



KINETIKA VULKANISASI KARET MENGGUNAKAN BIOPLASTICIZER MINYAK KAKAO TEREPOKSI

Pani Satwikanitya^a, Andri Saputra^{a,*}, Muh Wahyu Sya'bani^a, Mertza Fitra Agustian^a

^aProgram Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta

Jl. ATEKA, Bangunharjo, Sewon, Bantul, Yogyakarta 55187

*E-mail: andri.saputra@atk.ac.id

Masuk Tanggal : 3 Juni , revisi tanggal: 16 Juni, diterima untuk diterbitkan tanggal : 30 Juni 2023

Abstrak

Kinetika vulkanisasi karet menggunakan *bioplasticizer* minyak kakao terepoksi dipelajari berdasarkan data *output moving die rheometer*. Data percobaan didekati dengan beberapa model kinetika, yaitu model reaksi orde 1, orde 2, dan Deng-Isayev. Konstanta laju reaksi (k) pada model reaksi orde 1 dan orde 2 dihitung dari data torsi yang merupakan fungsi waktu ($M = f(t)$). Sedangkan pada model Deng-Isayev, nilai k dan orde reaksi (n) ditentukan menggunakan optimasi *multivariable* dengan *tools Solver* pada aplikasi Excel. Nilai energi aktivasi (E_a) diperoleh dari persamaan Arrhenius. Hasil penelitian memperlihatkan model Deng-Isayev dapat merepresentasikan data percobaan dengan baik. Konstanta laju reaksi sebanding dengan kenaikan suhu vulkanisasi. Reaksi vulkanisasi karet menggunakan minyak kakao terepoksi berlangsung pada orde (n) 3 dengan energi aktivasi (E_a) sebesar 157,55 kJ/mol.

Kata Kunci: Bioplasticizer, Epoksi, Kinetika, Minyak kakao, Vulkanisasi

Abstract

The kinetics of rubber vulcanization using epoxy cocoa oil bioplasticizer was studied based on moving die rheometer output data. The experimental data were approached with several kinetics models, namely the first-order, second-order, and Deng-Isayev reaction models. The reaction rate constant (k) in the first-order and second-order reaction models was calculated from torque data as a function of time ($M = f(t)$). While in the Deng-Isayev model, the value of k and the reaction order (n) are determined using multivariable optimization with the Solver tool in the Excel application. The activation energy (E_a) value was obtained from the Arrhenius equation. The results showed that the Deng-Isayev model can represent the experimental data well. The reaction rate constant is proportional to the increase of vulcanization temperature. The rubber vulcanization reaction using epoxy cocoa oil proceeds on order (n) 3 with an activation energy (E_a) of 157.55 kJ/mol.

Keywords: Bioplasticizer, Epoxy, Kinetics, Cacao oil, Vulcanization

1. PENDAHULUAN

Berkembangnya industri produk karet di Indonesia seperti ban, kabel, sol sepatu, dan lain-lain menyebabkan kebutuhan baku utama dan bahan aditif mengalami peningkatan. Salah satu bahan aditif tersebut adalah *plasticizer* yang berfungsi untuk menurunkan viskositas karet dan meningkatkan plastisitas karet, sehingga karet menjadi lunak dan dispersi bahan aditif (bahan pengisi, *accelerator*, *activator*, *vulcanizing agent*, dan lain-lain) menjadi lebih mudah dan cepat. *Diocetyl phthalate* (DOP) merupakan salah satu

