

Studi Pengaruh Jenis Bioplasticizer Minyak Jelantah Terepoksi Terhadap Sifat Mekanik Vulkanisat Karet

Andri Saputra¹⁾, Pani Satwikanitya^{1,*)}, Muh Wahyu Sya'bani¹⁾, Mertza Fitra Agustian¹⁾

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

*) Corresponding author: pani.satwikanitya@atk.ac.id

Abstract

The high volume of used cooking oil is one of the biggest obstacles. Unsaturated fatty acids in waste cooking oil have the potential as a raw material for producing plasticizer of epoxy oil. This research aims to study the effect of different types of epoxy used cooking oil plasticizers on the mechanical properties of rubber vulcanizates. Used cooking oil that still contains unsaturated fatty acids was epoxidized by reflux method at 60°C using n-hexane solvent, glacial acetic acid catalyst and IR-120 amberlite resin, and oxygen donor hydrogen peroxide for 4 hours (MJE4), 6 hours (MJE6), and 8 hours (MJE8). The epoxy used cooking oil was characterized for oxirane number using the titration method. The epoxy cooking oil plasticizer was applied to the rubber compound and the mechanical properties of the rubber vulcanizate were tested. The analysis showed that MJE8 was the epoxy cooking oil with the highest oxirane number of 2.42% with a relative oxirane conversion of 84.92%. Epoxy cooking oil that has a higher oxirane content can reduce the hardness and abrasion index, and increase the tensile strength, elongation at break, and tear strength of rubber vulcanizates. The use of MJE8 produced rubber vulcanizates with higher elasticity properties, such as tensile strength (19.1 N/mm²), elongation at break (792.3%), and tear strength (26 N/mm). Meanwhile, MJE4 produced rubber vulcanizates with higher hardness and abrasion index with values of 68.7 HA and 90.8%, respectively.

Abstrak

Tingginya jumlah minyak jelantah yang tersedia sebagai limbah menjadi tantangan terbesar. Asam lemak tak jenuh yang terdapat dalam minyak jelantah memiliki potensi sebagai bahan baku pembuatan *plasticizer* minyak epoksi. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh berbagai jenis *plasticizer* minyak jelantah epoksi terhadap sifat mekanis vulkanisat karet. Minyak jelantah yang masih mengandung asam lemak tak jenuh diproses epoksidasi dengan metode refluks pada 60°C menggunakan pelarut n-heksane, katalis asam asetat glasial dan resin amberlit IR-120, dan oksigen donor hidrogen peroksida selama 4 jam (MJE4), 6 jam (MJE6), dan 8 jam (MJE8). Minyak jelantah epoksi dikarakterisasi bilangan oksiran menggunakan metode titrasi. *Plasticizer* minyak jelantah epoksi diaplikasikan pada kompon karet dan diuji sifat mekanis vulkanisat karet. Hasil analisis diketahui bahwa MJE8 merupakan minyak jelantah epoksi yang memiliki bilangan oksiran tertinggi sebesar 2,42% dengan konversi relatif oksiran 84,92%. Minyak jelantah epoksi yang memiliki kandungan oksiran lebih tinggi dapat menurunkan kekerasan dan indeks abrasi, serta meningkatkan kekuatan tarik, perpanjangan putus, dan kekuatan sobek vulkanisat karet. Penggunaan MJE8 menghasilkan vulkanisat karet dengan sifat elastisitas yang lebih tinggi, seperti kekuatan tarik (19,1 N/mm²), perpanjangan putus (792,3%), dan kekuatan sobek (26 N/mm). Sedangkan MJE4 menghasilkan vulkanisat karet dengan kekerasan dan indeks abrasi yang lebih tinggi dengan nilai masing-masing 68,7 HA dan 90,8%.

Keywords: *bioplasticizer; epoxy oil; mechanical properties; rubber vulcanisate; used cooking oil*

PENDAHULUAN

Bertumbuhnya industri kimia di Indonesia, terutama industri kulit imitasi, industri plastik (terutama produk dari PVC), industri produk karet (kabel, sol sepatu, dan lain sebagainya), maka kebutuhan *plasticizer* akan meningkat. Salah satu *plasticizer* yang umum digunakan adalah *dioctyl phthalate* (DOP). Data kebutuhan DOP di Indonesia dari tahun 2014 hingga 2018 terus meningkat seperti terlihat dalam Tabel 1 [1].

Tabel 1. Data kebutuhan DOP di Indonesia

Tahun	Kebutuhan (ton/tahun)
2014	97.544,380
2015	98.180,466
2016	98.850,448
2017	111.341,093
2018	112.691,775

DOP merupakan *plasticizer* yang disintesis dari bahan baku petroleum. Konsumsi *plasticizer* petroleum turut menyumbang 75% dari total konsumsi *plasticizer*. Munculnya isu cadangan minyak bumi yang semakin terbatas/berkurang [2], [3], isu dampak terhadap lingkungan, hingga masalah kesehatan [4], [5] menyebabkan industri yang menggunakan *plasticizer* mulai beralih dari *plasticizer* berbasis petroleum ke *plasticizer* terbarukan. Pengembangan *plasticizer* terbarukan berbasis bahan alam (*bioplasticizer*) untuk menggantikan *plasticizer* berbasis petroleum telah menjadi perhatian banyak stakeholder, seperti peneliti hingga industri. *Bioplasticizer* dinilai memiliki kompatibilitas yang baik dengan bahan lainnya, tidak mudah bermigrasi keluar dari polimer, tidak beracun, efisiensi tinggi, dan murah [6]. Sumber *bioplasticizer* berasal dari biomassa produk pertanian, seperti minyak nabati.

