talenta PUBLISHER

Jurnal Teknik Kimia USU
Journal homepage: https://talenta.usu.ac.id/jtk

Pengaruh Urutan Pencampuran Pemlastis pada Komponding Karet Terhadap Kinetika Vulkanisasi Menggunakan Model Deng-Isayev dan Kamal-Sorour

Effect of Plasticizer Mixing Sequence on Rubber Compounding to Vulcanization Kinetics Based Deng-Isayev and Kamal-Sorour Models

Andri Saputra*, Mertza Fitra Agustian
Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta, Jl. ATEKA, Bangunharjo, Sewon, Bantul, Yogyakarta, 55187, Indonesia
*Email: andri.saputra@atk.ac.id

***Article history*:**

Diterima : 29 Januari 2024
Direvisi : 24 Februari 2024
Disetujui : 3 April 2024
Mulai online : 28 September 2024

E-ISSN: 2337-4888

***How to cite*:**
Andri Saputra, Mertza Fitra Agustian. (2024). Pengaruh Urutan Pencampuran Pemlastis pada Komponding Karet Terhadap Kinetika Vulkanisasi Menggunakan Model Deng-Isayev dan Kamal-Sorour. Jurnal Teknik Kimia USU, 13(2), 122-130.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
https://doi.org/10.32734/jtk.v13i2.15550

ABSTRAK

Pemlastis berperan penting dalam industri karet mempermudah dispersi bahan aditif ke dalam karet. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh urutan pencampuran pemlastis terhadap kinetika vulkanisasi. Hal ini berhubungan dengan pengaruhnya terhadap lama dan energi pencetakan, serta biaya listrik yang digunakan. Kompon A yang dibuat dengan menambahkan pemlastis di tahap mastikasi dan kompon B yang dibuat dengan menambahkan pemlastis di tahap *masterbatch*. Parameter kinetika ditentukan menggunakan model Deng-Isayev dan Kamal-Sorour. Hasil penelitian menyatakan bahwa model Deng-Isayev lebih mendekati data eksperimen dibandingkan model Kamal-Sorour. Kompon A memiliki nilai *k* ($3{,}0635x10^{-6}$ det^{-1}) dan *cure rate index* (0,8403) sedikit lebih rendah dibandingkan kompon B dengan nilai *k* sebesar $3{,}3511x10^{-6}$ det^{-1} dan *cure rate index* sebesar 0,9260. Namun, urutan pencampuran pemlastis tidak signifikan mempengaruhi kinerja vulkanisasi, baik konstanta kecepatan reaksi, orde reaksi, waktu induksi, waktu optimal vulkanisasi, dan *cure rate index*.

Kata kunci: deng-isayev, kamal-sorour, kinetika vulkanisasi, pemlastis

ABSTRACT

Plasticizers play an important role in the rubber industry to facilitate the dispersion of additives into rubber. This research aims to study the effect of plasticizer mixing sequence on vulcanization kinetics. This relates to its effect on printing time and energy, as well as the cost of electricity used. Compound A was made by adding plasticizer at the mastication stage and compound B was made by adding plasticizer at the masterbatch stage. Kinetic parameters were determined using Deng-Isayev and Kamal-Sorour models. The results show that the Deng-Isayev model is closer to the experimental data than the Kamal-Sorour model. Compound A has a *k* value ($3.0635x10^{-6}$ sec^{-1}) and cure index (0.8403) slightly lower than compound B with a *k* value $3.3511x10^{-6}$ sec^{-1} and cure index 0.9260. However, the mixing order of the plasticizers did not significantly affect the vulcanization performance, either the reaction speed constant, reaction order, induction time, optimal vulcanization time, and cure index.

Keyword: *deng-isayev, kamal-sorour, vulcanization kinetics, plasticizer*

1. Pendahuluan

Vulkanisasi karet merupakan reaksi bertingkat yang kompleks antara karet dengan bahan aditif, mengarah pada sifat-sifat psiko-mekanikal yang beragam [1]. Sifat-sifat vulkanisat karet tidak hanya dipengaruhi oleh reaksi vulkanisasi tetapi juga dipengaruhi oleh pencampuran atau peracikan [2]. Urutan pemasukan bahan karet dalam komponding karet mempengaruhi kekuatan tarik, perpanjangan putus, dan kerapatan ikatan silang vulkanisat karet [3]. Dalam formulasi karet, penambahan karbon hitam yang diikuti dengan minyak memberikan ketahanan abrasi yang lebih tinggi daripada penambahan karbon hitam dan minyak secara bersamaan [2]. Penambahan dua jenis bahan pengisi (*organoclay* dan nano-kalsium karbonat) secara simultan ke dalam senyawa karet alam menghasilkan sifat nanokomposit yang lebih baik dibandingkan dengan urutan pencampuran lainnya [4].