plasticizer yang umum digunakan. Kebutuhan DOP di Indonesia terus meningkat dari tahun 2014 hingga 2018 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 produk turunan dari petroleum. Penggunaan *plasticizer* petroleum sekitar 75% dari konsumsi *plasticizer* keseluruhan. Munculnya isu dampak buruk *plasticizer* petroleum terhadap lingkungan dan masalah kesehatan [2], [3], hingga isu cadangan minyak bumi yang makin menurun atau terbatas [4], [5], menyebabkan pengguna *plasticizer* mulai beralih dari *plasticizer* 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 teroksigenasi yang dapat dipolimerisasi dengan cara epoksidasi [7]. Sintesis minyak epoksi dari berbagai macam minyak nabati telah dilakukan, seperti menggunakan minyak biji kapas [8], minyak biji rami [9], minyak jarak pagar [10], minyak jarak kastor [11], minyak kanola [12], minyak rapa [13], minyak kedelai [14], minyak karanja [15], minyak sawit [16]. Beberapa *bioplasticizer* minyak nabati tersebut telah diuji coba dan diaplikasikan dalam industri karet, seperti minyak kedelai [17], minyak jarak pagar [10], minyak jarak kastor [11], minyak biji rami [18], minyak sawit [19], minyak zaitun [20], dan minyak biji karet [21]. Berdasarkan telaah literatur tersebut, studi pemanfaatan minyak kakao terepoksi dalam industri karet belum pernah dilakukan sebelumnya.

Kakao merupakan salah satu hasil perkebunan dan komoditas ekspor yang menjanjikan di Indonesia dengan hasil olahan utama berupa kakao bubuk. Produksi kakao tahun 2020 sejumlah 720 ribu ton menjadikan Indonesia sebagai negara produsen dan eksportir kakao terbesar ketiga dunia setelah Ghana dan Pantai Gading [22]. Selain kakao bubuk, pengolahan kakao menghasilkan produk samping berupa lemak/minyak kakao sekitar 36% dari biji kakao [23]. Jika dilihat dari produksi kakao pada tahun 2020, jumlah minyak kakao yang dihasilkan cukup tinggi. Produk turunan dari minyak kakao sejauh ini belum luas dieksplorasi. Lemak kakao sejauh ini dimanfaatkan sebagai bahan aditif untuk membuat pasta coklat [24], *solid perfume* [25], aditif dalam *hand body lotion* [26]. Salah satu alternatif yang ditawarkan penelitian ini adalah memanfaatkan minyak kakao terepoksi sebagai *bioplasticizer* dalam pembuatan produk karet.

Penelitian ini merupakan penelitian tahap awal yang bertujuan untuk mempelajari pengaruh *bioplasticizer* minyak kakao terepoksi terhadap karakteristik vulkanisasi dan kinetika vulkanisasi karet. Reaksi vulkanisasi memerlukan panas untuk mencetak kompon menjadi produk karet, dimana konsumsi energi selama vulkanisasi berkaitan dengan biaya produk karet. Jika proses vulkanisasi terlalu cepat, peningkatan viskositas karet dapat menghambat aliran kompon dan menyebabkan cacat produk (*scorch*). Jika reaksi vulkanisasi terlalu lambat, produktivitas akan menurun. Dengan demikian, perlu dilakukan penyeimbangan laju pemanasan dengan kinetika vulkanisasi untuk keberhasilan pencetakan produk karet [27]. Studi kinetika vulkanisasi memberikan informasi dalam mengontrol dan mengoptimasi proses pematangan (*curing*), sehingga diperoleh kematangan yang seragam pada produk karet, kematangan yang sesuai dan kematangan yang cukup untuk produk yang tebal [28].

2. METODOLOGI

2.1. Alat

Peralatan yang digunakan yaitu jangka sorong, mesin *two-roll mill* Y315H-6 LEADGO, mesin *hot press molding* USMC CO KR, dan *moving die rheometer* Gotech GT-M2000-AN.