Minyak nabati diubah menjadi monomer teroksidasi yang dapat dipolimerisasi dengan cara epoksidasi. Minyak nabati teroksidasi memiliki gugus fungsional epoksida, sehingga digunakan sebagai *bioplasticizer* dan penstabil dalam polimer [7]. Agar dapat diperoleh senyawa epoksi, minyak nabati harus memiliki kandungan asam lemak yang memiliki ikatan rangkap atau asam lemak tak jenuh pada strukturnya [8]. Sintesis minyak epoksi dari berbagai macam minyak nabati telah dilakukan, seperti menggunakan minyak biji kapas [9], minyak biji rami [10], minyak jarak [11], minyak kanola [12], minyak rapa [13], minyak kedelai [14], minyak karanja [15], minyak sawit [16]. Pada penelitian ini, *bioplasticizer* minyak epoksi disintesis dari bahan baku minyak goreng sawit bekas, yaitu minyak jelantah.

Keberadaan minyak jelantah di Indonesia setiap tahunnya berjumlah sekitar 4 juta ton [17]. Kurangnya pemanfaatan dan penanganan yang tepat menyebabkan jumlah minyak jelantah terus meningkat dan menimbulkan berbagai permasalahan seperti terkontaminasinya sumber daya air tanah, bau tidak sedap, menyumbat pipa pembuangan, dan sebagainya. Sejauh ini, minyak jelantah telah dikembangkan manfaatnya sebagai bahan baku biodiesel dan sabun [18], [19], sehingga perlu eksplorasi lebih lanjut terkait pemanfaatan minyak jelantah tersebut. Salah satu alternatif yang ditawarkan penelitian ini adalah memanfaatkan minyak jelantah sebagai bahan baku pembuatan minyak epoksi dan menggunakannya sebagai *bioplasticizer* dalam pembuatan vulkanisat atau produk karet.

Minyak jelantah mengandung asam lemak tak jenuh (linolenat 2,60%, linoleat 52,68%, dan oleat 22,64%) dan asam lemak jenuh (palmitat 17,34% dan stearat 4,21%) [20]. Kandungan beberapa asam lemak tak jenuh dalam minyak jelantah memungkinkan untuk diepoksidasi menjadi minyak epoksi. Penelitian terdahulu pernah mengepoksidasi minyak jelantah selama 5 jam menggunakan katalis asam asetat glasial dan asam sulfat (konsentrasi katalis 1,5%) dengan diperoleh bilangan oksiran 1,872% dan konversi sebesar 62,25% [21]. Berbeda dengan penelitian terdahulu, katalis yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah kombinasi asam asetat glasial dan resin amberlit IR-120. Resin amberlit IR-120 mudah diperoleh di pasaran dan memiliki harga yang murah. Resin amberlit IR-120 memiliki struktur siklik yang memiliki ikatan dengan beberapa oksigen, sehingga diharapkan dapat meningkatkan konversi dan bilangan oksiran minyak epoksi yang dihasilkan. Penelitian ini mempelajari karakteristik bilangan oksiran berbagai jenis *bioplastisizer* minyak jelantah terepoksi dan membandingkan kinerjanya pada sifat mekanis vulkanisat karet.

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan untuk mensintesis minyak jelantah epoksi antara lain resin amberlit IR-120, hidrogen peroksida 30% No. CAS 7722-84-1 (Merck), asam asetat glasial 99,8% No. CAS 64-19-7 (Merck), n-Heksana 98,5% No. CAS 110-54-3 (Merck), akuades, dan bahan baku utama minyak jelantah.

Bahan yang digunakan untuk menganalisis bilangan oksiran minyak jelantah epoksi antara lain asam asetat glasial 99,8% No. CAS 64-19-7 (Merck), hidrogen bromida 47-49% No. CAS 10035-10-6 (Loba Chemie), dan indikator kristal violet.

Bahan yang digunakan untuk pembuatan kompon karet seperti yang tertera dalam Tabel 2. Jumlah dari setiap bahan dalam formula dinyatakan dalam bagian seratus karet (bsk).

Tabel 2. Formula kompon karet stirena butadiena

Bahan	Formulasi (bsk)		
	1	2	3
<i>Standard Indonesian Rubber</i> 20 (SIR 20)	35	35	35
<i>Styrene-Butadiene Rubber</i> (SBR) Indopol	35	35	35
<i>Butadiene Rubber</i> (BR)	30	30	30
Zink oksida C041605 HM Chemical Technology Co., Ltd.	3	3	3
Asam stearat DK-1838 Henan Yeedok Industry Co., Ltd.	2	2	2
Silika dioksida Zeosil 175MP Solvay	40	40	40
<i>Carbon black</i> N330 CAS No. 1333-86-4 Dimacolor Group	15	15	15
MJE4	5	-	-
MJE6	-	5	-
MJE8	-	-	5
2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline (TMQ) CAS No. 26780-96-1	2	2	2
n-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide (CBS) CAS No. 95-33-0	1,5	1,5	1,5
1,3-diphenylguanidine (DPG)	0,5	0,5	0,5
Sulfur CAS No. 1326-66-7	1,8	1,8	1,8

Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan untuk mensintesis minyak epoksi antara lain termometer, sendok sungu, neraca analitik, alat refluks meliputi labu leher tiga yang dilengkapi kolom kondensor, pengaduk magnetik sekaligus pemanas, gelas beker, corong pemisah, dan alat sentrifugasi.

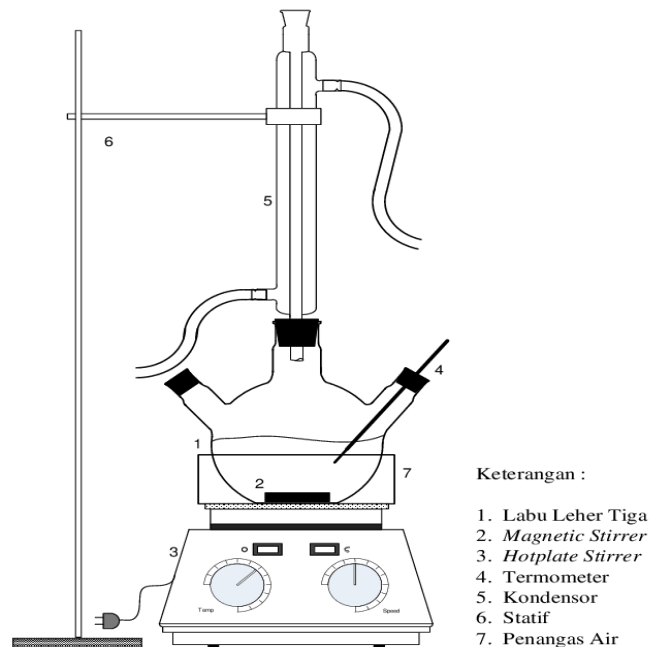
Peralatan yang digunakan untuk menganalisis bilangan oksiran minyak epoksi antara lain erlenmeyer, bulpet, pipet ukur, buret, statif, dan aluminium foil.

