

PEMBUATAN *CRUMB RUBBER* DARI LIMBAH KARET BAN-DALAM MENGGUNAKAN KEROSIN DAN MESIN GILING

Production of Crumb Rubber From Rubber Waste of Inner-Tire Using Kerosene And Milling Machine

Andri Saputra¹, Septiyana Windiastuti¹, Mertza Fitra Agustian¹, Danang Cahya Eka Saputra¹, Putra Oktavianto², Dennis Farina Nury³, dan Aldillah Herlambang⁴

¹Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta, Tarudan Bangunharjo, Sewon, Bantul, 55188

²Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif, KST BJ Habibie Gd 20, Tangerang Selatan, Banten 15313

³Program Studi Teknologi Proses Industri Petrokimia, Politeknik Industri Petrokimia Banten, Jalan Karang Bolong Cikoneng, Kecamatan Anyar, Kabupaten Serang, Banten, 42166

⁴Departemen Teknik Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Muaro Jambi, Jambi, 36361
Email: andri.saputra@atk.ac.id

Diterima 26 Maret 2025 / Direvisi 23 Mei 2025 / Disetujui 1 Juli 2025

Abstrak

Jumlah produksi ban di Indonesia mengalami peningkatan setiap tahunnya yang memberikan pengaruh terhadap peningkatan jumlah limbah ban-dalam. Pemanfaatan limbah ban-dalam sangat sulit dilakukan karena tidak dapat terurai secara alami bahkan setelah jangka waktu yang lama. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode kombinasi kimia dan mekanik dalam produksi crumb rubber dari limbah ban-dalam, guna menghasilkan alternatif daur ulang yang efisien dan dapat diterapkan pada skala industri kecil. Limbah ban-dalam dipotong menjadi spesimen uji, kemudian direndam dalam kerosin pada berbagai variasi waktu dan dikeringkan hingga berat konstan. Sifat mekanis (kekuatan tarik dan perpanjangan putus) diuji menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM). Hasil penelitian diketahui bahwa semakin lama perendaman menggunakan kerosin maka semakin menurunkan sifat mekanis spesimen karet uji. Perendaman dalam larutan kerosin selama 96 jam menurunkan kekuatan tarik (93,7%) dan perpanjangan putus (91%) spesimen karet uji secara maksimal. *Crumb rubber* yang diperoleh

dari penelitian ini berukuran berkisar 0,3-0,5 cm. Analisis spektra FTIR mengonfirmasi bahwa produk *crumb rubber* yang dihasilkan bebas dari kerosin.

Kata kunci: ban-dalam, *crumb rubber*, kerosin, limbah karet, mesin giling

Abstract

The annual production of tires in Indonesia has shown a consistent increase, consequently leading to a rise in the volume of inner tube waste. The utilization of inner tube waste poses a significant challenge due to its non-biodegradable nature, even over extended periods. This study aims to develop a combined chemical and mechanical method for producing crumb rubber from inner tube waste, in order to provide an efficient recycling alternative suitable for small-scale industrial applications. The inner tube waste was cut into test specimens, soaked in kerosene for various durations, and subsequently dried to a constant weight. The mechanical properties, including tensile strength and elongation at break, were evaluated using a Universal Testing Machine (UTM). The results indicate that prolonged immersion in kerosene leads to a greater reduction in the mechanical properties of the rubber

specimens. The most significant decrease in tensile strength (93.7%) and elongation at break (91%) was observed after 96 hours of immersion. The crumb rubber obtained in this study had a particle size ranging from 0.3 to 0.5 cm. FTIR spectra analysis confirmed that the crumb rubber product produced was free of kerosene.

Keywords: inner tube, crumb rubber, kerosene, rubber waste, milling machine.

Pendahuluan

Pemanfaatan limbah ban bekas sangat sulit dilakukan karena limbah ban bekas tidak dapat terurai secara alami bahkan setelah jangka waktu yang lama (Czajczyńska *et al.*, 2017). Setiap tahun hampir 1000 juta ban dibuang dan 50% di antaranya tidak didaur ulang. Pada tahun 2030 akumulasi ban tahunan akan mencapai 1200 juta. Ini adalah masalah ekologi yang sangat penting yang memerlukan solusi segera (B. S. Thomas *et al.*, 2015). Jumlah produksi ban di Indonesia mengalami peningkatan setiap tahunnya yang memberikan pengaruh terhadap peningkatan jumlah limbah ban-dalam (Supriyanto *et al.*, 2019; Mukti *et al.*, 2023). Sifat-sifat ban, seperti tahan terhadap kerusakan mekanis, awet dan kuat, dalam kondisi cuaca apa pun, membuat pembuangannya menjadi sangat sulit. Mikroorganisme membutuhkan waktu lebih dari 100 tahun untuk menghancurkan ban (Torretta *et al.*, 2015).

Untuk mengatasi masalah ini, ada tiga cara utama yang dapat digunakan untuk menangani limbah ban, yaitu: penggunaan kembali, pembakaran, dan pembuangan (penimbunan). Telah diketahui bahwa pembakaran limbah ban dapat mengeluarkan sejumlah besar CO_x, NO_x, dan SO_x. Menimbun limbah ban ke dalam lahan terbuka (permukaan tanah) akan menimbulkan pengaruh yang serius terhadap tanah dan pemukiman. Tempat pembuangan sampah ban juga merupakan ancaman besar bagi lingkungan dan kesehatan manusia karena risiko kebakaran dan karena merupakan habitat nyamuk dan hewan pengerat, yang

sangat terkait dengan banyak penyakit (Czajczyńska *et al.*, 2017). Pengolahan limbah ban melalui gasifikasi dan pirolisis masih belum umum dilakukan (Banar *et al.*, 2012; Khan *et al.*, 2020). Metode ini berpotensi berkembang karena didorong oleh isu lingkungan dan kebutuhan energi. Selain itu, investasi di bidang pirolisis terus bertambah. Meski demikian, limbah ban di beberapa negara masih dibuang tanpa diolah. Pembuangan limbah ban sangat bermasalah dan berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia (Czajczyńska *et al.*, 2017).

