Warta Perkaretan 2026, 45 (1), 61 - 76

VALIDASI EKSPERIMENTAL OSCILLATING DISK RHEOMETER DALAM PENENTUAN WAKTU VULKANISASI DAN ANALISIS KINETIKA VULKANISASI KOMPON KARET

Experimental Validation of Oscillating Disk Rheometer in Determining Cure Time and Analyzing Vulcanization Kinetics of Rubber Compounds

E. Ratna Utarianingrum[1], Andri Saputra[1], dan Sherly Hanifarianty[2]

[1]Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta, Tarudan Bangunharjo, Sewon, Bantul, 55188
[2]Unit Bogor Getas – Riset Perkebunan Nusantara, Jalan Salak No. 1 Bogor, 16128, Indonesia
Email: e_ratnautarianingrum@yahoo.com

Diterima 7 Desember 2025 / Direvisi 26 Februari 2026 / Disetujui 16 April 2026

Abstrak

Pengendalian *optimum cure time* (t_{c90}) merupakan parameter kritis dalam penjaminan mutu dan efisiensi proses vulkanisasi karet, namun validasi metodologis serta integrasi hasil laboratorium dengan kondisi industri masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi penggunaan Oscillating Disk Rheometer (ODR) sebagai alat penentuan parameter vulkanisasi sekaligus mengevaluasi kinetika reaksi berbasis pendekatan Arrhenius pada variasi suhu. Pengujian dilakukan sesuai ASTM D2084 pada 150 °C untuk studi validasi melibatkan empat analis independen, dengan evaluasi keterulangan dan keterbandingan menggunakan analisis Z-score. Analisis kinetika dilakukan pada rentang suhu 140-160°C melalui parameter *scorch time* (t_{s2}), t_{c90}, dan cure rate index (CRI). Hasil menunjukkan bahwa metode ODR memiliki reliabilitas tinggi dengan dominasi $|Z| \leq 2$ tanpa indikasi bias sistematis. Peningkatan suhu secara konsisten menurunkan t_{c90} dan t_{s2} serta meningkatkan CRI, menunjukkan percepatan laju reaksi yang mengikuti hubungan linier dalam plot Arrhenius. Evaluasi peran tekanan menunjukkan bahwa tekanan berkontribusi terhadap keseragaman derajat vulkanisasi melalui peningkatan efisiensi transfer panas, namun tidak memengaruhi konstanta laju reaksi secara langsung. Integrasi parameter laboratorium dengan simulasi kondisi industri mengindikasikan bahwa data ODR dapat digunakan sebagai dasar penetapan *cure cycle* yang lebih presisi dan terkontrol. Studi ini menegaskan kontribusi metodologis dan kinetika dalam menjembatani pengujian laboratorium dengan praktik produksi industri karet.

Kata kunci: *Oscillating Disk Rheometer, suhu, tekanan, waktu, vulkanisasi.*

Abstract

Control of the optimum cure time (t_{c90}) is a critical parameter in ensuring product quality and process efficiency in rubber vulcanization; however, methodological validation and integration of laboratory results with industrial processing conditions remain limited. This study aims to validate the use of the Oscillating Disk Rheometer (ODR) as a tool for determining vulcanization parameters while evaluating reaction kinetics based on the Arrhenius approach under varying temperature conditions. Testing was conducted in accordance with ASTM D2084 at 150 °C for the validation study, involving four independent analysts, with repeatability and comparability assessed using Z-score analysis. Kinetic evaluation was performed over a temperature range of 140-160 °C using scorch time (t_{s2}), t_{c90}, and cure rate index (CRI) as analytical parameters. The results demonstrate that the ODR method exhibits high reliability, indicated by the predominance of $|Z| \leq 2$ without evidence of systematic bias. Increasing

temperature consistently reduced t_{c90} and t_{s2} while increasing CRI, indicating accelerated reaction rates consistent with a linear relationship in the Arrhenius plot. Evaluation of pressure effects shows that pressure contributes to improved uniformity of vulcanization through enhanced heat transfer efficiency, although it does not directly affect the reaction rate constant. Integration of laboratory parameters with simulated industrial conditions suggests that ODR-derived data can serve as a reliable basis for establishing more precise and controlled cure cycles. This study highlights both methodological and kinetic contributions in bridging laboratory-scale testing with industrial rubber production practices.

Keywords: Oscillating Disk Rheometer, temperature, pressure, time, curing

Pendahuluan

Industri karet memegang peranan penting dalam perekonomian serta sektor manufaktur global, terutama melalui produk ban yang merupakan konsumen utama karet alam. Indonesia tercatat sebagai produsen karet alam terbesar kedua di dunia (di bawah Thailand), dengan output sekitar 2,65 juta ton pada tahun 2023 (Indonesia Investments, 2024). Sekitar 80% produksi karet Indonesia diarahkan ke pasar ekspor, menjadikan komoditas ini sebagai produk strategis nasional. Meski demikian, tantangan utama industri karet terletak pada konsistensi mutu produk, khususnya dalam proses vulkanisasi (pematangan karet) yang menuntut pengendalian yang sangat cermat. Cacat pada produk yang disebabkan oleh proses vulkanisasi yang tidak optimal dapat berujung pada kerugian finansial serta meningkatkan risiko kegagalan fungsi produk (Habieb *et al.*, 2022). Sebagai contoh empiris, sebuah pabrik ban di Sidoarjo melaporkan tingkat produk cacat sebesar 3-4,5%. Salah satu proporsi cacat terbesar berasal dari produk dengan karet kurang matang alias belum tervulkanisasi sempurna. Cacat berupa karet yang kurang matang tersebut mencapai sekitar 1,56% dari total produksi, yang mana penyebab utamanya adalah proses pemasakan (*curing*) yang belum terkendali dengan baik (Yulianto, 2006). Dampak dari hal ini cukup serius antara lain produk yang tervulkanisasi secara kurang sempurna, cenderung memiliki sifat mekanik di bawah spesifikasi (misalnya menjadi terlalu lunak atau rapuh), mudah mengalami kegagalan saat digunakan, serta dapat menurunkan tingkat kepercayaan pelanggan (Ghani *et al.*, 2020; Schieppati *et al.,* 2024).