Peralatan yang digunakan untuk membuat vulkanisat karet antara lain mesin *two-roll mill* Y315H-6 LEADGO, mesin *hot press molding* USMC CO KR, dan *moving die rheometer* Gotech GT-M2000-AN.

Peralatan yang digunakan untuk menguji sifat mekanis vulkanisat karet antara lain *thickness gauge* digital TF-TGD030, gunting, *universal testing machine* (UTM) ETM-D, *durometer hardness tester shore A* Teclock GS-719G, dan *din abrasion tester* DECCA DC-5611.

Sintesis minyak jelantah epoksi

Rangkaian alat pada proses epoksidasi seperti pada Gambar 1. Minyak jelantah 100 g dimasukkan ke dalam labu leher tiga dan ditambahkan n-heksana 20 g, asam asetat glasial 15,5 mL, resin amberlit IR-120 3,15 g. Campuran dipanaskan hingga mencapai suhu 50°C dan ditambahkan hidrogen peroksida 56 mL. Selama penambahan hidrogen peroksida, suhu campuran dipertahankan pada 50°C. Kemudian campuran direfluks pada suhu 60°C selama 4 jam. Minyak epoksi dipisahkan dari impuritasnya dengan menggunakan alat sentrifugasi, sehingga diperoleh minyak jelantah epoksi dengan kode sampel MJE4. Untuk kode sampel MJE6 prosedur yang sama dilakukan namun lama proses refluks selama 6 jam, sedangkan kode sampel MJE8 untuk proses refluks selama 8 jam.



Gambar 1. Rangkaian alat epoksidasi

Karakterisasi bilangan oksiran minyak jelantah epoksi

Metode titrasi Langsung digunakan untuk menentukan bilangan oksiran hasil percobaan (OC_e). Minyak jelantah epoksi 0,49 gram ditambahkan 10 mL asam asetat glasial dan indikator kristal violet 3 tetes. Campuran larutan dititrasi dengan larutan hidrogen bromida 0,1 N hingga terjadi perubahan warna dari ungu menjadi biru kemudian menjadi biru-hijau yang bertahan selama 30 detik. Buret mikro yang dilengkapi/ditutup dengan aluminium foil digunakan saat titrasi berlangsung. OC_e dihitung menggunakan Persamaan 1, dimana V merupakan volume hidrogen bromida yang dipakai pada titrasi sampel (mL), K merupakan normalitas hidrogen bromida, dan G merupakan berat sampel minyak (gram).

$$OC_e (\%) = \frac{V \times K}{G} \times 1,60 \quad (1)$$

Pembuatan vulkanisat karet

Bahan baku ditimbang sesuai dengan formulasi kompon yang tertera pada Tabel 2. Bahan baku karet seperti SBR Indopol, SIR 20, dan BR dimastikasi (dilunakkan) menggunakan *two-roll mill*. Karet yang telah lunak ditambahkan *carbon black* sedikit demi sedikit dan diselingi dengan penambahan *bioplasticizer* minyak jelantah epoksi dan silika dioksida. Lembaran karet yang ada di dinding *two-roll mill* disobek dan digulung di beberapa sisi agar *carbon black* dan silika dioksida terdistribusi pada kompon karet. Karet ditambahkan asam stearat, zink oksida, dan TMQ sedikit demi sedikit sambil digiling hingga tercampur homogen. Kompon karet yang ada pada dinding *two-roll mill* disobek dan digulung kembali di beberapa sisi agar bahan terdistribusi pada kompon karet. Kompon karet ditambahkan DPG, CBS, dan sulfur sedikit demi sedikit sambil lembar karet terus digiling, disobek, dan digulung kembali pada *two-roll mill* hingga diperoleh kompon karet yang homogen. Selama proses komponding suhu dijaga tidak lebih dari 80°C untuk menghindari terjadinya pengusangan dini (*scorching*).

Kompon karet diuji rheologi menggunakan mesin rheometer untuk mengetahui suhu dan waktu pencetakan sehingga diperoleh vulkanisat karet. Kompon karet dicetak menggunakan plat tebal (16 mm) dan plat tipis (tebal 2 mm) dalam mesin *hot press molding* dengan parameter waktu dan suhu seperti yang tertera pada Tabel 3. Plat tipis digunakan untuk menghasilkan vulkanisat karet untuk spesimen uji kekuatan sobek, kekuatan tarik, dan perpanjangan putus. Plat tebal digunakan untuk menghasilkan vulkanisat karet untuk spesimen uji indeks abrasi dan kekerasan.

Penamaan kompon dan vulkanisat karet dilakukan berdasarkan jenis *plasticizer* yang digunakan, yaitu formulasi 1 (MJE4), formulasi 2 (MJE6), formulasi 3 (MJE8).

Tabel 3. Parameter pencetakan kompon karet

No.	Kode Kompon	Spesimen Cetak Tebal		Spesimen Cetak Tipis	
		Suhu (°C)	Waktu (Menit)	Suhu (°C)	Waktu (Menit)
1	MJE4	150	18:26	150	5:11
2	MJE6	150	12:23	150	3:29
3	MJE8	150	15:17	150	4:18

Pengujian sifat mekanik vulkanisat karet stirena butadiena

Kekerasan vulkanisat diukur mengacu ASTM D2240 menggunakan durometer shore A. Indeks abrasi vulkanisat diukur mengacu ISO 4649-2010 menggunakan *din abrasion tester*. Kekuatan sobek vulkanisat diukur mengacu ISO 34-1-2015 menggunakan mesin UTM. Kekuatan tarik dan perpanjangan putus vulkanisat diukur mengacu SNI 778:2017 menggunakan mesin UTM. Data yang dihasilkan pada penelitian ini merupakan nilai rata-rata dari replikasi 3 kali percobaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik bilangan oksiran berbagai jenis minyak jelantah epoksi dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik vulkanisat karet secara detail dibahas pada sub-bab berikut.

