan standar EN 15129.

Beberapa sifat yang penting sebagai material peredam getaran yang baik dapat ditunjukkan dengan nilai yang tinggi pada faktor redaman, modulus viskos, modulus geser, dan stabilitas termal, serta memiliki nilai modulus elastisitas yang rendah^[3]. Karet alam telah diketahui memiliki sifat peredaman getaran yang lebih rendah dibandingkan dengan karet sintetik yang ditunjukkan dari nilai tangen delta (*loss atau damping factor*) yang paling kecil^[4]. Rendahnya sifat peredaman getaran NR disebabkan oleh sifat viskoelastik bahan yang memiliki komponen bersifat elastis lebih besar dibandingkan komponen bersifat viskos pada struktur rantai molekulnya. Oleh karena itu, penelitian untuk peningkatan sifat dinamik, khususnya modulus geser, modulus viskos, dan tangen delta, dapat digunakan sebagai prediksi dasar pada formulasi kompon NR untuk pembuatan material peredam getaran.

Perilaku viskoelastisitas karet dapat ditentukan melalui pengujian sifat dinamik bahan dan bergantung pada frekuensi regangan, amplitudo regangan, dan suhu^[5]. Sifat viskoelastik ini dapat ditentukan melalui pengujian dinamik dengan alat *Dynamic Mechanical Analysis* (DMA) ataupun *Rubber Process Analyzer* (RPA). Sifat dinamik material karet yang penting untuk menentukan sifat peredaman getaran adalah nilai histeresis. Nilai histeresis dapat ditentukan dari pengukuran tangen delta. Pada vulkanisat karet, nilai histeresis dipengaruhi oleh jenis karet mentah dan bahan kimia karet yang digunakan^[4]. Bahan kimia karet yang dapat mempengaruhi nilai histeresis diantaranya adalah jenis dan

jumlah bahan pengisi^[4], bahan pemvulkanisasi^{[6],[7]}, bahan pelunak^[4], dan bahan resin^[8]. Selanjutnya, salah satu cara untuk meningkatkan sifat dinamik material karet adalah dengan menambahkan bahan kimia yang dapat menyebabkan peningkatan sifat kekakuan ataupun sifat viskoelastis dari vulkanisat karet. Beberapa penelitian untuk peningkatan sifat dinamik pada karet alam atau sintesis telah dilakukan melalui perlakuan yang mengakibatkan perubahan sifat viskoelastis bahan, seperti: pengaruh jenis dan jumlah bahan pengisi, pengaruh bahan pelunak, pengaruh sistem vulkanisasi belerang, pengaruh pemaduan karet, ataupun pengaruh penambahan resin^{[4],[9]-[16]}.

Bahan pengisi kompon karet, seperti CB atau silika umumnya digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik vulkanisat karet. Pengaruh penggunaan CB pada komposit karet terhadap sifat mekanik dan fisika telah banyak dilakukan kajian. Namun, kajian penggunaan CB N990 pada komposit karet alam masih terbatas dan belum banyak dipelajari, khususnya pengaruhnya terhadap sifat dinamik dan termal. Beberapa penelitian telah dilakukan terkait pengaruh CB N990 terhadap sifat mekanik komposit karet. Marhoon^[2] telah melakukan kajian pengaruh penggunaan CB N990 terhadap sifat mekanik dan fisika komposit karet poliuretan. Cifriadi *et al.*^[17] juga telah melakukan kajian pengaruh penggunaan CB N990 terhadap sifat mekanik komposit karet alam. Oleh karena itu, kajian penggunaan CB N990 terhadap sifat dinamik dan termal dari komposit karet alam menarik untuk dilakukan penelitian sehingga dapat diketahui aplikasinya untuk pembuatan produk komposit karet yang mensyaratkan sifat tersebut, diantaranya adalah produk karet sebagai peredam getaran.

Dalam eksperimen ini dipelajari pengaruh penggunaan CB N990 terhadap sifat dinamik, kestabilan termal, dan ketahanan panas pada kompon NR untuk pembuatan material peredam getaran pada rumah tahan gempa. Perbandingan sifat dinamik, kestabilan termal, dan ketahanan panas dari kompon NR tanpa dan mengandung bahan pengisi CB N990 dipelajari lebih detail. Berdasarkan hasil riset

ini diperoleh formula kompon NR untuk pembuatan material peredam getaran pada rumah tahan gempa sesuai persyaratan sifat dinamik dan ketahanan panas pada standar EN 15129.

Metodologi Penelitian

Bahan kimia

Bahan yang digunakan untuk pembuatan kompon karet terdiri atas karet alam jenis SIR 20 sebagai *base elastomer*, bahan pengaktif berupa *zinc oxide* (ZnO) UN 3077 dari Lanxess Jerman, asam stearat Aflux®52 dari Lanxess Jerman, bahan pemercepat berupa 2-2'-*dithiobenzothiazole* (MBTS) merek Kemai China, bahan pemvulkanisasi berupa belerang (sulfur) merek Midas SP 325 produksi Miwon Co Jepang, dan CB N990 merek CABOT. Bahan kimia kompon karet yang digunakan seluruhnya pada tingkatan mutu teknis. Formula kompon karet yang diaplikasikan dalam eksperimen ini dirancang pada variasi dosis CB N990 sebesar 15, 30, dan 50 phr seperti pada Tabel 1. Pemilihan dosis tersebut didasarkan kategori jumlah bahan pengisi

partikulat yang ditambahkan pada material komposit, yakni kategori rendah, kategori sedang, dan kategori tinggi.

