

PENGARUH BIOKARBON BERBASIS BIOMASSA DAN KARBON HITAM TIPE N990 TERHADAP SIFAT DINAMIK DAN PEREDAMAN GETARAN KOMPOSIT KARET ALAM

Effect of Biomass-Derived Biocarbon and N990 Carbon Black on the Dynamic and Vibration-Damping Properties of Natural Rubber Composites

Adi CIFRIADI¹, Purwantiningsih SUGITA², Tetty KEMALA², Siti NIKMATIN³
¹PT Riset Perkebunan Nusantara-Unit Riset Riset Bogor Getas, Jalan Salak No.1
Bogor, Indonesia

²Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

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

E-mail: acip9748@gmail.com

Diterima: November 2025/Disetujui: Maret 2026

Abstract

Natural rubber (NR)-based viscoelastic materials are frequently employed in vibration-damping applications, necessitating sufficient dynamic and damping properties. The dynamic and vibration-damping behaviour of NR composites filled with biomass-derived biocarbon and N990 carbon black was examined in this study in response to the effects of filler type and loading. Biocarbon fillers were synthesised from cassava starch and tamarind wood through pyrolysis, followed by ball milling. These fillers were then incorporated into NR at loadings of 15, 30, and 50 phr. Dynamic shear testing and a Rubber Process Analyser (RPA) were implemented to assess the composites' dynamic properties. The findings demonstrated that the dynamic performance of NR composites was highly influenced by both filler type and loading. Shear stiffness, effective shear modulus, and vibration-damping capacity were all improved by increasing filler loading. Compared with the empty NR compound, cassava-starch biocarbon improved the complex shear modulus by 159% at a loading of 50 phr, while tamarind-wood biocarbon increased it by 109%. N990 carbon black produced an increase of just 62.5%. The corresponding damping ratio at 50 phr rose from roughly 0.35% for N990 carbon black to 0.85% and 1.35% for cassava-starch and tamarind-wood biocarbon, respectively, demonstrating the biocarbon-filled composites' improved ability to dissipate energy. Additionally, dynamic research showed that while tangent delta

values decreased, increasing frequency raised the elastic modulus, viscous modulus, and complex shear modulus. These findings demonstrate that biomass-derived biocarbon fillers can provide more effective reinforcement and vibration-damping performance than N990 carbon black. Thus, biocarbon derived from tamarind wood and cassava starch has promising potential as a partial sustainable substitute for N990 carbon black in natural rubber-based vibration-damping materials..

Keywords: biocarbon; biomass; composite; vibration damping; viscoelastic

Abstrak

Material viskoelastik berbasis karet alam (NR) sering digunakan dalam aplikasi peredaman getaran, sehingga membutuhkan sifat dinamis dan peredaman yang memadai. Perilaku dinamis dan peredaman getaran komposit NR yang diisi dengan biokarbon turunan biomassa dan karbon hitam N990 diteliti dalam studi ini sebagai respons terhadap pengaruh jenis dan kadar pengisi. Pengisi biokarbon disintesis dari pati singkong dan kayu asam jawa melalui pirolisis, diikuti dengan penggilingan bola. Pengisi ini kemudian dimasukkan ke dalam NR dengan kadar 15, 30, dan 50 phr. Pengujian geser dinamis dan Analisis Proses Karet (RPA) diimplementasikan untuk menilai sifat dinamis komposit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja dinamis komposit NR sangat dipengaruhi oleh jenis dan kadar pengisi. Kekakuan geser,

modulus geser efektif, dan kapasitas peredaman getaran semuanya meningkat dengan peningkatan kadar pengisi. Dibandingkan dengan senyawa NR kosong, biokarbon pati singkong meningkatkan modulus geser kompleks sebesar 159% pada pemuatan 50 phr, sedangkan biokarbon kayu asam jawa meningkatkannya sebesar 109%. Karbon hitam N990 hanya menghasilkan peningkatan sebesar 62,5%. Rasio redaman yang sesuai pada 50 phr meningkat dari sekitar 0,35% untuk karbon hitam N990 menjadi 0,85% dan 1,35% untuk biokarbon pati singkong dan kayu asam jawa, masing-masing, menunjukkan peningkatan kemampuan komposit yang diisi biokarbon untuk menghilangkan energi. Selain itu, penelitian dinamis menunjukkan bahwa sementara nilai delta tangen menurun, peningkatan frekuensi meningkatkan modulus elastis, modulus viskos, dan modulus geser kompleks. Temuan ini menunjukkan bahwa pengisi biokarbon yang berasal dari biomassa dapat memberikan penguatan dan kinerja peredaman getaran yang lebih efektif daripada karbon hitam N990. Dengan demikian, biokarbon yang berasal dari kayu asam jawa dan pati singkong menunjukkan potensi sebagai alternatif parsial pengganti karbon hitam tipe N990 pada material peredam getaran berbasis karet alam yang lebih berkelanjutan.

Kata kunci : biokarbon; biomassa; komposit; peredam getaran; viskoelastik.

PENDAHULUAN

Penggunaan bahan kimia ramah lingkungan dan berkelanjutan semakin menjadi tuntutan bagi industri barang jadi karet di dunia. Karbon hitam merupakan salah satu bahan kimia karet yang banyak dilakukan penelitian untuk dicari penggantinya dari sumber bahan yang terbarukan dan ramah lingkungan. Penelitian tentang substitusi pengisi karbon hitam berbasis minyak bumi dengan pengisi terbarukan berbasis biomassa semakin penting dilakukan, khususnya penelitian tentang biokarbon berbasis biomassa sebagai pengisi komposit karet jenis partikulat. Biokarbon telah diujicobakan sebagai pengisi pada komposit karet (Yuvaraj, *et al.*, 2018; Otoikhian, *et al.*, 2019; Xue, *et al.*, 2019; Jiang, *et al.*, 2020; Lay, *et al.*, 2020; Peterson dan Kim, 2020; Chausali,

et al., 2021). Penelitian tentang biokarbon sebagai pengisi komposit karet untuk mensubstitusi karbon hitam semakin banyak dilakukan disebabkan bahan baku dari biomassa sangat melimpah, biaya pemrosesan cukup rendah, dan merupakan bahan yang bersifat dapat diperbarui kembali (Jiang, *et al.*, 2020). Oleh karena itu, biokarbon berbasis biomassa memiliki potensi yang besar untuk diaplikasikan sebagai pengisi pada komposit karet dan berpotensi dapat mensubstitusi karbon hitam komersial berbasis minyak bumi.

