

Upcycling Cangkang Kelapa Sawit Menjadi Green Filler Teraktivasi Ultrasonik dan Aplikasinya Sebagai Pengisi Kompon Karet

Palm Kernel Shell Upcycling as Ultrasonic-activated Green Filler and Its Application as Filler in Rubber Compound Making

Giffary Pramafisi Soeherman*, Pridata Gina Putri, Fahrulsyah, Taufik Nugraha Agassi, Iyan Indrawan

Program Studi Pengembangan Produk Agroindustri, Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung 35141, Indonesia

*E-mail: giffarypramafisi@polinela.ac.id

Diterima: 10 Oktober 2024; Disetujui: 18 April 2025

ABSTRAK

Cangkang kelapa sawit (CKS) merupakan salah satu hasil samping produksi industri pengolahan sawit yang hingga saat ini, di Indonesia, masih belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu pemanfaatan CKS sebagai bahan dengan serat tinggi yaitu dengan cara mengubahnya menjadi material tinggi karbon. Material karbon ini dapat digunakan sebagai salah satu alternatif bahan pengisi bagi industri pengolahan karet untuk menggantikan Sebagian besar *carbon black* (CB) yang tidak ramah lingkungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh substitusi CB menggunakan *green filler* CKS teraktivasi ultrasonik terhadap karakteristik mekanis kompon karet berbahan dasar *lump*. CKS melalui proses pirolisis diubah menjadi arang dan diaktivasi menggunakan ultrasonik dengan frekuensi 40 kHz selama 15 menit. Arang aktif CKS yang diperoleh kemudian ditambahkan ke dalam formulasi kompon sebagai pengganti substitusi *carbon black* dengan formulasi berbeda sesuai dengan perlakuan. Kompon yang dihasilkan diuji karakteristik *curing*-nya sebelum dicetak menggunakan *hot press*. Vulkanisat yang diperoleh kemudian diuji karakteristik mekanisnya yang meliputi kekerasan, kuat Tarik, perpanjangan putus, dan *young modulus*. Kompon dengan 100% *carbon black* menghasilkan nilai torsi minimum (ML), torsi maksimum (MH), waktu pemasakan optimum (TC90) dan waktu *scorch* (ts_2) sebesar 13,02 kgf-cm, 34,54 kgf-cm, 232 detik, dan 101 detik secara berturut-turut. Kompon dengan komposisi *filler* 30 phr CB dan 30 phr arang CKS teraktivasi ultrasonik memiliki ML, MH, TC90, dan ts_2 sebesar 9,35 kgf-cm, 12,28 kgf-cm, 98 detik, dan 91 detik secara berturut-turut.

Kata kunci: Arang aktif; cangkang kelapa sawit; karet; kompon; *lump*; ultrasonik

ABSTRACT

Palm kernel shells (PKS) are one of the by-products of the palm oil processing industry which until now, in Indonesia, has not been optimally utilized. One of the uses of PKS as a high-fiber material is by converting it into a high-carbon material. This carbon material can be used as an alternative filler material for the rubber processing industry to replace most of the carbon black (CB) which is not environmentally friendly. The purpose of this study is to determine the effect of CB substitution using ultrasonic-activated PKS as a green filler on the mechanical characteristics of rubber compounds made from lumps. PKS through the pyrolysis process is converted into charcoal and activated using ultrasonic with a frequency of 40 kHz for 15 minutes. The activated charcoal PKS obtained was then added to the compound formulation as a substitute for carbon black substitution with different formulations according to the treatment. The resulting compound was tested for its curing characteristics before being molded using a hot press. The vulcanizate obtained was then tested for its mechanical characteristics including hardness, tensile strength, elongation at break, and young modulus. Compound with 100% carbon black produces minimum torque (ML), maximum torque (MH), optimum curing time (TC90) and scorch time (ts_2) of 13.02 kgf-cm, 34.54 kgf-cm, 232 seconds, and 101 seconds respectively. Compound with filler composition of 30 phr CB and 30 phr ultrasonically activated CKS charcoal has ML, MH, TC90, and ts_2 of 9.35 kgf-cm, 12.28 kgf-cm, 98 seconds, and 91 seconds respectively.

Keywords: Activated charcoal; *lump*; palm kernel shell; rubber; rubber compound; ultrasonic

PENDAHULUAN

Cangkang kelapa sawit (CKS) merupakan hasil samping dari pabrik pengolahan minyak sawit kasar menjadi minyak makan. Di Indonesia, CKS masih kerap dianggap sebagai limbah dan hanya digunakan sebagai bahan bakar untuk boiler. Namun, menurut Kepala Seksi Kepatuhan Internal dan Penyuluhan Bea Cukai Pare-Pare, Muh. Daud M. pada laman beacukai.go.id, pasar global sudah melirik CKS sebagai bahan baku potensial. Hal ini dibuktikan dengan ekspor CKS sebanyak 10.906,66 MT cangkang dengan tujuan bongkar Pelabuhan Maizuru Jepang, melalui

pelabuhan Belang-Belang Sulawesi Barat (Kementerian Keuangan Direktorat Bea dan Cukai, 2023). Selain potensinya sebagai bahan bakar, CKS yang memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi dapat berpotensi menjadi bahan pengisi pada komposit atau campuran dari berbagai macam barang jadi (Ar-Raudhoh, Haziq, Zafirah, Liyana, & Hayawin, 2023; Daud, Ismail, & Bakar, 2016). Salah satunya adalah pengisi pada polimer karet sebagai filler alternatif yang lebih ramah lingkungan jika dibandingkan dengan filler *Carbon black* (CB) yang biasa digunakan (Kazemi, Mighri, & Rodrigue, 2022; M. Ikumapayi & T. Akinlab, 2018). Beberapa penelitian terdahulu telah

