

Pembuatan Bantalan Dermaga Menggunakan Karet Bekas (*Reclaimed Rubber*)

Brian Agriel Saragih Sitio¹, Pani Satwikanitya^{1*}

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

*Email: pani.satwikanitya@atk.ac.id

Received 20 Desember 2024 | Revised 15 Januari 2025 | Accepted 17 Januari 2025

ABSTRAK

Tingginya harga karet bahan baku dan faktor kepedulian terhadap lingkungan dapat menjadikan karet bekas (*reclaimed rubber*) sebagai alternatif bahan yang hemat biaya untuk banyak aplikasi produk karet, seperti bantalan dermaga. Studi ini mempelajari pemanfaatan karet bekas dalam pembuatan bantalan dermaga dengan memvariasikan jumlah (phr) karet bekas dalam kompon, masing-masing 0, 15, 35, dan 50 phr. Pengujian sifat mekanik dilakukan untuk mengetahui pemenuhan kualitas produk berdasarkan SNI. Sementara, biaya bahan baku dievaluasi berdasarkan harga kompon/kg. Penambahan karet bekas dalam kompon mempengaruhi sifat mekanik vulkanisat. Ketidakhomogenan kompon dan pemutusan ikatan saat proses *reclaiming* menyebabkan penurunan sifat mekanik vulkanisat karet bantalan dermaga. Penggunaan karet bekas sebesar 15 phr menghasilkan produk yang paling baik, yaitu harga rendah dengan sifat mekanik yang optimal. Karet bekas sebesar 15 phr yang dicampurkan dalam kompon bantalan dermaga mampu memberikan harga yang lebih ekonomis dan penurunan biaya bahan baku mencapai 6,73% dengan harga kompon sebesar Rp26.455,47/kg. Hasil pengujian vulkanisat yang mengandung karet bekas 15 phr (R15) memenuhi persyaratan mutu SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga, meliputi tegangan putus, perpanjangan putus, ketahanan sobek, dan kekerasan dengan nilai masing-masing sebesar 173,69 kgf/cm²; 470,67%; 97,34 kgf/cm; dan 71,40 Shore A.

Kata kunci: bantalan dermaga, fender, karet bekas, *reclaimed rubber*, sifat mekanik

ABSTRACT

Due to the cost of raw rubber and environmental considerations, waste rubber can be a cost-effective alternative material for many rubber product applications, such as marine rubber fender. This study investigates the utilisation of waste rubber in the manufacture of marine rubber fender by varying the amount (phr) of waste rubber in the compound, by 0, 15, 35, and 50 phr, respectively. Mechanical properties testing was conducted to determine the fulfilment of product quality based on SNI. Meanwhile, the cost of raw materials was evaluated based on the price of compound/kg. Adding waste rubber to the compound affects the vulcanizate's mechanical properties. The inhomogeneity of the compound and the breaking of bonds during the *reclaiming* process cause a reduction in the mechanical properties of the rubber vulcanizate for marine rubber fender. Using 15 phr waste rubber results in an optimum product that is inexpensive and has optimum mechanical properties. Waste rubber of 15 phr mixed in the marine rubber fender compound can provide a more economical price and a decrease in raw material cost that reaches 6.73% with a compound price of IDR 26,455.47/kg. The test results of vulcanizate containing 15 phr waste rubber (R15) meet the quality requirements of SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga, including tensile strength, elongation at break, tear strength and hardness with respective values of 173.69 kgf/cm²; 470.67%; 97.34 kgf/cm; and 71.40 Shore A.

Keywords: rubber fender, fender, waste rubber, *reclaimed rubber*, mechanical properties

1. PENDAHULUAN

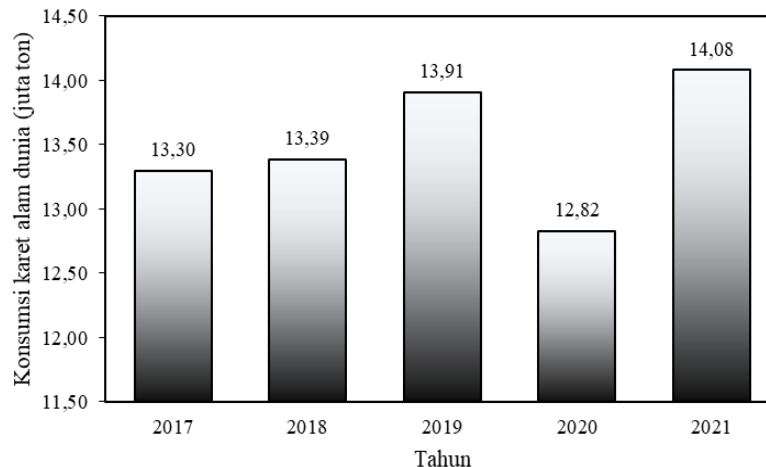
Indonesia yang merupakan negara maritim memiliki pelabuhan-pelabuhan yang tersebar di wilayah Sabang sampai Merauke. Dermaga dan pelabuhan berperan penting sebagai infrastruktur yang mendukung pertumbuhan ekonomi nasional. Dermaga merupakan bangunan pelabuhan yang digunakan untuk merapat dan menambatkan kapal yang menaik-turunkan penumpang, melakukan bongkar muat barang, dan kegiatan lain yang menunjang operasional kapal. Saat kapal merapat ke dermaga terjadi benturan antara kapal dan dermaga. Bantalan dermaga atau *fender* merupakan bantalan yang ditempatkan pada bagian depan dermaga, seperti terlihat pada Gambar 1. Bantalan dermaga terbuat dari karet yang divulkanisasi yang berfungsi sebagai penyerap getaran dan tenaga yang disebabkan oleh benturan kapal yang merapat di dermaga. Bantalan dermaga dipasang di sepanjang dermaga. Hal ini bertujuan untuk menghindari kerusakan pada kapal dan dermaga [1].