Salah satu tantangan utama dalam menggantikan karbon hitam adalah memastikan bahwa pengisi alternatif yang berasal dari biomassa tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga mampu mempertahankan atau bahkan meningkatkan sifat-sifat komposit karetnya, termasuk sifat peredaman getaran jika digunakan untuk pembuatan produk peredam getaran. Beberapa sifat penting sebagai material peredam getaran dari komposit karet yang baik dapat ditunjukkan dengan nilai yang sesuai dengan persyaratan produk peredam getaran, seperti: sifat peredaman getaran, dinamik, mekanik, ketahanan panas, dan stabilitas termal (Hujare dan Sahasrabudhe, 2014). NR telah diketahui memiliki sifat peredaman getaran yang lebih rendah dibandingkan dengan karet sintetik yang ditunjukkan dari nilai *tangent delta* (*loss atau damping factor*) paling kecil (Halladay dan Jaglowski, 2017). Rendahnya sifat peredaman getaran NR disebabkan sifat viskoelastik bahannya memiliki komponen bersifat elastis lebih besar dibandingkan komponen bersifat viskos pada struktur rantai molekulnya. Oleh karena itu, peningkatan sifat mekanik, dinamik, peredaman getaran, dan ketahanan panas pada komposit NR sebagai material peredam getaran jenis viskoelastik merupakan upaya diversifikasi dan pengembangan produk NR yang menarik untuk dikaji.

Perilaku viskoelastisitas karet dapat ditentukan melalui pengujian sifat dinamik bahan dan bergantung pada frekuensi regangan, amplitudo regangan, dan suhu (Hentschke, 2017). Sifat viskoelastik ini dapat ditentukan melalui pengujian dinamik dengan alat *Dynamic Mechanical Analysis* (DMA), *Rubber Process Analyzer* (RPA), ataupun menggunakan pengujian sifat geseran dinamik. Parameter sifat dinamik

material karet yang penting untuk menentukan sifat peredaman getaran adalah nilai histeresis. Nilai histeresis dapat ditentukan dari pengukuran *tangent delta*. Nilai histeresis pada vulkanisat karet dipengaruhi oleh jenis karet mentah dan bahan kimia karet yang digunakan (Halladay dan Jaglowski, 2017). Bahan kimia karet yang dapat mempengaruhi nilai histeresis diantaranya adalah jenis dan jumlah bahan pengisi (Halladay dan Jaglowski, 2017), bahan pemvulkanisasi (Le Cam, 2017; Shi, *et al.*, 2019), bahan pelunak (Halladay dan Jaglowski, 2017), dan bahan resin (Su, *et al.*, 2015).

Salah satu cara untuk meningkatkan sifat dinamik material karet adalah dengan menambahkan bahan kimia yang dapat menyebabkan peningkatan sifat kekakuan ataupun sifat viskoelastik dari vulkanisat karet. Beberapa penelitian untuk meningkatkan sifat dinamik pada NR atau karet sintesis telah dilakukan melalui perlakuan yang mengakibatkan perubahan sifat viskoelastik bahan, seperti: pengaruh jenis dan jumlah bahan pengisi, pengaruh bahan pelunak, pengaruh sistem vulkanisasi belerang, pengaruh pemaduan karet, ataupun pengaruh penambahan resin (Wang J, 1998; Koupai, *et al.*, 2017; Halladay dan Jaglowski, 2017; Mohamad, *et al.*, 2017; Wang Y, *et al.*, 2018; Lei, *et al.*, 2019; Li, *et al.*, 2019; Ma, *et al.*, 2019; Murniati, *et al.*, 2020).

Mekanisme peredaman getaran pada komposit karet tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik karet mentah atau polimer viskoelastik sebagai matriks tetapi juga dipengaruhi oleh redaman intrinsik pengisi, pergeseran batas (*the boundary sliding*) dari pengisi, pergeseran antarmuka (*the interfacial sliding*) antara matriks dan *filler*, dan pengaruh kerusakan sistem komposit (Chung, 2010; Geethamma, *et al.*, 2014; Li, *et al.*, 2019; Dacol dan Caetano, 2020). Jenis partikel, ukuran, bentuk, permukaan, dan fraksi volume pengisi juga dapat berkontribusi pada kapasitas redaman getaran sistem material komposit (Kroisová, 2010; Shuib dan Pickering, 2016; Koupai, *et al.*, 2017; Halladay dan Jaglowski, 2017; Wang Y, *et al.*, 2018; Murniati, *et al.*, 2020). Dengan demikian terdapat hubungan antara kapasitas sistem redaman getaran dengan struktur dan kandungan material komposit karet, khususnya pengisi.

Biokarbon dari bahan kayu telah banyak diujicobakan sebagai pengisi

komposit karet (Yuvaraj, *et al.*, 2018; Otoikhian, *et al.*, 2019; Xue, *et al.*, 2019; Jiang, *et al.*, 2020; Lay, *et al.*, 2020; Peterson dan Kim, 2020; Chausali, *et al.*, 2021). Beberapa karakteristik biokarbon yang mempengaruhi performa sebagai pengisi pada komposit karet diantaranya adalah: sifat kimia dan fisika bahan biokarbon. Sifat kimia dan fisika bahan biokarbon dipengaruhi oleh bahan baku biomassa yang digunakan dalam pembuatannya, suhu dan waktu pirolisis, teknik pirolisis, serta pengecilan ukuran partikel. Penelitian ini menggunakan pengisi biokarbon dari bahan pati singkong dan kayu asem untuk pembuatan komposit NR. Penelitian pengisi biokarbon dari bahan bukan kayu pada komposit NR, seperti bahan pati, masih sangat terbatas dan bahkan belum ada penelitian terkait hal ini. Selain itu, studi komprehensif yang membandingkan kinerja pengisi biokarbon dari bahan pati dan kayu asem dengan karbon hitam tipe N990 pada komposit NR terkait sifat dinamik dan peredaman getaran juga belum ada penelitian tentang kajian ini.

Oleh karena itu, perbandingan karakteristik pengisi biokarbon dari bahan pati singkong dengan pengisi biokarbon dari bahan kayu asem pada komposit NR sangat menarik untuk dipelajari.

Meskipun beberapa penelitian telah membahas penggunaan biochar atau biokarbon sebagai pengisi komposit karet, sebagian besar penelitian berfokus pada sifat mekanik dan kekuatan material. Khususnya, penelitian yang membandingkan biokarbon berbasis pati singkong dan kayu asem dengan karbon hitam tipe N990 masih sangat sedikit. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis dan jumlah pengisi biokarbon (pati singkong dan kayu asem) dibandingkan karbon hitam tipe N990 terhadap sifat dinamik dan peredaman getaran komposit karet alam.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknologi Karet, Unit Riset Bogor Getas, PT Riset Perkebunan Nusantara, Bogor, Jawa Barat. Penelitian dimulai dari September 2022 sampai dengan Mei 2023 dengan bahan dan metode dijelaskan sebagai berikut:

1. Bahan

Bahan yang digunakan untuk pembuatan komposit karet terdiri atas NR jenis *Standard Indonesian Rubber* (SIR) 20 sebagai *base elastomer*, bahan pengaktif berupa *zinc oxide* (ZnO) merek UN 3077, asam stearat merek *Aflux®52*, bahan pemercepat berupa *2-2'-dithiobenzothiazole* (MBTS), bahan pemvulkanisasi berupa belerang (sulfur) merek *Midas SP 325*, *trimethyl-dihydroquinoline* (TMQ), *N*-(1,3-dimethyl butyl)-*N'*-phenyl-*p*-

phenylenediamine (6 PPD), dan pengisi biokarbon dari bahan pati singkong (CP), pengisi biokarbon dari bahan kayu asem (CK), dan pengisi CB N990 (CB). Seluruh formulasi komposit NR menggunakan komposisi dasar yang sama, sedangkan variabel yang diteliti adalah jenis pengisi (CB, CP, dan CK) dan jumlah pengisi (15, 30, dan 50 phr). Rancangan formulasi komposit NR yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rancangan formulasi komposit karet alam (NR) dengan variasi jenis dan jumlah pengisi
Table 1. *Formulation design of natural rubber (NR) composites with different filler types and loadings*