Di sisi lain, urutan pencampuran material juga mempengaruhi karakteristik dan kinetika vulkanisasi. Semakin banyak karbon hitam dicampur di awal proses penggilingan karet, semakin tinggi konstanta laju reaksi vulkanisasi. Urutan pencampuran karbon hitam dan diikuti bahan kimia aditif lainnya ke dalam karet menghasilkan konstanta laju reaksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pencampuran bahan-bahan tersebut secara simultan [2]. Pengaruh urutan pencampuran bahan aditif dalam komponding karet terhadap kinetika reaksi vulkanisasi belum banyak dipelajari. Secara khusus, belum banyak penelitian yang menyelidiki pengaruh pemlastis dalam komponding karet. Di sisi lain, pemlastis sering digunakan dalam formulasi produk karet. Pemlastis berperan penting untuk menurunkan viskositas kompon karet, membuat kompon karet menjadi lunak, dan memberikan efek pelumasan pada kompon, sehingga mempermudah proses komponding dan distribusi bahan aditif lainnya pada karet [5]. Studi pengaruh jumlah pemlastis terhadap karakteristik vulkanisasi pernah dilakukan sebelumnya. Kurva reologi menunjukkan nilai torsi optimal berbanding terbalik dengan jumlah pemlastis minyak kedelai termodifikasi dalam kompon karet [6]. Waktu induksi (t_{s2}) sebanding dengan jumlah pemlastis minyak aromatik (Tudalen 65) [7]. Namun, informasi pengaruh urutan pencampuran pemlastis pada komponding karet terhadap parameter kinetika reaksi vulkanisasi karet sangat terbatas. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki pengaruh urutan pencampuran pemlastis dalam komponding karet terhadap kinetika reaksi vulkanisasi.

Studi kinetika vulkanisasi memberikan informasi mengenai proses pematangan yang dapat digunakan sebagai dasar untuk mengontrol dan mengoptimalkan siklus pematangan karet, sehingga diperoleh pematangan yang seragam pada produk karet [8-10]. Penerapan model kinetik memberikan penjelasan rinci tentang karakteristik pematangan (vulkanisasi) [9] dan prediksi tentang waktu pematangan optimum [11, 12]. Karakteristik dan kinetika vulkanisasi tersebut dapat diperkirakan dan diperhitungkan menggunakan kurva pematangan (nilai torsi pada berbagai waktu pematangan) dari metode uji reologi. Uji reologi merupakan metode yang paling umum digunakan untuk mempelajari kinetika vulkanisasi karena praktis untuk diterapkan [13, 14]. Beberapa publikasi telah mempelajari kinetika vulkanisasi dari berbagai hal seperti jenis karet dan campuran karet [15], jenis sistem vulkanisasi [16], jenis bahan pengisi [17, 18], dan jenis pemlastis [6, 19, 20].

Proses vulkanisasi polimer termoset pada penelitian yang dilakukan oleh peneliti lain sebelumnya [21-23], umumnya kinetika vulkanisasi dipelajari dengan menggunakan model Kamal-Sorour dan Deng-Isayev. Model Kamal-Sorour mengasumsikan bahwa reaksi vulkanisasi bukanlah proses elementer yang sederhana, tetapi beberapa reaksi berjalan secara simultan dan produk reaksi vulkanisasi dapat mengkatalisis reaksi berikutnya (autokatalisis) [21, 22]. Pada model Deng-Isayev, laju reaksi vulkanisasi sebanding dengan konsentrasi bahan yang tidak bereaksi dan yang bereaksi [23]. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh urutan pencampuran pemlastis dalam komponding karet terhadap karakteristik vulkanisasi dan parameter kinetika antara lain waktu induksi, waktu vulkanisasi, waktu reversi, konstanta laju reaksi, dan orde reaksi dengan menggunakan model empiris Deng-Isayev dan Kamal-Sorour yang didasarkan pada data reologi. Harapannya penelitian ini menjadi acuan bagi industri karet saat menentukan urutan pencampuran pemlastis dalam proses komponding karet.

2. Metode

Bahan

Jumlah dari setiap bahan dalam formula dinyatakan dalam bagian seratus karet (bsk). Bahan-bahan ditimbang berdasarkan formulasi kompon pada Tabel 1 dengan basis berat karet 1 kg.

Peralatan

Peralatan yang digunakan antara lain mesin *two-roll mill* tipe Y315H-6 LEADGO), mesin *moving die rheometer* tipe Gotech GT-M2000-AN, neraca massa merek Ohaus (ketelitian ±0,01 g), dan gunting.

Tabel 1. Formula kompon karet

Bahan	Jumlah (bsk)	Keterangan
Karet stirena butadiena (SBR) merek Indopol	100	Elastomer
Sulfur CAS No. 1326-66-7	1,5	Pemvulkanisasi
Tetrametiltiuram disulfida (TMTD) MFR. Kemai Chemical Co.LTD.	1	Akselerator
Benzotiazol disulfida (MBTS) MFR. Kemai Chemical Co.LTD.	2,5	Akselerator
Zink oksida C041605 HM Chemical Technology Co., Ltd.	5	Aktivator
Asam stearat DK-1838 Henan Yeedok Industry Co., Ltd	1	Aktivator
Karbon hitam N330 CAS No. 1333-86-4 Dimacolor Group	30	Bahan pengisi
Minyak paraffin dari Multi Jaya Kimia	3	Pemlastis

Setiap jenis kompon dibuat dengan urutan pencampuran pemlastis yang berbeda seperti yang dijelaskan berikut ini.

Kompon A

Kompon A dibuat dengan skema pencampuran pemlastis pada tahap mastikasi (pelunakan) karet. SBR pertama kali digiling dan ditambahkan minyak paraffin menggunakan mesin *two-roll mill* (Y315H-6 LEADGO) selama waktu 3 menit (45 ^{o}C) dan diikuti dengan penambahan karbon hitam yang digiling selama waktu 7 menit (50 ^{o}C). Asam stearat dan zink oksida dicampurkan ke dalam kompon selama 2 menit (52 ^{o}C). Setelah pencampuran ini, TMTD dan MBTS dicampur ke dalam kompon selama 1 menit (52^{o}C). Sulfur ditambahkan pada urutan akhir ke dalam kompon selama 1 menit (52 ^{o}C).