Karakteristik bilangan oksiran minyak jelantah epoksi

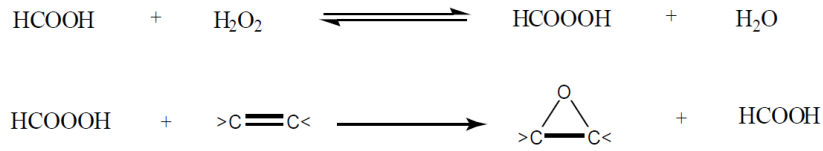
Hasil analisis bilangan oksiran (C–O–C) minyak epoksi pada berbagai waktu epoksidasi ditampilkan dalam Tabel 4. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa waktu epoksidasi mempengaruhi besarnya bilangan oksiran minyak epoksi, sehingga berdasarkan analisis menggunakan bilangan oksiran diperkirakan bahwa sintesis epoksi dari minyak jelantah telah berhasil dilakukan seperti dalam mekanisme reaksi pada Gambar 2.

Hasil pada Tabel 4 memperlihatkan bahwa seiring meningkatnya waktu epoksidasi dari 4 jam menjadi 8 jam menyebabkan tren peningkatan terhadap besarnya bilangan oksiran dan konversi relatif oksiran. Hal ini disebabkan karena meningkatnya waktu reaksi hingga pada waktu tertentu menyebabkan kesempatan molekul-molekul zat pereaksi untuk saling bertumbukan semakin besar. Hal yang sama disampaikan oleh peneliti sebelumnya [21], [23], [24]. Proses ini akan mengakibatkan konversi senyawa tak jenuh atau ikatan rangkap dalam minyak jelantah menjadi senyawa epoksi meningkat, sehingga rendemen senyawa epoksi yang diukur melalui bilangan oksiran juga akan meningkat.

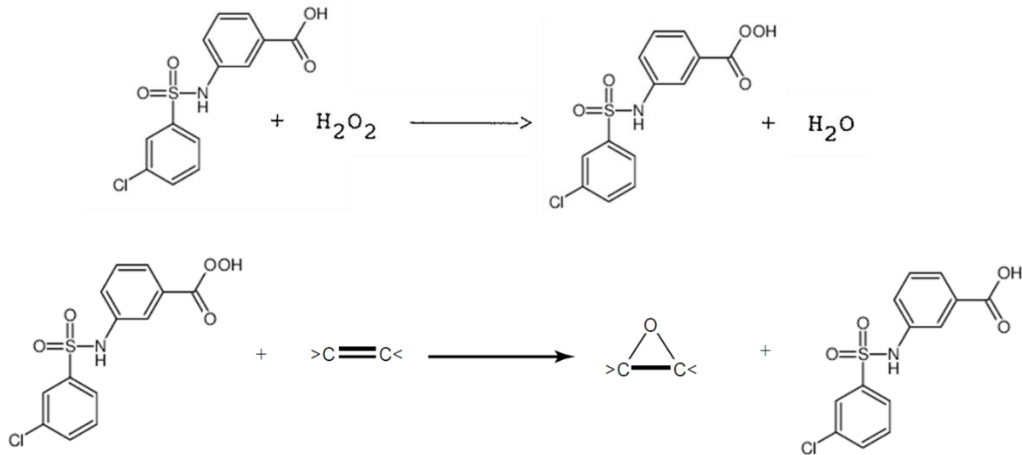
Epoksidasi minyak jelantah menggunakan katalis asam asetat glasial dan asam sulfat (konsentrasi katalis 1,5%) selama 5 jam menghasilkan minyak epoksi dengan bilangan oksiran 1,872% dan konversi relatif oksiran sebesar 62,25% [21]. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya tersebut, minyak jelantah epoksi (MJE4) dalam penelitian ini memiliki bilangan oksiran yang lebih tinggi (2,24%) dan konversi relatif oksiran yang lebih tinggi juga (78,73%) dalam waktu epoksidasi 1 jam lebih singkat (4 jam). Berdasarkan temuan yang telah diperoleh, maka dapat diketahui bahwa epoksidasi menggunakan katalis kombinasi asam asetat glasial dan resin amberlit IR-120 menghasilkan minyak epoksi dengan bilangan oksiran dan konversi relatif oksiran yang lebih tinggi.

Tabel 4. Bilangan oksiran dan konversi relatif oksiran minyak epoksi

Minyak epoksi	Bilangan oksiran (%)	Konversi relatif oksiran (%)
MJE4	2,24	78,73
MJE6	2,36	82,81
MJE8	2,42	84,92



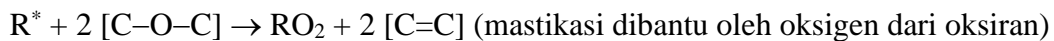
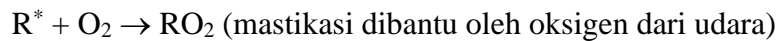
(a)



(b)

Gambar 2. Mekanisme Reaksi Epoksidasi Menggunakan Peroksida dengan Katalis (a) Asam Asetat [22] (b) Resin IR-120