Kode sampel	CBN990 (CB, phr)	biokarbon pati singkong (CP, phr)	biokarbon kayu asem (CK, phr)
CB15	15	-	-
CB30	30	-	-
CB50	50	-	-
CP15	-	15	-
CP30	-	30	-
CP50	-	50	-
CK15	-	-	15
CK30	-	-	30
CK50	-	-	50

Catatan: Seluruh formulasi menggunakan komposisi dasar yang sama, yaitu SIR 20 (100 phr), ZnO (5 phr), asam stearat (2 phr), TMQ (1,5 phr), 6PPD (1,5 phr), sulfur (2,90 phr), dan MBTS (1,35 phr). Variasi perlakuan hanya dilakukan pada jenis dan jumlah pengisi. *phr* (*parts per hundred rubber*) menunjukkan jumlah atau dosis bahan aditif yang ditambahkan dalam bagian per seratus karet

Note: The amount of these additives to be added is expressed in parts per hundred rubber (phr)

2. Pembuatan Komposit NR

Komposit NR dibuat melalui pencampuran NR dengan bahan kimia karet dalam mesin giling terbuka skala laboratorium berkapasitas 1000 g/batch. Pembuatan komposit karet mengacu pada standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D3182. Tahap awal NR dimastikasi hingga viskositas NR turun sehingga lebih mudah bercampur dengan bahan kimia karet. NR yang telah dimastikasi menjadi lebih lunak ditandai dengan wujudnya yang menjadi plastis. Selanjutnya bahan kimia kompon karet ditambahkan kedalam NR dengan urutan ZnO, asam stearat, MBTS, TMQ, 6 PPD, filler, dan terakhir belerang. Setelah seluruh bahan kimia komposit karet selesai ditambahkan, maka karet digiling dan dihomogenkan.

3. Pengujian sifat geseran dinamik

Pengujian sifat geseran dinamik vulkanisat dari kompon NR dilakukan

berdasarkan metode standar ISO 4664-1 dengan sampel uji berbentuk tipe geser 4 blok karet (*four-block lap shear type*), seperti yang disajikan pada Gambar 1, pada frekuensi 10 Hz dengan regangan 100% sebanyak 4 kali siklus pengujian.

Hasil yang diperoleh adalah berupa kurva hubungan *displacement* (mm) terhadap tenaga tarik (N) bentuk *loop*. Hasil data yang diperoleh kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (1), (2), dan (3) untuk menentukan sifat kekakuan geser (K_H), rasio peredaman ekuivalen (h_{eq}), dan modulus geser efektif (Koupai *et al.* 2017).

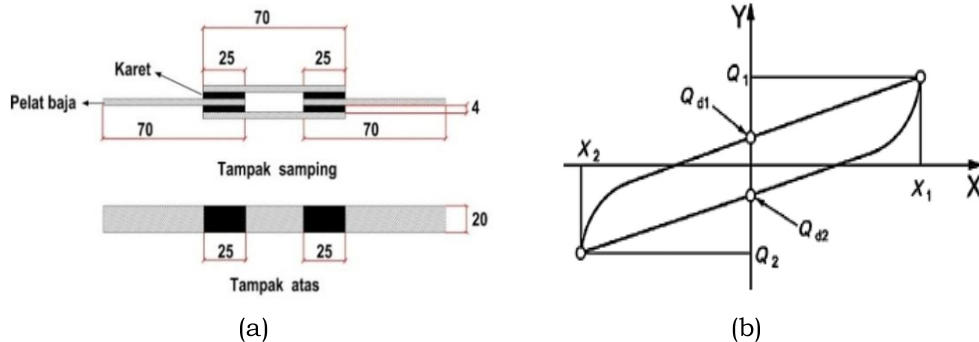
Keterangan: Q_1 adalah gaya geser maksimum, Q_2 adalah gaya geser minimum, X_1 adalah perpanjangan maksimum pada siklus ketiga, X_2 adalah perpanjangan minimum pada siklus ketiga. ΔW adalah luas area dibawah kurva histerisis *loop* ketiga, serta A , dan t , merupakan luas area karet dan tebal karet.

Secara teknis, data yang diperoleh dari pengujian sifat geseran dinamik menggunakan alat uji *universal testing machine* diplot sehingga dihasilkan kurva hubungan *displacement* (mm) terhadap tenaga tarik (N) bentuk *loop*. Plot data tersebut dilakukan secara komputerisasi menggunakan *software* OriginPro 2022. Selanjutnya dihitung luas area dibawah kurva histeresis *loop* menggunakan *software*

yang sama, OriginPro 2022.

4. Pengujian sifat dinamik menggunakan RPA

Pengujian sifat dinamik dan peredaman getaran dari kompon NR dilakukan dengan mode sebelum pematangan (*before curing*) menggunakan alat *Rubber Process Analyser* (RPA elite, TA instrument) sesuai prosedur berikut: sampel kompon NR dipotong, lalu hasil potongan



Gambar 1. Pengujian sifat geseran dinamik. (a) Bentuk spesimen sampel uji (- satuan dalam mm) (b) Bentuk kurva *loop* histeresis.

Figure 1. The dynamic shear propertiestesting. (a) Fourblock lap shear type specimen (- unit in mm)(b) typical shear hysteresis loop

kompon karet ditimbang 6,0 g. Selanjutnya kompon karet ditempatkan ke dalam ruang cetakan pada alat RPA. Pemvariasi frekuensi (*frequency sweep*) dilakukan pada 0,08 – 50

Hz dengan amplitudo regangan konstan sebesar 0,5° dan pada suhu 90 °C (Gao *et al.* 2015).

$$K_h = \frac{Q_1 - Q_2}{X_1 - X_2} \dots\dots\dots(1)$$

$$h_{eq} = \frac{2 \Delta W}{\pi K_h (X_1 - X_2)^2} \dots\dots\dots(2)$$

$$G_{eff} = \frac{K_h t_r}{A_r} \dots\dots\dots(3)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