Kompon B

Kompon B dibuat dengan skema pencampuran pemlastis pada tahap *masterbatch* karet. SBR pertama kali digiling menggunakan mesin *two-roll mill* (Y315H-6 LEADGO) selama waktu 3 menit (45 ^{o}C) dan diikuti dengan penambahan karbon hitam yang digiling dalam waktu 7 menit (50 ^{o}C). Asam stearat dan zink oksida dicampurkan ke dalam kompon selama 2 menit (52 ^{o}C). Kemudian, minyak paraffin, TMTD, dan MBTS ditambahkan ke dalam kompon selama 1 menit (52 ^{o}C). Sulfur ditambahkan ke dalam kompon dalam urutan pencampuran akhir selama 1 menit (52 ^{o}C).

Uji Reologi

Kompon karet dikarakterisasi pada kondisi isotermal di suhu 160 °C menggunakan *moving die rheometer* (Gotech GT-M2000-AN). Prosedur uji reologi mengikuti ASTM D5289 dan Standar Internasional ISO 6502. *Moving die rheometer* mengukur respon torsi elastis suatu material selama proses vulkanisasi.

Studi Kinetika

Hasil uji reologi diolah untuk mendapatkan konversi atau derajat vulkanisasi berdasarkan eksperimen (α). Derajat vulkanisasi berdasarkan model Deng-Isayev dihitung menggunakan Persamaan 1, sedangkan derajat vulkanisasi berdasarkan model Kamal-Sorour dihitung menggunakan Persamaan 2.

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

$$\alpha = \frac{M_t - M_L}{M_H - M_L} \quad (2)$$

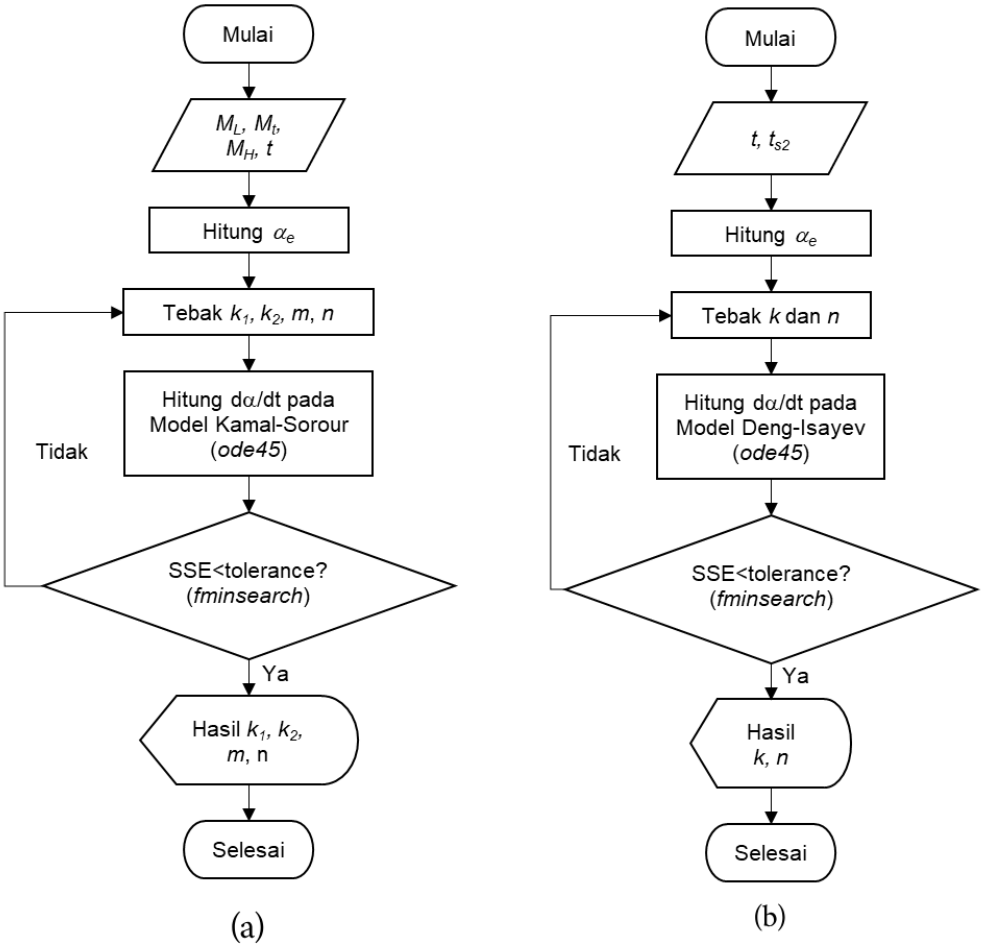
dengan *k*, *n*, *t*, dan t_{s2} secara berurutan adalah konstanta kecepatan vulkanisasi model Deng-Isayev, orde reaksi model Deng-Isayev, waktu reaksi, dan waktu induksi, sedangkan M_L, M_t, dan M_H secara berurutan adalah torsi minimum, torsi pada waktu *t*, dan torsi maksimum.