melaporkan pemanfaatan CKS sebagai pengisi pada berbagai macam polimer. CKS telah diaplikasikan sebagai pengisi kepada berbagai jenis polimer dan terbukti dapat meningkatkan kekuatan mekanis (kekerasan, kekakuan, kuat tarik, ductility) dari komposit CKS-LDPE (Inegbedion, Igbonazobi, Imasuen, & Inetianbor, 2021; Yakum, Kingsly Mofor, & Nnoko Ngaaje, 2020). Penggunaan karbon aktif CKS sebagai bahan pengisi pada komposit polimer selain karet juga telah dilakukan dan dilaporkan memberikan peningkatan yang baik dari segi kekuatan mekanis dan mekanisme penyimpanan energi (Chin, Yakub, & Hin, 2020; Nicholas, Hussein, Zainal, & Khadiran, 2020).

Carbon black (CB) merupakan salah satu bahan yang memiliki peran sangat penting dalam industri pembuatan barang jadi karet. CB tidak hanya berfungsi sebagai bahan pengisi yang dapat meningkatkan volume dari polimer yang diisi, namun juga dapat memberikan peningkatan kekuatan mekanis, terutama pada elastomer seperti polimer karet (Princi, 2019). Namun, penggunaan CB dengan jumlah besar ternyata dapat mengakibatkan masalah pada lingkungan. Chikri & Wetzl, (2020) melaporkan bahwa emisi CO₂ dan faktor konsumsi energi dalam memproduksi CB adalah 3,3 ton CO₂/ton CB dan 44 GJ/ton CB secara berturut-turut. Selain itu, penggunaan CB pada industri produksi barang jadi karet juga telah diketahui terdapat beberapa kelemahan tambahan yang terkait dengan penerapan komposit karet berisi CB, seperti penipisan cadangan minyak bumi secara terus-menerus, peningkatan konsentrasi gas rumah kaca, dan pemanasan global (Roy, Pongwisuthiruchte, Chandra Debnath, & Potiyaraj, 2021). Berdasarkan masalah tersebut, maka diperlukan alternatif bahan pengisi yang lebih ramah lingkungan. CKS sebagai biomassa dengan kandungan lignoselulosa tinggi merupakan salah satu alternatif ramah lingkungan yang dapat digunakan sebagai bahan pengisi pada pembuatan kompon karet.

Penggunaan arang biomassa CKS tanpa aktivasi telah dilakukan. Namun, karbon yang berasal dari biomassa memiliki aktivitas permukaan yang kurang baik, sehingga menyebabkan adhesi yang kurang maksimal antara elastomer dan bahan pengisi. Hal ini mengakibatkan kompon yang diisi menggunakan arang biomassa memiliki karakteristik mekanis yang kurang baik (Nuyah, 2012). Oleh karena itu, arang biomassa biasanya diaktivasi terlebih dahulu. Proses aktivasi arang dapat memberikan perubahan pada karakteristik arang yang dihasilkan. Metode aktivasi arang secara umum dapat dilakukan secara kimiawi dan fisik. Proses aktivasi kimiawi merupakan proses aktivasi yang paling umum digunakan. Namun proses ini menghasilkan limbah kimia berjumlah besar sehingga akan memberikan dampak negatif terhadap lingkungan (Suhas, Gupta, Singh, Chaudhary, & Kushwaha, 2021). Oleh karena itu, aktivasi fisik dengan ultrasonik dapat menjadi alternatif. Berdasarkan uraian sebelumnya, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan arang aktif CKS teraktivasi ultrasonik pada karakteristik mekanis dari kompon karet dan vulkanisat berbahan dasar *lump*.

Oleh sebab itu, karakteristik kompon berbahan dasar *lump* dengan variasi jumlah *loading* arang aktif CKS teraktivasi ultrasonik sebagai bahan pengisinya sangat penting untuk dievaluasi sehingga potensi pemanfaatan CKS sebagai bahan pengisi dalam industri produksi barang jadi karet dapat dimaksimalkan dan dapat diaplikasikan dalam berbagai produk barang jadi karet.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain reaktor pirolisis, *disk mill*, *ultrasonic bath*, ayakan *mesh* 300, *two roll open mill*, timbangan digital, neraca analitik, *brush*, *molding step motor*, *vulcanizer press*, peralatan gelas laboratorium meliputi beaker glass, batang pengaduk, dan gelas ukur, *universal tensile tester*, *automatic disk rheometer* (Hung Ta HT-8756P).

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah *lump* mangkuk sebagai bahan baku karet yang diperoleh dari Desa Simbaringin, Kecamatan Natar, Lampung Selatan, cangkang kelapa sawit yang diperoleh dari Kecamatan Bekri, Kabupaten Lampung Tengah, carbon black, ZnO, silikon, asam stearat, 2,2'-Dithiobis (benzothiazole) (MBTS), sulfur, *parafinic oil*, N-cyclohexyl-2-benzothiazolesulfenamide (CBS), trimetilkuinon (TMQ), dan N-isopropyl-N'-phenyl-1,4-phenylenediamine (IPPD).