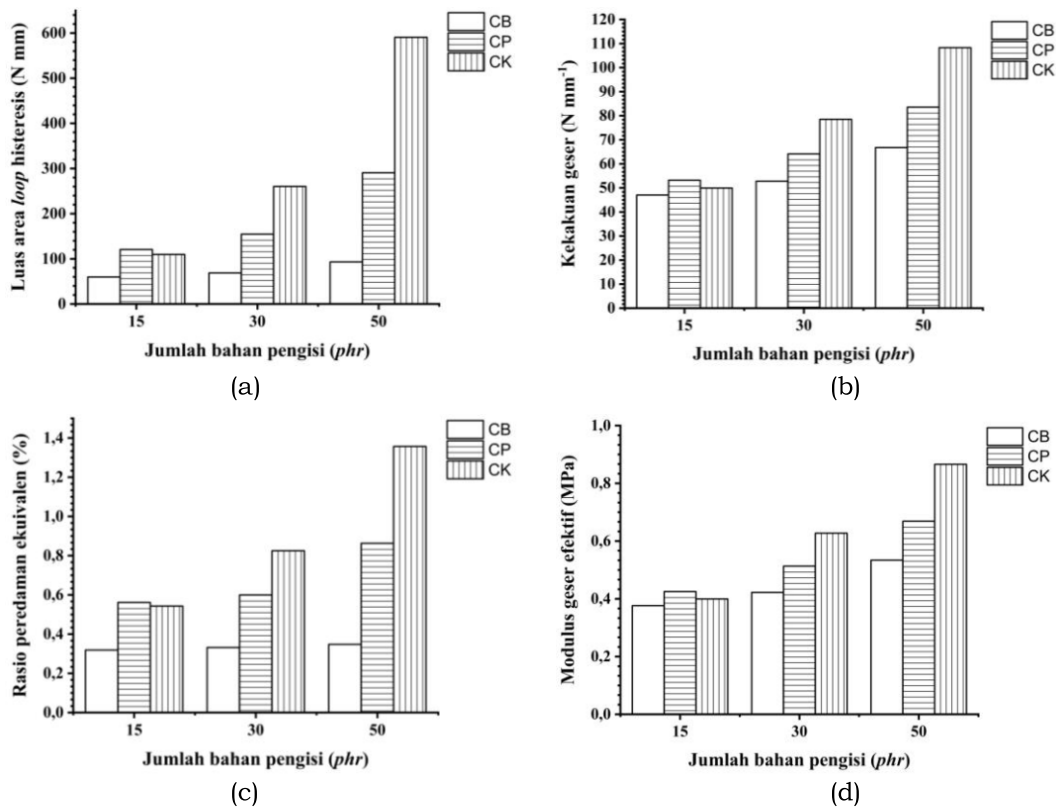
Karbon hitam komersial jenis karbon hitam tipe N990, biokarbon dari bahan pati singkong, dan biokarbon dari bahan kayu asem sebagai pengisi komposit NR dikaji pengaruhnya terhadap sifat geseran dinamik (kekakuan geser, rasio peredaman ekuivalen, dan modulus geser efektif) dengan pengujian modulus geser. Hasil uji sifat geseran dinamik dari komposit NR pengisi biokarbon dan karbon hitam tipe N990 ditunjukkan pada Gambar 2. Penambahan pengisi partikulat bertujuan

untuk meningkatkan sifat kekakuan komposit karet. Peningkatan sifat kekakuan diharapkan dapat meningkatkan performa komposit karet, khususnya modulus geser. Berdasarkan pengujian sifat geseran dinamik pada Gambar 2 ditunjukkan bahwa nilai luas area *loop* histeresis, kekakuan geser, rasio peredaman ekuivalen, dan modulus geser efektif dipengaruhi oleh jenis dan jumlah pengisi pada komposit NR. Komposit NR pengisi biokarbon dari bahan kayu asem memiliki nilai luas area *loop* histeresis, kekakuan geser, rasio peredaman ekuivalen, dan modulus geser efektif lebih

tinggi dibandingkan dengan nilai parameter tersebut pada komposit NR pengisi biokarbon dari bahan pati singkong dan karbon hitam tipe N990, pada semua variasi jumlah pengisi yang diujicobakan. Selain itu, komposit NR pengisi biokarbon dari bahan pati singkong memiliki nilai luas area *loop* histeresis, kekakuan geser, rasio peredaman ekuivalen, dan modulus geser efektif yang lebih tinggi dibandingkan komposit NR pengisi karbon hitam tipe N990. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan pengisi pada komposit NR dapat meningkatkan nilai kekakuan geser bahan (Gambar 2b) dan luas area *loop* histeresis (Gambar 2a), yang selanjutnya dapat mengakibatkan peningkatan sifat kapasitas peredaman getaran bahan

(Gambar 2c). Peningkatan sifat kekakuan komposit NR juga dapat menyebabkan peningkatan nilai modulus geser efektif sehingga perlakuan penambahan pengisi dapat meningkatkan performa komposit NR sebagai material peredam getaran jenis viskoelastik.

Fenomena peningkatan kapasitas peredaman getaran pada material viskoelastik akibat penambahan pengisi disebabkan perlakuan gerak dinamik yang dikenakan pada sampel komposit NR diredam oleh pengisi melalui penyerapan energi gerak tersebut menjadi energi panas yang timbul dari gesekan internal antara partikel pengisi. Peningkatan jumlah pengisi tidak hanya meningkatkan peluang terjadinya gesekan internal, tetapi juga



Gambar 2. Hubungan variasi jumlah pengisi terhadap sifat geseran dinamik komposit NR pengisi karbon hitam tipe N990, biokarbon dari bahan pati singkong dan kayu asem. (a) Luas area *loop* histeresis; (b) Kekakuan geser; (c) Rasio peredaman ekuivalen; dan (d) Modulus geser efektif.

Figure 2. The relationship of variation in the filler loading to the dynamic shear properties of NR composite filled with N990-type carbon black and biokarbon derived from cassava starch and tamarind wood. (a) the area enclosed by the hysteresis loop; (b) the shear stiffness; (c) the equivalent damping ratio; and (d) the effective shear modulus

meningkatkan interaksi filler-rubber, pembentukan filler network, serta disipasi energi pada daerah antarmuka pengisi-karet. Fenomena peredaman getaran merupakan suatu bentuk konversi energi mekanik menjadi bentuk energi lainnya akibat vibrasi pada bahan, seperti energi termal (Geethamma, *et al.*, 2014). Gesekan internal antara partikel atau molekul didalam bahan padatan yang mengalami vibrasi umumnya dianggap sebagai salah satu penyebab redaman getaran (Geethamma, *et al.*, 2014; Wang Y, *et al.*, 2018; Li, *et al.*, 2019; Dacol dan Caetano, 2020). Redaman getaran terjadi melalui disipasi energi mekanik pada saat gaya osilasi eksternal diterapkan pada material, yaitu transformasi energi mekanik menjadi bentuk energi lain seperti panas (Geethamma, *et al.*, 2014). Fenomena peredaman getaran ini telah dibuktikan dari hasil penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 2c bahwa komposit NR dengan pengisi sebanyak 50 phr memiliki nilai rasio peredaman ekuivalen lebih besar dibandingkan dengan komposit NR dengan jumlah pengisi lebih sedikit disebabkan peluang terjadinya gesekan antara partikel pengisi lebih besar.