Prosedur penelitian

Pembuatan Kompon Karet

Kompon karet dibuat melalui pencampuran karet dengan bahan kimia dalam mesin giling terbuka skala laboratorium berkapasitas 1000 *g/batch* merek Berstorf buatan Jerman. Pembuatan kompon karet ini mengacu pada standar ASTM 3182 dengan tahapan pencampuran sesuai dengan Tabel 2. Karet alam dimastikasi hingga viskositas turun sehingga lebih mudah bercampur dengan bahan kimia. Karet alam yang telah dimastikasi menjadi lebih lunak ditandai dengan wujudnya yang menjadi plastis. Selanjutnya bahan kimia kompon karet ditambahkan dalam karet alam dengan urutan ZnO, asam stearat, CB N990, MBTS dan terakhir belerang. Setelah seluruh bahan kimia kompon karet selesai ditambahkan, maka karet selanjutnya digiling dan dihomogenkan (*remilling and blending*).

Tabel 1. Formula bahan kompon karet alam

Kode Sampel	Komposisi Bahan					
	SIR 20	ZnO (phr)	Asam stearat (phr)	Sulfur (phr)	MBTS (phr)	CB N990 (phr)
B00	100	5	2	2,90	1,35	0
B15	100	5	2	2,90	1,35	15
B30	100	5	2	2,90	1,35	30
B50	100	5	2	2,90	1,35	50

Keterangan : phr (*parts per hundred rubber*) adalah bagian per seratus karet

Tabel 2. Prosedur pencampuran bahan kompon NR

Urutan Proses	Proses atau Bahan	Waktu (menit)
1.	Mastikasi SIR 20	5
2.	ZnO	1
3.	Asam Stearat	1
4.	MBTS	1
5.	Sulfur	1
6.	CB N990	2 – 5
7.	Giling homogenisasi	2

Pengujian Karakteristik Vulkanisasi

Karakteristik vulkanisasi kompon karet ditentukan berdasarkan metode standar ASTM D5289-12 pada suhu 150°C menggunakan *moving die rheometer* Alfa 2000 (Alfa Technologies, Akron, USA). Pada pengujian ini diperoleh data karakteristik pematangan kompon karet, diantaranya modulus torsi maksimum (M_H) dan minimum (M_L), selisih modulus torsi maksimum dan minimum ($M_H - M_L$), waktu vulkanisasi optimum (t_{90}) dan waktu *scorch* (ts_2). Nilai waktu vulkanisasi optimum selanjutnya digunakan untuk proses pencetakan kompon karet menjadi vulkanisat sampel uji. Proses pencetakan dilakukan pada mesin tekan hidrolik merek KMC buatan Jepang.

Pengujian Sifat Dinamik

Pengujian sifat dinamik dan peredaman getaran dari kompon karet alam dilakukan dengan mode sebelum pematangan (*before curing*) menggunakan alat *Rubber Process Analyser* (RPA elite, TA instrument) sesuai dengan metode Gao *et al.*^[18]. Sampel kompon karet alam dipotong, lalu hasil potongan kompon karet ditimbang sekitar 6,0 g. Setelah itu, kompon karet ditempatkan ke dalam ruang cetakan pada alat RPA. Pemvariasi frekuensi (*frequency sweep*) dilakukan pada 0,05 – 30,3 Hz dengan amplitudo regangan konstan sebesar 0,5° dan pada suhu 90°C. Nilai modulus geser kompleks yang dihasilkan dari pengujian RPA digunakan untuk memprediksi pemenuhan nilai modulus geser sesuai persyaratan EN 15129.

Pengujian Sifat Kestabilan Termal

Karakterisasi sifat kestabilan termal dari sampel vulkanisat NR ditentukan menggunakan TGA sesuai dengan metode Yunus *et al.*^[19]. Pengujian TGA dilakukan pada sampel vulkanisat NR (9-10 mg) menggunakan cawan *crucible* aluminium (Al) yang dialirkan gas nitrogen. Kisaran suhu yang diuji adalah 0–550°C dengan menggunakan mode pemanasan dan laju 10 °C/menit.

Pengujian Ketahanan Pengusangan terhadap Panas

Pengujian ketahanan pengusangan terhadap panas pada sampel vulkanisat karet alam dilakukan sesuai dengan metode standar ISO 188 metode A pada kondisi suhu pengusangan sebesar 70°C selama 7 hari. Nilai perubahan kuat tarik dan perpanjangan putus dari pengujian pengusangan ini digunakan untuk menentukan pemenuhan pada persyaratan sesuai dengan ISO 4632-1 dan EN 15129.