Parameter kinetika model Deng-Isayev (*k* dan *n*) dan model Kamal-Sorour (k_1, k_2, *m*, dan *n*) ditentukan menggunakan differensiasi Persamaan 3 dan Persamaan 4 dengan *tools ode45* dan optimasi multivariabel *sum of squared error* (SSE) dengan *tools fminsearch* pada perangkat lunak Online MATLAB. Algoritma komputasi model Kamal-Sorour dan Deng-Isayev seperti ditampilkan pada Gambar 1. k_1 dan k_2 merupakan konstanta kecepatan reaksi model Kamal-Sorour, sedangkan *m* dan *n* merupakan orde reaksi model Kamal-Sorour.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \alpha^{\frac{n-1}{n}}(1-\alpha)^{\frac{n+1}{n}} n\, k^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m)(1-\alpha)^n \quad (4)$$

Model Deng-Isayev dan Kamal-Sorour digunakan untuk menganalisis proses vulkanisasi pada periode vulkanisasi, namun tidak sesuai untuk periode sebelum induksi (t_{s2}). Periode tersebut berhubungan dengan viskositas kompon sehingga tidak dapat diikutsertakan dalam optimasi karena diatur oleh mekanisme fisis [24] dan bahan akselerator yang memegang peran utama pada periode tersebut [25]. Kedua model juga disusun dengan mengabaikan fenomena reversi [26]. Oleh karena itu, data pada saat induksi dan reversi tidak digunakan dalam perhitungan.



Gambar 1. Algoritma komputasi optimasi model (a) Kamal-Sorour (b) Deng-Isayev

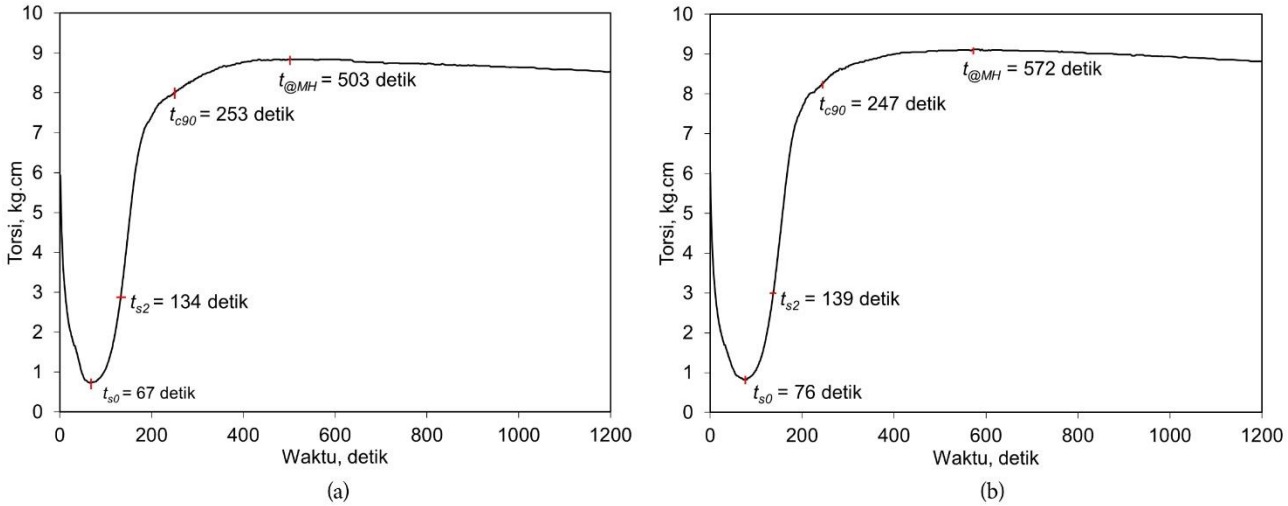
3. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Vulkanisasi

Uji kompon menggunakan rheometer menghasilkan data berupa kurva reologi yang menghubungkan antara besarnya torsi pada setiap waktu (M=f(t)). Kurva reologi berbagai jenis kompon ditampilkan dalam Gambar 2. Kurva reologi tersebut memperlihatkan mula-mula torsi turun hingga mencapai torsi terendah, lalu torsi meningkat seiring berjalannya waktu, kemudian torsi turun perlahan setelah torsi maksimum tercapai pada setiap suhu pengujian di masing-masing jenis kompon. Fenomena naik-turunnya torsi tersebut diklasifikasikan dalam beberapa tahapan, yaitu pelunakan, induksi, pematangan (vulkanisasi), dan reversi [27, 28].

Pelunakan merupakan tahap awal yang menyebabkan kompon mulai menyerap panas yang ditransfer oleh bagian *die* rheometer, sehingga kompon menjadi lunak. Hal ini ditandai dengan nilai viskositas yang semakin menurun [20]. Penurunan viskositas kompon menyebabkan nilai torsi yang terukur oleh bagian *die* rheometer juga ikut semakin menurun dari torsi awal (M_0) saat waktu awal (t_0) hingga torsi minimum (M_L) saat waktu terendah (t_{s0}) seperti terlihat pada Gambar 2. Selanjutnya, titik awal mulai terjadinya proses vulkanisasi ditandai dengan mulai meningkatnya nilai torsi dari torsi terendah (M_L) saat waktu terendah (t_{s0}) hingga torsi pada waktu induksi (t_{s2}) (lihat Gambar 2). Tahap inilah yang disebut periode induksi. Kerapatan ikatan silang karet meningkat perlahan pada periode ini [20]. Gambar 2 menjelaskan bahwa urutan pencampuran pemlastis

sangat sedikit mempengaruhi titik mulai vulkanisasi dan lamanya periode induksi. Pemlastis yang dicampurkan di tahap awal atau mastikasi karet menyebabkan vulkanisasi karet berlangsung sedikit lebih awal dibandingkan saat pemplastis dicampurkan di tahap *masterbatch*. Tahap *masterbatch* merupakan tahap telah berlangsung penambahan bahan aditif lain (seperti bahan pengisi dan aktivator) ke dalam kompon karet). Hal ini terlihat dari nilai t_{s0} dan t_{s2} kompon A yang sedikit lebih rendah dibanding kompon B (lihat Gambar 2).