Berdasarkan hasil penelitian pada Gambar 2c diperoleh fakta menarik bahwa nilai rasio peredaman ekuivalen pada komposit NR pengisi biokarbon dari bahan pati singkong dan kayu asem mengalami perubahan yang lebih besar dibandingkan dengan komposit pengisi karbon hitam tipe N990, akibat peningkatan jumlah pengisi yang ditambahkan pada komposit NR. Sebaliknya komposit NR pengisi karbon hitam tipe N990 menghasilkan perubahan nilai rasio peredaman ekuivalen lebih kecil sebagai akibat perlakuan peningkatan jumlah pengisi.

Rasio peredaman ekuivalen komposit NR pengisi biokarbon pati singkong (CP50) dan biokarbon kayu asem (CK50) sebesar sekitar 0,85% dan 1,35% pada jumlah pengisi 50 phr. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa rasio peredaman ekuivalen CP50 sekitar 2,4 kali lebih tinggi dibandingkan CB50, dan CK50 hampir 3,9 kali lebih tinggi dibandingkan CB50. Hasil ini menunjukkan bahwa, jika dibandingkan dengan karbon hitam tipe N990, biokarbon memiliki kemampuan disipasi energi yang lebih baik.

Jumlah partikel pengisi yang lebih besar, yang meningkatkan gesekan internal, dan mekanisme disipasi energi yang lebih kuat di antarmuka pengisi-karet diduga berperan dalam peningkatan kapasitas peredaman getaran. Dengan adanya pengisi, daerah antarmuka, juga dikenal sebagai *interphase*, dapat berubah selama pembebanan siklik. Akibatnya, sebagian energi mekanik terdisipasi menjadi energi panas. Interaksi antarpartikel pengisi dan kemungkinan munculnya jaringan pengisi, juga dapat meningkatkan histeresis material, meningkatkan kemampuan peredaman getaran. Hasil ini menunjukkan bahwa biokarbon dari pati singkong dan kayu asem lebih baik daripada karbon hitam tipe N990 dalam meningkatkan kemampuan peredaman getaran komposit NR.

Nilai kekakuan geser pada komposit NR meningkat seiring dengan jumlah pengisi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2b. Komposit NR yang mengandung biokarbon dari kayu asem menunjukkan nilai kekakuan geser tertinggi, diikuti oleh biokarbon dari pati singkong dan karbon hitam tipe N990. Dengan jumlah pengisi 50 phr, nilai kekakuan geser meningkat dari sekitar 70 N/mm pada CB50 menjadi sekitar 88 N/mm pada CP50 dan 108 N/mm pada CK50. Kekakuan geser yang lebih tinggi menunjukkan bahwa ada biokarbon yang lebih baik dalam membatasi mobilitas rantai molekul karet selama deformasi geser. Interaksi antara pengisi dan matriks karet, serta kemungkinan terbentuknya jaringan pengisi, juga dapat meningkatkan kemampuan material untuk menahan deformasi, yang menghasilkan nilai kekakuan geser yang lebih tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa biokarbon, dibandingkan dengan karbon hitam tipe N990, memiliki efektivitas penguatan yang lebih baik pada sistem komposit yang diteliti. Perbedaan nilai kekakuan geser antara CK, CP, dan CB menunjukkan bahwa ada perbedaan karakteristik fisikokimia pengisi yang mempengaruhi efektivitas penguatan komposit. Namun, mekanisme tersebut belum dapat dikonfirmasi secara langsung karena penelitian ini belum melakukan karakterisasi lebih lanjut seperti ukuran partikel, luas permukaan spesifik, morfologi permukaan, dan struktur kimia pengisi.

Sebagai material peredam getaran jenis viskoelastik, peningkatan kekakuan geser bahan dapat meningkatkan kinerja

komposit karet. Karena hubungan matematis antara kedua parameter tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (3), tren modulus geser efektif pada Gambar 2d menunjukkan pola yang serupa dengan kekakuan geser. Nilai modulus geser efektif meningkat seiring dengan jumlah pengisi yang digunakan untuk setiap jenis pengisi. Komposit NR yang mengandung biokarbon dari kayu asem memiliki nilai modulus geser efektif tertinggi. Biokarbon dari pati singkong dan karbon hitam tipe N990 masing-masing memiliki nilai modulus geser efektif yang lebih rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa biokarbon lebih baik daripada karbon hitam tipe N990 dalam meningkatkan resistensi material terhadap deformasi geser. Penggunaan biokarbon sebagai pengisi meningkatkan kapasitas peredaman getaran dan kekakuan dinamik komposit NR. Ini karena efek penguatan yang diberikan oleh pengisi meningkatkan modulus geser efektif dan membuat material menjadi lebih kaku dan lebih mampu mempertahankan bentuknya ketika menerima beban dinamik.

Pengujian sifat dinamik komposit NR dengan variasi jenis dan jumlah pengisi pada komposit NR juga ditentukan dengan menggunakan alat *Rubber Process Analyser* (RPA). RPA merupakan alat pengujian dinamik material yang memiliki prinsip seperti *rheometer* geseran rotasi dengan regangan terkontrol dan dapat digunakan untuk mengetahui sifat viskoelastik bahan. Hasil uji RPA dapat digunakan untuk memprediksi sifat dinamik bahan, khususnya sifat peredaman getaran yang ditunjukkan dari nilai *tangent delta*. Sifat dinamik dari komposit NR ditunjukkan dari profil kurva hubungan antara modulus elastis, modulus viskos, dan modulus geser kompleks dengan frekuensi. Sedangkan sifat peredaman getaran dari komposit NR ditunjukkan dari profil kurva hubungan *tangent delta* dengan frekuensi. Sifat viskoelastik dan peredaman getaran pada komposit NR pada berbagai jenis dan jumlah pengisi disajikan pada Gambar 3, 4, dan 5. Terdapat 3 (tiga) variasi jenis pengisi dan 3 (tiga) variasi jumlah pengisi yang diamati dan dikaji. Karbon hitam komersial tipe N990, biokarbon dari bahan pati singkong, dan biokarbon dari bahan kayu asem sebagai pengisi komposit NR dikaji pengaruhnya terhadap sifat dinamik dengan

pengujian RPA. Penelitian ini juga mengkaji sifat dinamik dari 3 (tiga) variasi jumlah pengisi pada komposit NR, yakni: 15, 30, dan 50 *phr*. Pengujian sifat dinamik menggunakan RPA dengan kondisi pengaturan suhu 90 °C ditunjukkan pada Gambar 3, 4, dan 5. Komposit NR dengan variasi jenis dan jumlah pengisi yang diujicobakan menunjukkan kesamaan profil kurva hubungan sifat dinamik dengan frekuensi (modulus elastis, modulus viskos, modulus geser kompleks, dan *tangent delta*). Pengujian RPA dilakukan pemvariasian frekuensi (*frequency sweep*) pada 0,05 – 30,3 Hz dengan amplitudo regangan ditetapkan konstan sebesar 0,5°.