Hasil dan Diskusi

Karakteristik Sifat Pematangan Kompon Karet

Karakteristik sifat pematangan kompon karet ditentukan dengan alat *rheometer*. Pada pengujian ini diperoleh informasi tentang M_H , M_L , ($M_H - M_L$), t_{90} , dan ts_2 . Waktu pematangan optimum dan waktu *scorch* merupakan data penting untuk mengetahui pemrosesan kompon karet menjadi barang jadi karet. Berdasarkan hasil pengujian sesuai Tabel 3 bahwa karakteristik sifat pematangan kompon karet alam tanpa bahan pengisi dan mengandung bahan pengisi CB N990 (Modulus torsi maksimum, modulus torsi minimum, selisih modulus torsi maksimum dengan minimum, waktu pematangan optimum dan waktu *scorch*) menunjukkan pengaruh yang cukup nyata akibat dari penambahan CB N990. Peningkatan jumlah CB N900 pada kompon karet alam menyebabkan peningkatan M_H , M_L , dan ($M_H - M_L$).

Selain itu, perlakuan penambahan CB juga menyebabkan t_{90} dan ts_2 menjadi lebih cepat. M_H merepresentasikan ikatan silang maksimum yang terbentuk selama vulkanisasi^[7]. M_L merupakan indikator viskositas kompon serta memberikan informasi terkait kemampuan proses dari kompon^[20]. ($M_H - M_L$) atau delta torsi secara tidak langsung terkait dengan kerapatan ikatan silang total dari sebuah kompon karet^[7]. Tabel 3 menunjukkan bahwa delta torsi semakin meningkat sejalan dengan peningkatan jumlah bahan pengisi CB N990.

Tabel 3. Karakteristik pematangan kompon NR pada berbagai jumlah CB

Karakteristik Pematangan Kompon	Kode Sampel			
	B00	B15	B30	B50
M_H , dNm	6,81	8,16	9,77	10.62
M_L , dNm	0,33	0,74	0,79	0.94
$M_H - M_L$, dNm	6,48	7,42	8,98	9.68
t_{s2} , menit:detik	6:01	5:15	4:35	4:16
t_{90} , menit:detik	11:02	11:20	10:23	10:15

Peningkatan jumlah bahan pengisi CB N990 mengakibatkan peningkatan interaksi antara karet dengan bahan pengisi sehingga menyumbang pembentukan ikatan silang, yang ditunjukkan dengan kenaikan nilai delta torsi kompon karet alam.

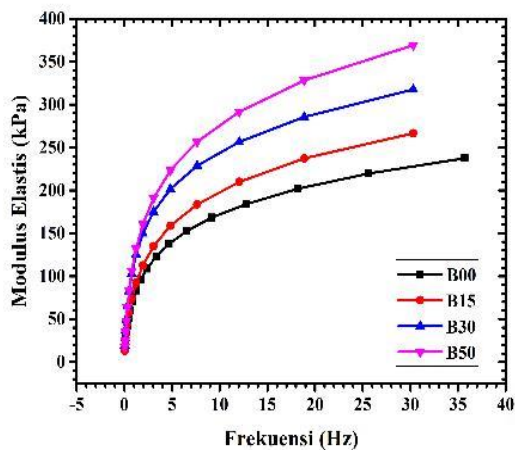
Karakteristik Sifat Dinamik

Bahan viskoelastik merupakan suatu bahan yang memiliki karakteristik gabungan sifat viskos dan sifat elastis. Perilaku viskoelastik terjadi pada material karet, sehingga material karet dapat dikategorikan sebagai bahan viskoelastik. Perilaku viskoelastisitas material karet dapat ditentukan melalui pengujian sifat dinamik bahan dan bergantung pada frekuensi regangan, amplitudo regangan, dan suhu^[5]. Sifat viskoelastik material karet dapat ditunjukkan dengan nilai histeresis melalui pengukuran sifat dinamis^{[4],[10]}. Tangen delta atau faktor kehilangan (*loss factor*) merupakan parameter untuk mengukur fenomena histeresis yang menunjukkan kapasitas pelepasan energi yang dimiliki material viskoelastik pada saat dikenakan gerak bolak-balik. Kapasitas pelepasan energi ini berhubungan dengan kapasitas peredaman getaran mekanik pada material viskoelastik. Semakin tinggi nilai tangen delta dari suatu material menunjukkan kapasitas peredaman getaran yang semakin tinggi. Nilai tangen delta dapat diperoleh dari rasio antara modulus viskos dengan modulus elastis.