Gambar 2. Kurva reologi (a) Kompon A dan (b) Kompon B

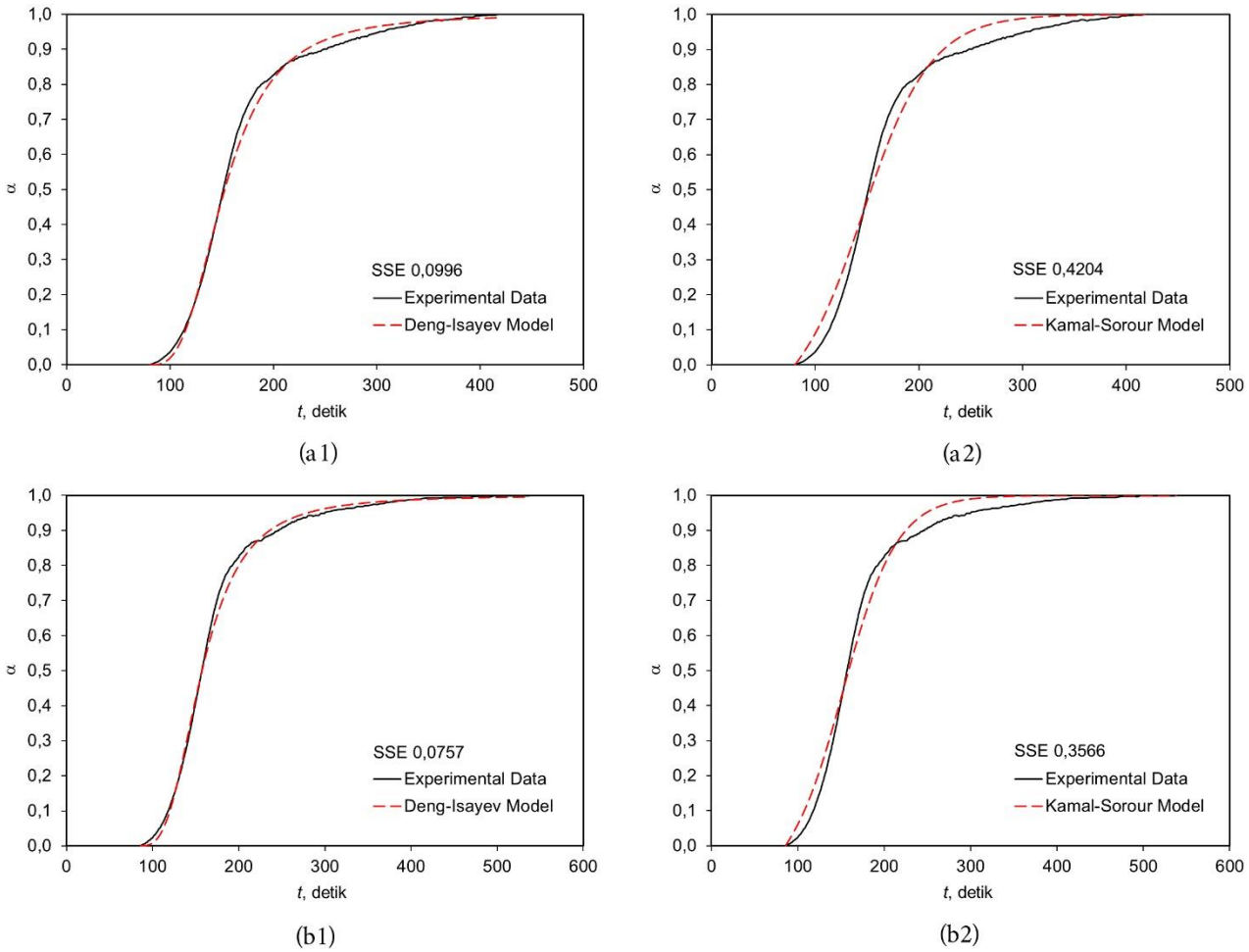
Kurva reologi mengalami peningkatan torsi secara signifikan hingga torsi pada t_{c90} dan torsi meningkat perlahan setelahnya hingga karet tervulkanisasi total di $t_{@MH}$. Vulkanisasi atau pembentukan ikatan silang antar karet oleh sulfur berlangsung cepat pada selang waktu t_{s2} hingga t_{c90}. Gambar 2 menjelaskan bahwa urutan pencampuran pemlastis juga sangat sedikit mempengaruhi waktu optimal vulkanisasi (t_{c90}), dengan asumsi bahwa faktor lain yang mempengaruhi proses komponding adalah sama pada setiap kompon. Pemlastis yang dicampurkan di tahap *masterbatch* menyebabkan t_{c90} sedikit lebih singkat dibandingkan saat pemlastis dicampurkan di tahap mastikasi karet. Namun, nilai tersebut tidak berbeda signifikan. Selain untuk mengetahui waktu vulkanisasi karet pada suhu tertentu, uji reologi secara praktis biasanya untuk mengetahui homogenitas kompon. Kompon yang distribusi dan dispersi bahan aditifnya baik (homogen) ditandai dengan nilai t_{c90}-nya hampir sama atau sama. Berdasarkan Gambar 2 diketahui bahwa sifat distribusi dan dispersi bahan aditif antar kompon A dan kompon B yaitu sama atau homogen. Dengan asumsi bahwa faktor lain yang mempengaruhi proses komponding pada saat pengambilan data adalah sama pada setiap kompon, maka dapat dikatakan bahwa pengaruh urutan pencampuran pemlastis di tahap mastikasi dan *masterbatch* terhadap homogenitas kompon adalah sama.