Untuk mencegah terjadinya berbagai masalah tersebut, pengujian waktu vulkanisasi (*cure time*, disingkat t_c) terhadap kompon karet di laboratorium merupakan langkah krusial. Metode standar yang lazim dipakai ialah *curemeter rheometer*, baik jenis ODR (*Oscillating Disk Rheometer*) maupun MDR (*Moving Die Rheometer*). Pengujian *rheometer* tersebut mensimulasikan proses vulkanisasi dalam skala laboratorium pada suhu tertentu (umumnya 150 °C sesuai standar ASTM), sambil mengukur perkembangan torsi pada karet selama pemanasan hingga kurva torsi mencapai titik jenuh (*plateau*). Beberapa parameter penting yang diperoleh dari kurva torsi-waktu tersebut antara lain *scorch time* (t_{s2}, yakni waktu awal sebelum terjadinya peningkatan torsi yang signifikan) serta *optimum cure time* (t_{c90}, yaitu waktu untuk mencapai 90% tingkat vulkanisasi maksimum) (Hayeemasae & Ismail, 2020; Puspitasari *et al.,* 2023; Costa *et al.,* 2024). Dalam konteks pengendalian mutu, nilai t_{c90} kerap dijadikan patokan untuk menentukan durasi pengepresan di pabrik. Waktu pengepresan yang terlalu singkat berisiko menyebabkan *undercure* (ikatan silang belum terbentuk sempurna), sedangkan waktu yang terlalu lama dapat mengakibatkan *overcure* maupun menurunnya efisiensi produksi. Berdasarkan teori kinetika kimia, laju reaksi vulkanisasi sangat dipengaruhi oleh suhu sesuai persamaan Arrhenius. Peningkatan suhu akan mempercepat reaksi pembentukan ikatan silang secara eksponensial (Azevedo *et al.,* 2022; Mensah *et al.,* 2022). Konsekuensinya, perbedaan suhu yang kecil saja dapat memberikan dampak besar terhadap durasi

cure time. Di sisi lain, tekanan yang diberikan selama proses vulkanisasi dalam cetakan diperlukan agar kompon karet dapat mengisi cetakan secara sempurna sekaligus meningkatkan transfer panas (Alnersson *et al.,* 2020; Bont *et al.,* 2021; Sarojini Narayana *et al.,* 2024). Tekanan yang memadai akan memastikan produk hasil vulkanisasi mencapai kepadatan dan kualitas yang diinginkan. Meskipun demikian, secara kimiawi laju reaksi vulkanisasi lebih dominan dipengaruhi oleh faktor suhu dibandingkan tekanan, setidaknya pada rentang kondisi proses yang umum di industri. Namun, penelitian pada kondisi ekstrem menunjukkan bahwa pada tekanan yang sangat tinggi (hingga ratusan MPa) kecepatan reaksi pembentukan ikatan silang dapat meningkat. Kondisi tersebut disebabkan oleh berkurangnya gerak molekul pada tekanan tinggi sehingga reaksi terminasi radikal tertekan (Song *et al.,* 2022; Buback & Russell, 2023). Dalam praktik industri ban, pengendalian suhu, tekanan, dan waktu secara simultan dikenal sebagai *cure cycle* perlu dioptimalkan untuk setiap jenis produk (Pentakota *et al.,* 2023).

Sejumlah studi terbaru dari periode 2020-2025 menyoroti berbagai upaya dalam meningkatkan kendali atas proses vulkanisasi. Setiap kenaikan suhu *cure* sebesar 10°C pada kompon *tread* ban (pada rentang suhu 140-160°C) secara nyata menurunkan durasi *cure time* dan faktor suhu lebih dominan pengaruhnya terhadap laju vulkanisasi dibandingkan faktor komposisi tertentu (Umunakwe *et al*., 2024). Kenaikan suhu akan mempercepat laju vulkanisasi, meskipun hal ini disertai konsekuensi potensi penurunan sifat-sifat mekanik apabila suhu terlalu tinggi. Adapun durasi vulkanisasi harus dioptimalkan sedemikian rupa agar cukup untuk mencapai sifat akhir yang diinginkan tanpa menyebabkan *overcure* (Umunakwe *et al.,* 2024; Diaz Armas *et al.,* 2025; Kaczewiak *et al.,* 2025). Selain itu, tekanan cetakan yang terjaga konsisten dilaporkan penting dalam industri ban guna memastikan proses *curing* berlangsung merata di seluruh penampang produk yang tebal seperti ban (Bellander, 1998). Permasalahan ketidakhomogenan suhu di dalam ban (misalnya perbedaan suhu antara bagian permukaan dan bagian inti) diatasi dengan merancang formulasi kompon karet yang berbeda untuk tiap lapisan. Kompon karet yang berada dekat permukaan cetakan dirancang agar laju *curing*-nya lebih lambat, sedangkan senyawa karet pada bagian tebal (inti ban) dibuat memiliki laju *curing* lebih cepat. Dengan demikian, pada akhir waktu pengepresan, seluruh bagian ban dapat mencapai tingkat vulkanisasi yang seimbang (Bellander, 1998). Fakta tersebut menggarisbawahi betapa kompleksnya praktik vulkanisasi di industri, di mana prosesnya melibatkan pengendalian multi-variabel secara simultan.