Gambar 1. Bantalan dermaga atau *marine rubber fender* tipe V [2].

Karet merupakan bahan baku utama dalam pembuatan produk karet. Penggunaan karet ditentukan oleh jenis dan karakteristik produk yang diinginkan. Produk karet dihasilkan dari kompon karet yang merupakan campuran antara karet dengan aditif. Produksi barang jadi karet terus mengalami perkembangan. Konsumsi karet alam dunia mengalami peningkatan dari tahun 2017 hingga tahun 2021, meskipun tahun 2020 menurun karena dampak pandemi Covid-19, seperti terlihat pada Gambar 2. Faktor yang mempengaruhi konsumsi karet dunia, antara lain pertumbuhan ekonomi global dan kinerja industri otomotif [3]. Dengan berkembangnya konsumsi karet, maka limbah karet sebagai hasil samping industri pengolahan karet berpotensi menyebabkan pencemaran jika langsung dibuang ke lingkungan.

Pengelolaan limbah menjadi salah satu permasalahan utama saat ini. Hal ini antara lain disebabkan limbah karet membutuhkan waktu yang sangat lama untuk terdegradasi secara alami karena struktur ikatan silang pada karet, adanya stabilisator, dan aditif lainnya. Berbagai upaya telah dilakukan untuk menangani limbah karet. Penimbunan merupakan salah satu cara penanganan limbah karet yang paling awal. Namun, metode ini memiliki kelemahan, yaitu ketersediaan lahan yang semakin terbatas dan potensi pencemaran lingkungan karena zat aditif pada produk karet dapat terurai atau *ter-leaching* dan membunuh bakteri baik di dalam tanah. Proses *reclaiming* atau daur ulang karet merupakan alternatif terbaik sebagai metode pengolahan limbah karet karena dapat menghemat sumber daya yang terbatas dan menjaga kelestarian lingkungan [4].



Gambar 2. Konsumsi karet alam dunia [3]

Karet bekas atau karet reklm (*reclaimed rubber*) merupakan karet yang dimanfaatkan kembali dari produk karet bekas, terutama ban mobil bekas dan ban berjalan bekas. Karet bekas sebagai limbah karet didaur ulang dengan cara diolah melalui proses *reclaiming*. Karet bekas dilakukan devulkanisasi atau pemutusan ikatan silang menggunakan energi mekanik, panas, maupun bahan kimia untuk mengembalikan sifat plastisitas karet, sehingga memiliki ikatan rangkap baru dan dapat divulkanisasi lagi [5]. Karet bekas diperlukan dalam jumlah yang cukup banyak sebagai campuran karena memiliki daya lekat yang baik. Penggunaan karet bekas dapat mempercepat proses mastikasi dan pencampuran kompon [6]. Hal ini disebabkan karet bekas lebih cepat tercampur dan menghasilkan lebih sedikit panas dibandingkan karet bahan baku, sehingga lebih sedikit energi yang dibutuhkan dalam pencampuran [4]. Produk yang mengandung karet bekas lebih kokoh dan tahan lama dalam pemakaian. Selain itu, karet bekas lebih tahan terhadap bensin dan minyak pelumas dibandingkan dengan karet bahan baku. Kelemahan karet bekas antara lain kurang kenyal dan tidak tahan terhadap gesekan [6].

Penggunaan karet bekas dalam pembuatan kompon dapat mengurangi kebutuhan karet bahan baku dan harganya lebih murah. Menggunakan kembali karet bekas sebagai bahan baku produk dapat mengatasi masalah limbah karet [7], sekaligus mengurangi biaya produksi dan meningkatkan karakteristik proses, seperti keseragaman dan stabilitas dimensi produk jadi. Karet bekas banyak digunakan dalam pembuatan produk karet yang berwarna gelap atau hitam, seperti ban, *outsole*, karpet, dan produk karet lain dengan tujuan untuk menekan biaya bahan baku. Namun, karet bekas memiliki elastisitas rendah, sehingga dapat menurunkan sifat mekanik produk karet yang dihasilkan [5]. Memanfaatkan karet bekas untuk dikonsumsi oleh produsen yang menghasilkan limbah secara langsung dapat mengurangi limbah lingkungan dan menciptakan industri tanpa limbah (*zero-waste manufacturing*). Studi lebih lanjut terkait pemanfaatan karet bekas perlu dilakukan. Penelitian pembuatan bantalan dermaga menggunakan karet *compo crepe* dengan *filler carbon black* menunjukkan bahwa material ini memiliki sifat mekanis yang memadai [19]. Sementara, studi terkait penggunaan karet bekas telah diterapkan dalam pembuatan berbagai produk karet, seperti sol sepatu [5] [17], *hand grip rubber* [7], karet pembersih lantai [12], pedal sepeda motor [18], namun belum secara spesifik diaplikasikan pada bantalan dermaga. Pada penelitian ini, karet bekas digunakan sebagai bahan dalam pembuatan produk karet bantalan dermaga. Karet bekas ditambahkan dalam formulasi kompon dan dipelajari pengaruhnya terhadap sifat mekanik vulkanisat yang dihasilkan serta pengaruh penggunaan karet bekas terhadap penurunan harga bahan baku kompon, sehingga diharapkan memberikan solusi yang lebih ekonomis dalam pengembangan bantalan dermaga.