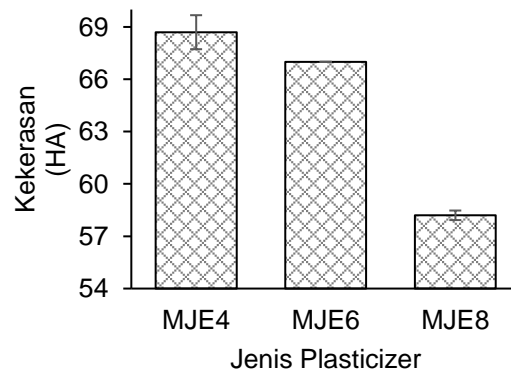
Minyak jelantah yang telah berhasil diepoksidasi dalam penelitian ini selanjutnya digunakan sebagai *bioplasticizer*. *Bioplasticizer* tersebut digunakan pada tahap mastikasi atau pelunakan karet. Sebelum *bioplasticizer* ditambahkan pada mastikasi, mula-mula terjadi pemutusan rantai molekul karet oleh tenaga mekanis mesin *two-roll mill* menjadi radikal-radikal bebas (R^*) seperti pada Gambar 3. Peran oksiran pada *bioplasticizer* minyak jelantah epoksi dan oksigen dari udara adalah menghalangi terjadinya penggabungan kembali rantai-rantai molekul karet yang terputus (Gambar 3), sehingga diperoleh karet yang lebih lunak dan mudah untuk ditambahkan bahan aditif seperti bahan pengisi, sulfur, dan sebagainya. Selain itu, *bioplasticizer* memberikan efek pelumasan pada kompon, sehingga distribusi bahan aditif dapat dilakukan dengan baik dan diperoleh kompon yang seragam (homogen). Terdistribusinya bahan aditif secara baik menyebabkan sifat mekanis vulkanisat karet yang dihasilkan juga berpengaruh kearah yang sesuai diharapkan.



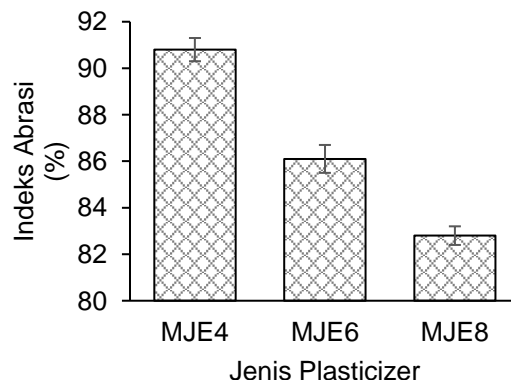
Gambar 3. Mekanisme mastikasi karet dibantu oksigen dari *bioplasticizer* [25]

Kekerasan dan indeks abrasi vulkanisat

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengukur besarnya nilai kekerasan vulkanisat karet. Nilai kekerasan semakin besar menunjukkan bahwa karet semakin tidak elastis. Sedangkan pengujian indeks abrasi bertujuan untuk mengetahui ketahanan kikis dari vulkanisat karet yang digesekkan pada ampelas kikis. Vulkanisat dengan indeks abrasi tinggi berarti memiliki ketahanan abrasi yang tinggi juga. Sebaliknya jika indeks abrasi rendah maka produk yang dihasilkan akan mudah aus. Indeks abrasi material memiliki korelasi terhadap nilai kekerasannya. Material yang memiliki kekerasan yang tinggi memiliki ketahanan abrasi yang tinggi juga [26]. Hasil pengujian pada Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan tren grafik yang sama antara kekerasan dan indeks abrasi vulkanisat karet yang dihasilkan. Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan bahwa minyak jelantah yang diepoksidasi paling singkat atau 4 jam (MJE4) menghasilkan vulkanisat dengan kekerasan (68,7 HA) dan indeks abrasi (90,8%) lebih tinggi dibandingkan minyak jelantah epoksi lainnya (MJE 6 dan MJE 8). Selain itu, Gambar 4 dan Gambar 5 juga memperlihatkan bahwa penambahan *plasticizer* yang berbeda menyebabkan sifat mekanis vulkanisat karet juga berbeda. Hasil ini mendukung teori yang menyatakan penambahan *plasticizer* pada karet selain untuk mempermudah pemrosesan karet ketika komponding (pencampuran dengan bahan aditif) juga memberi pengaruh terhadap sifat mekanis vulkanisat karet [27], [28].



Gambar 4. Pengaruh jenis plasticizer minyak jelantah epoksi terhadap kekerasan vulkanisat



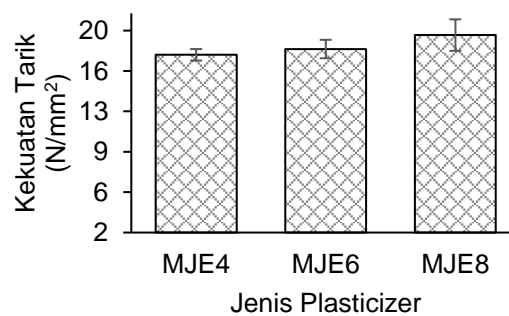
Gambar 5. Pengaruh jenis plasticizer minyak jelantah epoksi terhadap indeks abrasi vulkanisat

Mengacu pada Tabel 4 bahwa MJE4 memiliki kandungan oksiran (C–O–C) lebih rendah dibandingkan kedua *bioplasticizer* minyak epoksi lainnya (MJE 6 dan MJE8). Kandungan oksiran yang lebih rendah ini menyebabkan jumlah rantai karet yang terputus saat mastikasi (RO_2) juga lebih sedikit. Hal ini dikarenakan radikal bebas molekul karet (R^*) tidak memiliki cukup banyak pasangan oksigen dari *bioplasticizer* minyak epoksi untuk membentuk rantai karet putus yang stabil (RO_2) [25]. Berbanding terbalik dengan MJE4, MJE8 memiliki kandungan oksiran (C–O–C) lebih tinggi yang menyebabkan banyaknya rantai karet putus yang stabil (RO_2) saat mastikasi lebih tinggi juga. Semakin banyak rantai karet yang putus saat mastikasi tersebut menyebabkan karet mengalami penurunan viskositas yang lebih tinggi dan menghasilkan karet yang lebih lunak (lembek). Hal ini sesuai dengan hasil yang terlihat pada Gambar 4. Vulkanisat karet yang menggunakan MJE8 memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan vulkanisat lainnya. Sejalan dengan hasil pengujian kekerasan, indeks abrasi vulkanisat karet yang menggunakan MJE8 juga lebih rendah dibandingkan vulkanisat karet lainnya.