Di Indonesia, ban bekas tersedia dalam jumlah besar dan mudah ditemukan. Setiap tahun, jumlah kendaraan terus meningkat, sehingga volume ban bekas yang dihasilkan juga semakin tinggi. Kondisi ini menuntut penanganan limbah ban secara tepat dan berkelanjutan (Wijaya & Evangelino, 2021). Dari sudut pandang ekonomi, ban bekas dengan biaya rendah dapat digunakan kembali di beberapa aplikasi seperti asphalt pavements (Shu & Huang, 2014; Ge *et al.*, 2016), beton (Aiello & Leuzzi, 2010; Yung *et al.*, 2013; Wijaya & Evangelino, 2021), komposit plastik (Kakroodi & Rodrigue, 2013; Wang *et al.*, 2018) dan kompon karet (Araujo-Morera *et al.*, 2019; Fazli & Rodrigue, 2020). Penggunaan kembali ban bekas dalam beberapa aplikasi tersebut biasanya dalam bentuk butiran (granul) yang sering dikenal dengan crumb rubber. Crumb rubber adalah produk yang ramah lingkungan karena dipakai dari bahan karet bekas dan tidak larut dalam tanah ataupun air tanah. Kegunaan utama crumb rubber adalah sebagai bahan baku filler pengganti industri manufaktur karet (Araujo-Morera *et al.*, 2019; Fazli & Rodrigue, 2020).

Proses pembuatan crumb rubber terdiri dari dua tahap yaitu tahap primer dan sekunder. Tahap primer adalah proses mengubah limbah ban menggunakan cracker mill (mesin cacah sejenis) menjadi serpihan kasar, sedangkan tahap sekunder adalah proses pengurangan ukuran serpihan ban kasar menggunakan grinder (sejenis mesin giling) menjadi karet butiran (De *et al.*, 2005). Dilihat dari hal tersebut, kedua proses dilakukan secara

mekanis yang membutuhkan energi lebih tinggi. Pengolahan limbah karet menurut penelitian dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu proses mekanis dan proses mekano-kimia (Lapkovskis *et al.*, 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk membuat *crumb rubber* dengan memadukan metode kimia menggunakan pelarut kerosin dan proses mekanis menggunakan mesin giling. Pelarut kerosin yang digunakan adalah minyak tanah produksi PT Pertamina (Persero), yang mengandung lebih dari 99% hidrokarbon dan kurang dari 0,1% aditif. Kerosin dipilih karena sifatnya sebagai pelarut non-polar yang efektif dalam melunakkan matriks karet untuk mempermudah proses penghancuran. Limbah ban yang digunakan adalah ban-dalam karena kompleksitas penyusunnya yang lebih sederhana dibanding ban-luar yang biasanya terdiri dari serat, karet, wire, dan aditif. Oleh karena itu, pengolahan ban-dalam menjadi lebih sederhana dan tanpa perlu tahapan pemisahan karet dari serat dan wire. Karena limbah ban-dalam masih memiliki elastisitas yang cukup baik, sehingga memerlukan mesin giling dengan daya gerus yang tinggi. Oleh karena itu, pemilihan metode kimia menggunakan larutan kerosin bertujuan untuk melarutkan dan melunakkan limbah ban-dalam. Limbah ban-dalam yang telah lunak kemudian lebih mudah diolah atau dibentuk menjadi granul menggunakan mesin giling sederhana. Harapan kedepannya,

metode pembuatan *crumb rubber* yang lebih sederhana bisa diterapkan oleh industri kecil-menengah melalui Pengabdian kepada Masyarakat.

Bahan dan Metode

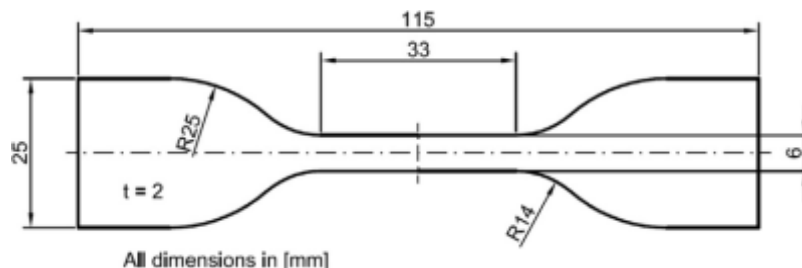
Penelitian dilakukan di Laboratorium Limbah dan Laboratorium Pengujian, Politeknik ATK Yogyakarta selama 6 bulan dari Maret hingga Agustus 2024.

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan adalah limbah ban-dalam kendaraan bermotor roda dua, kerosin, dan kertas tisu. Limbah ban-dalam diperoleh dari bengkel sepeda motor yang berada di Panggungharjo, Kecamatan Sewon, Kabupaten Bantul. Peralatan yang digunakan adalah mesin giling, gelas beaker 500 mL, mikrometer, pinset, universal testing machine (UTM), dan Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy Frontier C96600 PerkinElmer (Massachusetts).

Persiapan

Limbah ban-dalam dipotong menggunakan pisau pond menghasilkan potongan spesimen uji (sampel) berupa dumbell (Gambar 1). Jumlah sampel (spesimen uji) mengikuti rancangan variabel penelitian seperti terlihat dalam Tabel 1.