Walaupun sudah banyak penelitian mengenai kinetika vulkanisasi maupun inovasi material, masih terdapat kesenjangan penelitian terkait aspek validasi metode uji dan keterkaitan langsung antara data laboratorium dengan penerapan di industri. Literatur pada periode 2020-2025 lebih banyak membahas mengenai kinetika vulkanisasi dan kualitas hasil *vulkanisat*, namun relatif jarang yang menyoroti aspek konsistensi antar pengujian atau *reproducibility* dari metode pengujian *cure time* itu sendiri. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melaksanakan validasi kuantitatif terhadap metode ODR (ASTM D2084) dalam pengujian waktu vulkanisasi pada kompon karet, termasuk melakukan evaluasi antar-analis dengan menggunakan statistik *Z-score*, menganalisis pengaruh variasi suhu (pada rentang relevan, misalnya 140-160°C) terhadap waktu vulkanisasi optimum serta parameter kinetika terkait (seperti *scorch time* dan *cure rate index*) dengan mendasarkan pada data terkini, mengevaluasi dampak tekanan terhadap keberhasilan proses vulkanisasi dalam konteks industri dengan didukung oleh studi kasus upaya perbaikan kualitas di pabrik, dan menyusun suatu kerangka pikir yang mengintegrasikan hasil-hasil pengujian laboratorium (ODR) dengan kondisi pengendalian proses vulkanisasi di

lapangan, sehingga dapat dirumuskan rekomendasi strategi untuk peningkatan konsistensi mutu.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi metodologis dan kinetika yang memperkuat hubungan antara pengujian laboratorium dan implementasi industri dalam upaya peningkatan konsistensi mutu produk karet. Berbeda dengan studi sebelumnya yang umumnya berfokus pada aspek material atau kinetika reaksi secara terpisah, penelitian ini secara sistematis menggabungkan validasi statistik metode uji dengan analisis kinetika berbasis Arrhenius dalam satu kerangka evaluasi terpadu. Pendekatan ini menawarkan perspektif baru dalam standardisasi parameter curing berbasis data kuantitatif yang dapat langsung diimplementasikan pada pengendalian proses industri.

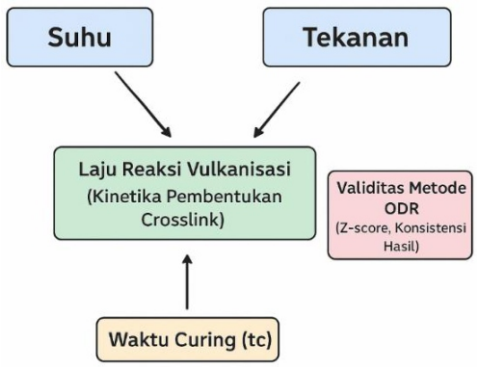
Bahan dan Metode

Penelitian dilakukan di Laboratorium Uji Karet Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Kulit, Karet, dan Plastik. Bahan yang digunakan adalah kompon karet. Peralatan yang digunakan adalah perangkat ODR.

Kerangka Penelitian

Penelitian ini mengonseptualisasikan sejumlah variabel utama antara lain suhu vulkanisasi, tekanan, dan waktu vulkanisasi. Selain variabel tersebut, terdapat pula variabel terkait, yaitu konsistensi antar-analis yang diukur melalui *Z-score* hasil tiap analis terhadap nilai referensi. Kerangka pikir penelitian pada Gambar 1 menghubungkan suhu dan tekanan sebagai variabel independen utama yang memengaruhi laju reaksi vulkanisasi. Laju reaksi yang lebih tinggi, baik karena kenaikan suhu maupun adanya akselerator dalam formulasi, diperkirakan akan menurunkan waktu vulkanisasi optimum. Tekanan yang cukup tinggi akan memastikan kondisi termal yang seragam, sehingga waktu vulkanisasi yang telah ditentukan benar-benar menghasilkan vulkanisasi yang sempurna. Sebaliknya, jika tekanan tidak memadai, meskipun waktu secara nominal sudah tercukupi, bagian tertentu mungkin tetap undercure (yang berarti secara efektif membutuhkan waktu vulkanisasi tambahan). Sementara itu, validitas metode dicerminkan oleh konsistensi hasil antar-analis (nilai *Z-score*). Asumsinya, apabila suhu pengujian terjaga (150 °C ± toleransi) dan prosedur ASTM diikuti dengan benar, maka variasi hasil antar-analis hanya bersumber dari kesalahan acak. Analisis Z-score dilakukan untuk memastikan tidak ada bias sistematis.

Adapun hubungan kausal yang diuji dalam penelitian ini mencakup: (a) peningkatan suhu cenderung menurunkan waktu vulkanisasi optimum (t_{c90}) (Hipotesis H2), (b) tekanan yang tidak mencukupi akan meningkatkan risiko terjadinya *undercure* sehingga memerlukan penambahan waktu vulkanisasi (Hipotesis H3), (c) metode yang tervalidasi akan



Gambar 1. Kerangka pikir penelitian

menghasilkan konsistensi hasil antar-analis (Hipotesis H1). Terakhir, terkait integrasi hasil laboratorium dan pabrik, jika metode pengujian di laboratorium sudah tervalidasi dan hubungan suhu-waktu sudah dipetakan, maka data dari laboratorium dapat digunakan untuk memprediksi waktu vulkanisasi di pabrik dengan penyesuaian tertentu (Hipotesis H4).

Validasi Metode ODR

Validasi metode ODR dilakukan pada tahun 2025 sesuai standar ASTM D2084 (Cifriadi *et al.,* 2021; Colom *et al.,* 2024; de Souza *et al.,* 2025). Pengujian dilakukan pada suhu 150 °C (sesuai standar) selama 30 menit untuk setiap sampel. Empat orang analis (kode: ana, yy, rw, eltri) masing-masing melakukan pengujian waktu *cure* secara mandiri terhadap material kompon karet yang identik. Waktu pengujian diatur berdekatan (selisih ±30 menit antar-analis) untuk meminimalkan variasi *batch* ataupun perubahan kondisi lingkungan. Setiap analis melakukan sedikitnya dua kali uji (ulangan), sehingga total terkumpul lebih dari 10 data poin. Parameter yang diamati adalah nilai t_{c90} dari setiap pengujian (dalam satuan menit). Selanjutnya, dilakukan analisis statistik antar-analis dengan menghitung *Z-score* untuk setiap data terhadap nilai referensi. Nilai referensi yang digunakan adalah *mean robust* dari seluruh data (diperoleh dengan prosedur *robust* yang mengabaikan *outlier*), sedangkan simpangan baku dihitung secara *robust*. Kriteria evaluasi mengikuti pedoman umum: $|Z| \leq 2$ dianggap memuaskan (hasil pengujian seorang analis berada dalam ±2 simpangan baku dari nilai referensi), $2 < |Z| \leq 3$ dianggap meragukan (hasil sedikit menyimpang dan perlu diperhatikan), dan $|Z| > 3$ dikategorikan tidak memuaskan atau *outlier* (Cordeiro *et al.,* 2022).