Kekuatan tarik vulkanisat

Kekuatan tarik menunjukkan besarnya gaya yang dapat ditahan karet sebelum karet tersebut putus. Nilai kekuatan tarik vulkanisat karet dipengaruhi *plasticizer* yang digunakan dan struktur molekul karet. Karet merupakan elastomer atau polimer yang bersifat elastis. Bahan aditif termasuk sulfur berinteraksi dalam matriks karet membentuk struktur tiga dimensi. Adanya ikatan silang antara sulfur dan karet memperkuat ikatan antar molekul. Perbedaan formulasi *plasticizer*, *filler* dan bahan aditif yang digunakan mempengaruhi nilai kekuatan tarik vulkanisat karet. Penggunaan *plasticizer* menghasilkan persebaran *filler* dalam matriks karet, sehingga mempengaruhi sifat mekanik vulkanisat karet [29].

Pemanfaatan minyak sawit dapat meningkatkan sifat mekanik vulkanisat karet, seperti modulus kekuatan tarik, dan perpanjangan putus. Minyak sawit memiliki kompatibilitas yang lebih baik dengan komposit SBR karena polaritas minyak. Penggunaan *plasticizer* berbasis minyak sawit memperbesar tingkat dispersi *filler* dalam matriks karet, sehingga *filler* tersebar secara homogen dalam matriks SBR. Hal tersebut mengindikasikan pembentukan ikatan silang yang lebih kuat selama proses vulkanisasi [30].



Gambar 6. Pengaruh jenis plasticizer minyak jelantah epoksi terhadap kekuatan tarik vulkanisat

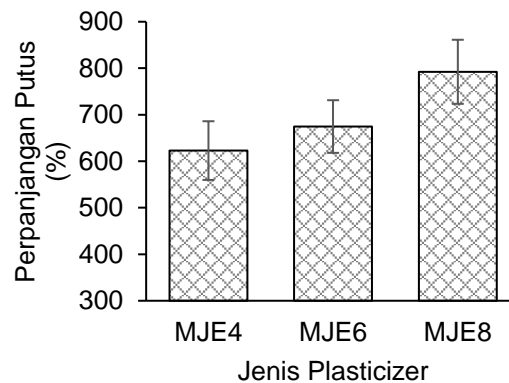
Pengaruh penggunaan *plasticizer* minyak jelantah epoksi terhadap kekuatan tarik vulkanisat karet disajikan dalam Gambar 6. Hasil penelitian memperlihatkan penggunaan

minyak jelantah yang diepoksidasikan lebih lama pada kompon karet (MJE8) menghasilkan vulkanisat karet dengan kekuatan tarik tertinggi (19,1 N/mm²). Peningkatan kekuatan tarik dipengaruhi oleh besarnya konversi relatif oksiran minyak jelantah epoksi. Nilai konversi relatif oksiran berpengaruh terhadap *crosslink density* yang terbentuk. Minyak epoksi semakin polar ketika nilai konversi relatif oksiran semakin tinggi, sehingga *crosslink density* semakin meningkat dan nilai kekuatan tarik vulkanisat karet semakin tinggi [31].

Perpanjangan putus vulkanisat

Perpanjangan putus menggambarkan besarnya pertambahan panjang suatu material yang dapat dicapai sebelum material tersebut putus ketika diregangkan. Perpanjangan putus dinyatakan dengan prosentase pertambahan panjang potongan uji. Besarnya pertambahan panjang material ketika meregang dipengaruhi tingkat elastisitasnya. Pengujian perpanjangan putus bertujuan untuk mengetahui sifat tegangan dan regangan dari vulkanisat karet. Nilai perpanjangan putus dipengaruhi oleh formulasi yang digunakan, antara lain jenis karet dan bahan aditif, serta ikatan silang yang terbentuk. Bahan aditif meliputi *plasticizer*, *filler*, *activator*, *accelerator*, dan *vulcanizing agent* [32].

Hasil penelitian yang disajikan dalam Gambar 7 memperlihatkan pengaruh jenis minyak jelantah epoksi terhadap perpanjangan putus vulkanisat karet. Nilai perpanjangan putus MJE8 (792,3%) lebih tinggi dibandingkan MJE4 (622,9%) dan MJE6 (674,6%). Semakin besar nilai perpanjangan putus menunjukkan vulkanisat karet semakin elastis. Tingginya nilai perpanjangan putus dipengaruhi oleh *crosslink density* antara karet dengan bahan aditif. Berdasarkan Tabel 4, MJE8 memiliki nilai konversi relatif oksiran terbesar, yaitu sebesar 84,92%. Nilai konversi relatif oksiran mempengaruhi *crosslink density* yang terbentuk. Semakin tinggi nilai konversi relatif oksiran mengakibatkan minyak epoksi semakin polar, sehingga *crosslink density* semakin meningkat dan nilai perpanjangan putus vulkanisat karet semakin tinggi [31].



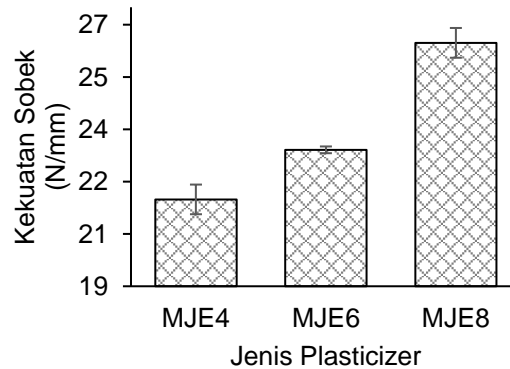
Gambar 7. Pengaruh jenis plasticizer minyak jelantah epoksi terhadap perpanjangan putus vulkanisat

Kekuatan sobek vulkanisat

Kekuatan sobek merupakan besarnya gaya yang dibutuhkan untuk menyobek spesimen uji sampai putus. Nilai kekuatan sobek semakin besar memperlihatkan daya tahan vulkanisat karet terhadap sobekan semakin baik. Besarnya nilai kekuatan sobek dipengaruhi oleh formulasi bahan dan ikatan yang terbentuk dalam vulkanisat karet. Adanya *plasticizer*, *filler*,

activator, *accelerator*, dan *vulcanizing agent* mempengaruhi ikatan silang yang terbentuk, sehingga vulkanisat karet memiliki ketahanan terhadap sobekan [32].