Gambar 1. Bentuk dan ukuran potongan spesimen uji (sampel).

Tabel 1. Rancangan variabel penelitian

Sampel	Lama perendaman (jam)
1	0
2	0,2
3	0,5
4	1
5	2
6	3
7	4
8	5
...	...
21	312

Perendaman dan Penggilingan

Kerosin 400 mL dimasukkan dalam gelas beaker 500 mL. Sampel direndam dalam larutan kerosin dengan lama perendaman mengikuti rancangan variabel penelitian seperti terlihat dalam Tabel 1. Kemudian, sampel dikeluarkan dari larutan kerosin. Sampel ditiriskan (dikeringkan) dan dilap menggunakan kertas tisu. Sampel dioven pada

suhu 30 °C selang beberapa waktu tertentu hingga berat sampel konstan. Sampel diuji kekuatan tarik menggunakan UTM. Sampel yang memiliki penurunan kekuatan tarik yang optimal digiling menggunakan mesin giling (Gambar 2) sehingga diperoleh *crumb rubber*. Percobaan dalam penelitian ini dilakukan sebanyak dua kali (*duplo*).



Gambar 2. Penggilingan limbah ban-dalam yang telah direndam dalam larutan kerosin pada waktu optimum menggunakan mesin giling

Pengujian

Sampel dalam Tabel 1 diuji sifat mekanisnya (kekuatan tarik dan perpanjangan putus) menggunakan UTM mengikuti prosedur uji SNI 778-2017 (BSN, 2017). Suhu ruangan selama pengujian pada 25 °C. Sampel dengan penurunan sifat mekanis yang optimal dipilih untuk digiling menjadi *crumb rubber*. *Crumb rubber* dikeringkan dalam oven pada suhu 30 °C hingga beratnya konstan (2 hari), kemudian dilakukan beberapa karakterisasi antara lain gugus fungsi menggunakan FTIR. Karakteristik ukuran *crumb rubber* diukur menggunakan mikrometer dibandingkan dengan ukuran *filler* komersial (carbon black N330).

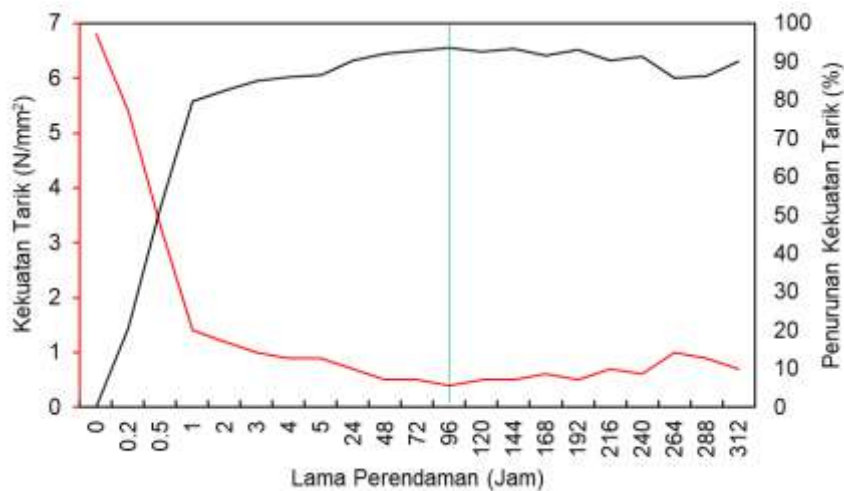
Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Waktu Perendaman Terhadap Sifat Mekanis

Data dalam Gambar 3 menunjukkan perubahan kekuatan tarik spesimen karet uji setelah direndam dalam larutan kerosin pada berbagai durasi waktu, mulai dari 0 hingga 312 jam. Pada waktu awal (0 jam), kekuatan tarik karet mencapai 6,8 N/mm², yang mencerminkan nilai kekuatan awal sebelum proses perendaman. Setelah perendaman selama 0,2 jam, terjadi penurunan signifikan

kekuatan tarik menjadi 5,4 N/mm². Penurunan ini terus berlanjut seiring waktu, dengan kekuatan tarik mencapai 3,3 N/mm² setelah 0,5 jam dan 1,4 N/mm² setelah 1 jam. Kekuatan tarik semakin menurun hingga mencapai 1,2 N/mm² pada 2 jam dan 0,9 N/mm² pada 4 jam perendaman. Setelah 24 jam perendaman, kekuatan tarik menurun lebih jauh menjadi 0,7 N/mm², dan stabil pada sekitar 0,5 N/mm² untuk durasi hingga 144 jam. Pada beberapa titik waktu, seperti 168 jam dan 216 jam, kekuatan tarik sedikit meningkat hingga 0,6 N/mm² dan 0,7 N/mm², sebelum kembali stabil di rentang 0,5–0,6 N/mm² untuk waktu perendaman yang lebih panjang.

Menariknya, pada 264 jam, kekuatan tarik mengalami peningkatan hingga 1 N/mm², menunjukkan adanya kemungkinan interaksi atau penyesuaian mekanik pada struktur karet selama perendaman. Namun, kekuatan tarik kembali turun pada 288 jam menjadi 0,9 N/mm² dan 0,7 N/mm² pada 312 jam. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa perendaman dalam larutan kerosin menyebabkan penurunan signifikan kekuatan tarik karet, terutama pada durasi awal, dengan nilai kekuatan tarik cenderung stabil pada tingkat rendah setelah 24 jam perendaman dan mencapai tingkat terendah pada perendaman 96 jam.