2. METODOLOGI

2.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi neraca analitik digital Sartorius CP224S, *two-roll mill XK-160*, rheometer Ektron, *press molding machine Pan Stone*, cetakan *plating* tipis dan *plating* tebal, jangka sorong Krisbow, *universal testing machine* U-CAN, dan durometer *shore A* Johoyd.

Bahan yang digunakan dalam pembuatan bantalan dermaga dapat dilihat pada formulasi yang tertera dalam Tabel 1. Jumlah masing-masing bahan dinyatakan dalam phr (*per hundred rubber*) atau bagian per 100 dari berat karet yang digunakan. Penamaan sampel karet disesuaikan dengan jumlah phr karet bekas (*reclaimed rubber*) dalam formulasi tersebut, misalnya R15 merupakan sampel karet dengan jumlah karet bekas (*reclaimed rubber*) sebesar 15 phr. Karet bekas (*reclaimed rubber*) diperoleh dari PT Jaya Rubber Indonesia.

Tabel 1. Formulasi kompon karet

Bahan	Sampel karet			
	R0	R15	R35	R50
Karet konvensional	100,00	100,00	100,00	100,00
Karet bekas (<i>reclaimed rubber</i>)	-	15,00	35,00	50,00
Aktivator organik	1,00	1,00	1,00	1,00
Aktivator anorganik	5,00	5,00	5,00	5,00
Antioksidan (<i>trimethyl quinon</i>)	3,00	3,00	3,00	3,00
Antidegradan (<i>wax</i>)	3,00	3,00	3,00	3,00
Antidegradan (<i>p-phenylenediamine</i>)	2,00	2,00	2,00	2,00
Bahan pengisi (<i>carbon black N330</i>)	55,00	55,00	55,00	55,00
Pencepat <i>sulfonamide</i>	1,50	1,50	1,50	1,50
Pencepat <i>thiuram sulfide</i>	0,20	0,20	0,20	0,20
Bahan pemvulkanisasi	1,80	1,80	1,80	1,80

2.2 Pembuatan vulkanisat karet

Proses pembuatan vulkanisat karet diawali dengan penimbangan bahan sesuai formulasi yang tercantum pada Tabel 1. Bahan baku karet dimastikasi terlebih dahulu selama 12 menit untuk melunakkan karet, sehingga diperoleh karet dengan viskositas rendah, elastisitas dan kekenyalan berkurang, permukaan lebih halus, serta mudah diolah dan dicampur. Kemudian, karet yang telah lunak ditambahkan aktivator, antioksidan, antidegradan, bahan pengisi dan digiling selama 15 menit. Selanjutnya, lembaran karet ditambahkan bahan pencepat dan bahan pemvulkanisasi, lalu digiling selama 5 menit hingga diperoleh lembaran kompon karet yang homogen. Hal ini terlihat dari warna dan tekstur kompon yang seragam, tanpa adanya gumpalan atau butiran, serta dapat terverifikasi berdasarkan uji rheologi. Proses mastikasi dan pencampuran dilakukan menggunakan mesin *two-roll mill* dan dijaga pada suhu 70°C.

Kompon karet dilakukan uji rheologi menggunakan rheometer untuk mengetahui suhu dan waktu vulkanisasi di mesin cetak. Proses vulkanisasi pada *press molding machine* dilakukan pada suhu 150°C. Kompon karet dicetak menggunakan cetakan *plating* tipis dengan ketebalan 3 mm yang akan digunakan sebagai specimen uji tegangan putus, perpanjangan putus, dan ketahanan sobek. Sedangkan hasil cetakan *plating* tebal dengan ketebalan 14 mm digunakan sebagai specimen uji kekerasan. Berdasarkan hasil uji rheologi, waktu vulkanisasi menggunakan cetakan *plating* tipis selama 3 menit dan waktu vulkanisasi menggunakan cetakan *plating* tebal selama 15 menit.

2.3 Pengujian vulkanisat karet

Pengujian sifat mekanik vulkanisat karet meliputi tegangan putus, perpanjangan putus, kekerasan, dan ketahanan sobek mengacu pada SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga dengan persyaratan mutu seperti tercantum dalam Tabel 2. Pengujian tegangan putus dan perpanjangan putus masing-masing sampel vulkanisat karet mengacu pada ASTM D412, pengujian ketahanan sobek mengacu pada ASTM D624, dan pengujian kekerasan mengacu pada ASTM D2240. Pengujian

tegangan putus, perpanjangan putus, dan ketahanan sobek dilakukan menggunakan *universal testing machine* dengan pengulangan sebanyak 3 kali percobaan, sedangkan pengujian kekerasan dilakukan menggunakan durometer *shore A* dengan pengulangan sebanyak 5 kali percobaan.