Hasil dan Pembahasan

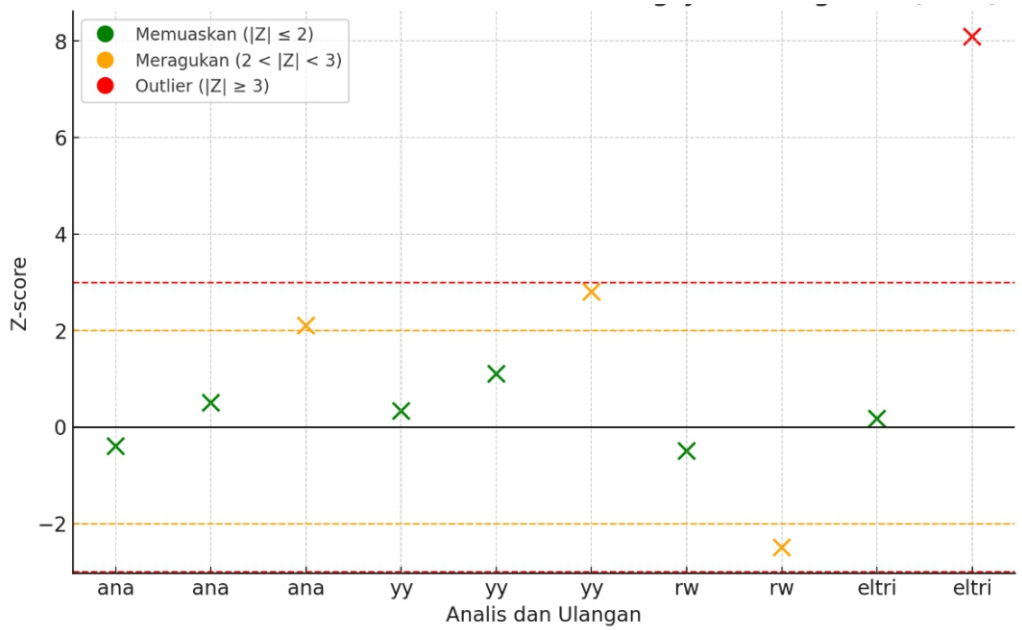
Validitas dan Reliabilitas Metode Pengujian *Cure Time* (ODR)

Tabel 1 menunjukkan ringkasan hasil validasi antar-analis. Terlihat bahwa sebagian besar hasil pengujian berada dalam kategori memuaskan. Secara keseluruhan, tidak ditemukan bias yang signifikan antar-analis: rata-rata nilai t_{c90} berada di kisaran 8-9 menit untuk semua analis, dengan simpangan baku sekitar 0,2-0,3 menit (berdasarkan perhitungan *robust* internal). Sebagian besar data (≥85%) memiliki $|Z| \leq 2$, yang berarti hasil keempat analis berkelompok di sekitar nilai acuan. Terdapat satu *outlier* ekstrem dari analis eltri dengan $Z \approx 8{,}09$. Catatan pengujian menunjukkan kemungkinan terjadi kesalahan pada pengujian tersebut (misalnya sampel tidak terjepit sempurna atau kesalahan pembacaan instrumen). Di luar *outlier* tersebut, data lainnya masuk kategori meragukan dengan nilai $|Z|$ sekitar 2,0-2,8. Sebagai contoh, analis yy pada ulangan ke-3 memperoleh $Z \approx 2{,}80$ (meragukan) dan analis ana pada ulangan ke-3 memperoleh $Z \approx 2{,}10$. Kedua nilai ini mendekati ambang ±2 dan sebenarnya masih dapat diterima meskipun perlu perhatian lebih lanjut.

Visualisasi *control chart* (Gambar 2) memperlihatkan plot nilai *Z-score* untuk masing-masing analis yang sebagian besar titik berada di zona hijau ($|Z| \leq 2$), satu titik berada di zona merah (*outlier*), dan beberapa titik lain berada di zona kuning (meragukan). Variasi kecil yang terjadi (Z mendekati 2) pada tiga kasus kemungkinan disebabkan oleh keterulangan (*repeatability*) pengujian. Misalnya fluktuasi suhu alat ±1 °C dapat membuat nilai t_{c90} berbeda beberapa detik, atau perbedaan dalam penempatan sampel. Data yang menyimpang ($Z > 3$) mengindikasikan adanya kejadian khusus. Salah satu *outlier* yang sangat ekstrem (Z mendekati 8) pada data

Tabel 1. Hasil pengujian t_{c90} kompon karet menggunakan ODR

No	Analis	t_c (menit)	*Z-score*	Kategori Evaluasi
1	ana	8,38	-0,40	memuaskan
2	ana	8,65	0,50	memuaskan
3	ana	9,13	2,10	meragukan
4	yy	8,60	0,33	memuaskan
5	yy	8,83	1,10	memuaskan
6	yy	9,34	2,80	meragukan
7	rw	8,35	-0,50	memuaskan
8	rw	7,75	-2,50	meragukan
9	eltri	8,55	0,17	memuaskan
10	eltri	10,93	8,09	*outlier*



Gambar 2. Visualisasi *control chart* memperlihatkan plot nilai *Z-score* untuk masing-masing analis

analis eltri hampir dapat dipastikan berasal dari kesalahan prosedur. Setelah *outlier* tersebut ditelusuri dan dikeluarkan dari perhitungan *mean robust*, hasil dari tiap analis pun terbukti berada dalam keadaan terkendali. Namun, secara keseluruhan, simpangan baku relatifnya sangat kecil (sekitar 2-3% dari rata-rata t_{c90}). Temuan ini konsisten dengan laporan validasi internal tahun 2005 bahwa ODR memiliki *repeatability* yang tinggi untuk parameter *cure time*.