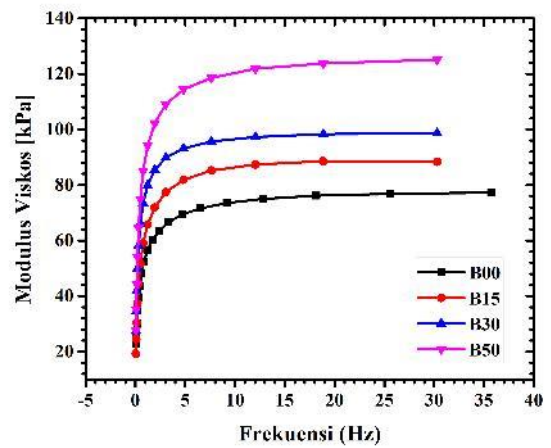
Pada penelitian ini, pengujian sifat dinamik kompon karet alam tanpa bahan pengisi dan menggunakan bahan pengisi CB N990 ditentukan dengan menggunakan alat *Rubber Process Analyser* (RPA). RPA merupakan alat pengujian dinamik material yang memiliki

prinsip seperti *rheometer* geseran rotasi dengan regangan terkontrol. Sifat dinamik dari kompon karet alam tersebut ditunjukkan dari profil kurva hubungan antara modulus elastis, modulus viskos, dan modulus geser kompleks dengan frekuensi. Sedangkan sifat peredaman getaran dari kompon karet alam ditunjukkan dari profil kurva hubungan tangen delta dengan frekuensi. Berdasarkan pengujian sifat dinamik menggunakan RPA pada kondisi pengaturan suhu 90 °C yang ditunjukkan pada Gambar 1 diperoleh informasi bahwa kompon karet alam tanpa bahan pengisi dan menggunakan bahan pengisi CB N990 menunjukkan kesamaan profil kurva hubungan sifat dinamik dengan frekuensi (modulus elastis, modulus viskos, modulus geser kompleks, dan tangen delta).

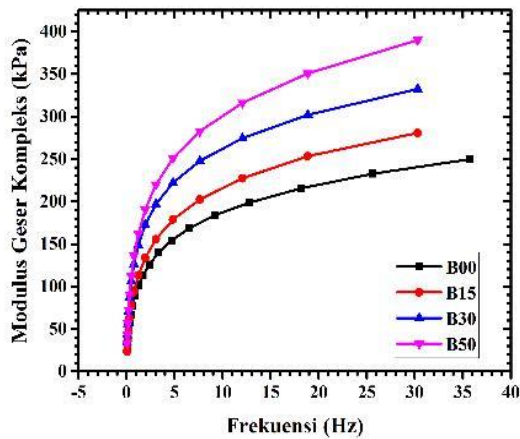
Pada kompon karet alam tanpa bahan pengisi (kode B00) menunjukkan pergeseran profil kurva modulus elastis (Gambar 1a), modulus viskos (Gambar 1b), dan modulus geser kompleks (Gambar 1c) yang cukup nyata menuju nilai yang lebih rendah mulai pada frekuensi 0,1 Hz. Adanya bahan pengisi CB N990 pada kompon karet alam mengakibatkan peningkatan nilai modulus elastis, viskos, dan geser kompleks pada berbagai variasi frekuensi dan peningkatannya mencapai 65% pada vulkanisat mengandung 50 phr relatif terhadap nilai sifat dinamik kompon NR tanpa bahan pengisi. Pada kompon NR mengandung 30 dan 50 phr CB N990 menghasilkan nilai modulus geser kompleks lebih besar dari 300 kPa (0,3 MPa) pada frekuensi diatas 18 Hz sehingga diprediksi kompon karet ini berpotensi besar dapat memenuhi nilai modulus geser sesuai persyaratan EN 15129.



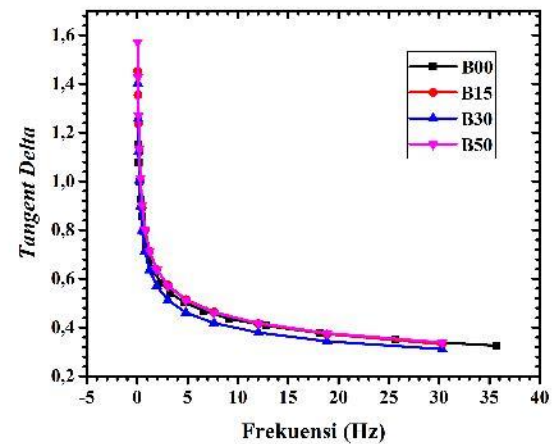
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 1. Kurva sifat dinamik terhadap variasi frekuensi dari kompon NR pada berbagai variasi komposisi CB N990, (a) modulus elastis, (b) modulus viskos, (c) modulus geser kompleks, dan (d) tangen delta

Hal ini menunjukkan bahwa terjadi interaksi bahan pengisi CB N990 dengan dengan matriks karet alam sehingga dapat mempengaruhi sifat dinamik vulkanisat yang cukup nyata. Sedangkan nilai tangen delta dari kompon karet alam tanpa bahan pengisi dan menggunakan bahan pengisi CB N990 menunjukkan perbedaan yang tidak berbeda nyata (Gambar 1d). Dengan demikian berdasarkan kurva hubungan tangen delta terhadap frekuensi pada pengujian RPA, dapat diperoleh informasi bahwa kompon karet alam tanpa bahan pengisi dan menggunakan bahan pengisi CB N990 menghasilkan kapasitas sifat

peredaman getaran yang relatif sama. Namun, sebagian persyaratan pada material sebagai peredam getaran, nilai modulus geser kompleks pada vulkanisat karet yang lebih tinggi memiliki potensi yang lebih besar untuk digunakan sebagai produk karet peredam getaran.