Di sisi lain, urutan pencampuran pemlastis mempengaruhi waktu vulkanisasi maksimal ($t_{@MH}$). Pemlastis yang dicampurkan lebih awal ke dalam kompon menyebabkan karet tervulkanisasi secara penuh lebih singkat dibandingkan saat pemlastis dicampurkan di tahap *masterbatch*. Hal ini terlihat dari nilai $t_{@MH}$ kompon A (503 detik) yang lebih rendah dibandingkan kompon B (572 detik). Kemudian, nilai torsi turun setelah $t_{@MH}$ tercapai. Hal ini menandakan bahwa tahap reversi telah terjadi (pembalikan). Reversi adalah proses degradasi karet yang ditandai dengan sifat kembali lengket akibat pematangan yang terlalu lama atau dikenai panas berlebih. Pada tahap ini, ikatan silang karet yang kuat putus dan molekul tersebut kembali ke rantai kecil aslinya [29].

Kinetika Vulkanisasi

Hubungan derajat vulkanisasi atau konversi (α) pada setiap waktu untuk masing-masing kompon ditampilkan pada Gambar 3. Konversi ini menunjukkan banyaknya sulfur yang telah bereaksi membentuk ikatan silang antar karet selama vulkanisasi [30]. Kecepatan konversi berkaitan dengan kecepatan reaksi vulkanisasi. Saat kompon menyerap panas selama uji reologi, sistem pemvulkanisasi (termasuk MBTS, TMTD, sulfur, asam stearat, dan ZnO) menyebar ke seluruh matriks karet dan bereaksi membentuk spesies aktif sulfida. Sulfida yang tersebar ini bereaksi dengan ikatan rangkap tak jenuh pada karet, yang menyebabkan ikatan silang pada rantai karet [31]. Gambar 3 menyajikan hasil simulasi komputasi dan optimasi multivariabel *sum of squared error* (SSE) untuk masing-masing model, sedangkan parameter kinetika vulkanisasi model Deng-Isayev dan Kamal-Sorour untuk setiap kompon ditabulasikan dalam Tabel 3 dan Tabel 4.

Data konversi model Kamal-Sorour sedikit kurang sesuai dengan data konversi eksperimen karena kurva model dan data eksperimen kurang tumpang tindih dengan cukup baik (lihat Gambar 3). Hal ini juga terlihat dari nilai SSE model Kamal-Sorour yang lebih tinggi dibandingkan model Deng-Isayev (lihat Tabel 3 dan Tabel 4). Sebaliknya, data konversi model Deng-Isayev lebih sesuai dengan data konversi eksperimen karena kurva Deng-Isayev lebih berimpitan dengan data eksperimen dan nilai SSE-nya relatif lebih rendah dari model lainnya. Model Deng-Isayev menjelaskan perubahan panas reaksi selama vulkanisasi dan mengasumsikan bahwa panas eksotermis yang dihasilkan selama vulkanisasi isotermal sebanding dengan reaksi antara spesies belerang dan hidrogen alilik dalam karet, serta kecepatan reaksi vulkanisasi sebanding dengan konsentrasi sulfur yang bereaksi dan yang tidak bereaksi [23].



Gambar 3. Nilai konversi (α) pada setiap waktu (a1-a2) kompon A dan (b1-b2) kompon B

Tabel 3. Parameter kinetika model Deng-Isayev

Kompon	k x 10^{-6} (det^{-1})	n	SSE
A	3,0635	2,9668	0,0996
B	3,3511	2,9554	0,0757

Tabel 4. Parameter kinetika model Kamal-Sorour

Kompon	k_1 x 10^{-3} (det^{-1})	k_2 x 10^{-2} (det^{-1})	m	n	SSE
A	4,6	6,82	1,1639	0,4023	0,4204
B	4,5	7,01	1,2044	0,4215	0,3566

Tabel 3 menyatakan bahwa urutan pencampuran pemlastis dalam kompon karet tidak signifikan mempengaruhi parameter kinetika vulkanisasi (k dan n). Kompon A memiliki nilai k yang sedikit rendah dibandingkan kompon B. Pemlastis yang dicampurkan lebih awal ke dalam kompon menyebabkan k sedikit lebih rendah dibandingkan pemlastis yang dicampurkan di tahap *masterbatch*. Hal ini menyebabkan kompon

A tervulkanisasi secara optimal oleh sulfur sedikit lebih lambat dibandingkan kompon B. Kecepatan vulkanisasi optimal ini terlihat dari nilai t_{c90} kompon A (253 detik) yang sedikit lebih tinggi dibandingkan kompon B (247 detik). Selain itu, nilai *k* kompon A yang lebih rendah dari kompon B juga tergambarkan dari indeks kecepatan pematangan (*cure rate index*) yang dihitung menggunakan Persamaan 5. Indeks pematangan menyatakan kecepatan reaksi vulkanisasi [32]. Tabel 5 menampilkan bahwa indeks pematangan kompon A sedikit lebih rendah dibandingkan kompon B. Hal ini tentunya dapat dijelaskan karena memang nilai *k* kompon A juga lebih rendah dibandingkan kompon B.