Gambar 3. Pengaruh lama perendaman terhadap kekuatan tarik limbah karet ban-dalam.

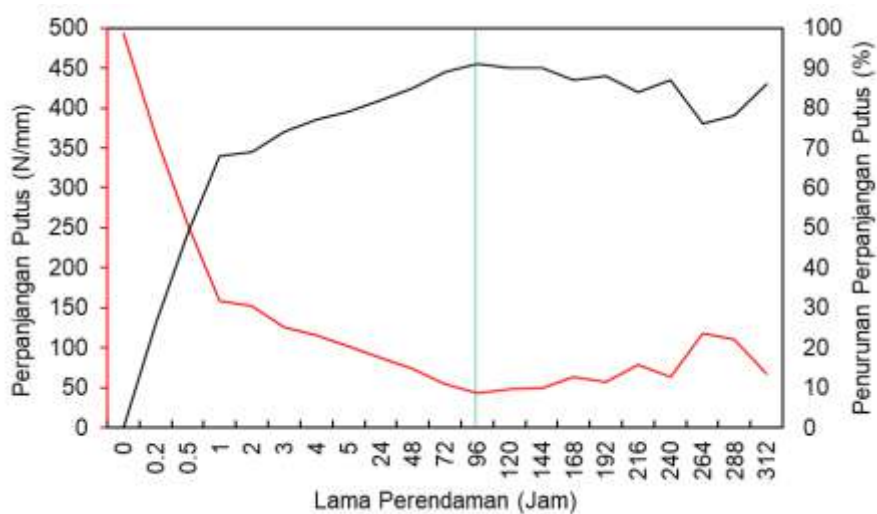
Gambar 3 juga menunjukkan persentase penurunan kekuatan tarik spesimen karet uji akibat perendaman limbah karet ban dalam dalam larutan kerosin pada berbagai durasi waktu. Pada awal perendaman (0 jam), tidak terdapat penurunan kekuatan tarik, dengan nilai penurunan tercatat sebesar 0%. Namun, setelah 0,2 jam, penurunan signifikan mulai terlihat dengan persentase mencapai 20,5%. Pada 0,5 jam perendaman, terjadi peningkatan penurunan hingga 52,1%, diikuti oleh nilai 79,8% setelah 1 jam, dan 82,4% setelah 2 jam.

Setelah 3 jam perendaman, penurunan kekuatan tarik mencapai 85,1% dan terus meningkat hingga stabil pada 86%–86,5% pada interval waktu 4 hingga 5 jam. Pada durasi perendaman yang lebih panjang, yaitu 24 jam, penurunan kekuatan tarik mencapai 90,3%, dan terus meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 93,7% pada 96 jam. Setelah 96 jam, terjadi sedikit fluktuasi pada nilai penurunan kekuatan tarik, yang berkisar antara 90,4% hingga 93,7% hingga akhir perendaman pada 312 jam.

Hasil ini menunjukkan bahwa larutan kerosin secara efektif menurunkan kekuatan tarik spesimen karet uji, terutama pada fase awal perendaman, dengan penurunan mencapai lebih dari 50% hanya dalam 0,5 jam. Selama perendaman jangka panjang, penurunan kekuatan tarik mendekati nilai

maksimum, menunjukkan bahwa degradasi material mencapai batas tertentu. Fluktuasi kecil yang diamati pada nilai penurunan setelah 96 jam dapat dikaitkan dengan fenomena stabilisasi atau penyerapan yang tidak merata oleh material. Data ini menggambarkan pengaruh signifikan kerosin terhadap degradasi fisik karet limbah. Temuan ini sejalan dengan studi oleh Farid *et al.* (2010) menunjukkan bahwa penambahan pelarut toluena dan aseton pada resin epoksi mempengaruhi sifat mekaniknya. Penambahan toluena hingga 8% berat meningkatkan modulus Young dan tegangan patah, tetapi penambahan lebih lanjut menurunkan sifat-sifat tersebut.

Gambar 4 menunjukkan data perubahan perpanjangan putus spesimen karet uji setelah perendaman dalam larutan kerosin pada berbagai durasi waktu. Pada awal perendaman (0 jam), perpanjangan putus spesimen berada pada nilai maksimum sebesar 493 N/mm. Setelah perendaman selama 0,2 jam, perpanjangan putus mengalami penurunan signifikan menjadi 364 N/mm, dan terus menurun menjadi 252 N/mm pada 0,5 jam. Penurunan lebih lanjut diamati setelah 1 jam perendaman, dengan nilai mencapai 159 N/mm, dan stabil pada kisaran 152–126 N/mm dalam durasi 2 hingga 3 jam.



Gambar 4. Pengaruh lama perendaman terhadap perpanjangan putus limbah karet ban-dalam.

Penurunan berlanjut hingga mencapai 102 N/mm pada 5 jam perendaman. Pada waktu 24 jam, nilai perpanjangan putus menurun lebih lanjut menjadi 88 N/mm dan mencapai 43 N/mm pada 96 jam, yang merupakan nilai terendah yang diamati dalam tabel. Menariknya, setelah 96 jam, terjadi sedikit peningkatan nilai perpanjangan putus, seperti yang terlihat pada durasi 120–144 jam, dengan nilai berkisar antara 48 hingga 50 N/mm. Selanjutnya, pada 168 hingga 216 jam, perpanjangan putus fluktuatif, dengan nilai meningkat dari 64 N/mm hingga 79 N/mm, sebelum kembali menurun.