Hasil penelitian yang disajikan dalam Gambar 8 menunjukkan vulkanisat karet dengan *plasticizer* minyak jelantah yang diepoksidasi dengan waktu terlalu lama (MJE8) memberikan nilai kekuatan sobek (26 N/mm) paling tinggi dibandingkan MJE4 (21,5 N/mm) dan MJE6 (22,9 N/mm). Minyak jelantah epoksi berperan sebagai *coupling agent* yang dapat meningkatkan interaksi antara karet dengan *filler*, sehingga mengoptimalkan sifat mekanik vulkanisat karet [33].



Gambar 8. Pengaruh jenis plasticizer minyak jelantah epoksi terhadap kekuatan sobek vulkanisat

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan disimpulkan bahwa MJE8 merupakan *bioplasticizer* minyak jelantah epoksi yang memiliki bilangan oksiran tertinggi sebesar 2,42% dengan konversi relatif oksiran 84,92%. Minyak jelantah epoksi yang memiliki kandungan oksiran lebih tinggi dapat menurunkan kekerasan dan indeks abrasi, serta meningkatkan kekuatan tarik, perpanjangan putus, dan kekuatan sobek vulkanisat karet. Penggunaan MJE8 menghasilkan vulkanisat karet dengan sifat elastisitas yang lebih tinggi, seperti kekuatan tarik (19,1 N/mm²), perpanjangan putus (792,3%), dan kekuatan sobek (26 N/mm). Sedangkan MJE4 menghasilkan vulkanisat karet dengan kekerasan dan indeks abrasi yang lebih tinggi dengan nilai masing-masing 68,7 HA dan 90,8%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. D. Brilliant and T. I. Kurniawan, "Prarancangan Pabrik Dioctyl Phthalate dari Phthalic Anhydride dan 2-Ethyl Hexanol Kapasitas 35.000 Ton/Tahun," Skripsi, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, 2020.
- [2] S. Chuepeng and C. Komintarachat, "Interesterification optimization of waste cooking oil and ethyl acetate over homogeneous catalyst for biofuel production with engine validation," *Applied Energy*, vol. 232, pp. 728–739, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.085.

- [3] Y. Xiong *et al.*, “Solid alcohol based on waste cooking oil: Synthesis, properties, micromorphology and simultaneous synthesis of biodiesel,” *Waste Management*, vol. 85, pp. 295–303, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2018.12.036.
- [4] K. Peng *et al.*, “Systematic comparison of hydrogen production from fossil fuels and biomass resources,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 192–200, 2017, doi: 10.25165/j.ijabe.20171006.2990.
- [5] T. Zheng *et al.*, “Structural modification of waste cooking oil methyl esters as cleaner plasticizer to substitute toxic dioctyl phthalate,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 1021–1030, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.175.
- [6] S. S. Muobom, A.-M. S. Umar, A.-P. Brolin, and Y. Soongseok, “A Review on Plasticizers and Eco-Friendly Bioplasticizers: Biomass Sources and Market,” *IJERT*, vol. 9, no. 5, pp. 1138–1144, Jun. 2020, doi: 10.17577/IJERTV9IS050788.
- [7] S. G. Tan and W. S. Chow, “Biobased Epoxidized Vegetable Oils and Its Greener Epoxy Blends: A Review,” *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 49, no. 15, pp. 1581–1590, 2010, doi: 10.1080/03602559.2010.512338.
- [8] M. Murniati, E. R. Gunawan, D. Suhendra, D. Asnawati, and P. Qurba, “Synthesis of Epoxy Compounds from Nyamplung Oil Fatty Acids (*Calophyllum inophyllum* L.),” *J.Ris.Kim.*, vol. 13, no. 1, pp. 89–99, Mar. 2022, doi: 10.25077/jrk.v13i1.447.
- [9] S. Dinda, A. V. Patwardhan, V. V. Goud, and N. C. Pradhan, “Epoxidation of cottonseed oil by aqueous hydrogen peroxide catalysed by liquid inorganic acids,” *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 9, pp. 3737–3744, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.07.015.
- [10] G. Wuzella, A. R. Mahendran, U. Müller, A. Kandelbauer, and A. Teischinger, “Photocrosslinking of an Acrylated Epoxidized Linseed Oil: Kinetics and its Application for Optimized Wood Coatings,” *J Polym Environ*, vol. 20, no. 4, pp. 1063–1074, 2012, doi: 10.1007/s10924-012-0511-9.
- [11] S.-J. Park, F.-L. Jin, and J.-R. Lee, “Effect of Biodegradable Epoxidized Castor Oil on Physicochemical and Mechanical Properties of Epoxy Resins,” *Macromol. Chem. Phys.*, vol. 205, no. 15, pp. 2048–2054, 2004, doi: 10.1002/macp.200400214.
- [12] X. Kong, T. S. Omonov, and J. M. Curtis, “The development of canola oil based bio-resins,” *Lipid Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 7–10, 2012, doi: 10.1002/lite.201200167.
- [13] S. Arumugam and G. Sriram, “Synthesis and characterization of rapeseed oil bio-lubricant dispersed with nano copper oxide: Its effect on wear and frictional behavior of piston ring–cylinder liner combination,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 228, no. 11, pp. 1308–1318, 2014, doi: 10.1177/1350650114535384.
- [14] V. Thulasiraman, S. Rakesh, and M. Sarojadevi, “Synthesis and characterization of chlorinated soy oil based epoxy resin/glass fiber composites,” *Polym. Compos.*, vol. 30, no. 1, pp. 49–58, 2009, doi: 10.1002/pc.20532.
- [15] A. Kadam, M. Pawar, O. Yemul, V. Thamke, and K. Kodam, “Biodegradable biobased epoxy resin from karanja oil,” *Polymer*, vol. 72, pp. 82–92, 2015, doi: 10.1016/j.polymer.2015.07.002.