$$Cure\ rate\ index = \frac{100}{t_{c90} - t_{s2}} \tag{5}$$

Tabel 5. *Cure index* kompon

Kompon	*Cure index*
A	0,8403
B	0,9260

Tabel 3 juga menyatakan bahwa orde reaksi (*n*) kompon A dan kompon B hampir sama, yaitu secara berurutan sebesar 2,9668 dan 2,9554. Hal ini memberikan gambaran bahwa urutan pencampuran pemlastis dalam kompon tidak mempengaruhi orde reaksi vulkanisasi. Orde reaksi berhubungan dengan banyaknya faktor konsentrasi yang mempengaruhi kecepatan suatu reaksi kimia [33]. Berdasarkan nilai *n* yang cukup tinggi (mendekati 3) tergambarkan bahwa konsentrasi reaktan (sulfur sebagai pemvulkanisasi) yang ditambahkan ke dalam formulasi kompon karet sangat mempengaruhi kecepatan reaksi vulkanisasi. Sedikit penambahan sulfur ke dalam formulasi kompon maka dapat secara signifikan meningkatkan kecepatan reaksi vulkanisasi.

4. Kesimpulan

Model Deng-Isayev lebih mendekati data eksperimen kinetika vulkanisasi dibandingkan model Kamal-Sorour. Kompon A yang dibuat dengan mencampurkan pemlastis pada mastikasi memiliki nilai *k* ($3{,}0635x10^{-6}$ det^{-1}) dan *cure rate index* (0,8403) sedikit lebih rendah dibandingkan kompon B yang dibuat dengan mencampurkan pemlastis pada *masterbatch* dengan nilai *k* sebesar $3{,}3511x10^{-6}$ det^{-1} dan *cure rate index* sebesar 0,9260. Orde reaksi (*n*) kompon A dan kompon B secara berurutan sebesar 2,9668 dan 2,9554 yang menandakan bahwa konsentrasi sulfur dalam kompon karet sangat mempengaruhi kecepatan reaksi vulkanisasi. Namun, urutan pencampuran pemlastis tidak signifikan mempengaruhi kinerja vulkanisasi, baik konstanta kecepatan reaksi, orde reaksi, waktu induksi, waktu optimal vulkanisasi, dan *cure rate index*.

5. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

[1] O. H. Yeoh, "Mathematical modeling of vulcanization characteristics," *Rubber Chem. Technol.*, vol. 85, no. 3, pp. 482–492, 2012.

[2] A. Hasan, R. Rochmadi, H. Sulistyo, and S. Honggokusumo, "The effect of ingredients mixing sequence in rubber compounding upon vulcanization kinetics of natural rubber: An autocatalytic model study," *Indones. J. Chem.*, vol. 18, no. 4, pp. 709–717, 2018.

[3] A. K. Akinlabi, F. E. Okieimen, F. Egharevba, and D. Malomo, "Investigation of the effect of mixing schemes on reological and physico-mechanical properties of modified natural rubber blends," *Mater. Des.*, vol. 27, no. 9, pp. 783–788, 2006.

[4] H. S. Ghari, A. J. Arani, and Z. Shakouri, "Mixing sequence in natural rubber containing organoclay and nano–calcium carbonate ternary hybrid nanocomposites," *Rubber Chem. Technol.*, vol. 86, no. 2, pp. 330–341, 2013.

[5] A. Saputra, P. Satwikanitya, F. Puspita, M. W. Sya'bani, M. F. Agustian, and W. Pambudi, "Synthesis of epoxy oil from Waste Cooking Oil (WCO) using acetic acid and amberlite resin IR-120 as catalyst," *Eng. Appl. Sci. Res.*, vol. 50, no. 4, pp. 335–342, 2023.

[6] H. Xu, T. Fan, N. Ye, W. Wu, D. Huang, D. Wang, Z. Wang, and L. Zhang, "Plasticization effect of bio-based plasticizers from soybean oil for tire tread rubber," *Polymers*, vol. 12, no. 3, p. 623, 2020.