Prosedur Penelitian

Persiapan Arang CKS

Prosedur persiapan arang CKS dilakukan berdasarkan kepada hasil penelitian yang dilakukan oleh Kasih et al., (2020). Cangkang kelapa sawit pertama-tama dihamparkan pada tampah besar dan dilakukan proses sortasi untuk memisahkan pengotor dan biji sawit yang masih mengandung inti sawit. Cangkang kelapa sawit kemudian dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis dan dibakar di atas api dengan rentang suhu 300 – 450 °C selama 8 – 10 jam. Arang CKS yang telah diperoleh kemudian digiling menggunakan *disk mill* untuk mendapatkan arang CKS halus. Arang halus kemudian diayak menggunakan ayakan 300-mesh. Arang CKS halus kemudian dikemas di dalam wadah yang tertutup rapat.

Penentuan Waktu Aktivasi

Aktivasi ultrasonik dilakukan menggunakan alat ultrasonik bath dengan frekuensi 40 kHz. Lama waktu aktivasi pertama-tama ditentukan terlebih dahulu berdasarkan kepada kekerasan kompon yang diperoleh. Variasi dari waktu aktivasi mengacu kepada penelitian Wang et al., (2024) yaitu 0, 15, dan 20 menit. Lebih lanjut, Wang et al., (2024) melaporkan bahwa waktu aktivasi menggunakan ultrasonik yang terlalu dapat menyebabkan penurunan pada kemampuan adsorpsi dari karbon. Waktu aktivasi dengan kekerasan tertinggi akan dipilih sebagai waktu aktivasi pada penelitian utama.

Aktivasi Arang CKS secara ultrasonik

Aktivasi arang dilakukan berdasarkan kepada metode pengerjaan yang dideskripsikan oleh Insyirah & Khair, (2021). CKS dimasukkan ke dalam gelas kimia dan ditambahkan akuades dengan proporsi berat 4:1 untuk air dan CKS. CKS kemudian diaktivasi menggunakan waktu yang telah terpilih dari penelitian tahap pertama. CKS kemudian dikeringkan dalam oven bersuhu 105-110°C selama 4-5 jam sehingga dihasilkan arang aktif CKS teraktivasi ultrasonik (UA-PKSC).

Persiapan Kompon Karet

Variasi Formulasi pembuatan kompon karet pada penelitian ini merupakan faktor penelitian utama yang terdiri dari lima formulasi berbeda (Tabel 1). Proses pencampuran karet dan bahan-bahan kimia dilakukan di atas mesin *two roll open mill* dengan bukaan 1 mm. Karet *lump* yang telah kering digiling di atas *two roll mill* selama 10 menit. Tahapan penggilingan elastomer ini disebut dengan mastikasi.

Tabel 1. Formulasi kompon karet

Bahan	F1	F2	F3	F4	F5
	phr	phr	phr	phr	phr
Lump	100	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5
Asam Stearat	2	2	2	2	2
Carbon Black	60	45	30	15	0
Green Filler	0	15	30	45	60
CKS	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
MBTS	1	1	1	1	1
CBS	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Sulfur	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1-PPD	10	10	10	10	10
Oil					
TMQ	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Tahap selanjutnya yaitu penambahan ZnO dan asam stearat dengan lama pencampuran 2 -3 menit. Bahan pengisi (sesuai perlakuan) lalu ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam elastomer sambil terus digiling di atas *open mill*. Proses pencampuran *filler* berjalan selama 5-7 menit. Akselerator, dan aktivator kemudian ditambahkan ke atas kompon dan digiling selama 4-5 menit. Setelah itu, parafin oil ditambahkan secara bertahap. TMQ dan IPPD ditambahkan ke atas kompon dan digiling selama 3 menit. Sebelum penambahan sulfur, bukaan *roller* dari *open mill* ditingkatkan menjadi 6 mm. Sulfur ditambahkan secara bertahap dan kompon digiling selama kurang lebih 1-2 menit. Kompon yang terbentuk kemudian diletakkan di atas plastik PP dan diistirahatkan selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian karakteristik *curing* pada kompon yang dihasilkan.

Pengujian Karakteristik *curing* kompon karet

Pengujian karakteristik *curing* kompon karet dilakukan dengan mengacu kepada metode American Standard Testing and Material (ASTM D2084-1). Kompon karet dengan ketebalan 6 mm pertama-tama dipotong menjadi spesimen sampel berbentuk lingkaran dengan diameter sesuai dengan diameter pada alat uji reologi (Hung Ta HT-8756P). Spesimen kemudian diletakkan di atas *moving die* bagian bawah sebelum *lid* dari alat rheometer ditutup. Pengujian dilakukan selama 10 menit dengan suhu 150 °C. Parameter waktu *curing* optimum (TC90) kemudian akan digunakan sebagai acuan waktu dalam proses pencetakan kompon menjadi vulkanisat karet.

Pencetakan Vulkanisat Karet

Kompon karet yang telah diperoleh dipotong hingga membentuk kompon dengan bentuk persegi berukuran 20 cm x 20 cm. Kompon kemudian diletakkan di atas plat besi yang sudah dioleskan sedikit silikon dan ditutup rapat. Cetakan kemudian di-press menggunakan *hydraulic press* dengan suhu 150 °C selama 10 menit sehingga menghasilkan karet ter Vulkanisasi.

Pengujian Kekerasan Karet (*Shore A*)

Pengujian kekerasan vulkanisat karet dilakukan dengan menggunakan durometer *shore A* sesuai dengan standar ASTM D2240-15. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menguji beberapa titik dari lembaran vulkanisat.

Pengujian Kuat Tarik Vulkanisat

Pengujian kuat tarik vulkanisat dilakukan di Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Kulit, Karet, dan Plastik (BBSPJIKKP), Yogyakarta. Prosedur pengujian dilakukan dengan merujuk kepada metode pengujian SNI ISO 37:2011.