2.2. Bahan

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

Tabel 2. Formulasi kompon karet

Bahan	Formulasi (bsk)
<i>Standard indonesian rubber</i> (SIR) 20	35
<i>Styrene-butadiene rubber</i> (SBR) Indopol	35
<i>Butadiene rubber</i> (BR)	30
Zink oksida C041605 HM Chemical Technology Co., Ltd.	3
Asam stearat DK-1838 Henan Yeedok Industry Co., Ltd.	2
Silika dioksida Zeosil 175MP Solvay	40
<i>Carbon black</i> N330 Dimacolor Group	15
Minyak kakao terepoksi	5
<i>2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline</i> (TMQ)	2
<i>n-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide</i> (CBS)	1,5
<i>1,3-diphenylguanidine</i> (DPG)	0,5
Sulfur	1,8

2.3. Prosedur

Bahan baku ditimbang sesuai dengan formulasi kompon yang tertera pada Tabel 1. Bahan baku

karet seperti SBR Indopol, SIR 20, dan BR dimastikasi menggunakan *two-roll mill*. Karet yang telah lunak ditambahkan *carbon black* sedikit demi sedikit dan diselingi dengan penambahan *bioplasticizer* minyak kakao terepoksi 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 dikarakterisasi pada kondisi isothermal menggunakan *Moving Die Rheometer* (MDR). Pengujian dilakukan pada suhu 150, 160, dan 170 °C. Dalam uji rheologi, reaksi *curing* dipantau sebagai fungsi waktu pada suhu konstan mengikuti karakteristik mekanik yang mengindikasikan ikatan silang. Prosedur pengujian mengikuti ASTM D5289 dan Standar Internasional ISO 6502. MDR mengukur respon torsi suatu material selama proses *curing*, dan menghasilkan respon autografis yang memisahkan pembacaan torsi elastis dan *viscous*. Respons elastis yang diperoleh dianggap sebagai kurva *curing* [29].

Derajat *curing* atau konversi (α) didefinisikan:

$$\alpha = \frac{M_t - M_L}{M_H - M_L} \quad (1)$$

dimana M_t merupakan torsi pada waktu t , M_H torsi maksimum, dan M_L torsi minimum [28].

Kinetika vulkanisasi karet dengan *bioplasticizer* minyak kakao terepoksi didekati dengan beberapa model. Derajat *curing* atau konversi (α) dideskripsikan sebagai berikut:

a. Reaksi orde 1

$$\alpha = 1 - e^{-kt} \quad (2)$$

b. Reaksi orde 2

$$\alpha = 1 - \frac{1}{1 + kC_{S0}t} \quad (3)$$

dimana k merupakan konstanta laju reaksi, C_{S0} konsentrasi sulfur awal, dan t waktu [30].

c. Deng-Isayev

$$\alpha = \frac{k(t - t_{s2})^n}{1 + k(t - t_{s2})^n} \quad (4)$$

dimana k merupakan konstanta laju reaksi, t_{s2} waktu scorch, dan n orde reaksi [28].

Berdasarkan persamaan Arrhenius, konstanta laju reaksi (k) dipengaruhi oleh suhu vulkanisasi:

$$k = A e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (5)$$

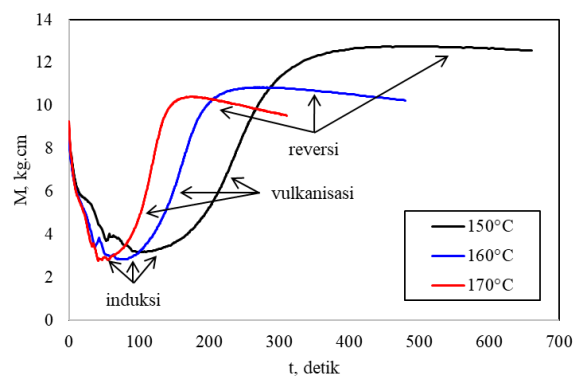
dimana A merupakan faktor frekuensi, E_a energi aktivasi, R konstanta gas, dan T suhu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kurva Rheometer

Pengaruh suhu vulkanisasi terhadap hasil pengujian rheologi kompon karet dengan *bioplasticizer* minyak kakao terepoksi dapat dilihat pada Gambar 1. Uji rheologi menghasilkan kurva *curing* yang terdiri dari tahapan induksi, vulkanisasi, dan reversi [31].