Sifat Kestabilan Termal

Hasil pengujian sifat kestabilan termal dari vulkanisat karet tanpa bahan pengisi dan menggunakan bahan pengisi CB N990 ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 2. Hasil

pengujian tersebut memberikan informasi mengenai degradasi atau penguraian vulkanisat karet sampai suhu 550 °C menggunakan alat TGA. Gambar 2 (a) menunjukkan kurva *thermal gravimetric* (TG) dan *differential thermal gravimetric* (DTG) dari 1 (satu) vulkanisat dan Gambar 2 (b) menunjukkan gabungan kurva TG dari 4 (empat) sampel vulkanisat. Berdasarkan kurva TG, tahapan penguraian (dekomposisi) vulkanisat karet terjadi pada rentang suhu 250 sampai dengan 300°C dan pada rentang suhu 300 sampai dengan 470 °C. Suhu sebelum mulai terjadinya penguraian vulkanisat karet (suhu sebelum T_{onset}) menunjukkan sifat kestabilan termal dari vulkanisat karet. Hasil pengujian TGA sesuai Tabel 4 menunjukkan peningkatan jumlah CB N990 didalam vulkanisat NR dapat menyebabkan meningkatkan sifat kestabilan termal, walaupun nilai peningkatannya relatif kecil. Vulkanisat NR tanpa bahan pengisi stabil terhadap panas hingga 353 °C, sedangkan vulkanisat NR mengandung 15, 30, dan 50 phr CB N990 berturut-turut stabil terhadap panas hingga 348,1 °C, 348 °C, dan 349 °C. Nilai suhu pada T_{onset} pada vulkanisat NR mengandung 50 phr CB N990 lebih besar dari pada nilai T_{onset} dari vulkanisat NR yang mengandung 15 dan 30 phr CB N990. Sedangkan vulkanisat tanpa bahan pengisi CB N990 menunjukkan nilai suhu pada T_{onset} lebih tinggi dibandingkan nilai T_{onset} pada vulkanisat NR dengan bahan pengisi CB N990. Hal ini menunjukkan bahwa vulkanisat NR tanpa bahan pengisi memiliki sifat kestabilan termal yang lebih baik dari pada vulkanisat NR yang mengandung CB N990.

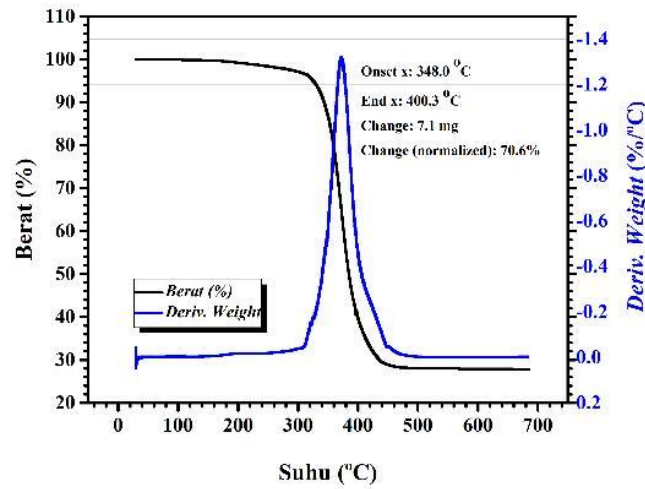
Fenomena penurunan berat dari kurva TG sesuai dengan Gambar 2 merupakan proses dekomposisi bahan. Sesuai dengan Gambar 2, dekomposisi yang terjadi pada rentang suhu 250 sampai dengan 300°C dikaitkan dengan

penguraian bahan minyak (*oil*) yang terkandung didalam sampel vulkanisat dan penurunan berat dari kurva TG (Gambar 2a dan 2b) tersebut nampak tidak terlihat jelas yang menunjukkan komposisi bahan minyak sangat kecil. Sementara itu, dekomposisi sampel vulkanisat yang terjadi pada rentang suhu 300 sampai dengan 470°C dikaitkan dengan degradasi vulkanisat karet melalui pemutusan ikatan silang dan rantai molekul karet. Penurunan fraksi berat dari kurva TG pada rentang suhu 300 sampai dengan 470°C sangat besar. Selanjutnya pada suhu 550°C sesuai dengan Tabel 4 diperoleh informasi bahwa terbentuk residu yang dikaitkan dengan bahan pengisi CB yang terkandung dalam sampel.