Tabel 2. Persyaratan mutu vulkanisat karet bantalan dermaga [8]

Sifat mekanik	Satuan	Persyaratan
Tegangan putus	kgf/cm ²	Min. 150
Perpanjangan putus	%	Min. 300
Kekerasan	<i>Shore A</i>	50 – 80
Ketahanan sobek	kgf/cm	Min. 70

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh jumlah phr karet bekas (*reclaimed rubber*) terhadap karakteristik vulkanisasi kompon karet dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan Tabel 3, nilai torsi minimum (M_L) dan torsi maksimum (M_H) meningkat dengan bertambahnya jumlah karet bekas hingga 35 phr, namun menurun pada 50 phr. Peningkatan nilai torsi dapat terjadi karena adanya peningkatan ikatan adhesi antara matriks karet dengan partikel bahan pengisi [9]. Penambahan karet bekas yang cukup tinggi, 50 phr, mengurangi homogenitas kompon, sehingga terjadi penurunan nilai torsi. Sedangkan, waktu *scorch* (t_{s2}) cenderung sedikit menurun dengan peningkatan jumlah karet bekas dalam formulasi. Penurunan t_{s2} kemungkinan disebabkan migrasi akselerator dari karet bekas ke dalam matriks karet yang meningkatkan reaktivitas pada reaksi pengikatan silang. Namun, migrasi hanya mempengaruhi tahap awal vulkanisasi [20]. Kemudian, waktu vulkanisasi meningkat dengan penambahan karet bekas, seperti terlihat pada Tabel 3, waktu vulkanisasi optimum (t_{c90}) menunjukkan nilai yang hampir sama.

Tabel 3. Karakteristik vulkanisasi kompon karet

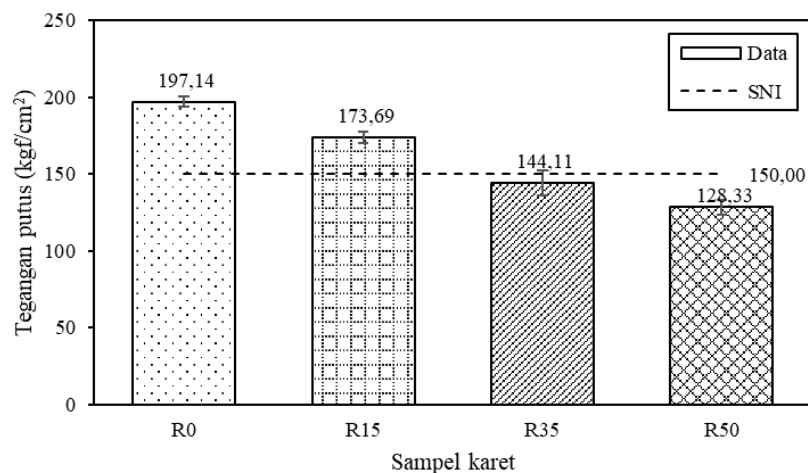
Karakteristik vulkanisasi	Sampel karet							
	R0		R15		R35		R50	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
M_L , kg.cm	0,43	0,56	0,69	0,60	0,75	0,66	0,50	0,51
M_H , kg.cm	7,45	9,59	9,47	9,44	12,76	13,26	9,95	10,38
t_{s2} , min:sec	02:07	02:07	02:11	02:14	01:43	01:42	01:36	01:35
t_{c90} , min:sec	03:15	03:30	03:20	03:40	03:24	03:14	03:10	03:16

3.1 Sifat mekanik vulkanisat karet

a. Tegangan putus

Tegangan putus menggambarkan beban maksimum per satuan luas yang dapat ditahan sampel karet ketika ditarik hingga putus. Penggunaan karet bekas (*reclaimed rubber*) dapat mempengaruhi sifat mekanik vulkanisat karet, diantaranya tegangan putus. Pengaruh penggunaan karet bekas (*reclaimed rubber*) pada pembuatan kompon karet ditunjukkan oleh Gambar 3. Gambar 3 memperlihatkan sampel karet dengan jumlah karet bekas 0 phr (R0) menghasilkan nilai tegangan putus tertinggi sebesar 197,14 kgf/cm². Semakin besar jumlah phr karet bekas yang digunakan, nilai tegangan putus semakin rendah. Hal ini sejalan dengan penelitian lain. Studi tentang karet reklim dari limbah *outsole* sepatu mengungkapkan penurunan tegangan putus akibat degradasi struktur molekul dan berkurangnya ikatan silang pada karet bekas [17]. Hal serupa ditemukan dalam penelitian pemanfaatan karet skrap vulkanisir untuk kompon pedal sepeda motor, di mana tegangan putus juga menurun seiring dengan peningkatan kadar karet skrap [18]. Sampel karet R0 dan R1 menghasilkan tegangan putus yang masih memenuhi persyaratan mutu SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga. Sedangkan, nilai tegangan putus sampel karet R35 dan R50 tidak memenuhi SNI.

Nilai tegangan putus vulkanisat yang rendah dapat disebabkan oleh berkurangnya kekuatan ikatan antar molekul karet akibat perlakuan mekanik maupun kimiawi saat proses *reclaiming* pada karet bekas. Proses *reclaiming* memutus sebagian besar ikatan silang yang ada dalam jaringan tiga dimensi karet bekas. Rantai makromolekul karet bekas terurai menjadi unit dengan bobot molekul yang lebih rendah, sehingga karet bekas lebih mudah dicampur dengan karet bahan baku. Namun, karena banyak ikatan silang yang telah rusak, karet bekas cenderung memiliki kemampuan yang lebih rendah untuk membentuk ikatan silang yang kuat jika dibandingkan dengan karet bahan baku [4]. Dengan demikian, karet bekas yang sudah tervulkanisasi lebih sulit membentuk ikatan silang dibandingkan karet bahan baku yang menyebabkan ikatan antar molekul yang terbentuk dalam vulkanisat karet lebih lemah. Selain itu, campuran karet dan bahan pengisi yang mengandung karet bekas kemungkinan tidak sepenuhnya homogen dan kompatibel. Ketidakhomogenan kompon dan pemutusan ikatan saat proses *reclaiming* menyebabkan penurunan tegangan putus vulkanisat karet [10].