Kurva rheometer menggambarkan hubungan antara torsi terhadap waktu ($M = f(t)$). Gambar 1 memperlihatkan pada ketiga variasi suhu vulkanisasi, mula-mula torsi turun, lalu torsi naik seiring berjalannya waktu, kemudian torsi menurun perlahan setelah waktu tertentu. Tahap vulkanisasi didahului tahap induksi, kerapatan ikatan silang meningkat perlahan pada periode ini, kemudian meningkat dengan cepat ketika reaksi vulkanisasi berlangsung ditunjukkan dengan naiknya torsi, setelah mencapai torsi maksimum diikuti tahap reversi, yaitu putusnya sebagian ikatan silang yang telah terbentuk akibat degradasi termal [32].



Gambar 1. Kurva rheometer minyak kakao terepoksi

Karakteristik vulkanisasi karet dengan *bioplasticizer* minyak kakao terepoksi pada suhu 150, 160, dan 170°C ditampilkan dalam Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa suhu vulkanisasi berpengaruh terhadap karakteristik vulkanisasi, seperti nilai torsi minimum (M_L), torsi maksimum (M_H), delta torsi (ΔM), waktu *scorch* (t_{s2}), dan waktu vulkanisasi optimum (t_{c90}).

Naiknya suhu menyebabkan nilai M_L , M_H , ΔM turun. Demikian pula, semakin tinggi suhu vulkanisasi, nilai t_{s2} dan t_{c90} semakin menurun. Hal ini disebabkan pergerakan molekul bertambah dengan meningkatnya suhu, sehingga mempercepat reaksi vulkanisasi. Waktu yang diperlukan untuk mencapai konversi maksimal menjadi singkat dan pembentukan ikatan silang berjalan lebih cepat [31].

Tabel 3. Hasil Pengujian Rheologi

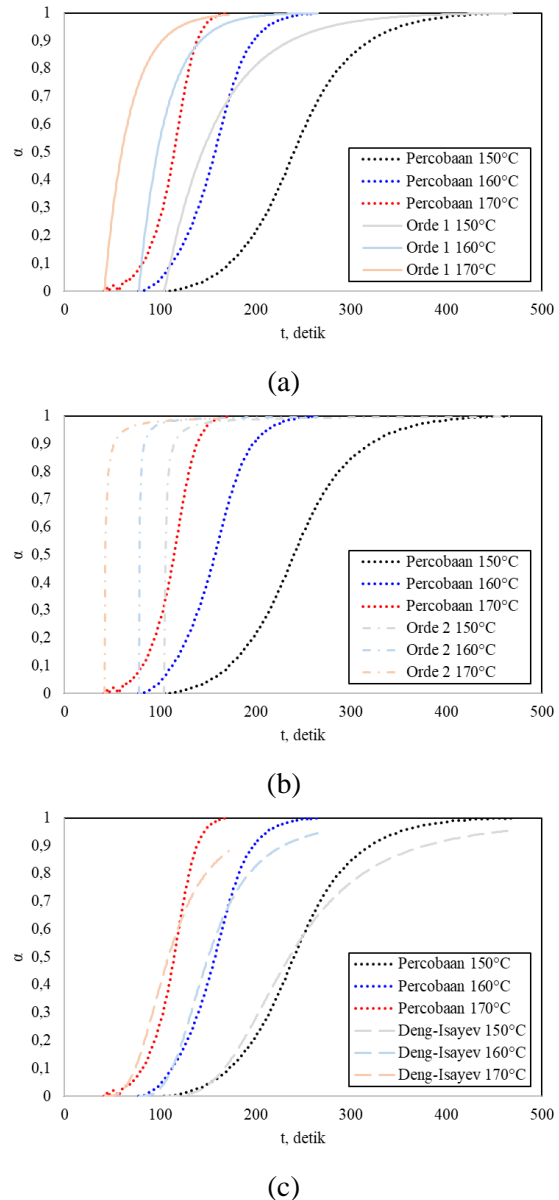
Data Karakterisasi	Suhu vulkanisasi (°C)		
	150	160	170
M_L , kg.cm	3,18	2,84	2,78
M_H , kg.cm	12,76	10,85	10,41
ΔM , kg.cm	9,58	8,01	7,63
t_{s2} , min:sec	3:25	2:19	1:43
t_{c90} , min:sec	5:20	3:18	2:19