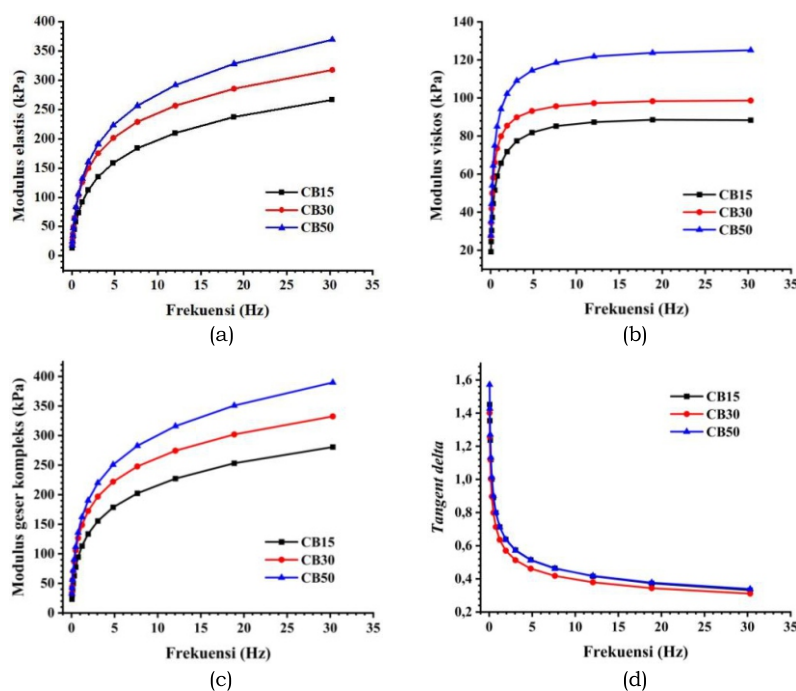
Hasil uji RPA menunjukkan bahwa nilai modulus elastis, modulus viskos, dan modulus geser kompleks mengalami peningkatan akibat perlakuan peningkatan frekuensi pada semua jenis dan jumlah pengisi yang terkandung pada komposit NR, sedangkan nilai *tangent delta* mengalami penurunan. Berdasarkan hasil uji tersebut dapat ditunjukkan bahwa penambahan pengisi pada komposit NR dan peningkatan frekuensi dapat meningkatkan komponen elastis dan viskos cukup besar pada material viskoelastik. Selain itu, hasil uji tersebut dapat ditunjukkan bahwa sifat peredaman getaran, yang dikorelasikan dengan nilai *tangent delta*, mengalami penurunan yang cukup besar akibat peningkatan frekuensi, sedangkan penambahan jumlah pengisi pada komposit NR menyebabkan perubahan nilai *tangent delta* tidak signifikan. Kurva hubungan sifat dinamik terhadap variasi frekuensi pada komposit NR pengisi karbon hitam tipe N990, biokarbon dari bahan pati singkong, dan biokarbon dari bahan kayu asem menunjukkan pergeseran profil kurva akibat peningkatan jumlah pengisi. Profil kurva modulus elastis (Gambar 3a), modulus viskos (Gambar 3b), dan modulus geser kompleks (Gambar 3c) pada komposit NR pengisi karbon hitam tipe N990 menghasilkan pergeseran yang cukup signifikan menuju nilai yang cukup tinggi pada frekuensi 0,079 Hz akibat peningkatan jumlah pengisi, sedangkan peningkatan jumlah pengisi pada komposit NR yang mengandung biokarbon dari bahan kayu asem menunjukkan pergeseran profil kurva yang cukup signifikan dari semua parameter tersebut menuju nilai yang cukup tinggi pada frekuensi 0,197 Hz. Selanjutnya komposit NR pengisi biokarbon dari bahan

pati singkong mengalami pergeseran profil kurva yang cukup signifikan pada semua parameter sifat dinamik menuju nilai yang cukup tinggi mulai pada frekuensi yang lebih rendah yakni 0,05 Hz. Hasil ini menunjukkan bahwa, dibandingkan dengan pengisi lainnya, biokarbon yang lebih tinggi dalam pati singkong memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap sifat viskoelastik komposit NR. Pergeseran kurva ke arah nilai modulus yang lebih tinggi menunjukkan bahwa pengisi berkontribusi lebih banyak dalam memperkuat matriks karet selain membatasi mobilitas rantai polimer selama deformasi dinamik. Jumlah pengisi yang lebih besar juga dapat meningkatkan interaksi antara partikel pengisi dan matriks karet, serta interaksi antara pengisi dan matriks karet. Akibatnya, energi yang diterima material selama pembebanan dinamik dapat disimpan dan didisipasikan dengan lebih baik. Pada komposit NR yang mengandung biokarbon, kondisi ini meningkatkan modulus elastis, viskositas,

dan modulus geser kompleks.

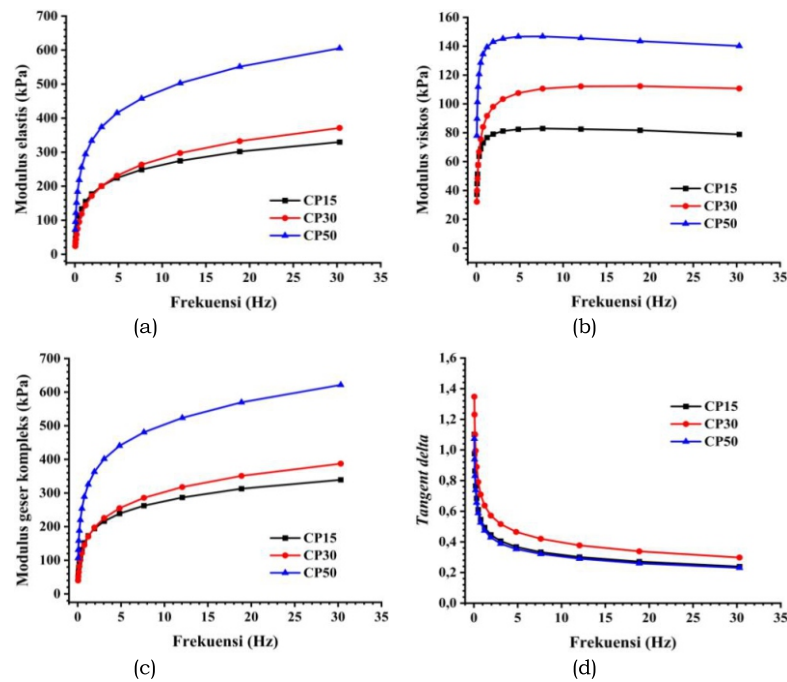
Sesuai hasil uji yang ditunjukkan Gambar 3 bahwa adanya pengisi karbon hitam tipe N990 sebanyak 50 *phr* pada komposit NR mengakibatkan peningkatan nilai modulus geser kompleks mencapai 62,5%, relatif terhadap nilai modulus geser kompleks kompon NR tanpa pengisi, sedangkan pada Gambar 4 ditunjukkan bahwa komposit NR pengisi biokarbon dari bahan pati singkong 50 *phr* mengalami peningkatan nilai modulus geser kompleks mencapai 159% dan kayu asem sebanyak 50 *phr* mengakibatkan peningkatan nilai modulus geser kompleks 109% (Gambar 5).