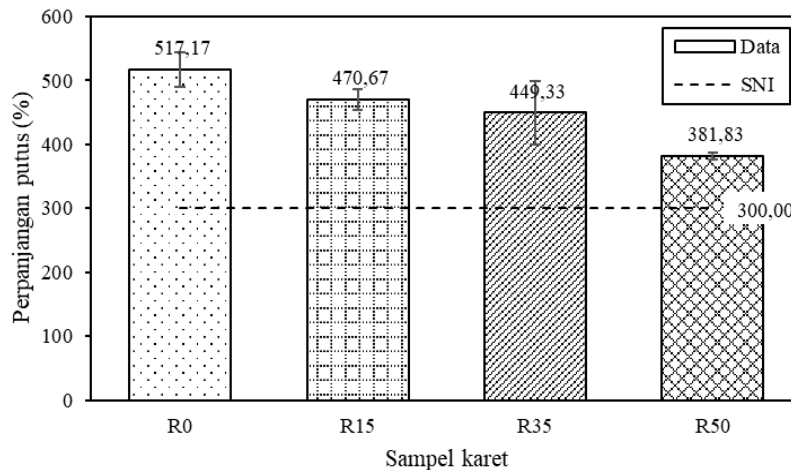


Gambar 3. Pengaruh jumlah phr karet bekas terhadap tegangan putus vulkanisat

b. Perpanjangan putus

Pengujian perpanjangan putus bertujuan untuk mengetahui kemampuan peregangan vulkanisat karet ketika ditarik hingga putus. Perpanjangan putus dinyatakan dalam persen (%) penambahan dari panjang sampel uji sebelum diregangkan. Berdasarkan Gambar 4, hasil pengujian menunjukkan penurunan nilai perpanjangan putus seiring dengan bertambahnya jumlah phr karet bekas (*reclaimed rubber*) yang digunakan dalam formulasi. Nilai perpanjangan putus tertinggi sebesar 517,17% diperlihatkan oleh R0, yaitu sampel karet dengan jumlah karet bekas 0 phr. Semakin tinggi nilai perpanjangan putus mengindikasikan vulkanisat karet semakin elastis [11].

Vulkanisat karet dengan komposisi karet bekas yang lebih sedikit memiliki nilai perpanjangan putus yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan karet bekas memiliki elastisitas yang lebih rendah dibandingkan karet bahan baku. Tingkat elastisitas campuran karet yang mengandung karet bekas lebih rendah karena sifat non-homogenitas kompon dan persebaran bahan pengisi yang tidak seragam dalam campuran [10]. Namun demikian, hasil pengujian memperlihatkan penambahan karet bekas hingga 50 phr pada formulasi kompon karet bantalan dermaga menghasilkan nilai perpanjangan putus vulkanisat karet lebih dari 300%, sehingga keseluruhan sampel memenuhi persyaratan mutu SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga.



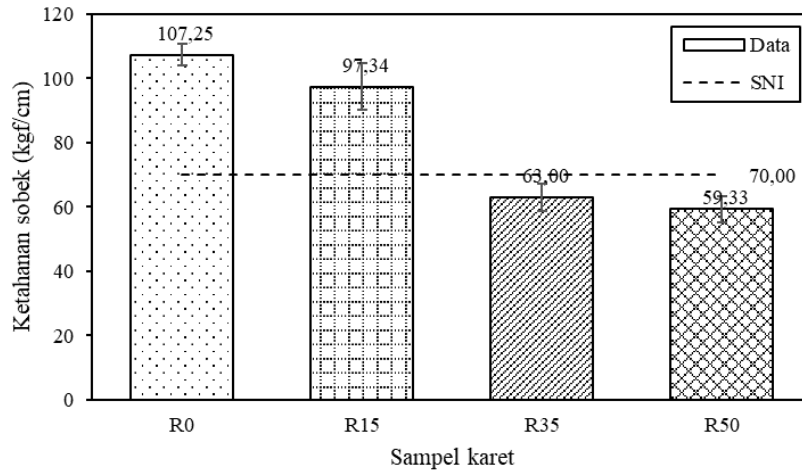
Gambar 4. Pengaruh jumlah phr karet bekas terhadap perpanjangan putus vulkanisat

c. Ketahanan sobek

Pengujian ketahanan sobek merupakan parameter untuk mengetahui ketahanan sampel karet terhadap sobekan. Semakin besar nilai ketahanan sobek, daya tahan vulkanisat terhadap sobekan semakin baik. Pengaruh penambahan karet bekas (*reclaimed rubber*) terhadap ketahanan sobek vulkanisat disajikan dalam Gambar 5. Peningkatan penggunaan karet bekas menyebabkan penurunan nilai ketahanan sobek vulkanisat karet. Nilai ketahanan sobek yang dihasilkan oleh sampel karet R0 hingga R50 memperlihatkan penurunan dengan penambahan karet bekas. Hal ini sesuai dengan penelitian yang menyatakan bahwa penambahan limbah pengikisan vulkanisat ban (*brushing rubber*) menurunkan nilai ketahanan sobek produk karet [12]. Penelitian yang mempelajari campuran karet reklim dan karet alam juga menunjukkan hasil yang sama, di mana terjadi penurunan ketahanan sobek dengan semakin banyaknya jumlah karet reklim yang digunakan [13].