Analisis Statistik

Rancangan percobaan yang digunakan pada penelitian ini adalah rancangan acak lengkap (RAL). Masing-masing perlakuan pada penelitian ini diulang sebanyak tiga kali. Data yang diperoleh akan diolah secara ANOVA dan dilakukan uji lanjut Tukey's HSD test untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan. Data ditampilkan dalam rata-rata ± standar deviasi. Seluruh pengolahan data statistik dilakukan menggunakan *software* OriginPro 2024 dengan sistem operasi Windows 11.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Waktu Aktivasi Ultrasonik

Proses aktivasi dilakukan dengan memvariasikan waktu aktivasi yaitu 0, 15, dan 20 menit. Hasil pengujian kekerasan pada kompon penelitian pendahuluan dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan hasil kekerasan vulkanisat pada Tabel 2, dapat diketahui bahwa pada taraf signifikansi 95%, tidak terdapat perbedaan nyata pada kekerasan vulkanisat dengan perbedaan waktu aktivasi yang digunakan. Kekerasan dari vulkanisat dengan arang aktif teraktivasi ultrasonik dengan waktu 0 menit, 15 menit, dan 20 menit adalah sebesar 21,33, 24,54, dan 22,57 *Shore A* secara berturut-turut. Berdasarkan hasil tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa aktivasi menggunakan ultrasonik memberikan peningkatan kekerasan pada vulkanisat karet yang dicetak. Peningkatan kekerasan terbaik terdapat pada kompon karet yang ditambahkan filler arang CKS dengan waktu aktivasi 15 menit, sehingga waktu aktivasi 15 menit akan dipilih sebagai waktu aktivasi pada penelitian utama.

Karakteristik Vulkanisasi Kompon

Karakteristik vulkanisasi dari masing-masing perlakuan dapat dilihat pada tabel 3. Analisis karakteristik vulkanisasi dilakukan menggunakan alat *automatic die rheometer*. Parameter yang didapatkan meliputi M_L , M_H , ts_2 , TC90, serta Δ torsi yang didapatkan berdasarkan selisih antara nilai M_H dan M_L . Berdasarkan hasil analisis karakteristik *curing* pada kompon karet yang dihasilkan, dapat diketahui bahwa kompon dengan 100% CB memiliki nilai M_H tertinggi (84,94 kgf-cm) dan berbeda nyata dengan perlakuan F2, F3, dan F4 namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan F5. Nilai M_H menunjukkan torsi maksimal pada saat proses vulkanisasi.

Nilai M_H berkaitan dengan kekerasan dari vulkanisat yang terbentuk yang mana semakin tinggi nilai M_H maka semakin banyak ikatan silang yang terbentuk, maka semakin tinggi juga nilai torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan spesimen sampel karet pada alat rheometer. Banyaknya ikatan silang yang terbentuk juga dapat dilihat dari selisih antara nilai torsi terendah dengan nilai torsi tertinggi dari spesimen karet yang diuji ($M_H - M_L$). Semakin besar nilai selisih ini (Δ), maka semakin banyak ikatan silang yang terbentuk pada sampel uji. Selain itu, nilai Δ torsi juga menunjukkan densitas ikatan silang yang terbentuk selama proses vulkanisasi (Oh et al., 2014).

Tabel 2. Kekerasan vulkanisat karet dengan arang CKS yang teraktivasi dengan variasi waktu

Waktu Aktivasi	Kekerasan Rata-rata (<i>Shore A</i>)
0 menit	21,33 ^a
15 menit	24,54 ^a
20 menit	22,57 ^a

Keterangan : notasi *superscript* merupakan notasi uji lanjut DMRT

Tabel 3. Karakteristik Vulkanisasi Kompon Pada Masing-masing Perlakuan

CB/UA -PKSC (phr)	M _L (kgf-cm)	M _H (kgf-cm)	Δ Torsi (kgf-cm)	TC ₉₀ (detik)	ts ₂ (detik)
60/0	21,22 ^a _b	84,94 _a	63,73 ^a	226 ^a	72,00 ^a _b
45/15	15,43 ^b _c	29,46 _c	14,04 ^c	141 ^b	76,25 ^a _b
30/30	13,12 ^c	25,20 _c	12,09 ^c	152,33 ^a _b	84,33 ^a
15/45	16,17 ^b _c	54,30 _b	38,13 ^b	155,67 ^a _b	59,67 ^a _b
0/60	26,20 ^a	70,48 _a	44,28 ^a _b	206,33 ^a _b	65,67 ^b

Berdasarkan hasil yang didapatkan, semakin sedikit *loading* dari CB dan semakin meningkat jumlah arang CKS teraktivasi ultrasonik, nilai Δ torsi semakin menurun, dan meningkat kembali pada formulasi F5 dengan 100% arang aktif CKS teraktivasi ultrasonik. Perlakuan formulasi F1 memiliki nilai Δ torsi sebesar 63,73 kgf-cm, yang mana nilai ini berbeda nyata jika dibandingkan dengan perlakuan F2, F3, dan F4 dengan nilai 14,04, 12,09, dan 38,13 kgf-cm secara berturut-turut, sedangkan memiliki nilai Δ torsi yang tidak berbeda nyata jika dibandingkan dengan formulasi dengan 100% arang aktif CKS teraktivasi ultrasonik (44,28 kgf-cm). Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar nilai *loading* arang aktif CKS (yang mana semakin kecil phr CB pada formulasi), maka densitas ikatan silang yang terbentuk selama vulkanisasi karet semakin menurun. Hal ini dapat dikaitkan dengan luas permukaan dari bahan pengisi UA-PKSC yang disebabkan yang lebih besar, yang menyebabkan berkurangnya kemampuan penguatan, baik secara fisik (melalui penyerapan) pada tahap awal dan secara kimia pada tahap selanjutnya (melalui jembatan sulfur pengisi polimer).