Pada durasi perendaman yang lebih panjang (264 hingga 312 jam), terjadi fluktuasi yang lebih signifikan, dengan nilai perpanjangan putus mencapai puncak kecil sebesar 118 N/mm pada 264 jam, sebelum menurun lagi menjadi 67 N/mm pada akhir perendaman (312 jam). Data ini menunjukkan bahwa larutan kerosin secara signifikan mengurangi elastisitas karet limbah, terutama pada tahap awal perendaman. Peningkatan kecil pada beberapa titik waktu mungkin disebabkan oleh relaksasi material atau redistribusi efek pelarut dalam matriks karet. Namun, secara keseluruhan, tren yang menurun menunjukkan degradasi permanen struktur karet akibat perendaman dalam larutan kerosin.

Data yang disajikan pada Gambar 4 juga menunjukkan hubungan antara lama waktu perendaman limbah karet ban dalam larutan kerosin dengan persentase penurunan perpanjangan putus spesimen karet uji (%). Peningkatan waktu perendaman umumnya menyebabkan peningkatan penurunan perpanjangan putus hingga batas tertentu, kemudian nilai tersebut berfluktuasi. Pada awal perendaman, terjadi peningkatan yang signifikan dalam penurunan perpanjangan putus, misalnya dari 0% pada waktu 0 jam menjadi 26% hanya dalam 0,2 jam. Peningkatan yang signifikan terus terjadi hingga mencapai 91% pada 96 jam perendaman. Setelahnya, terdapat pola stabilisasi, di mana penurunan berada pada kisaran 90% hingga 87% selama rentang waktu

120 hingga 192 jam. Namun, setelah 192 jam, persentase penurunan mulai menunjukkan fluktuasi. Pada 216 jam, nilai turun menjadi 84%, meningkat lagi menjadi 87% pada 240 jam, dan menurun hingga 76% pada 264 jam sebelum naik kembali menjadi 86% pada 312 jam.

Fluktuasi yang terjadi setelah waktu tertentu mungkin disebabkan oleh faktor material karet yang mengalami degradasi lebih lanjut atau adanya keseimbangan difusi larutan kerosin ke dalam struktur karet. Data ini menunjukkan bahwa larutan kerosin memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan sifat elastisitas karet, khususnya pada tahap awal perendaman, sebelum akhirnya mencapai kondisi yang lebih stabil dengan fluktuasi pada jangka waktu yang lebih lama.

Penurunan sifat mekanik karet ban-dalam dalam larutan kerosin disebabkan oleh kombinasi efek fisik (*swelling* dan plastisasi) serta reaksi kimia, terutama degradasi oksidatif dan ekstraksi aditif. Proses ini menunjukkan bahwa paparan pelarut organik dapat sangat mendegradasi karet (Akinlabi & Okieimen, 2011; Demmel *et al.*, 2022). Ketika karet ban-dalam direndam dalam pelarut kerosin, terjadi interaksi fisik dan kimia yang memengaruhi struktur dan sifat mekanis karet. Fenomena ini terutama berkaitan dengan sifat kerosin sebagai pelarut organik nonpolar dan komposisi karet yang umumnya terdiri dari polimer elastomer (seperti karet alam atau sintesis), ditambah bahan aditif seperti karbon hitam, minyak, dan *plasticizer*. Fenomena yang terjadi saat perendaman karet dalam pelarut kerosin antara lain *swelling* (pembengkakan), plastisasi, degradasi polimer, dan ekstraksi komponen aditif.

Pada tahap awal perendaman, molekul-molekul kerosin meresap ke dalam matriks polimer karet melalui proses difusi. Kerosin, yang bersifat nonpolar, memiliki afinitas tinggi terhadap segmen hidrokarbon pada polimer karet, menyebabkan polimer menyerap pelarut. Akibatnya, rantai polimer dalam karet saling menjauh (*swelling*), yang melemahkan gaya antar molekul dan mengurangi kekuatan

mekanis, seperti modulus elastisitas – (Brunier & Antonini, 1984; Randová & Bartovská, 2018; Kumar *et al.*, 2022).

Kerosin bertindak sebagai pelarut eksternal, menurunkan kohesi antar rantai polimer. Hal ini menyebabkan penurunan modulus dan kekuatan tarik karet, serta meningkatkan fleksibilitas sementara (Fan *et al.*, 2022). Penurunan ini terlihat jelas dalam data, di mana perpanjangan putus berkurang seiring waktu. Pada paparan kerosin yang lebih lama, rantai polimer dapat mulai mengalami degradasi oksidatif atau termal jika ada pemicu, seperti panas atau paparan oksigen selama perendaman. Reaksi ini dapat menyebabkan pemutusan ikatan kimia dalam struktur polimer, sehingga memengaruhi elastisitas (Mucha & Mucha, 2022). Beberapa aditif dalam karet, seperti minyak dan *plasticizer* bawaan, dapat larut dalam kerosin dan terekstraksi dari matriks karet. Kehilangan aditif ini mengurangi fleksibilitas dan mempercepat penurunan sifat mekanik, terutama pada perendaman yang lebih lama (Kikuchi & Ohtake, 2006).