Berdasarkan hasil analisis studi ini, kriteria penerimaan metode ODR telah terpenuhi dari segi akurasi dan keterulangan. Akurasi terjaga karena tidak ditemukan penyimpangan yang konsisten terhadap nilai acuan, sedangkan keterulangan (*repeatability*) tercermin dari rendahnya variasi hasil pada ulangan oleh analis yang sama (misalnya selisih antara ulangan pertama dan kedua oleh analis "ana" kurang dari 0,3 menit). Sementara itu, keterbandingan hasil antar-analis

(*reproducibility*) ditunjukkan melalui kesesuaian hasil pengujian di antara keempat analis tersebut. Validasi metode yang dilakukan pada tahun 2005 mengindikasikan bahwa metode ODR berdasarkan ASTM D2084 terbukti sahih (valid) dan andal (reliabel) di laboratorium pengujian tersebut. Sebagian besar data antar analis menunjukkan konsistensi, di mana nilai *Z-score* berada dalam rentang $|Z| \leq 2$. Artinya, secara statistik tidak ditemukan perbedaan signifikan antara hasil yang diperoleh oleh masing-masing analis untuk sampel yang sama. Dengan kata lain, metode ini memiliki reproduksibilitas yang baik. Secara teoritis, validitas metode ODR tersebut mendukung asumsi bahwa *cure time* merupakan karakteristik material yang dapat diukur secara konsisten selama kondisi pengujiannya distandardisasi. Memang, ASTM D2084 sendiri telah dirancang untuk tujuan tersebut, yaitu menstandarkan suhu, frekuensi osilasi, amplitudo, serta kriteria torsi.

Hasil studi ini mengingatkan pentingnya penerapan *quality control* dalam pengujian. Laboratorium perlu menerapkan *control chart* dan melakukan pengujian bahan kontrol secara berkala untuk mendeteksi apabila terdapat penyimpangan dalam kinerja alat maupun operator. Metode ODR telah terbukti andal (*reliable*) dalam konteks QC di laboratorium. Contohnya, laboratorium LUKKAPS telah memasukkan hasil validasi ini ke dalam SOP rutinnya, termasuk perhitungan *Z-score* setiap kali uji bahan kontrol dilakukan. Dengan demikian, kontribusi penting dari sisi metrologi adalah bahwa metode ini bersifat terukur dan terlacak (karena adanya acuan internal berupa *mean robust*), serta mampu mendeteksi pergeseran performa yang kecil (melalui indikator *Z-score* > 2 yang akan memicu investigasi).

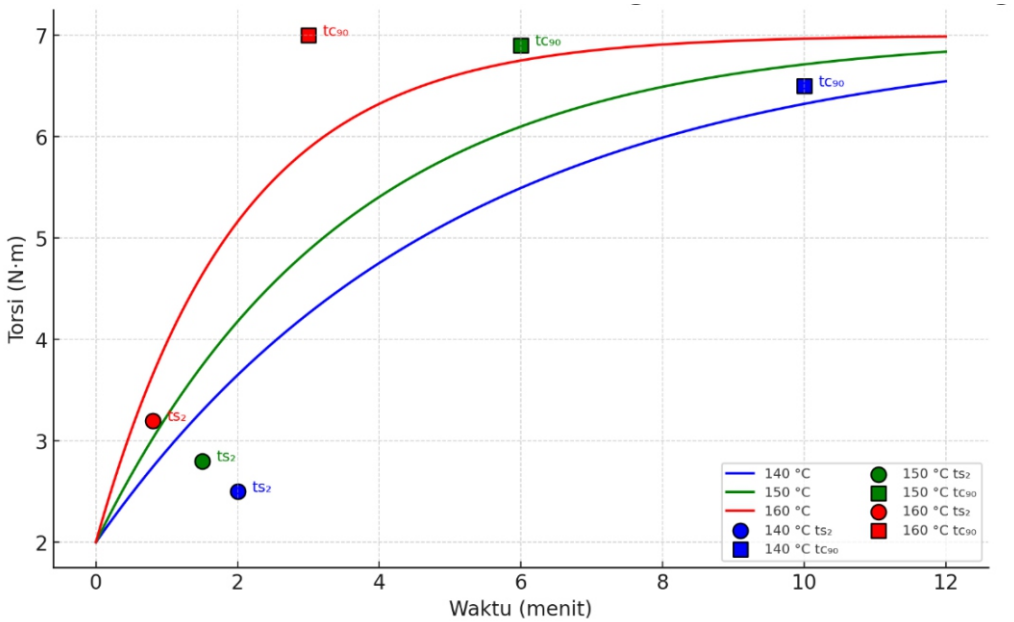
Adapun keterbatasannya, validasi ini hanya dilakukan dalam satu laboratorium (*intra-laboratory*). Untuk memperoleh generalisasi yang lebih luas, idealnya perlu dilakukan uji banding antar laboratorium (*interlaboratory test*, misalnya melalui *proficiency testing* atau metode *round robin*). Dalam konteks pengujian antar laboratorium semacam itu, *Z-score* juga digunakan sebagai indikator profisiensi antar-lab (Patan Alper, 2023). Memang, hasil ini tidak melibatkan laboratorium lain, namun temuan tersebut dapat mendorong laboratorium-laboratorium lain untuk melakukan hal serupa.