Waktu optimum vulkanisasi (TC₉₀) dari masing-masing perlakuan juga menunjukkan perbedaan yang nyata antar perlakuan. Kompon dengan 100% CB memiliki TC₉₀ sebesar 226 detik, sedangkan kompon dengan penambahan UA-PKSC sebagai *filler* memiliki nilai TC₉₀ yang lebih rendah dibandingkan perlakuan 100% CB yaitu 141 detik, 152,33 detik, 155,67 detik, dan 206,33 untuk perlakuan CB/UA-PKSC 45/15, 30/30, 15/45, dan 0/60 secara berturut-turut. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan UA-PKSC memberikan pengaruh terhadap TC₉₀.

Kekerasan Vulkanisat Karet

Kekerasan dari vulkanisat (karet kompon yang sudah dicetak) diukur dengan menggunakan alat durometer *hardness tester*. Hasil pengujian parameter kekerasan dapat dilihat pada Tabel 4. Berdasarkan kepada Tabel 4, dapat

diketahui bahwa semakin besar inkorporasi arang CKS terhadap formulasi pembuatan barang jadi karet, semakin rendah kekerasan dari barang jadi karet tersebut. Nilai kekerasan pada barang jadi karet dengan 60 phr CB sebagai bahan pengisi adalah sebesar 48,71 *shore A*. Dengan meningkatnya inkorporasi arang CKS dan menurunnya jumlah CB, nilai kekerasan barang jadi karet yang dihasilkan semakin menurun, yaitu 43 *shore A*, 40,29 *shore A*, dan 29,62 *shore A* untuk perlakuan F2, F3, dan F4 secara berturut-turut. Namun, pada perlakuan 60 phr arang aktif CKS, nilai kekerasan dari barang jadi karet kembali meningkat menjadi 33,93 *shore A* jika dibandingkan dengan perlakuan F4. Penggunaan campuran pengisi antara CB/arang CKS menghasilkan barang jadi karet dengan tingkat kekerasan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan barang jadi karet yang hanya menggunakan CB sebagai bahan pengisinya. Nilai kekerasan yang tinggi pada barang jadi karet yang hanya diisi oleh pengisi CB merupakan hasil dari interaksi dan kecocokan yang sangat baik dari partikel CB dengan matriks elastomer yang diisi. Interaksi yang kuat dan baik antara CB dan matriks elastomer ini dapat menyebabkan tingginya densitas dari ikatan silang yang terbentuk antara matriks elastomer dengan partikel CB.

Penggunaan biomassa sebagai bahan pengisi memiliki beberapa kelemahan jika digunakan sebagai bahan pengisi pada karet. Ukuran partikel merupakan salah satu hal yang menyebabkan rendahnya nilai kekerasan pada produk karet yang diisi. Ukuran partikel dari arang CKS yang digunakan pada penelitian ini adalah ± 300 *mesh* atau setara dengan ukuran partikel sebesar ~50 μm yang mana nilai ini cukup besar jika dibandingkan dengan ukuran partikel CB komersial yang memiliki ukuran partikel yang berkisar dari 8 – 100 nm (Bhatia & Goel, 2019).

Ukuran partikel yang besar dari arang biomassa menyebabkan arang biomassa tidak mampu memberikan peningkatan yang baik terhadap sifat mekanik dari polimer yang diisinya. Hal ini merupakan salah satu kelemahan dari penggunaan arang biomassa sebagai bahan pengisi pada karet (Greenough, Dumont, & Prasher, 2021). Ukuran partikel yang besar dari arang biomassa disebabkan oleh karena arang dibuat dengan cara membakar biomassa secara pirolisis lalu mengecikan ukurannya dengan cara *top-down* seperti proses penggilingan dan penghancuran. Proses pengecilan ukuran *top-down* yang dilakukan menjadi proses yang membatasi ukuran partikel dari arang biomassa dan akan menjadi sangat mahal apabila arang biomassa tersebut harus dibuat untuk menyamai ukuran partikel dari CB (Peterson, 2020).

Tabel 4. Kekerasan vulkanisat karet masing-masing perlakuan

Formulasi	CB/UA-PKSC (phr)	Kekerasan (<i>shore A</i>)
F1	60/0	48.71 ± 3.12 ^a
F2	45/15	43,00 ± 4.71 ^b
F3	30/30	40.29 ± 4.27 ^b
F4	15/45	29.62 ± 4.87 ^c
F5	0/60	33.93 ± 2.12 ^c

Keterangan: Data yang ditampilkan merupakan nilai rata-rata ± standar deviasi. Nilai dengan notasi yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan yang nyata antar perlakuan

Tabel 5. Kekuatan tarik dan perpanjangan putus vulkanisat karet masing-masing perlakuan