Nilai modulus geser kompleks pada komposit NR pengisi biokarbon dari bahan pati singkong lebih tinggi dibandingkan dengan komposit NR pengisi biokarbon dari bahan kayu asem dan karbon hitam tipe N990. Pengisi meningkatkan kontribusi komponen elastis dan viskos pada sistem komposit NR, seperti yang ditunjukkan oleh fenomena peningkatan nilai modulus geser



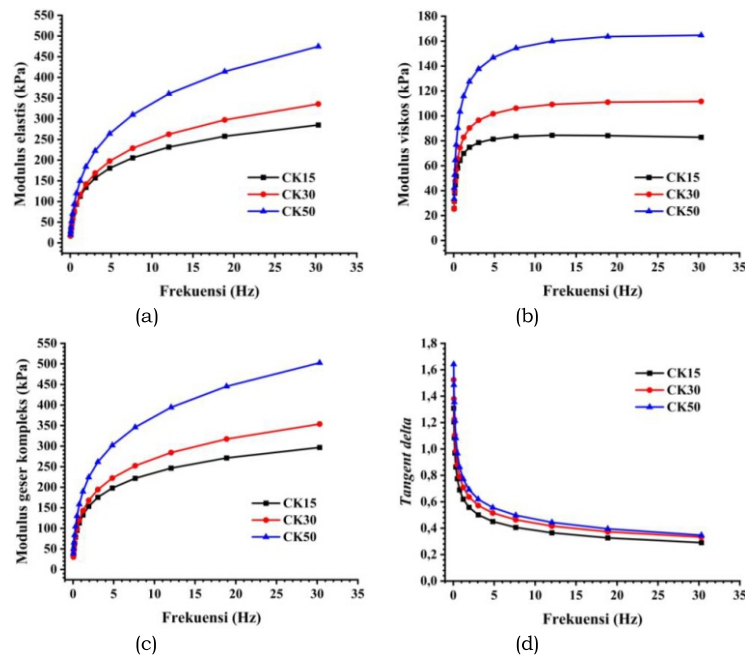
Gambar 3. Kurva sifat dinamik terhadap variasi frekuensi dari komposit NR pengisi karbon hitam tipe N990. (a) Modulus elastis; (b) Modulus viskos; (c) Modulus geser kompleks; dan (d) Tangent delta

Figure 3. Frequency dependence of the dynamic properties for the NR composite filled with N990-type carbon black. (a) the elastic modulus; (b) the viscous modulus; (c) the complex shear modulus; and (d) the tangent delta



Gambar 4. Kurva sifat dinamik terhadap variasi frekuensi dari komposit NR pengisi biokarbon dari bahan pati singkong. (a) Modulus elastis; (b) Modulus viskos; (c) Modulus geser kompleks; dan (d) Tangent delta.

Figure 4. Frequency dependence of the dynamic properties for the NR composite filled with biocarbon derived from cassava starch. (a) the elastic modulus; (b) the viscous modulus; (c) the complex shear modulus; and (d) the tangent delta.



Gambar 5. Kurva sifat dinamik terhadap variasi frekuensi dari komposit NR pengisi biokarbon dari bahan kayu asem. (a) Modulus elastis; (b) Modulus viskos; (c) Modulus geser kompleks; dan (d) Tangent delta

Figure 5. Frequency dependence of the dynamic properties for the NR composite filled with biocarbon derived from tamarind wood. (a) the elastic modulus; (b) the viscous modulus; (c) the complex shear modulus; and (d) the tangent delta

kompleks. Dengan jumlah pengisi yang lebih besar, mobilitas rantai molekul karet terbatas selama deformasi dinamik, sementara transfer tegangan antara matriks dan pengisi meningkat. Interaksi antara partikel pengisi dan matriks karet juga dapat meningkatkan kemampuan material dalam menyimpan dan mendisipasikan energi mekanik selama pembebanan dinamik. Perbedaan nilai modulus geser kompleks antara CK, CP, dan CB menunjukkan perbedaan efektivitas penguatan pengisi yang mungkin terkait dengan karakteristik fisik dan kimia masing-masing pengisi (Geethamma, *et al.*, 2014; Wang Y, *et al.*, 2018; Li, *et al.*, 2019; Dacol dan Caetano, 2020). Namun, karakterisasi lebih lanjut seperti morfologi permukaan, luas permukaan khusus, struktur kimia, dan ukuran partikel diperlukan untuk memastikan mekanisme yang mendasari perbedaan ini.

Secara umum, biokarbon dari kayu asem dan pati singkong lebih baik dalam hal performa dinamik dibandingkan karbon hitam tipe N990. Dalam pengujian geseran dinamik, komposit dengan pengisi biokarbon kayu asem cenderung menghasilkan nilai rasio peredaman ekuivalen, kekakuan geser, dan modulus geser efektif yang paling tinggi. Namun, dalam pengujian RPA, biokarbon pati singkong menghasilkan modulus geser kompleks yang lebih besar. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter dan teknik pengujian yang digunakan memengaruhi performa komposit.

KESIMPULAN DAN SARAN

Jenis dan jumlah pengisi berpengaruh terhadap sifat dinamik dan peredaman getaran komposit NR. Penambahan biokarbon dari pati singkong dan kayu asem meningkatkan kekakuan geser, modulus geser efektif, dan kapasitas peredaman getaran komposit NR, sementara peningkatan jumlah pengisi juga menyebabkan peningkatan modulus elastis, modulus viskos, dan modulus geser kompleks. nilai tangent delta. Berdasarkan hasil pengujian geseran dinamik dan RPA, komposit NR yang mengandung biokarbon lebih baik daripada karbon hitam tipe N990. Biokarbon kayu asem menunjukkan rasio peredaman yang sama, kekakuan geser, dan modulus geser yang paling efektif dalam pengujian geseran dinamik, dan biokarbon

pati singkong menunjukkan modulus geser kompleks yang lebih besar dalam pengujian RPA. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa biokarbon dari pati singkong dan kayu asem dapat digunakan sebagai pengganti parsial untuk karbon hitam tipe N990 dalam aplikasi material peredam getaran berbasis karet alam. Namun, untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan biokarbon ini sebagai pengganti penuh karbon hitam secara komersial, diperlukan pengujian tambahan terhadap sifat mekanik, ketahanan aus, ketahanan lelah, ketahanan penuaan, dan stabilitas termal.

Untuk menyelidiki hubungan antara karakteristik fisikokimia biokarbon dengan sifat dinamik komposit NR, penelitian tambahan diperlukan. Karakterisasi seperti ukuran partikel, luas permukaan khusus, kandungan karbon terikat, morfologi permukaan, dan struktur kimia harus dipelajari melalui analisis SEM, FTIR, XRD, dan BET. Penelitian ini harus dilakukan untuk memverifikasi mekanisme penguatan dan peredaman getaran yang terjadi. Untuk menilai potensi penggunaan biokarbon sebagai pengganti karbon hitam komersial pada berbagai aplikasi industri karet, juga diperlukan evaluasi sifat mekanik, ketahanan aus, ketahanan lelah, ketahanan penuaan, dan stabilitas termal.