[7] C. Bergmann and J. Trimbach, "Influence of plasticizers on the properties of natural rubber based compounds," *Kgk-Kautschuk Gummi Kunststoffe*, vol. 67, no. 7–8, pp. 40–49, 2014.
[8] M. M. Dharmaraj, S. S. Begum, and B. C. Chakraborty, "A study on nitrile rubber/polyvinyl chloride blend vulcanization kinetics with different fillers by using single isothermal rheograph," *J. Elastomers Plast.*, vol. 55, no. 6, pp. 896–916, 2023.
[9] W. Urrego, M. A. Guzmán Sánchez, D. H. Giraldo, J. C. Posada Correa, and C. M. Rodríguez Ledezma, "Comparative study of three vulcanization kinetic models for natural rubber/leather wastes composites," *J. Elastomers Plast.*, vol. 55, no. 5, pp. 677–692, 2023.
[10] C. Xiao, Q. Yang, K. Shao, Y. Li, S. Wan, and X. He, "Vulcanization kinetics and mechanical properties of filled ethylene-vinyl acetate copolymer rubber composites," *Int. Polym. Process.*, vol. 38, no. 4, pp. 496–504, 2023.
[11] G. Milani and F. Milani, "Optimal vulcanization of tires: Experimentation on idealized NR-PB natural and poly-butadiene rubber blends, phenomenological smoothed numerical kinetic model and FE implementation," *Polym. Test.*, vol. 72, pp. 63–85, 2018.
[12] J. Lubura, P. Kojić, J. Pavličević, B. Ikonić, D. Balaban, and O. Bera, "A novel approach for simulation and optimization of rubber vulcanization," *Polymers*, vol. 15, no. 7, p. 1750, 2023.
[13] M. A. A. Amiruddin and S. S. Sarkawi, "A reological characteristics and kinetic study for sulphur accelerated vulcanisation of epoxidized natural rubber," *J. Rubber Res.*, vol. 26, pp. 363–372, 2023.
[14] Y. Song, G. Wu, J. Peng, C. Zhang, D. Wang, and Q. Zheng, "Vulcanization kinetics of natural rubber and strain softening behaviors of gum vulcanizates tailored by deep eutectic solvents," *Polymer*, vol. 263, p. 125504, 2022.
[15] G. Milani and F. Milani, "Quasi-analytical kinetic model for natural rubber and polybutadiene rubber blends," *React. Kinet., Mech. Catal.*, vol. 123, no. 2, pp. 351–365, 2018.
[16] S. Nikolova, M. Mihaylov, and N. Dishovsky, "Mixed peroxide/sulfur vulcanization of ethylene-propylene terpolymer based composites. Curing characteristics, curing kinetics and mechanical properties," *J. Chem. Technol. Metall.*, vol. 57, no. 5, pp. 881–894, 2022.
[17] M. Raef, S. M. Hosseini, M. Nabavian Kalat, and M. Razzaghi-Kashani, "Vulcanization kinetics of styrene butadiene rubber reinforced by graphenic particles," *SPE Polym.*, vol. 2, no. 2, pp. 122–133, 2021.
[18] D. B. García, M. A. Mansilla, M. Crisnejo, H. Farabollini, and M. M. Escobar, "Effect of carbon nanotubes content on the vulcanization kinetic in styrene–butadiene rubber compounds," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 59, no. s2, pp. 327–336, 2019.
[19] J. Vršková, I. Labaj, and P. Skalková, "Effect of different types of plasticizers on the properties of elastomeric blends filled with biopolymer," *NanoWorld J.*, vol. 8, no. 4, pp. 91–95, 2022.
[20] P. Satwikanitya, A. Saputra, Muh. Wahyu Sya'bani, W. Pambudi, and M. Fitra Agustian, "Effect of plasticizer of epoxidized used cooking oil on rubber vulcanization kinetics," *Jurnal Penelitian Karet*, vol. 41, no. 1, pp. 33–46, 2023.
[21] M. R. Kamal, "Thermoset characterization for moldability analysis," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 231–239, 1974.
[22] M. R. Kamal and S. Sourour, "Kinetics and thermal characterization of thermoset cure," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 59–64, 1973.
[23] A. I. Isayev and J. S. Deng, "Nonisothermal vulcanization of rubber compounds," *Rubber Chem. Technol.*, vol. 61, no. 2, pp. 340–361, 1988.
[24] G. Milani and F. Milani, "Quasi-analytical kinetic model for natural rubber and polybutadiene rubber blends," *React. Kinet., Mech. Catal.*, vol. 123, no. 2, pp. 351–365, 2018.
[25] A. J. Marzocca and M. A. Mansilla, "Vulcanization kinetic of styrene-butadiene rubber by sulfur/TBBS," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 101, no. 1, pp. 35–41, 2006.
[26] E. Leroy, A. Souid, and R. Deterre, "A continuous kinetic model of rubber vulcanization predicting induction and reversion," *Polym. Test.*, vol. 32, no. 3, pp. 575–582, 2013.
[27] P. Satwikanitya, A. Saputra, M. W. Sya'bani, and M. F. Agustian, "Kinetika vulkanisasi karet menggunakan bioplasticizer minyak kakao terepoksi," *Jurnal Teknologi Kimia Mineral*, vol. 2, no. 1, pp. 31–37, 2023.
[28] M. Chen, Y. Zhou, Z. Shen, J. Liu, R. Gao, X. Li, L. Zhang, and F. Li "A crosslinking kinetic model considering reversion effect with verification and its application in thick rubber vulcanization process," *Polymer*, vol. 287, no. 17, p. 126443, 2023.

[29] P. Kumawat, J. Chanda, S. K. Das, A. Ghosal, S. D. Gupta, and R. Mukhopadhyay, "Alternatives of resorcinol in carbon black filled belt skim compound: A sustainable approach to make tire," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 61, no. 3, pp. 864–878, 2021.

[30] S. M. Hosseini and M. Razzaghi-Kashani, "Vulcanization kinetics of nano-silica filled styrene butadiene rubber," *Polymer*, vol. 55, no. 24, pp. 6426–6434, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.polymer.2014.09.073.

[31] J. Wu, W. Xing, G. Huang, H. Li, M. Tang, S. Wu, and Y. Liu, "Vulcanization kinetics of graphene/natural rubber nanocomposites," *Polymer*, vol. 54, no. 13, pp. 3314–3323, 2013.

[32] N. M. Setyadewi and H. E. Mayasari, "Curing characteristic of various accelerators on natural rubber/chloroprene rubber blends," *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, vol. 31, no. 2, pp. 154–162, 2020.

[33] I. E. Wijayanti, E. Erliasna, and Solfarina, "Perbandingan metode gravimetri dengan spektrofotometri uv-vis untuk penentuan orde reaksi pada proses adsorpsi pewarna alami," *Journal of Innovation Research and Knowledge*, vol. 2, no. 5, pp. 4947–4952, 2022.