Pengaruh Suhu terhadap Kinetika Vulkanisasi: Konsistensi Temuan dengan Teori

Data empiris terbaru (tahun 2020-2025) turut mendukung temuan sebelumnya terkait pengaruh suhu dan tekanan terhadap waktu vulkanisasi. Berbagai studi mengonfirmasi bahwa suhu yang lebih tinggi akan mempersingkat waktu yang dibutuhkan untuk vulkanisasi. Tabel 2 menunjukkan hasil penelitian mengenai efek suhu terhadap *optimum cure time* (t_{c90}) untuk kompon karet *tread* ban. Pada 140 °C, t_{c90} rata-rata tercatat sekitar 10,0 menit; ketika suhu dinaikkan menjadi 150 °C, t_{c90} turun menjadi kira-kira 6,0 menit; dan t_{c90} semakin cepat menjadi 3,0 menit pada 160 °C. Semakin tinggi suhu *curing*, waktu scorch (t_{s2}) dan t_{c90} cenderung semakin singkat, sedangkan nilai CRI meningkat tajam. Hal ini sejalan dengan studi sebelumnya bahwa kenaikan suhu vulkanisasi mempercepat laju vulkanisasi (CRI lebih tinggi) dan menurunkan waktu optimum vulkanisasi. Kenaikan suhu tidak hanya mempercepat tercapainya vulkanisasi optimum, tetapi juga mengurangi *scorch time* (waktu pemanasan awal sebelum vulkanisasi berlangsung cepat). Data menunjukkan bahwa t_{s2} berkurang dari sekitar 2,6 menit pada 140 °C menjadi ±0,8 menit pada 160 °C, yang mengindikasikan risiko *scorch* lebih tinggi pada suhu operasi yang lebih tinggi (konsekuensinya, formulasi senyawa karet perlu disesuaikan agar proses tetap aman). Selain itu, *cure rate index* (CRI) meningkat secara signifikan seiring naiknya suhu (misalnya, dari sekitar 13,3 pada 140 °C menjadi 45,5 pada 160 °C), yang menandakan bahwa laju reaksi vulkanisasi berlangsung jauh lebih cepat (Umunakwe *et al.,* 2024). Penurunan waktu *cure* ini konsisten dengan ekspektasi kinetika Arrhenius, di mana

Tabel 2. Pengaruh variasi suhu *curing* terhadap karakteristik vulkanisasi kompon karet *tread* ban

Suhu (°C)	t_{s2} (menit)	t_{c90} (menit)	CRI (menit^{-1})
140	2,5	10,0	13,3
150	1,5	6,0	22,2
160	0,8	3,0	45,5



Gambar 3. Kurva rheometer torsi-waktu dengan penandaan titik penting

kenaikan setiap ±10 °C kira-kira akan mengurangi waktu yang dibutuhkan hingga setengahnya. Gambar 3 mengilustrasikan fenomena ini, yaitu kurva torsi-waktu rheometer bergeser ke kiri (waktu yang diperlukan lebih singkat) seiring dengan kenaikan suhu.

Data eksperimental terkini pada variasi suhu (140-160 °C) secara konsisten memperkuat kerangka teoritis kinetika vulkanisasi. Peningkatan suhu terbukti menurunkan *cure time* secara signifikan, yang secara langsung mendukung hipotesis H2. Rasio penurunan waktu tersebut menunjukkan kedekatan dengan prediksi model Arrhenius. Berdasarkan perhitungan, peningkatan suhu sebesar 10 °C dari 150 ke 160 °C mampu mengurangi t_{c90} sekitar 50–55%, sedangkan kenaikan dari 140 ke 150 °C menurunkannya sekitar ±35%. Variasi kecil ini secara rasional dapat dijelaskan oleh perbedaan energi aktivasi efektif pada rentang suhu tertentu, serta kemungkinan adanya hambatan difusi panas di dalam instrumen uji. Meskipun demikian, tren umum tetap menunjukkan hubungan yang mendekati linear pada grafik $\ln(t_{c90})$ terhadap $1/T$, yang secara kualitatif memperkuat bahwa mekanisme reaksi mengikuti pola kinetika klasik. Dari perspektif industri, implikasi ini sangat nyata bahwa pengaturan suhu langsung menentukan efisiensi waktu produksi dan stabilitas proses.

Teori Arrhenius selanjutnya menjelaskan mengapa formulasi kompon yang berbeda dapat menunjukkan sensitivitas yang berlainan terhadap suhu. Studi-studi terbaru menunjukkan bahwa keberadaan akselerator,

aktivator, dan aditif *filler*/penyusun formulasi memang menurunkan energi aktivasi efektif untuk langkah-langkah kunci dalam mekanisme vulkanisasi, sehingga kemiringan kurva Arrhenius berubah dan respons laju reaksi terhadap kenaikan suhu menjadi kurang tajam (Cataldo, 2023; Alam *et al.,* 2024). Selain itu, beberapa penelitian eksperimen melaporkan bahwa variasi sistem akselerator mempengaruhi parameter kinetika (mis. E_a, t_{s2}, t_{c90}) secara kuantitatif, misalnya senyawa sulfenamida dan jenis thiuram menghasilkan perbedaan Ea dan waktu *cure* yang nyata dibandingkan sistem lambat yang menjelaskan selisih sensitivitas antar formulasi. Fenomena serupa juga ditemukan pada penelitian nasional mengenai oleamide: penambahan *oleamide* sebagai *co-accelerator* atau aditif *co-curing* terbukti memperpendek t_{c90} pada berbagai suhu pengujian, yang konsisten dengan peran *oleamide* dalam menurunkan hambatan kinetik bagi pembentukan prekursor *cross-link* (Surya & Philbert, 2021). Walaupun beberapa studi tidak melaporkan nilai E_a secara eksplisit untuk tiap variasi formulasi, pola perubahan t_{c90} dan kurva Arrhenius yang bergeser jelas mengindikasikan perubahan kemiringan akibat modifikasi sistem reaksi (Y. Zhao & Drummer, 2019). Literatur periode 2020-2025 secara umum konsisten dengan prinsip klasik bahwa peningkatan suhu atau penambahan katalis mempercepat proses vulkanisasi, namun selalu diikuti oleh kebutuhan akan pengendalian risiko keselamatan proses.

Aspek lain yang terkonfirmasi adalah bahwa suhu tidak hanya memengaruhi laju reaksi, tetapi juga kualitas produk akhir. Berbagai penelitian (misalnya Umunakwe, 2024; Fang *et al.*, 2024) melaporkan bahwa suhu vulkanisasi yang lebih tinggi berpotensi menurunkan kekuatan tarik vulkanisat. Fenomena ini sering dikaitkan dengan terbentuknya struktur ikatan silang yang kurang homogen atau terjadinya *reversion* dalam skala minor. Walaupun aspek ini berada di luar fokus utama pengukuran waktu *cure*, implikasinya tetap penting karena optimasi proses tidak semata-mata berorientasi pada kecepatan produksi, tetapi juga pada kestabilan performa mekanik produk. Atas dasar pertimbangan ini, Umunakwe (2024) merekomendasikan suhu operasi sekitar 150 °C untuk kompon yang mengandung 10-20% karet daur ulang, dibandingkan 160 °C. Pada suhu 160 °C, waktu *cure* memang lebih singkat, namun ditemukan peningkatan abrasi dan penurunan kekerasan yang melampaui batas optimal.