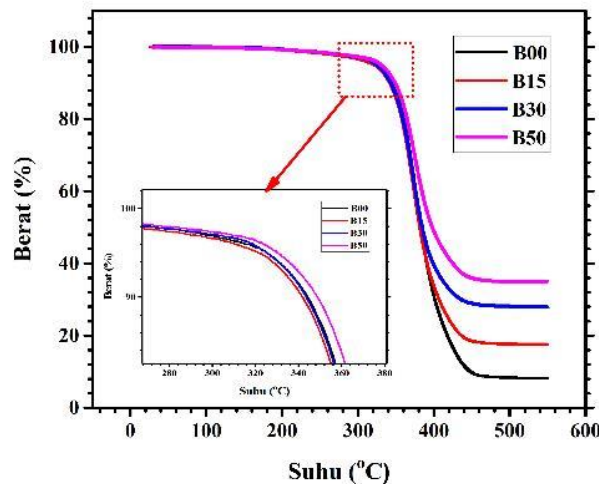
Berdasarkan hasil pengujian TGA yang ditunjukkan pada kurva TG sesuai dengan Gambar 2 (b), profil kurva TG antara sampel vulkanisat tanpa bahan pengisi dan menggunakan bahan pengisi relatif sama. Suhu mulai terdegradasi dan suhu akhir degradasi dari vulkanisat tanpa bahan pengisi (kode B00) lebih tinggi dibandingkan dengan vulkanisat yang mengandung bahan pengisi CB N990. Hal ini menunjukkan vulkanisat tanpa bahan pengisi (kode B00) memiliki sifat kestabilan termal yang lebih baik. Adanya bahan pengisi CB N990 pada vulkanisat karet dapat menyebabkan penundaan terbentuknya suhu akhir degradasi. Selanjutnya, peningkatan kandungan bahan pengisi CB N990 menyebabkan jumlah residu pada suhu 550°C semakin meningkat, dari 17,6% sampai dengan 35%. Oleh karena itu, sesuai dengan hasil pengujian sifat termal dengan alat TGA maka formula kompon karet mengandung bahan pengisi CB N990 memiliki sifat ketahanan termal yang cukup baik disebabkan pengaruh formula dasar (kode B00) yang digunakan.

Tabel 4. Suhu degradasi termal vulkanisat NR pada berbagai variasi komposisi CB N990

Kode Sampel	T_{onset} (°C)	T_{end} (°C)	Residu pada 550 °C (%)
B00	353,0	409,3	8,3
B15	348,1	404,1	17,6
B30	348,0	400,3	28,0
B50	349,6	406,8	35,0



(a)



(b)

Gambar 2. Kurva TGA dari vulkanisat NR, (a) pada 1 sampel (b) pada gabungan 4 sampel dengan berbagai variasi jumlah CB N990

Dengan demikian untuk mendapatkan formula kompon karet dengan biaya yang lebih hemat maka vulkanisat yang mengandung CB N990 sebanyak 50 phr (kode B50) diprediksi memiliki sifat kestabilan termal yang cukup baik sehingga dapat digunakan sebagai formula kompon karet untuk aplikasi peredam getaran.

Sifat ketahanan panas

Sifat ketahanan panas pada vulkanisat karet alam tanpa bahan pengisi dan menggunakan bahan pengisi CB N990 ditunjukkan pada Tabel 5. Berdasarkan hasil pengujian sifat ketahanan panas sesuai Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai ketahanan pengusangan yang ditunjukkan dari

penurunan nilai kuat tarik dan perpanjangan putus pada suhu pengusangan 70°C selama 7 hari kurang dari 20%. Sesuai dengan persyaratan ISO 4632-1 bahwa vulkanisat karet memiliki sifat ketahanan terhadap panas yang baik apabila memiliki nilai penurunan kuat tarik tidak lebih dari $\pm 30\%$ dan nilai penurunan perpanjangan putus tidak lebih dari -50%. Berdasarkan hasil pengujian sifat pengusangan terhadap panas sesuai Tabel 5 menunjukkan bahwa vulkanisat NR mengandung CB N990 memiliki sifat ketahanan terhadap panas yang baik karena telah memenuhi persyaratan sesuai ISO 4632-1.

Tabel 5. Sifat ketahanan panas dari vulkanisat NR pada berbagai variasi komposisi CB N990

Pengujian	Kode Sampel				ISO 4632-1
	B00	B15	B30	B50	
Pengusangan terhadap panas (70°C selama 7 hari)					
- Perubahan kuat tarik (%)	+6,20	-8,79	-8,89	-15,8	Maks. ±30%
- Perubahan perpanjangan putus (%)	-9,40	-14,90	-15,90	-16,80	Maks -50%

Sifat ketahanan terhadap panas dari vulkanisat karet sangat dipengaruhi oleh sistem vulkanisasi belerang yang digunakan dalam pembuatan kompon karet^{[21],[22]}. Rasio bahan sulfur terhadap bahan pencepat menentukan jenis sistem vulkanisasi belerang yang terbentuk pada vulkanisat dan berhubungan dengan pembentukan jumlah dan jenis ikatan silang pada rantai molekul karet^{[23],[24]}. Pada penelitian ini, kompon karet tanpa bahan pengisi (kode B00) dan menggunakan bahan pengisi CB N990 (kode B15, B30, dan B50) menggunakan rasio sulfur terhadap MBTS sebesar 2,15. Rasio ini termasuk dalam kelompok sistem vulkanisasi belerang jenis konvensional. Hasil pengujian pengusangan tersebut menunjukkan bahwa degradasi termal pada suhu 70°C selama 7 hari pada vulkanisat yang ditunjukkan dengan penurunan nilai kuat tarik dan perpanjangan putus relatif kecil. Degradasi termal pada vulkanisat karet alam ini berkaitan dengan pemutusan ikatan antar atom yang terbentuk, termasuk pemutusan ikatan silang pada vulkanisat karet (ikatan silang monosulfida, disulfida, dan polisulfida). Ikatan polisulfida memiliki kekuatan ikatan kurang dari 262 kJ/mol, sedang ikatan monosulfida memiliki kekuatan ikatan sebesar 280 kJ/mol^[25]. Penurunan sifat kuat tarik dan perpanjangan putus akibat pengusangan panas secara mikro disebabkan terjadinya pemutusan ikatan silang pada vulkanisat karet alam.