3.2. Kinetika Reaksi

Teknik rheometrik menunjukkan tingkat kekakuan karet dan perubahannya selama proses *curing* pada kondisi isothermal berhubungan dengan derajat *curing* atau konversi (α). Derajat *curing* merupakan parameter penting untuk mengamati jalannya proses *curing* dan bervariasi menurut waktu vulkanisasi [33]. Derajat *curing* atau konversi (α) menggambarkan banyaknya ikatan silang yang terbentuk pada waktu tertentu. Pada Gambar 2, bentuk kurva *curing* memperlihatkan setelah periode induksi, konversi mengalami akselerasi atau peningkatan dengan cepat, diikuti deselerasi atau perlambatan ditandai kurva mendatar hingga mencapai nilai maksimum [34]. Berdasarkan gambar tersebut, konversi bergerak lebih lambat pada suhu vulkanisasi yang lebih rendah, sehingga untuk mencapai konversi 100% atau $\alpha = 1$ diperlukan waktu yang lebih lama. Laju konversi meningkat dengan bertambahnya suhu vulkanisasi, dilihat dari tingkat kemiringan kurva *curing* yang lebih terjal.

Kinetika vulkanisasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain formulasi kompon karet, suhu vulkanisasi, dan metode karakterisasi material [29]. Gambar 2 menampilkan hubungan antara derajat *curing* (α) terhadap waktu dari data percobaan yang dievaluasi menggunakan beberapa model kinetika, yaitu (a) model orde 1, (b) model orde 2, dan (c) model Deng-Isayev. Berdasarkan gambar tersebut, kinetika reaksi model orde 1 dan orde 2 belum dapat menggambarkan data percobaan. Model kinetika Deng-Isayev mengasumsikan reaksi vulkanisasi berjalan simultan [35], sehingga paling merepresentasikan reaksi vulkanisasi karet dengan *bioplasticizer* minyak kakao terepoksi. Model orde ke- n belum dapat menggambarkan keseluruhan proses karena beberapa reaksi

simultan dapat terjadi selama proses vulkanisasi [36]. Model Deng-Isayev mampu menggambarkan proses vulkanisasi material karet [27], seperti pada kompon karet alam [28] dan karet dengan *plasticizer* minyak jelantah epoksi [37].



Gambar 2. Hubungan antara derajat *curing* (α) terhadap waktu dengan pendekatan model kinetika (a) orde 1, (b) orde 2, dan (c) Deng-Isayev

Nilai konstanta laju reaksi (k) dan orde reaksi (n) model kinetika Deng-Isayev ditampilkan dalam Tabel 4. Konstanta laju reaksi sebanding dengan kenaikan suhu vulkanisasi, sedangkan orde reaksi diasumsikan konstan. Orde reaksi yang digunakan pada model Deng-Isayev merupakan rata-rata nilai n yang ditentukan pada setiap suhu [29].

Reaksi vulkanisasi merupakan reaksi endotermis (Allahbakhsh, Mazinani, Kalae, & Sharif, 2013). Untuk memulai reaksi vulkanisasi

diperlukan panas karena energi yang diambil dari lingkungan tidak mencukupi. Keseluruhan energi yang digunakan untuk bereaksi disebut dengan energi aktivasi (E_a). Energi aktivasi menggambarkan kemudahan dalam proses pembentukan ikatan silang. Nilai E_a diperoleh dari kemiringan (*slope*) hubungan linier antara $\ln k$ dengan $1/T$ pada persamaan (5). Nilai E_a dapat dilihat dalam Tabel 4. Nilai E_a dalam percobaan ini lebih rendah dibandingkan E_a pada sistem vulkanisasi kompon karet alam [28] dan karet dengan plasticizer minyak jelantah epoksi [37].