Karakteristik *Crumb Rubber*

Karakteristik *crumb rubber* yang diamati dalam penelitian ini antara lain gugus fungsi dan penampakan fisik (ukuran) *crumb rubber*. *Crumb rubber* yang diperoleh dari penelitian ini memiliki tampilan seperti pada Gambar 5 dengan ukuran berkisar 0,3-0,5 cm. Ukuran partikel *crumb rubber* ini masih tergolong jauh lebih besar jika akan digunakan sebagai *filler*

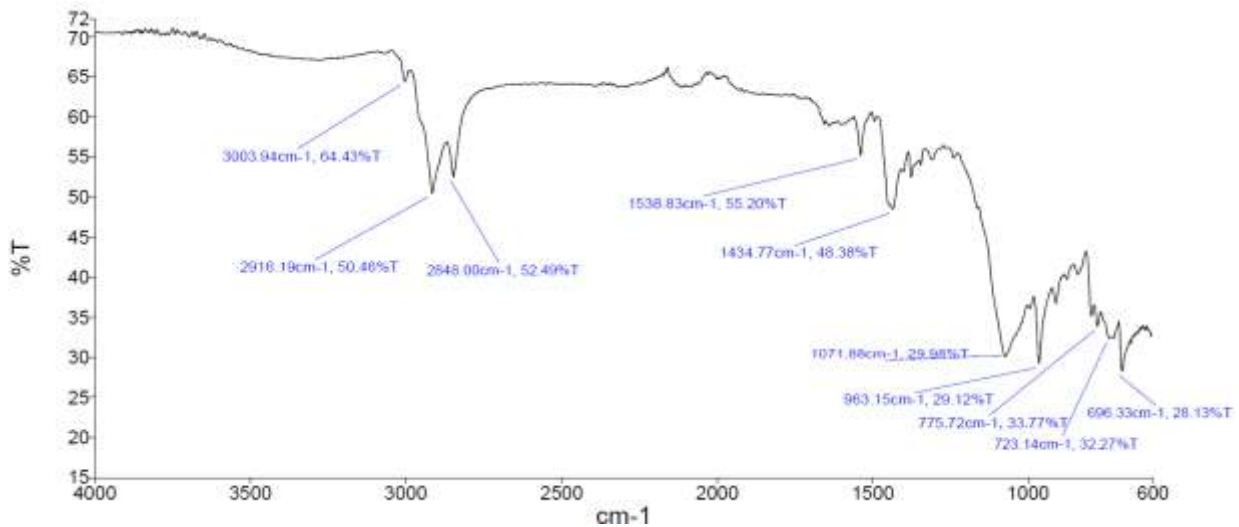
komersial yang umum digunakan seperti carbon black N330 (20-30 nm). Ukuran partikel yang masih relatif besar ini dikarenakan mesin giling yang digunakan belum optimal untuk menggiling dan mereduksi ukuran limbah karet ban-dalam yang telah direndam. Karena memiliki ukuran yang lebih besar, aplikasi *crumb rubber* sebagai bahan pengganti filler komersil perlu dikaji lebih lanjut ke depannya, termasuk pengaruhnya terhadap karakteristik vulkanisat atau produk karet.

Ketika *crumb rubber* akan digunakan sebagai *filler* karet, keberadaan kerosin dalam *crumb rubber* dikhawatirkan mengganggu dan menurunkan kualitas kompon dan vulkanisat karet. Oleh karena itu, kerosin harus dihilangkan dari *crumb rubber* dengan cara dikeringkan dalam oven pada suhu 30 °C hingga beratnya konstan (2 hari). Pengecekan spektra FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan kerosin pada *crumb rubber* yang sebelumnya telah direndam dalam kerosin. Spektra FTIR pada Gambar 6 menunjukkan beberapa puncak karakteristik yang mencerminkan komponen kimia dalam material *crumb rubber*.

Identifikasi gugus fungsi berdasarkan spektra FTIR ditampilkan dalam Tabel 2. Puncak pada bilangan gelombang 3003,94 cm^{-1} dapat diasosiasikan dengan getaran ulur (*stretching*) C-H dari ikatan rangkap pada senyawa alifatik (C=C-H), yang khas untuk struktur karet. Puncak di sekitar 2916,19 cm^{-1} dan 2848,00 cm^{-1} mencerminkan getaran ulur



Gambar 5. Tampilan *crumb rubber* dari ban-dalam.



Gambar 6. Spektra FTIR *crumb rubber*.

C-H dari gugus metilen ($-\text{CH}_2-$) dan metil ($-\text{CH}_3$) dalam rantai polimer (Smith, 2022). Puncak pada $1538,83 \text{ cm}^{-1}$ dan $1434,77 \text{ cm}^{-1}$ dapat dihubungkan dengan getaran ulur rangkap dari gugus $\text{C}=\text{C}$ pada struktur karet, menunjukkan keberadaan ikatan rangkap dalam matriks karet. Selain itu, puncak pada $1374,31 \text{ cm}^{-1}$ dapat dikaitkan dengan deformasi (*bending*) dari gugus metil ($-\text{CH}_3$) (Smith, 2022). Puncak signifikan lainnya di daerah *finger-print*, puncak pada $1071,88 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi peregangan C-O, yang mungkin berasal dari seng stearat yang

terbentuk dari seng oksida dan asam stearat (Musto *et al.*, 2013). Puncak $963,15 \text{ cm}^{-1}$, $775,72 \text{ cm}^{-1}$, dan $723,14 \text{ cm}^{-1}$ berhubungan dengan vibrasi tekukan di luar bidang dari ikatan $\text{C}=\text{C}$ tak jenuh, yang menunjukkan adanya ikatan rangkap dari struktur karet (Lopatin *et al.*, 1991). Puncak pada $696,33 \text{ cm}^{-1}$ dapat dikaitkan dengan vibrasi peregangan C-S, sebuah karakteristik ikatan silang sulfur yang terbentuk selama vulkanisasi dengan tetrametiltiuram disulfida (TMTD) dan sulfur (Geysler & McGill, 1996).