- [16] A. J. Clark and S. S. Hoong, "Copolymers of tetrahydrofuran and epoxidized vegetable oils: application to elastomeric polyurethanes," *Polym. Chem.*, vol. 5, no. 9, pp. 3238–3244, 2014, doi: 10.1039/C3PY01527K.
- [17] H. Adhari, Yusnimar, and S. P. Utami, "Pemanfaatan minyak jelantah menjadi biodiesel dengan katalis ZnO presipitan zinc karbonat: Pengaruh waktu reaksi dan jumlah katalis," *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*, vol. 3, no. 2, pp. 1–7, 2016.
- [18] K. Handayani, M. Kanedi, S. Farisi, and W. A. Setiawan, "Pembuatan Sabun Cuci Dari Minyak Jelantah Sebagai Upaya Mengurangi Limbah Rumah Tangga," *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat TABIKPUN*, vol. 2, no. 1, pp. 55–62, 2021, doi: 10.23960/jpkmt.v2i1.25.
- [19] E. Permana, M. Naswir, M. E. T. Sinaga, H. Alfairuz, and SD. S. Murti, "Kualitas biodiesel dari minyak jelantah berdasarkan proses saponifikasi dan tanpa saponifikasi," *Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 6, no. 1, p. 26, 2020, doi: 10.31884/jtt.v6i1.244.
- [20] T. F. Adepoju and O. Olawale, "Acid catalyzed esterification of waste cooking oil with high FFA for biodiesel production," vol. 21, pp. 80–85, 2014, [Online]. Available: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/CPER/article/view/12175/12528>
- [21] Y. Listiana, H. R. Tampubolon, and M. S. Sinaga, "Effect of catalyst concentration and reaction time to epoxy production from waste cooking oil," *J. Teknik Kimia*, vol. 6, no. 3, pp. 28–33, 2017, doi: 10.32734/jtk.v6i3.1586.
- [22] P. L. Lee, W. M. Z. Wan Yunus, S. K. Yeong, D. K. Abdullah, and W. H. Lim, "Optimization of The Epoxidation of Methyl Ester of Palm Fatty Acid Distillate," *Journal of Oil Palm Research*, vol. 21, pp. 675–682, 2009, [Online]. Available: <http://jopr.mpob.gov.my/wp-content/uploads/2013/09/jopr21dec09-lee.pdf>
- [23] M. S. Sinaga, "Effect of H₂SO₄ Catalyst on the Epoxidation Reaction of PFAD Methyl Ester," *Jurnal Teknologi Proses*, vol. 6, no. 1, pp. 70–74, 2007, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/44389813_Pengaruh_Katalis_H2SO4_pada_Reaksi_Epoksidasi_Metil_Ester_PFAD_Palm_Fatty_Acid_Distillate
- [24] T. Saurabh, M. Patnaik, S. L. Bhagt, and V. C. Renge, "Epoxidation of Vegetable Oils: A Review," *International Journal of Advanced Engineering Technology*, vol. II, no. IV, pp. 491–501, 2011, [Online]. Available: <https://www.technicaljournalonline.com/ijeat/VOL%20II/IJAET%20VOL%20II%20ISSUE%20IV%20OCTOBER%20DECEMBER%202011/ARTICLE%2086%20IJAET%20VOLII%20ISSUE%20IV%20OCT%20DEC%202011.pdf>
- [25] B. Rodgers, Ed., *Rubber compounding: chemistry and applications*. New York, N.Y: Marcel Dekker, 2004.
- [26] B. Setiyana, "Identifikasi sifat tribologi dari karet vulkanisir dengan menggunakan metode uji pin on disc," in *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, Semarang: Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim, 2019, pp. 41–46. doi: 10.36499/psnst.v1i1.2818.

- [27] H. Long and R. A. Pett, *Rubber Compounding - Educational Symposium No. 9*. Ohio: The John H. Gifford Memorial Library & Information Center of The University of Akron, 1982.
- [28] G. Chandrasekara, M. K. Mahanama, D. G. Edirisinghe, and L. Karunanayake, "Epoxidized vegetable oils as processing aids and activators in carbon-black filled natural rubber compounds," *J. Natn. Sci. Foundation Sri Lanka*, vol. 39, no. 3, p. 243, 2011, doi: 10.4038/jnsfsr.v39i3.3628.
- [29] Nasruddin, "Pengaruh komposit bahan pelunak terhadap sifat mekanik vulkanisat karet alam SIR-20," *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, vol. 30, no. 1, pp. 65–76, 2019, [Online]. Available: http://litbang.kemenperin.go.id/dpi/article/view/5292/pdf_69
- [30] S. Song, "The Effect of Palm Oil-Based Hybrid Oils as Green Multifunctional Oils on the Properties of Elastomer Composites," *Polymers*, vol. 10, no. 9, p. 1045, 2018, doi: 10.3390/polym10091045.
- [31] N. A. Kinasih and A. Cefriadi, "The Characteristic of Pure Epoxidized Jatropha Curcas (*Jatropha curcas* L.) Oil as NBR Vulcanizate Plasticizer," *International Journal of Natural Rubber Research*, vol. 32, no. 2, pp. 198–205, 2014, doi: 10.22302/ppk.jpk.v32i2.165.
- [32] Nasruddin, "Karakteristik Sifat Fisika Kimia Membran dari Berbagai Formula Kompon," *Dinamika Penelitian BIPA*, vol. 21, no. 37, pp. 60–71, 2010.
- [33] P. P. Kundu, "Improvement of filler-rubber interaction by the coupling action of vegetable oil in carbon black reinforced rubber," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 75, no. 6, pp. 735–739, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1097-4628(20000207)75:6<735::AID-APP1>3.0.CO;2-T.