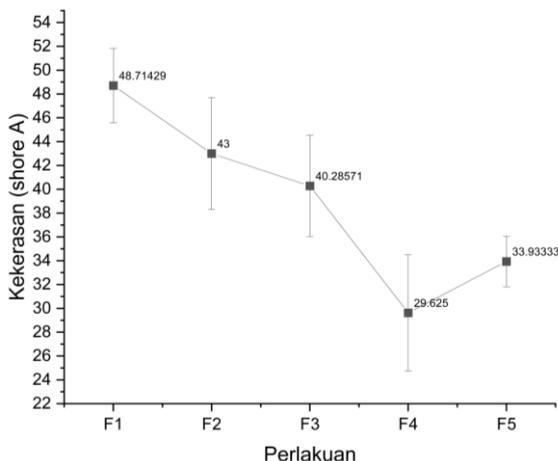
CB/UA-PKSC (phr)	Kekuatan tarik (N/mm ²)	Perpanjangan Putus (%)
60/0	15,47 ± 1,68 ^a	551,27 ± 24,84 ^{ab}
45/15	8,41 ± 1,23 ^b	495,75 ± 44,31 ^b
30/30	9,14 ± 1,61 ^b	570,50 ± 25,13 ^{ab}
15/45	3,23 ± 0,45 ^c	607,65 ± 63,61 ^a
0/60	4,37 ± 0,49 ^c	515,40 ± 33,14 ^b

Keterangan: Data yang ditampilkan merupakan nilai rata-rata ± standar deviasi. Nilai dengan notasi yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan yang nyata antar perlakuan

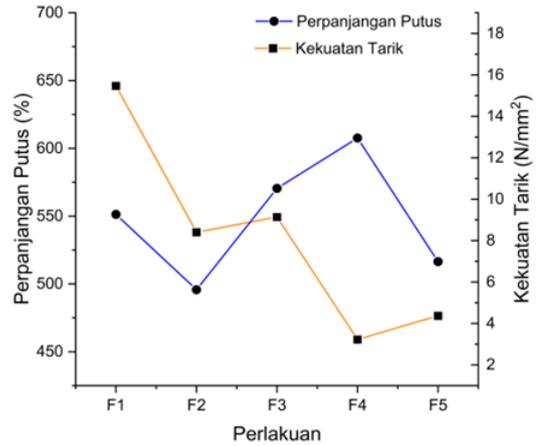
Berdasarkan studi yang dilaporkan oleh Peterson, Chandrasekaran, & Sharma (2016), arang biomassa yang diperoleh dengan cara penggilingan dan penghancuran memiliki rentang ukuran partikel yang berkisar antara 10-100 µm, tergantung kepada proses pengecilan ukuran yang digunakan. Ukuran partikel yang besar dapat menyebabkan *stress* lokal pada elastomer yang menyebabkan komposit karet tersebut melemah dan mengalami *fracture*. Hal ini dapat menurunkan kekuatan mekanis dari karet komposit yang dihasilkan (Abbas, Muizz Mohamed Ghazali, & Kooi Ong, 2019).

Kekuatan Tarik dan Perpanjangan Putus Vulkanisat

Kekuatan tarik dan perpanjangan putus dari vulkanisat karet yang dihasilkan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 5. Berdasarkan pada tabel 5, dapat diketahui bahwa nilai kekuatan tarik dari vulkanisat karet semakin menurun seiring berkurangnya phr *carbon black* pada formulasi. Vulkanisat dengan 100% CB memiliki kekuatan tarik sebesar 15,47 N/mm², sedangkan vulkanisat dengan perbandingan CB dan UA-PKSC 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100 memiliki nilai kuat tarik yang berbeda nyata jika dibandingkan dengan perlakuan F1 yaitu 8,41, 9,14, 3,23, dan 4,37 N/mm² secara berturut-turut. CB merupakan salah satu bahan pengisi yang telah diketahui dapat meningkatkan kekuatan mekanis dari polimer yang diisinya seperti meningkatkan *tensile strength*, kekerasan, ketahanan sobek, histerisis, ketahanan abrasi, dan modulus dinamis (Bardha, Prasher, & Dumont, 2024; Donnet, Bansal, & Wang, 2018; Princi, 2019).



Gambar 1 Grafik nilai kekerasan vulkanisat karet



Gambar 2. Grafik perbandingan perpanjangan putus dan kuat tarik vulkanisat karet

Berdasarkan kepada hasil yang didapatkan, seiring berkurangnya jumlah CB dan bertambahnya jumlah arang CKS pada formulasi, maka kekuatan tarik dari vulkanisat yang dihasilkan semakin menurun. Hal ini menunjukkan bahwa arang CKS, meskipun sudah melalui proses aktivasi fisik, belum dapat berperan sebagai bahan pengisi yang bersifat menguatkan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Torres et al. (2021) yang menyatakan bahwa dengan meningkatnya *loading* dari bahan pengisi *non-black* berupa sekam padi dan cangkang almond yang ditorekasi menyebabkan penurunan kekuatan tarik dari kompon yang dihasilkan sebesar 35% (Torres et al., 2021). Menurunnya kekuatan tarik pada kompon yang diisi oleh pengisi non-CB juga dilaporkan oleh Peterson (2020) yang melaporkan bahwa dengan mengganti sebagian CB menggunakan biochar dari tumbuhan *Paulownia elongata* (PAUL) dan *Populus tremuloides* (POP), menghasilkan vulkanisat dengan kuat tarik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan vulkanisat yang menggunakan CB secara keseluruhan, yaitu 21,03 MPa untuk vulkanisat dengan 100% CB, 7,4 MPa untuk PAUL dan 1,0 MPa untuk vulkanisat dengan 100% arang POP. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Torres et al., (2021) yang menyatakan bahwa penggantian sebagian CB menggunakan arang cangkang almond dan arang sekam padi menyebabkan penurunan kekuatan tarik pada vulkanisat yang dihasilkan dan penurunan terbesar terjadi ketika sebesar 50% dari CB digantikan oleh arang biomassa.