Tabel 2. Identifikasi gugus fungsi berdasarkan spektra FTIR

Panjang Gelombang (cm^{-1})	Gugus Fungsi
3003,94	C-H (<i>stretching</i>)
2916,19	C-H (<i>stretching</i>)
2848,00	C-H (<i>stretching</i>)
1538,83	$\text{C}=\text{C}$ (<i>stretching</i>)
1434,77	$\text{C}=\text{C}$ (<i>stretching</i>)
1374,31	$-\text{CH}_3$ (<i>bending</i>)
1071,88	C-O (<i>stretching</i>)
963,15	$\text{C}=\text{C}$ (<i>stretching</i>)
775,72	$\text{C}=\text{C}$ (<i>stretching</i>)
723,14	$\text{C}=\text{C}$ (<i>stretching</i>)
696,33	C-S

Kerosin standar memiliki puncak karakteristik pada 1452 cm^{-1} dan 1373 cm^{-1} yang merepresentasikan gugus fungsi $-\text{CH}=\text{CH}_2$ (Khan *et al.*, 2016). Namun, puncak ini tidak ditemukan dalam sampel uji (*crumb rubber*), sehingga dapat dikatakan proses pengeringan mampu mengeluarkan (menguapkan) kerosin yang terserap selama perendaman dan membuat kualitas *crumb rubber* berpotensi dijadikan sebagai *filler* karet. Jika *crumb rubber* masih mengandung kerosin, maka dikhawatirkan kerosin akan melarutkan molekul karet. Akibatnya, rantai polimer dalam karet saling menjauh (*swelling*), yang melemahkan gaya antar molekul dan mengurangi kekuatan mekanis produk karet, seperti modulus elastisitas (Brunier & Antonini, 1984; Randová & Bartovská, 2018; Kumar *et al.*, 2022).

Kesimpulan

Limbah karet ban-dalam dapat didaur ulang untuk membuat *crumb rubber*. Perendaman limbah ban-dalam dalam kerosin selama 96 jam secara maksimal melunakkan material ban-dalam, yang ditunjukkan oleh penurunan kekuatan tarik (93,7%) dan peningkatan perpanjangan putus (91%). Hal ini memungkinkan limbah ban-dalam dapat mempermudah proses penggilingan menjadi *crumb rubber*. Ukuran partikel *crumb rubber* yang diperoleh tergolong besar (0,3–0,5 cm), sehingga diperlukan pengujian lanjutan menggunakan *grinder* atau *milling machine* dengan mata pisau lebih kecil untuk menghasilkan partikel yang mendekati ukuran *filler* komersial. Analisis spektra FTIR terhadap *crumb rubber* yang telah dikeringkan menunjukkan keberadaan struktur utama karet dan bahan aditif seperti seng oksida, asam stearat, serta ikatan silang sulfur, namun tidak terdeteksi gugus fungsi dari kerosin. Metode kombinasi pelarutan kerosin dan penggilingan berpotensi diterapkan sebagai solusi sederhana untuk pengolahan limbah ban-dalam pada skala industri kecil.

Daftar Pustaka

- Aiello, M. A., & Leuzzi, F. (2010). Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. *Waste Management* (New York, N.Y.), 30(8–9), 1696–1704. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.005>
- Akinlabi, A. K., & Okieimen, F. E. (2011). Investigation of the degradation properties of low molecular weight natural rubber blends in oven, oxygen, ozone, water, and some organic solvents. *Journal of Applied Polymer Science*, 121(1), 78–85. <https://doi.org/10.1002/app.33286>
- Araujo-Morera, J., Hernández Santana, M., Verdejo, R., & López-Manchado, M. A. (2019). Giving a Second Opportunity to Tire Waste: An Alternative Path for the Development of Sustainable Self-Healing Styrene-Butadiene Rubber Compounds Overcoming the Magic Triangle of Tires. *Polymers*, 11(12), 2122. <https://doi.org/10.3390/polym11122122>
- Banar, M., Akyıldız, V., Özkan, A., Çokaygil, Z., & Onay, Ö. (2012). Characterization of pyrolytic oil obtained from pyrolysis of TDF (Tire Derived Fuel). *Energy Conversion and Management*, 62, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.03.019>
- Brunier, E., & Antonini, G. (1984). Experimental and Numerical Description of the Diffusion of a Liquid in a Swelling Elastomer. In C. A. Brebbia & G. A. Keramidis (Eds.), *Computational Methods and Experimental Measurements* (pp. 623–632). Springer Berlin Heidelberg.
- BSN. (2017). Sol Karet Cetak (SNI SNI 778:2017). Badan Standardisasi Nasional.
- Czajczyńska, D., Krzyżyńska, R., Jouhara, H., & Spencer, N. (2017). Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*, 134, 1121–1131. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113623427>