Secara keseluruhan, keterkaitan antara suhu dan waktu *curing* membentuk suatu pola prediktif yang relatif robust: semakin tinggi suhu, semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat vulkanisasi optimum, dengan pola yang secara konsisten mengikuti pendekatan Arrhenius pada berbagai rentang formulasi. Penyusunan data empiris terkini, temuan literatur, serta rasionalisasi kinetika menunjukkan bahwa hubungan suhu-waktu *cure* bukan hanya bersifat empiris, tetapi memiliki dasar teoritis yang kuat dan dapat dimanfaatkan sebagai dasar penentuan parameter proses yang lebih presisi. Dengan demikian, tujuan penelitian kedua, yaitu memvalidasi hubungan kuantitatif antara variasi suhu dan waktu *curing* dalam konteks kinetika vulkanisasi, dapat dijawab secara logis dan terverifikasi melalui konsistensi data eksperimen dan kerangka teori yang mendasarinya.

Peran Tekanan: Analisis dalam Konteks Laboratorium dan Industri

Dalam literatur laboratorium, tekanan memang tidak mendapat perhatian sebesar parameter suhu, terutama karena instrumen seperti ODR beroperasi pada tekanan baku yang tidak berubah sepanjang pengujian (Alcalá *et al.,* 2022). Meskipun demikian, data industri memperlihatkan bahwa tekanan memiliki peran operasional yang langsung memengaruhi keberhasilan vulkanisasi, terutama untuk bagian produk berketebalan besar atau geometri kompleks, karena tekanan memengaruhi kualitas kontak *mold* dan kompon, laju transfer panas permukaan, dan penghilangan rongga udara yang dapat menyebabkan heterogenitas *degree-of-cure*

(Limrungruengrat *et al.,* 2022; Lubura *et al.,* 2023). Perbedaan fokus antara laboratorium dan lapangan ini menjadi titik awal penting untuk memahami mengapa tekanan sering kali tidak terbaca sebagai variabel signifikan dalam studi skala kecil, tetapi sangat menentukan dalam produksi nyata (Traintinger *et al.,* 2024).

Gambaran pengaruh tersebut tampak jelas dalam salah satu studi kasus di pabrik ban, di mana peningkatan tekanan uap pada mesin *press* dari sekitar 4 kg/cm² menjadi 6-7 kg/cm², bersamaan dengan penyeragaman waktu minimum *cure* selama 6 menit, berhasil menghilangkan cacat *undercure* yang sebelumnya mencapai 1,56%. Setelah intervensi proses dilakukan, cacat total turun dari 2,30% menjadi 0,74%. Temuan ini mengindikasikan bahwa tekanan yang cukup tidak hanya memastikan kontak termal *mold* dan kompon yang lebih baik, tetapi juga memungkinkan waktu *cure* yang diberikan termanfaatkan sepenuhnya sehingga reaksi vulkanisasi berlangsung merata di seluruh bagian produk (Dhupia, 2022). Selain itu, studi lain menunjukkan bahwa kombinasi antara suhu (~150 °C) dan tekanan tinggi (misalnya 200 kgf/cm²) menghasilkan sifat mekanik vulkanisat yang paling baik dibanding kondisi tekanan lebih rendah (Isra *et al.,* 2014).

Di sisi lain, literatur teknik vulkanisasi memberikan gambaran yang konsisten. Pada produksi komponen karet tebal (misal ban) sering diadopsi skema tekanan bertahap. Tekanan awal tinggi untuk memastikan aliran kompon dan pengisian *cavity* yang sempurna, lalu penurunan atau penyesuaian tekanan pada tahap akhir untuk mencegah deformasi berlebih. Sebuah praktik yang dilaporkan efektif dalam mengoptimalkan pengisian *mold* sekaligus meminimalkan cacat dimensi ' (Limrungruengrat *et al.,* 2022; C. Zhao *et al.,* 2024). Pendekatan bertahap seperti ini memperlihatkan bahwa tekanan tidak hanya berfungsi sebagai gaya penekan *mold*, tetapi juga sebagai pengatur kestabilan aliran panas dan distribusi energi termal dalam sistem vulkanisasi (Pentakota *et al.,* 2023). Kajian optimasi proses serupa pada skala industri menegaskan bahwa variabel tekanan, bersama suhu dan waktu, harus dipertimbangkan dalam desain proses dan simulasi *mold-filling/curing* agar prediksi *degree-of-cure* dari data lab dapat direalisasikan secara andal di lantai produksi (Amarta *et al.,* 2019).

Simulasi laboratorium berbasis *rubber process analyzer* (RPA) juga mendukung interpretasi tersebut. Dalam profil *curing* bertahap yang meniru kondisi lapangan, mulai dari tahap awal pada 170 °C yang mewakili kontak uap bertekanan tinggi, disusul penahanan suhu pada 150 °C, kurva torsi menunjukkan bahwa sekitar 70% derajat vulkanisasi tercapai pada akhir tahap tekanan tinggi, dan mendekati 90% pada akhir siklus *press*. Ketika hasil simulasi ini dibandingkan dengan sifat fisik ban aktual, keduanya menunjukkan konsistensi yang baik (Dhupia, 2022). Pendekatan berbasis rheologi ini memberikan bukti bahwa hubungan suhu, tekanan, dan waktu dapat dipetakan secara kuantitatif dan digunakan untuk memprediksi *degree of cure* secara lebih *reliabel*.