Tabel 4. Nilai parameter kinetika model Deng-Isayev

Suhu vulkanisasi (°C)	$k \times 10^{-6}$ (s ⁻¹)	n	E_a (kJ/mol)
150	0,44		
160	2,58	3	157,55
170	3,31		

4. KESIMPULAN

Kinetika vulkanisasi karet dengan *bioplasticizer* minyak kakao terepoksi dipelajari menggunakan pendekatan model reaksi orde 1, orde 2, dan Deng-Isayev berdasarkan data *output* MDR. Semakin tinggi suhu vulkanisasi, semakin rendah waktu vulkanisasi optimum (t_{c90}). Data percobaan dapat dideskripsikan dengan baik menggunakan model kinetika Deng-Isayev. Konstanta laju reaksi (k) sebanding dengan kenaikan suhu vulkanisasi. Reaksi vulkanisasi karet menggunakan minyak kakao terepoksi berlangsung pada orde (n) 3 dengan energi aktivasi (E_a) sebesar 157,55 kJ/mol.

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] K. Peng, G. Morrow, Z. Xiaolei, W. Tipeng, Z. Tan, and J. Agarwal, "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.

[3] T. Zheng, Z. Wu, Q. Xie, J. Fang, Y. Hu, M. Lu, F. Xia, Y. Nie, and J. Ji, "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.

[4] 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.

[5] Y. Xiong, W. Miao, N. Wang, H. Chen, X. Wang, J. Wang, Q. Tan, and S. Chen, "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.

[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] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] S. Puspitasari, A. Cifriadi, K. Krisnawati, and T. T. Irawadi, "Reaksi transfer hidrogenasi minyak jarak kastor serta aplikasinya sebagai bahan pelunak kompon karet," *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, vol. 32, no. 2, p. 85, 2016, doi: 10.20543/mkpk.v32i2.1361.