Pada Gambar 5, penambahan karet bekas (*reclaimed rubber*) ke dalam kompon karet dapat mempengaruhi ketahanan sobek secara berbeda tergantung pada proporsi yang ditambahkan. Pada penambahan 15 phr (R15), penurunan ketahanan sobek tidak terlalu signifikan karena jumlah karet bekas yang relatif kecil masih dapat terdistribusi dengan cukup baik dalam matriks karet, sehingga tidak banyak mempengaruhi struktur kompon. Namun, ketika proporsi karet bekas ditingkatkan menjadi 35 phr (R35), penurunan ketahanan sobek menjadi lebih signifikan. Peningkatan jumlah karet bekas menyebabkan distribusi yang kurang homogen, pembentukan ikatan silang yang tidak optimal, dan perbedaan sifat mekanik antara karet bahan baku dan karet bekas, yang secara keseluruhan berkontribusi pada menurunnya ketahanan sobek. Pada penambahan hingga 50 phr (R50), penurunan ketahanan sobek tidak lagi signifikan dibandingkan dengan 35 phr (R35) karena kemungkinan kompon telah mencapai titik jenuh, di mana penambahan karet bekas lebih lanjut tidak secara drastis mempengaruhi struktur matriks karet. Dalam hal ini, sifat mekanik kompon kemungkinan telah mencapai ambang batas di mana penambahan karet bekas tambahan tidak menyebabkan perubahan signifikan dalam ketahanan sobek.

Hasil pengujian ketahanan sobek menunjukkan tren serupa dengan tegangan putus. Sampel karet R0 dan R15 menghasilkan nilai ketahanan sobek di atas 70 kgf/cm, sehingga memenuhi persyaratan mutu sesuai SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga. Pada penggunaan karet bekas dengan jumlah yang lebih besar, yang ditunjukkan oleh sampel karet R35 dan R50 memperlihatkan nilai ketahanan sobek di bawah 70 kgf/cm, sehingga tidak memenuhi SNI. Penurunan nilai ketahanan sobek disebabkan perlakuan mekanik maupun kimiawi saat proses *reclaiming* pada karet bekas mengakibatkan berkurangnya kekuatan ikatan antar molekul karet. Hal ini berpengaruh terhadap berkurangnya panjang rantai polimer karet dan penurunan berat molekul vulkanisat, sehingga ketahanan sobek rendah. Dispersi atau persebaran karet bekas dalam kompon yang tidak konsisten juga dapat menyebabkan rendahnya ikatan antara matriks karet dan karet bekas [13].

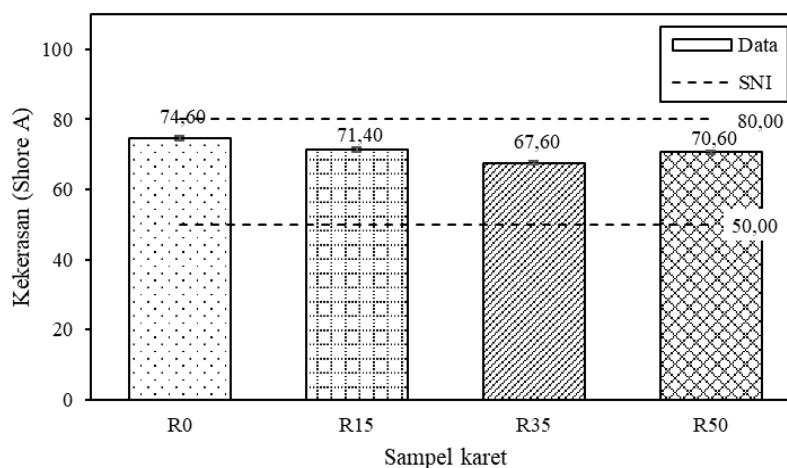


Gambar 5. Pengaruh jumlah phr karet bekas terhadap ketahanan sobek vulkanisat

d. Kekerasan

Kekerasan vulkanisat mempengaruhi penampakan dan daya tahan produk karet. Jumlah dan jenis bahan pengisi yang ditambahkan ke dalam kompon karet serta banyaknya ikatan silang yang terbentuk mempengaruhi nilai kekerasan vulkanisat karet. Vulkanisat bersifat semakin keras, kuat, dan kaku ketika ikatan silang yang terbentuk semakin banyak [14]. Selain itu, nilai kekerasan vulkanisat karet juga erat kaitannya dengan jenis dan jumlah *plasticizer* yang digunakan [15].

Hasil pengujian kekerasan sampel vulkanisat karet dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan nilai kekerasan tertinggi sebesar 74,60 *Shore A* yang diperlihatkan oleh vulkanisat dengan jumlah karet bekas (*reclaimed rubber*) 0 phr. Semakin besar karet bekas yang ditambahkan dalam formulasi kompon, semakin rendah nilai kekerasan vulkanisat karet. Hal ini selaras dengan studi terdahulu yang memperlihatkan bahwa kekerasan vulkanisat karet semakin rendah ketika jumlah limbah *crumb rubber* yang digunakan semakin besar [7]. Karet bekas mengandung minyak proses yang dapat menyebabkan pergeseran antar rantai karet, sehingga nilai kekerasan vulkanisat karet turun [16]. Namun demikian, keseluruhan sampel yang diuji masih menghasilkan nilai kekerasan vulkanisat karet yang memenuhi persyaratan mutu SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga, yaitu berada dalam *range* antara 50-80 *Shore A*.