Penurunan nilai kekuatan tarik ini disebabkan oleh adanya penambahan arang biomassa yang memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan CB sehingga menyebabkan *stress* secara lokal pada elastomer yang diisi, mengakibatkan penurunan dari nilai ketahanan putus dari vulkanisat yang dihasilkan. Selain itu, menurut beberapa penelitian yang telah dilakukan terhadap CKS dan arang aktif CKS, berdasarkan pengujian gugus fungsi permukaan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), baik CKS maupun arang aktif CKS memiliki *peak* yang terdapat pada panjang gelombang sekitar 3434 cm⁻¹. *Peak* ini mengindikasikan terdapatnya gugus fungsi hidroksil (-OH) pada kedua CKS dan arang aktif CKS (Rashidi, Bokhari, & Yusup, 2021; Samuel, 2020; Uchebulam, Momoh, & Agan, 2022). Keberadaan gugus hidroksil pada arang aktif CKS ini (dan pada sebagian besar biomassa) menyebabkan kompatibilitas yang kurang baik dengan karet, sehingga afinitas pengisi dan polimer karet juga kurang baik (Torres et al., 2021).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan arang CKS teraktivasi ultrasonik (UA-PKSC) memberikan pengaruh dan perbedaan yang nyata apabila digunakan dalam rasio CB/UA-PKSC yang berbeda-beda. Penggunaan 100% UA-PKSC memiliki nilai M_H , Δ torsi, TC90, dan ts_2 tidak menunjukkan perbedaan nyata apabila dibandingkan dengan kompon dengan 100% CB. Dalam hal nilai kekerasan, penggunaan semakin banyak UA-PKSC yang diinkorporasi ke dalam kompon, maka nilai kekerasan juga semakin menurun. Hal ini menunjukkan bahwa proses aktivasi arang CKS dengan ultrasonik belum dapat mengubah arang CKS menjadi pengisi yang dapat memperbaiki kekuatan mekanis pada karet. Sedangkan pada perpanjangan putus, semakin tinggi jumlah UA-PKSC yang ditambahkan, semakin tinggi perpanjangan putus yang dimiliki oleh vulkanisat. Hasil ini berbanding terbalik dengan kekuatan tarik yang mana semakin tinggi penambahan UA-PKSC, maka nilai kekuatan tarik semakin rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan UA-PKSC pada lump karet masih sebatas hanya sebagai *volume extender*, bukan sebagai penguat.

Berdasarkan hasil penelitian pada tulisan ini maka penelitian lanjutan untuk menciptakan bahan pengisi karet dari arang CKS perlu terus dilakukan. Salah satu prospek penelitian selanjutnya yaitu dengan memvariasikan frekuensi aktivasi ultrasonik dan dengan melakukan kombinasi modifikasi arang CKS sebagai bahan pengisi dan modifikasi elastomer yang akan digunakan sehingga dapat diperoleh kompatibilitas yang lebih baik antara arang biomassa CKS dan elastomer yang digunakan, yang diduga akan meningkatkan kekuatan mekanis dari vulkanisat yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Lampung selaku instansi yang mendanai penelitian ini melalui dana DIPA Politeknik Negeri Lampung. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada *teaching factory Latex Glove* Polinela yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian dengan menyediakan peralatan pengolahan karet.

DAFTAR PUSTAKA

Abbas, K., Muizz Mohamed Ghazali, A., & Kooi Ong, S. (2019). The Effect of Particle Size of Palm Kernel Shell on the Mechanical Properties and Physical Properties of Filled Natural Rubber Vulcanizates. *Materials Today: Proceedings*, 19, 1599–1607. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.188>

American Standard Testing and Material. (2019). *Test Method for Rubber Property Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2084-19A>

Ar-Raudhoh, M. T. N., 'Aisyah, Haziq, M. F. M., Zafirah, Z. A., Liyana, M. S. N., & Hayawin, Z. N. (2023). Comparative Studies On Cure Characteristics And Mechanical Properties Of Oil Palm Biomass Filled Natural Rubber Composites. *Journal of Oil Palm Research*. <https://doi.org/10.21894/jopr.2023.0009>

Bardha, A., Prasher, S., & Dumont, M.-J. (2024). Waste biomass-derived rubber composite additives: Review of current research and future investigations into biowaste tire formulation.

Biomass and Bioenergy, 183, 107149. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107149>

Bhatia, S. C., & Goel, A. (2019). *Rubber Technology*. New Delhi: Woodhead publishing India Pvt Ltd.

Chikri, Y. A., & Weltz, W. (2020, May 29). Decarbonisation options for the Dutch carbon black industry | PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Retrieved March 19, 2024, from <https://www.pbl.nl/en/publications/decarbonisation-options-for-the-dutch-carbon-black-industry>

Chin, T. Y., Yakub, I., & Hin, T.-Y. Y. (2020). Evaluation of Catalysts Derived from Palm Kernel Shell Carbon in a Passive NOx Removal from a Diesel Engine Exhaust. *Emission Control Science and Technology*, 6(3), 336–344. <https://doi.org/10.1007/s40825-020-00164-0>

Daud, S., Ismail, H., & Bakar, A. A. (2016). The Effect of 3-aminopropyltrimethoxysilane (AMEO) as a Coupling Agent on Curing and Mechanical Properties of Natural Rubber/Palm Kernel Shell Powder Composites. *Procedia Chemistry*, 19, 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.019>