- [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. Xu, T. Fan, N. Ye, W. Wu, D. Huang, D. Wang, Z. Wang, and L. Zhan, "Plasticization effect of bio-based plasticizers from soybean oil for tire tread rubber," *Polymers*, vol. 12, no. 3, p. 623, 2020, doi: 10.3390/polym12030623.
- [18] C. Bétron, P. Cassagnau, and V. Bounor-Legaré, "Control of diffusion and exudation of vegetable oils in EPDM copolymers," *European Polymer Journal*, vol. 82, pp. 102–113, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2016.06.027.
- [19] B. Mensah, B. Onwona-Agyeman, E. Nyankson, and D. Y. Bensah, "Effect of palm oil as plasticizer for compounding polar and non-polar rubber matrix reinforced carbon black composites," *Journal of Polymer Research*, vol. 30, no. 2, p. 67, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03443-w>.
- [20] A. I. Khalaf, A. A. Ward, A. E. Abd El-Kader, and S. H. El-Sabbagh, "Effect of selected vegetable oils on the properties of acrylonitrile-butadiene rubber vulcanizates," *Polimery*, vol. 60, no. 01, pp. 43–56, Jan. 2015, doi: 10.14314/polimery.2015.043.
- [21] R. Joseph, R. Alex, V. S. Vinod, C. K. Premalatha, and B. Kuriakose, "Studies on epoxidized rubber seed oil as plasticizer for acrylonitrile butadiene rubber," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 89, no. 3, pp. 668–673, 2003, doi: 10.1002/app.12037.
- [22] Badan Pusat Statistik Indonesia, *Statistik Kakao Indonesia Tahun 2020*. Jakarta: Badan Pusat Statistik Indonesia, 2020.
- [23] N. Nafisah, F. Fachraniah, and E. Elwina, "Ekstraksi minyak coklat dari biji kakao dengan penambahan jenis pelarut," in *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, in 1, vol. 2. Aceh: Politeknik Negeri Lhokseumawe, 2018, pp. 72–76.
- [24] H. Hatta and A. Laboko, *Sifat fisikokimia pasta coklat: Dengan penambahan lemak kakao dan minyak sawit*. Gorontalo: CV Cahaya Arsh Publisher & Printing, 2021.
- [25] N. Suryani, "Pemanfaatan lemak coklat sebagai bahan baku pembuatan solid perfume berbasis minyak melati," Skripsi, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Jakarta, 2020.
- [26] S. Ramlah, "Karakteristik mutu dan efek penambahan polifenol pada hand body lotion berbasis lemak kakao terhadap kulit," *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, vol. 12, no. 2, pp. 29–39, 2017.
- [27] O. H. Yeoh, "Mathematical Modeling of Vulcanization Characteristics", *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 85, no. 3, pp. 482–492, 2012, doi: 10.5254/rct.12.87982.
- [28] T. H. Khang and Z. M. Ariff, "Vulcanization kinetics study of natural rubber compounds having different formulation variables," *J Therm Anal Calorim*, vol. 109, no. 3, pp. 1545–1553, 2012, doi: 10.1007/s10973-011-1937-3.
- [29] A. Arrillaga, A. M. Zaldua, R. M. Atxurra, and A. S. Farid, "Techniques used for determining cure kinetics of rubber compounds," *European Polymer Journal*, vol. 43, no. 11, pp. 4783–4799, 2007, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2007.08.024.
- [30] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering (3 ed.)*. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [31] A. Yuniari, I. Setyorini, and H. E. Mayasari, "Kinetika vulkanisasi dan sifat mekanis komposit acrylonitrile butadiene rubber (NBR)," *MKKP*, vol. 32, no. 2, p. 117, 2016, doi: 10.20543/mkcp.v32i2.1594.
- [32] E. Leroy, A. Souid, and R. Deterre, "A continuous kinetic model of rubber

- vulcanization predicting induction and reversion," *Polymer Testing*, vol. 32, no. 3, pp. 575–582, 2013, doi: 10.1016/j.polymeresting.2013.01.003.
- [33] A. Allahbakhsh, S. Mazinani, M. R. Kalae, and F. Sharif, "Cure kinetics and chemorheology of EPDM/graphene oxide nanocomposites," *Thermochimica Acta*, vol. 563, pp. 22–32, 2013, doi: 10.1016/j.tca.2013.04.010.
- [34] B. Janković, "The kinetic analysis of isothermal curing reaction of an unsaturated polyester resin: Estimation of the density distribution function of the apparent activation energy," *Chemical Engineering Journal*, vol. 162, no. 1, pp. 331–340, 2010, doi: 10.1016/j.cej.2010.05.010.
- [35] I. N. Indrajati and M. Sholeh, "Kinetika vulkanisasi campuran NR/EPDM dengan pendekatan model Deng-Isayev dan Kamal-Sorour," *MKKP*, vol. 30, no. 2, p. 95, 2014, doi: 10.20543/mkkp.v30i2.130.
- [36] Kalae, M., Akhlaghi, S., Nouri, A., Mazinani, S., Mortezaei, M., Afshari, M., and Gohari, D. P., "Effect of nano-sized calcium carbonate on cure kinetics and properties of polyester/epoxy blend powder coatings," *Progress in Organic Coatings*, vol. 71, pp. 173-180, 2011, doi: 10.1016/j.porgcoat.2011.02.006
- [37] Satwikanitya, P., Saputra, A., Sya'bani, M. W., Pambudi, W., and Agustian, M. F. (2023). Studi Pengaruh Penggunaan Plasticizer dari Minyak Jelantah Epoksi terhadap Kinetika Vulkanisasi Karet. *Jurnal Penelitian Karet*, 33-46.