Gambar 6. Pengaruh jumlah phr karet bekas terhadap kekerasan vulkanisat

Bertambahnya jumlah karet bekas (*reclaimed rubber*) yang digunakan dalam formulasi kompon menyebabkan penurunan sifat mekanik vulkanisat karet, meliputi tegangan putus, perpanjangan putus, ketahanan sobek, dan kekerasan. Hal ini disebabkan oleh lemahnya interaksi antara karet dengan bahan pengisi [17]. Interaksi karet dengan bahan pengisi lemah karena karet bekas yang sudah tervulkanisasi lebih sulit membentuk ikatan silang dibandingkan karet bahan baku, sehingga ikatan antar molekul yang terbentuk dalam vulkanisat karet lebih lemah. Selain itu, dispersi bahan pengisi yang tidak seragam, kompon yang tidak homogen, dan pemutusan ikatan saat proses *reclaiming* menyebabkan berkurangnya sifat mekanik vulkanisat karet [10]. Namun demikian, penurunan sifat mekanik tidak selalu berdampak besar pada kekerasan, karena kekerasan lebih dipengaruhi oleh kepadatan (*crosslink density*) dalam matriks karet. Oleh karena itu, meskipun tegangan putus, perpanjangan putus, dan ketahanan sobek menurun, nilai kekerasan dapat tetap relatif stabil atau hanya mengalami sedikit penurunan. Penelitian lain menunjukkan bahwa penambahan karet reklim dari limbah *outsole* menyebabkan penurunan kuat tarik dan perpanjangan putus, sementara nilai kekerasan cenderung meningkat [17].

Sifat mekanik vulkanisat karet penting untuk diketahui karena memberikan gambaran terkait keamanan material yang digunakan, khususnya penggunaan karet pada bangunan, jembatan, dan penyangga struktural [13]. Pengujian sampel karet dengan penambahan karet bekas, mencakup tegangan putus, perpanjangan putus, ketahanan sobek, dan kekerasan dapat dilihat pada Tabel 4, di mana hasil pengujian sifat mekanik dibandingkan dengan persyaratan mutu sesuai SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga. Berdasarkan Tabel 4, vulkanisat tanpa karet bekas (R0) dan vulkanisat dengan jumlah karet bekas 15 phr (R15) memenuhi persyaratan mutu SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga. Hasil pengujian tegangan putus dan ketahanan sobek sampel karet R35 dan R50 berada di bawah nilai minimal yang dipersyaratkan, sehingga tidak memenuhi SNI.

Tabel 4. Perbandingan antara hasil pengujian sifat mekanik vulkanisat karet dengan persyaratan mutu SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga

Sampel karet	Tegangan putus (kgf/cm ²)	Perpanjangan putus (%)	Ketahanan sobek (kgf/cm)	Kekerasan (Shore A)	Sifat mekanik sesuai persyaratan SNI
R0	197,14	517,17	107,25	74,60	Memenuhi
R15	173,69	470,67	97,34	71,40	Memenuhi
R35	144,11	449,33	63,00	67,60	Tidak memenuhi
R50	128,33	381,83	59,33	70,60	Tidak memenuhi
SNI 06-3568-2006	Min. 150	Min. 300	Min. 70	50-80	

3.2 Harga kompon masing-masing formulasi sampel karet

Sampel karet dalam studi ini memiliki harga kompon masing-masing berdasarkan formulasi bahan penyusunnya, seperti terlihat pada Tabel 5. Tabel 5 menunjukkan bahwa sampel karet R50 memiliki harga kompon terendah, yaitu Rp23.001,80/kg dengan penurunan harga mencapai 18,91% dibandingkan sampel karet R0. Semakin banyak jumlah karet bekas (*reclaimed rubber*) yang digunakan, semakin murah harga kompon karet. Penggunaan karet bekas dalam jumlah yang besar dapat menghemat penggunaan karet bahan baku dan menekan biaya [5]. Namun, penambahan karet bekas dapat menurunkan sifat mekanik vulkanisat bantalan dermaga. Berdasarkan Tabel 4 dan Tabel 5, penggunaan karet bekas sebesar 15 phr menghasilkan produk yang paling baik, yaitu harga rendah dengan sifat mekanik yang optimal. Karet bekas sebesar 15 phr yang dicampurkan dalam kompon bantalan dermaga mampu memberikan harga yang lebih ekonomis dan penurunan biaya bahan baku mencapai 6,73% dengan harga kompon sebesar Rp26.455,47/kg. Selain itu, hasil pengujian vulkanisat yang mengandung karet bekas 15 phr (R15) memenuhi persyaratan mutu SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga.