KONTRIBUSI PENULIS

AC melakukan eksperimen, pengumpulan data, analisis dan interpretasi data, dan menulis naskah, sedangkan PS, TK dan SN merevisi naskah, dan melakukan supervisi penelitian. Semua penulis menyetujui versi final naskah ini.

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

- Chausali, N., Saxena, J., & Prasad, R. (2021). Nanobiochar and biochar based nanocomposites: Advances and applications. *J Agric Food Res*, 5. doi:10.1016/j.jafr.2021.100191.
- Chung, D. D. L. (2010). Composite Materials: Science and Applications, 2nd Edition. London: Springer-Verlag.
- Dacol, V., & Caetano, E. (2020). A new viscoelasticity dynamic fitting method applied for polymeric and polymer-based composite materials. *Materials*, 13(22): 1 – 12. doi:10.3390/ma13225213.
- Gao, T., Xie, R., Zhang, L., Gui, H., & Huang, M. (2015). Use of Rubber Process Analyzer for Characterizing the Molecular Weight Parameters of Natural Rubber. *Int J Polym Sci*, 2015. doi:10.1155/2015/517260.
- Geethamma, V. G., Asaletha, R., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2014). Vibration and Sound Damping in Polymers. *Journal of Resonance*, 19(9):821–833.
- Halladay, J.R., & Jaglowski, K.T. (2017). Sources of hysteresis in rubber compounds. Rubber and Plastic News., www.rubbernews.com.
- Hentschke, R. (2017). The payne effect revisited. *Express Polym Lett*, 11(4): 278 – 292. doi:10.3144/expresspolymlett.2017.28.
- Hujare, P.P., & Sahasrabudhe, A.D. (2014). Experimental Investigation of Damping Performance of Viscoelastic Material Using Constrained Layer Damping Treatment. *Procedia Materials Science*, 5:726–733. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.321.
- Jiang, C., Bo, J., Xiao, X., Zhang, S., Wang, Z., Yan, G., Wu, Y., Wong, C., & He, H. (2020). Converting waste lignin into nano-biochar as a renewable substitute of carbon black for reinforcing styrene-butadiene rubber. *Waste Management*, 102: 732 – 742. doi:10.1016/j.wasman.2019.11.019
- Koupai, S., Bakhshi, A., & Valadoust Tabrizi, V. (2017). Experimental investigation on effects of elastomer components on dynamic and mechanical properties in seismic isolator compounds. *Constr Build Mater*, 135: 267 – 278. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.184.
- Kroisová, D. (2010). An internal damping in epoxy composite systems. *International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 2010, Belgium. hlm 1207–1217.
- Lay, M., Rusli, A., Abdullah, M.K., Abdul Hamid, Z.A., & Shuib, R.K. (2020). Converting dead leaf biomass into activated carbon as a potential replacement for carbon black filler in rubber composites. *Compos B Eng*, 201. doi:10.1016/j.compositesb.2020.108366.
- Le Cam, J.B. (2017). Energy storage due to strain-induced crystallization in natural rubber: The physical origin of the mechanical hysteresis. *Polymer (Guildf)*, 127: 166 – 173. doi:10.1016/j.polymer.2017.08.059.
- Lei, T., Zhang, Y.W., Kuang, D.L., & Yang, Y.R. (2019). Preparation and properties of rubber blends for high-damping-isolation bearings. *Polymers (Basel)*, 11(8). doi:10.3390/polym11081374.
- Li, J.C., Zhang, H.S., Zhao, X.Y., Jiang, J.G., Wu, Y.X., Lu, Y.L., Zhang, L.Q., & Nishi, T. (2019). 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. doi:10.3144/expresspolymlett.2019.58.
- Ma, R., Zhang, X., Liu, C., & Wu, W. (2019). Hindered phenol-mediated damping of polyacrylate rubber: Effect of hydrogen bonding strength on the damping properties. *Journal of Polymer Engineering*, 39(7):642–652. doi:10.1515/polyeng-2018-0378.
- Mohamad, N., Yaakub, J., Ab Maulod, H.E., Jeefferie, A.R., Yuhazri, M.Y., Lau, K.T., Ahsan, Q., Shueb, M.I., & Othman, R. (2017). Vibrational damping behaviors of graphene nanoplatelets reinforced NR/EPDM nanocomposites. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 11(4):3274–3287. doi:10.15282/jmes.11.4.2017.28.0294.

- Murniati, R., Rahmayanti, H.D., Utami, F.D., Cifriadi, A., Iskandar, F., & Abdullah, M. (2020). 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. *Journal of Polymer Research*, 27(2). doi:10.1007/s10965-020-2013-0.
- Otoikhian, K.S., Adeniyi, A.G., Dada, A.M., & Ighalo, J.O. (2019). Assessment of Carbonised Wood-Flour Fillers on the Mechanical Properties of Natural Rubber Vulcanisates. *European Journal of Sustainable Development Research*, 3(4). doi:10.29333/ejosdr/5860.
- Peterson, S.C., & Kim, S. (2020). Reducing Biochar Particle Size with Nanosilica and Its Effect on Rubber Composite Reinforcement. *J Polym Environ*, 28(1):317–322. doi:10.1007/s10924-019-01604-x.
- Shi, G., Wang, W., Lu, H., Wang, G., Yang, F., & Rui, X. (2019). Study of crosslink structure and dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomer: Effect of vulcanization system. *J Intell Mater Syst Struct*, 30(8):1189–1199. doi:10.1177/1045389X19835940.
- Shuib, R.K., & Pickering, K.L. (2016). Effect of Carbon Black on the Dynamic Properties of Anisotropic Magnetorheological Elastomer. *Journal of Engineering Science*, 12:1–12.
- Su, C., Zhao, C., Xu, L., & Zhang, C. (2015). Effects of chemical structure of phenolic resin on damping properties of acrylate rubber-based blends. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. 54(2):177–189. doi:10.1080/00222348.2014.996463.
- Wang, J. (1998). Effect of Polymer-Filler and Filler-Filler Interactions on Dynamic Properties of Filled Vulcanizates. *Rubber Chemistry and Technology*. 71(3):520–589.
- Wang, Y., Liao, L., Lin, H., Zhang, F., Zhong, J., Xu, K., & Peng, Z. (2018). Damping Properties of Natural rubber/ Epoxidized Natural Rubber composites with different fillers. *Advances in Engineering Research*, Atlantis Press. hlm 772–775.
- Xue, B., Wang, X., Sui, J., Xu, D., Zhu, Y., & Liu, X. (2019). A facile ball milling method to produce sustainable pyrolytic rice husk bio-filler for reinforcement of rubber mechanical property. *Ind Crops Prod*, 141. doi:10.1016/j.indcrop.2019.111791.
- Yuvaraj, P., Rao, J.R., Fathima, N.N., Natchimuthu, N., & Mohan, R. (2018). Complete replacement of carbon black filler in rubber sole with CaO embedded activated carbon derived from tannery solid waste. *J Clean Prod*, 170:446–450. doi:10.1016/j.jclepro.2017.09.188