Donnet, J.-B., Bansal, R. C., & Wang, M.-J. (2018). *Carbon Black: Science and Technology* (2nd ed.; J.-B. Donnet, Ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315138763>

Greenough, S., Dumont, M.-J., & Prasher, S. (2021). The physicochemical properties of biochar and its applicability as a filler in rubber composites: A review. *Materials Today Communications*, 29, 102912. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102912>

Inegbedion, F., Igbonazobi, L. C., Imasuen, A. O., & Inetianbor, C. O. (2021). Characterization Of Low Density Polyethylene Waste Filled With Palm Kernel Shell. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 8(4), 71–78. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v8.i4.2021.918>

Insyirah, F., & Khair, M. (2021). Pembuatan Karbon Aktif Secara Kimia Hijau dari Tandan Sawit dengan Aktivasi Ultrasonik. *Periodic*, 10(1), 28–32. <https://doi.org/10.24036/p.v10i1.110612>

Kasih, T. S. D., Taufik, M., & Khair, M. (2020). PEMBUATAN KARBON AKTIF DARI LIMBAH CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis*) MENGGUNAKAN ULTRASONIK. *Periodic*, 9(2), 60–64. <https://doi.org/10.24036/p.v9i2.110252>

Kazemi, H., Mighri, F., & Rodrigue, D. (2022). A Review of Rubber Biocomposites Reinforced with Lignocellulosic Fillers. *Journal of Composites Science*, 6(7), 183. <https://doi.org/10.3390/jcs6070183>

Kementerian Keuangan Direktorat Bea dan Cukai. (2023, September 6). Bea Cukai Parepare Layani Ekspor Cangkang Sawit Indonesia ke Jepang. Retrieved October 15, 2024, from <https://www.beacukai.go.id/berita/bea-cukai-parepare-layani-ekspor-cangkang-sawit-indonesia-ke-jepang.html>

M. Ikumapayi, O., & T. Akinlab, E. (2018). Composition, Characteristics and Socioeconomic Benefits of Palm Kernel Shell Exploitation-An Overview. *Journal of Environmental Science and Technology*, 11(5), 220–232. <https://doi.org/10.3923/jest.2018.220.232>

Nicholas, A. F., Hussein, M. Z., Zainal, Z., & Khadiran, T. (2020). The effect of surface area on the properties of shape-stabilized phase change material

- prepared using palm kernel shell activated carbon. *Scientific Reports*, 10(1), 15047. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72019-1>
- Nuyah, N. (2012). Penggunaan Arang Cangkang Kelapa Sawit sebagai Bahan Pengisi dalam Pembuatan Kompon Selang Karet. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 23(1), 78710. <https://doi.org/10.28959/jdpi.v23i1.556>
- Oh, J., Yoo, Y. H., Yoo, I., Huh, Y., Chaki, T. K., & Nah, C. (2014). Effect of plasticizer and curing system on freezing resistance of rubbers. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(2), app.39795. <https://doi.org/10.1002/app.39795>
- Peterson, S. C. (2020). Coppiced Biochars as Partial Replacement of Carbon Black Filler in Polybutadiene/Natural Rubber Composites. *Journal of Composites Science*, 4(4), 147. <https://doi.org/10.3390/jcs4040147>
- Peterson, S. C., Chandrasekaran, S. R., & Sharma, B. K. (2016). Birchwood biochar as partial carbon black replacement in styrene-butadiene rubber composites. *Journal of Elastomers & Plastics*, 48(4), 305–316. <https://doi.org/10.1177/0095244315576241>
- Princi, E. (2019). Rubber: Science and Technology. In *Rubber*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110640328>
- Rashidi, N. A., Bokhari, A., & Yusup, S. (2021). Evaluation of kinetics and mechanism properties of CO₂ adsorption onto the palm kernel shell activated carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26), 33967–33979. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08823-z>
- Roy, K., Pongwisuthiruchte, A., Chandra Debnath, S., & Potiyaraj, P. (2021). Application of cellulose as green filler for the development of sustainable rubber technology. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100140. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100140>
- Samuel, A. O. A. (2020). Assessment of Palm Kernel Shells as Partial Replacement of Coarse Aggregates in Highway Pavements. *International Journal of Engineering Management*, 4(2), 25–29. <https://doi.org/10.11648/j.ijem.20200402.12>
- Suhas, Gupta, V. K., Singh, L. P., Chaudhary, M., & Kushwaha, S. (2021). A novel approach to develop activated carbon by an ingenious hydrothermal treatment methodology using *Phyllanthus emblica* fruit stone. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125643>
- Torres, L. F., McCaffrey, Z., Washington, W., Williams, T. G., Wood, D. F., Orts, W. J., & McMahan, C. M. (2021). Torrefied agro-industrial residue as filler in natural rubber compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(28), 50684. <https://doi.org/10.1002/app.50684>
- Uchegbulam, I., Momoh, E. O., & Agan, S. A. (2022). Potentials of palm kernel shell derivatives: A critical review on waste recovery for environmental sustainability. *Cleaner Materials*, 6, 100154. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100154>
- Wang, Z., Zhou, B., Liu, Z., Li, L., Zhou, K., Tian, T., ... Wang, Z. (2024). Ultrasonic regeneration of activated carbon with the addition of gas flushing. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100185. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100185>
- Yakum, R. N., Kingsly Mofor, W., & Nnoko Ngaaje, N. (2020). Influence of mechanical and physical properties of palm nut shell-plastic composite. *International Journal of Engineering Science Technologies*, 4(6), 30–38. <https://doi.org/10.29121/ijest.v4.i6.2020.128>

Halaman ini sengaja dikosongkan