Tabel 5. Harga kompon sampel karet

Sampel karet	Harga kompon/kg (Rp)	Penurunan harga (%)
R0	28.364,64	0,00
R15	26.455,47	6,73
R35	24.339,28	14,19
R50	23.001,80	18,91

4. KESIMPULAN

Karet bekas (*reclaimed rubber*) dapat dimanfaatkan dalam pembuatan kompon untuk bantalan dermaga. Penambahan karet bekas (*reclaimed rubber*) dalam kompon mempengaruhi sifat mekanik vulkanisat. Ketidakhomogenan kompon dan pemutusan ikatan saat proses *reclaiming* menyebabkan penurunan sifat mekanik vulkanisat karet. Dalam penelitian ini, penggunaan karet bekas sebesar 15 phr menghasilkan produk yang optimal. Keseluruhan pengujian sifat mekanik vulkanisat meliputi tegangan putus, perpanjangan putus, ketahanan sobek, dan kekerasan memenuhi persyaratan mutu SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga. Campuran karet bekas dapat menghemat penggunaan karet bahan baku dan menekan biaya. Penambahan karet bekas sebesar 15 phr mampu memberikan harga yang lebih ekonomis dengan penurunan biaya bahan baku mencapai 6,73%. Studi lebih lanjut dapat dilakukan untuk mempelajari pengaruh penambahan karet bekas antara 15 phr hingga 35 phr dalam vulkanisat karet.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Triatmodjo, (2009). *Perencanaan Pelabuhan*, Yogyakarta, Beta Offset.
- [2] Ranusa, (2024). "Ranusa," [Online]. Available: <https://ranusa.id/rubber-fender-dermaga/>. [Accessed 10 March 2024].
- [3] L. F. Syarifa, D. S. Agustina, A. Alamsyah, I. S. Nugraha and H. Asywadi, "Outlook Komoditas Karet Alam Indonesia 2023," *Jurnal Penelitian Karet*, pp. 47-58, 2023.
- [4] B. Adhikari, D. De and S. Maiti, (2000). "Reclamation and recycling of waste rubber," *Progress in Polymer Science*, pp. 909-948.
- [5] P. Setyowati, Pramono and Supriyanto, (2006). "Pemanfaatan Karet Riklim dari Skrap Rubber Roll untuk Kompon Sol Sepatu," *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, pp. 38-44.
- [6] Tim Penulis PS, (2008). *Panduan Lengkap Karet*, Jakarta, Penebar Swadaya.
- [7] E. Efendri, Elfidiyah, D. Kharismadewi and H. A. Prasetya, (2019). "Pengaruh Penambahan Abu Cangkang Sawit dan Limbah Crumb Rubber terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Vulkanisat Handgrip Rubber," *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, pp. 165-176.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, (2006). "SNI 06-3568-2006 Vulkanisat karet kompon bantalan dermaga," [Online]. Available: <https://akses-sni.bsn.go.id/>. [Accessed 15 February 2024].
- [9] O. S. Dahham, N. Z. Noriman, A. W. M. Kahar, H. Ismail and S. T. Sam, (2015). "The effect of Sawdust loading as natural short fiber on NBR/NRL-G compounds," *Journal of Applied Science and Agriculture*, pp. 33-39.
- [10] T. D. Farahani, G. R. Bakhshandeh and M. Abtahi, (2006). "Mechanical and Viscoelastic Properties of Natural Rubber-Reclaimed Rubber Blends," *Polymer Bulletin*, pp. 495-505.
- [11] A. Saputra, P. Satwikanitya, M. W. Syabani, M. F. Agustian, F. Puspita and P. Oktavianto, (2023). "Studi Perbandingan Sifat Mekanis Vulkanisat Karet Menggunakan Plasticizer Minyak Jelantah Epoksi Dan Komersil," *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, pp. 138-151.
- [12] S. Bahri and B. Sugiyono, (2014). "Pengaruh Perbandingan Carbon Black dan Brushing Rubber pada Pembuatan Karet Pembersih Lantai," *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, pp. 141-147.

- [13] N. S. S. Saimi, S. N. L. Mamaud, N. A. Majid, S. S. Sarkawi and Z. Z. Abidin, (2021). "Mechanical Properties of Tire Reclaimed Rubber/NR Blends: Effect of Blend Ratios," in *AIP Conference Proceedings*.
- [14] A. Hasan, E. Dewi, I. Purnamasari, D. Irawan and P. Y. A. S., (2019). "Sifat Fisik Vulkanisat Karet dengan Bahan Pengisi Variasi Tanah Liat di Berbagai Lapisan Area Tambang PT Bukit Asam (Persero) Tbk," *Jurnal Kinetika*, pp. 31-37.
- [15] Nasruddin, (2019). "Pengaruh Komposit Bahan Pelunak terhadap Sifat Mekanik Vulkanisat Karet Alam SIR-20," *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, pp. 65-76.
- [16] A. M. Ajam, S. H. Al-Nesrawy and M. Al-Maamori, (2016). "Effect of Reclaim Rubber Loading on the Mechanical Properties of SBR Composites," *International Journal Chemist Sci.*, pp. 2439-2449.
- [17] M. W. Syabani, F. F. Fauziyyah and T. Mutiara, (2018). "Pengaruh Penambahan Karet Reklam dari Limbah Outsole terhadap Sifat Fisis dan Sifat Thermal Produk Outsole Sepatu (Studi Kasus di CV. Carita Niaga)," *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, pp. 26-40.
- [18] D. W. Nurhajati, (2009). "Pemanfaatan Karet Skrap Limbah Vulkanisir Ban untuk Kompon Pedal Sepeda Motor," *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, pp. 23-30.
- [19] W. E. Rosanti and Y. Suwarno, (2024). "Pengaruh Penggunaan Karet Compo Crepe dengan Filler Carbon Black Terhadap Karakteristik Fisis Vulkanisat Karet Untuk Produk Karet Bantalan Dermaga," *Jurnal Teknologi Terpadu*, pp. 58-65.
- [20] H. Nabil, H. Ismail and A. R. Azura, (2013). "Compounding, mechanical and morphological properties of carbon-black-filled natural rubber/recycled ethylene-propylene-diene-monomer (NR/R-EPDM) blends," *Polymer Testing*, pp. 385-393.