- De, S. K., Isayev, A., & Khait, K. (2005). *Rubber Recycling* (1st ed.) (Vol. 1). CRC Press.
- Demmel, B., Förster, T., Eibl, S., Johlitz, M., & Lion, A. (2022). Long-Term Storage of Aged NBR in Kerosene in Consideration of Long Material Service Life. In H. Altenbach, M. Johlitz, M. Merkel, & A. Öchsner (Eds.), *Lectures Notes on Advanced Structured Materials* (pp. 229–240). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11589-9_16
- Fan, J. J., Li, C. G., Liu, B. T., Sun, C. Y., & Jia, X. H. (2022). Study on the Change Behavior of Fluorosilicone Rubber in RP-3 Kerosene. *Materials Science Forum*, 1061, 45–50. <https://doi.org/10.4028/p-zg7ejj>
- Farid, S. B. H., Jabur, A. R., & Abbass, K. K. (2010). The effect of solvent additions on the mechanical properties of epoxy. *Engineering & Technology Journal*, 28(18), 1–10.
- Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020). Recycling Waste Tires into Ground Tire Rubber (GTR)/RubberCompounds: A Review. *Journal of Composites Science*, 4(3), 103. <https://doi.org/10.3390/jcs4030103>
- Ge, D., Yan, K., You, Z., & Xu, H. (2016). Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene. *Construction and Building Materials*, 126, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.014>
- Geyser, M., & McGill, W. J. (1996). Thiuram-accelerated sulfur vulcanization. III. The formation of crosslinks. *Journal of Applied Polymer Science*, 60(3), 439–447. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960418\)60:3<439::AID-APP18>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19960418)60:3<439::AID-APP18>3.0.CO;2-Y)
- Kakroodi, A. R., & Rodrigue, D. (2013). Highly filled thermoplastic elastomers from ground tire rubber, maleated polyethylene and high density polyethylene. *Plastics, Rubber and Composites*, 42(3), 115–122. <https://doi.org/10.1179/1743289812Y.000000042>
- Khan, M. S., Inamullah, Sohail, M., & Khattak, N. S. (2016). Conversion of mixed low-density polyethylene wastes into liquid fuel by novel CaO/SiO₂ catalyst. *Journal of Polymers and the Environment*, 24, 255–263.
- Khan, S. R., Zeeshan, M., & Masood, A. (2020). Enhancement of hydrocarbons production through co-pyrolysis of acid-treated biomass and waste tire in a fixed bed reactor. *Waste Management*, 106, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.010>
- Kumar, N., Singh, K. P., Giri, A., & Singh, S. P. (2022). Transport mechanism and diffusion kinetics of kerosene through polynorbornene rubber/natural rubber blends. *Polymer Bulletin*, 79(7), 5305–5325. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03770-2>
- Lapkovskis, V., Mironovs, V., Kasperovich, A., Myadelets, V., & Goljandin, D. (2020). Crumb Rubber as a Secondary Raw Material from Waste Rubber: A Short Review of End-Of-Life Mechanical Processing Methods. *Recycling*, 5(4), 32–0. <https://doi.org/10.3390/recycling5040032>
- Lopatin, B. V., Vinokurov, V. G., Lopatina, N. B., & Berdyugin, V. A. (1991). Identification of absorption bands corresponding to C-C1 stretching vibrations in the IR spectra of organic compounds. *Journal of Applied Spectroscopy*, 55(3), 863–866. <https://doi.org/10.1007/BF00662411>
- Mucha, M., & Mucha, J. (2022). Heterogeneous polymers degradation – microplastic. *Polimery*, 67(7–8), 293–297. <https://doi.org/10.14314/polimery.2022.7.1>
- Mukti, A. C., Prasetya, R. D., & Suminto, S. (2023). Aplikasi Limbah Ban Dalam Pada Produk Skateboard Carrier. *Idealog: Ide dan Dialog Desain Indonesia*, 8(1), 124–132. <https://doi.org/10.25124/idealog.v8i1.4660>

- Musto, P., Larobina, D., Cotugno, S., Straffi, P., Florio, G. D., & Mensitieri, G. (2013). Confocal Raman imaging, FTIR spectroscopy and kinetic modelling of the zinc oxide/stearic acid reaction in a vulcanizing rubber. *Polymer*, 54(2), 685 – 693 .
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.12.021>
- Randová, A., & Bartovská, L. (2018). Chapter 4—Fundamentals and Measurement Techniques for Solvent Transport in Polymers. In S. Thomas, R. Wilson, A. K. S., & S. C. George (Eds.), *Transport Properties of Polymeric Membranes* (pp. 51 – 70) . Elsevier .
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809884-4.00004-5>
- Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. 1. Special Issue of KIFA-6 2. Utilization of Crumb Rubber in Asphalt Mixtures, 67, 217–224.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>
- Smith, B. C. (2022). The Infrared Spectra of Polymers IV: Rubbers. *Spectroscopy*, 37(1), 8 – 12 .
<https://doi.org/10.56530/spectroscopy.mz6968v1>
- Supriyanto, S., Ismanto, I., & Suwito, N. (2019). Zeolit Alam Sebagai Katalis Pyrolisis Limbah Ban Bekas Menjadi Bahan Bakar Cair. *Automotive Experiences*, 2(1), 15 – 21 .
<https://doi.org/10.31603/ae.v2i1.2377>
- Thomas, B. S., Gupta, R. C., & John Panicker, V. (2015). Experimental and modelling studies on high strength concrete containing waste tire rubber. *Sustainable Cities and Society*, 19, 68–73.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.013>
- Torretta, V., Rada, E. C., Ragazzi, M., Trulli, E., Istrate, I. A., & Cioca, L. I. (2015). Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Urban Mining*, 45, 152 – 160 .
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.018>
- Wang, Y.-H., Chen, Y.-K., & Rodrigue, D. (2018). Production of Thermoplastic Elastomers Based on Recycled PE and Ground Tire Rubber: Morphology, Mechanical Properties and Effect of Compatibilizer Addition. *International Polymer Processing*, 33(4), 525–534.
<https://doi.org/doi:10.3139/217.3544>
- Wijaya, H. S., & Evangelino, E. D. C. (2021). Pengaruh Penambahan Limbah Ban Bekas Terhadap Kekuatan Beton. *Jurnal Quateknika*, 11(1), 10 – 17 .
<https://doi.org/10.35457/quateknika.v11i1.1405>
- Yung, W. H., Yung, L. C., & Hua, L. H. (2013). A Study of The Durability Properties of Waste Tire Rubber Applied To Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 41, 665–672.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019>