Material karet sebagai peredam getaran untuk rumah tahan gempa memiliki persyaratan nilai modulus geser $0,3 \leq x \leq 1,5$ MPa dan nilai ketahanan panas yang ditunjukkan dengan nilai perubahan kuat tarik kurang dari ± 15%, dan nilai perubahan perpanjangan putus lebih kecil dari ± 25% sesuai dengan persyaratan EN

15129. Berdasarkan hasil pengujian sifat dinamik dengan alat RPA dan ketahanan panas pada suhu 70°C selama 7 hari dapat ditunjukkan bahwa formula kompon karet alam mengandung 30 phr CB N990 memiliki nilai modulus geser kompleks, perubahan kuat tarik dan perpanjangan putus dari pengujian pengusangan terhadap panas telah memenuhi persyaratan EN 15129. Hal ini menunjukkan bahwa formula kompon karet alam mengandung 30 phr CB N990 berpotensi dapat digunakan sebagai material karet peredam getaran untuk rumah tahan gempa.

Kesimpulan

Penambahan CB N990 pada kompon NR dapat meningkatkan nilai modulus geser kompleks dan peningkatannya mencapai 65% dihasilkan dari kompon NR yang mengandung CB N990 sebanyak 50 phr. Hasil pengujian TGA menunjukkan bahwa sifat kestabilan termal dari vulkanisat NR tanpa bahan pengisi lebih baik dibandingkan vulkanisat NR yang mengandung CB N990. Vulkanisat NR tanpa bahan pengisi stabil terhadap panas hingga 353°C, sedangkan vulkanisat NR mengandung 15, 30, dan 50 phr CB N990 berturut-turut stabil terhadap panas hingga 348,1°C, 348°C, dan 349°C. Selain itu, penurunan nilai kuat tarik dan perpanjangan putus kurang dari 20% dari hasil pengujian ketahanan panas pada suhu 70°C selama 7 hari menunjukkan bahwa penambahan CB N990 pada kompon NR juga menghasilkan sifat ketahanan panas yang baik, telah memenuhi persyaratan sesuai ISO 4632-1. Formula kompon NR mengandung 30 phr CB N990 dengan rasio sulfur terhadap pemercepat sebesar 2,15 menunjukkan sifat dinamik dan ketahanan terhadap panas yang baik sesuai

dengan persyaratan EN 15129 sehingga berpotensi dapat digunakan sebagai material peredam getaran untuk rumah tahan gempa.

Ucapan Terima Kasih

Seluruh penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi-Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian Skema Penelitian Disertasi Doktor 2022 dengan kontrak Nomor : 082/E5/PG.02.00.PT/2022 pada tanggal 10 Mei 2022. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada PT Kemenangan atas kontribusinya dalam peralatan pengujian selama pelaksanaan penelitian.

Daftar Pustaka

- Maciejewska, M. & Sowińska, A., Influence of fillers and ionic liquids on the crosslinking and performance of natural rubber biocomposites. *Polymers (Basel)*, **13(10)**: (2021).
- Marhoon, I. I., Mechanical And Physical Properties Of Polyurethane Composites Reinforced With Carbon Black N990 Particles. *Int. J. Jof Sci. Technol. Res.*, **6(08)**: 225–228 (2017).
- Hujare, P. P. & Sahasrabudhe, A. D., Experimental Investigation of Damping Performance of Viscoelastic Material Using Constrained Layer Damping Treatment. *Procedia Mater. Sci.*, **5**: 726–733 (2014).
- Halladay, B. J. R. & Jaglowski, K. T., Sources of hysteresis in rubber compounds Technical. 13–17 (2017).
- Hentschke, R., The Payne effect revisited. **11(4)**: 278–292 (2017).
- Le Cam, J. B., Energy storage due to strain-induced crystallization in natural rubber: The physical origin of the mechanical hysteresis. *Polymer (Guildf)*, **127**: 166–173 (2017).
- Shi, G., Wang, W., Lu, H., Wang, G., Yang, F. & Rui, X., Study of crosslink structure and dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomer: Effect of vulcanization system. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **30(8)**: 1189–1199 (2019).
- Su, C., Zhao, C., Xu, L. & Zhang, C., Effects of chemical structure of phenolic resin on damping properties of acrylate rubber-based blends. *J. Macromol. Sci. Part B Phys.*, **54(2)**: 177–189 (2015).
- Lei, T., Zhang, Y. W., Kuang, D. L. & Yang, Y. R., Preparation and properties of rubber blends for high-damping-isolation bearings. *Polymers (Basel)*, **11(8)**: (2019).
- Abedi Koupai, S., Bakhshi, A. & Valadoust Tabrizi, V., Experimental investigation on effects of elastomer components on dynamic and mechanical properties in seismic isolator compounds. *Constr. Build. Mater.*, **135**: 267–278 (2017).
- Mohamad, N., Yaakub, J., Ab Maulod, H. E., Jeefferie, A. R., Yuhazri, M. Y., Lau, K. T., Ahsan, Q., *et al.*, Vibrational damping behaviors of graphene nanoplatelets reinforced NR/EPDM nanocomposites. *J. Mech. Eng. Sci.*, **11(4)**: 3274–3287 (2017).
- Wang, Y., Liao, L., Lin, H., Zhang, F., Zhong, J., Xu, K. & Peng, Z., Damping Properties of Natural rubber/ Epoxidized Natural Rubber composites with different fillers. **(January)**: (2018). doi:10.2991/ifeesm-17.2018.145
- Wang, J., Zhao, X., Wang, W., Geng, X., Zhang, L., Guo, B., Nishi, T., *et al.*, Significantly Improving Strength and Damping Performance of Nitrile Rubber via Incorporating Sliding Graft Copolymer. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **57(49)**: 16692–16700 (2018).
- Li, J. C., Zhang, H. S., Zhao, X. Y., Jiang, J. G., Wu, Y. X., Lu, Y. L., Zhang, L. Q., *et al.*, Development of high damping natural rubber/butyl rubber composites compatibilized by isobutylene-isoprene block copolymer for isolation bearing. *Express Polym. Lett.*, **13(8)**: 686–696 (2019).
- Murniati, R., Rahmayanti, H. D., Utami, F. D., Cifriadi, A., Iskandar, F. & Abdullah, M., Effects of magnetically modified

- natural zeolite addition on the crosslink density, mechanical, morphological, and damping properties of SIR 20 natural rubber reinforced with nanosilica compounds. *J. Polym. Res.*, **27(2)**: (2020).
16. Ma, R., Zhang, X., Liu, C. & Wu, W., Hindered phenol-mediated damping of polyacrylate rubber: Effect of hydrogen bonding strength on the damping properties. *J. Polym. Eng.*, **39(7)**: 642–652 (2019).
 17. Andriani, W., Cifriadi, A. & Puspitasari, S., Pengaruh Jenis Arang Hitam Terhadap Sifat Mekanik Komposit Karet Alam Pada Vulkanisat Elastomer Bantalan Jembatan. *J. Penelit. Karet*, **(October)**: 65–74 (2019). doi:10.22302/ppk.jpk.v37i1.606
 18. Gao, T., Xie, R., Zhang, L., Gui, H. & Huang, M., Use of Rubber Process Analyzer for Characterizing the Molecular Weight Parameters of Natural Rubber. *Int. J. Polym. Sci.*, **2015**: (2015).
 19. Yunus, N. A., Mazlan, S. A., Ubaidillah., Abdul Aziz, S. A., Shilan, S. T. & Abdul Wahab, N. A., Thermal stability and rheological properties of epoxidized natural rubber-based magnetorheological elastomer. *Int. J. Mol. Sci.*, **20(3)**: 1–19 (2019).
 20. Hiranobe, C. T., Ribeiro, G. D., Torres, G. B., Dos Reis, E. A. P., Cabrera, F. C., Job, A. E., Paim, L. L., *et al.*, Cross-linked density determination of natural rubber compounds by different analytical techniques. *Mater. Res.*, **24(S1)**: 1–9 (2021).
 21. Larpkasemsuk, A., Raksaksri, L., Chuayjuljit, S., Chaiwutthinan, P. & Boonmahitthisud, A., Effects of sulfur vulcanization system on cure characteristics, physical properties and thermal aging of epoxidized natural rubber. *J. Met. Mater. Miner.*, **29(1)**: 49–57 (2019).
 22. Alshabatat, N. & Abouel-Kasem, A., The Effects of Sulfur Content on the Mechanical Properties of Nitrile Butadiene Rubber with Different Aging Conditions. *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, **15(4)**: 387–393 (2021).
 23. Kim, D. Y., Park, J. W., Lee, D. Y. & Seo, K. H., Correlation between the crosslink characteristics and mechanical properties of natural rubber compound via accelerators and reinforcement. *Polymers (Basel)*, **12(9)**: 1–14 (2020).
 24. Han, S., Gu, B., Kim, S., Kim, S., Mun, D., Morita, K., Kim, D., *et al.*, Effect of sulfur variation on the vulcanizate structure of silica-filled styrene-butadiene rubber compounds with a sulfide–silane coupling agent. *Polymers (Basel)*, **12(12)**: 1–14 (2020).
 25. Hayeemasae, N. & Masa, A., Relationship between stress relaxation behavior and thermal stability of natural rubber vulcanizates. *Polimeros*, **30(2)**: (2020).