Secara konseptual, fenomena yang mendasari pengaruh tekanan terhadap keberhasilan vulkanisasi dapat dijelaskan melalui dinamika transfer panas dan distribusi suhu dalam *mold*. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pada proses vulkanisasi benda ukuran besar (*thick-wall molding*), distribusi suhu di seluruh ketebalan kompon sangat memengaruhi keseragaman *cure* dan derajat konversi *cross-link* (Limrungruengrat et al., 2020). Dalam rentang operasi industri yang umum, tekanan *mould* tidak secara langsung mengubah konstanta laju reaksi kimia vulkanisasi karena vulkanisasi pada fase padat tidak melibatkan perubahan volume besar yang sensitif terhadap tekanan gas atau sejenisnya, namun tekanan berperan penting secara termal dan mekanis. Hal ini ditunjukkan dalam studi pada karet alam dengan *filler*, di mana variasi tekanan (misalnya 50, 100, 150, hingga 200 kgf/cm²) terhadap suhu vulkanisasi memengaruhi sifat akhir dari vulkanisat: pada kondisi optimal (tekanan tinggi dan suhu tertentu) diperoleh sifat mekanik dan morfologi terbaik '(Isra et al., 2014). Tekanan membantu meningkatkan

kontak termal antara *mold* dan kompon, dengan demikian memperbaiki efisiensi transfer panas dari mold ke inti material. Situasi ini memungkinkan panas untuk meresap dengan lebih seragam dan cepat ke seluruh bagian kompon, sehingga bagian tengah atau bagian tebal tidak tertinggal dalam pencapaian suhu *curing*. Prinsip ini sangat penting untuk menghindari *gradient* suhu dan bawah-*cure* (*under-cure*) di bagian dalam produk vulkanisat (Likozar & Krajnc, 2008).

Kondisi yang berbeda terjadi pada pengujian laboratorium. Sampel ODR sangat tipis, berada dalam ruang tertutup, dan tekanan selama pengujian tidak berubah. Karena hambatan termal hampir tidak ada, seluruh bagian sampel cepat mencapai suhu *set point*, sehingga variasi tekanan tidak menjadi faktor yang memengaruhi t_{c90} atau parameter kinetika lainnya. Keadaan inilah yang membuat pengaruh tekanan pada skala laboratorium tidak terlihat signifikan, sementara pada skala industri sangat signifikan. Penjelasan tersebut memberikan konteks penting untuk interpretasi hasil laboratorium ketika diaplikasikan pada skala produksi. Data ODR mungkin menunjukkan t_{c90} = 6 menit pada 150 °C, tetapi produk setebal 2 cm dapat membutuhkan 12 menit pada 100 bar atau 14 menit ketika tekanan aktual turun menjadi 50 bar. Perbedaan tersebut secara praktis hanya dapat ditentukan melalui uji coba produksi atau simulasi proses berbasis model rheologi, termasuk perangkat seperti RPA. Pendekatan ini memungkinkan pabrik menghubungkan data laboratorium dengan kondisi operasi nyata secara lebih realistis. Tekanan memang tidak secara langsung mengubah laju reaksi kimia, tetapi merupakan variabel proses yang memastikan keseragaman pencapaian suhu dan stabilitas transfer panas, terutama pada produk tebal. Industri sangat bergantung pada konsistensi tekanan untuk menjamin bahwa derajat vulkanisasi aktual benar-benar sesuai dengan prediksi laboratorium. Oleh sebab itu, integrasi hasil ODR dengan praktik pengendalian tekanan di pabrik menjadi langkah kritis dalam menjembatani perbedaan antara kondisi ideal laboratorium dan kebutuhan operasional dunia nyata.

Integrasi Hasil Laboratorium dengan Aplikasi Industri dan Konsekuensi

Dalam praktik industri karet modern, tantangan utama bukan lagi sekadar memperoleh data laboratorium yang akurat, melainkan memastikan bahwa data tersebut benar-benar dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan di lini produksi. Di dalam kerangka manajemen mutu, hal ini dikenal sebagai kebutuhan akan *traceability* dan *translatability*. Metode ODR yang tervalidasi melalui ASTM D2084 memberikan fondasi yang kuat pada aspek *traceability*, karena hasil pengujiannya dapat ditelusur ke prosedur baku dan merepresentasikan karakter intrinsik kompon. Namun, manfaat ilmiah dari validasi tersebut baru menjadi nyata ketika hasil yang diperoleh mampu diterjemahkan menjadi parameter operasional yang aplikatif di lapangan.

Pemahaman tentang pengaruh suhu terhadap kinetika vulkanisasi menjadi jembatan pertama dalam proses translasi tersebut. Data empiris, baik dari penelitian ini maupun studi terkini, menunjukkan pola yang konsisten: kenaikan suhu mempercepat tercapainya kondisi vulkanisasi optimum. Secara praktis, temuan ini memberi ruang bagi *process engineer* untuk melakukan pengaturan suhu *mold* secara strategis. Untuk produk berdimensi tipis, suhu tinggi dapat digunakan untuk memperpendek waktu siklus. Untuk produk berdimensi tebal, suhu moderat yang sedikit lebih tinggi dari standar laboratorium dapat menjaga keseimbangan antara produktivitas dan stabilitas sifat mekanik. Di titik ini, data laboratorium berhenti menjadi angka dan mulai berfungsi sebagai dasar pengambilan keputusan nyata.

Namun, suhu saja tidak cukup untuk menjelaskan kompleksitas kondisi lapangan. Gradien suhu di dalam produk, perbedaan laju pemanasan antara permukaan dan inti, serta pengaruh tekanan *mold* menuntut pendekatan yang lebih realistis. Di sinilah RPA memainkan peran penting. Melalui simulasi

profil suhu bertahap, RPA mampu merepresentasikan kondisi non-isotermal yang lazim terjadi pada produk tebal. Perilaku torsi dan modulus dinamik yang dihasilkan memberikan gambaran kuantitatif tentang bagaimana derajat vulkanisasi berkembang di bagian dalam produk, bukan hanya di permukaan. Dengan demikian, RPA berfungsi sebagai "jembatan eksperimental" antara kondisi ideal laboratorium dan realitas industri.

Integrasi tersebut membawa implikasi teoretis yang signifikan. Pada masa lalu, model kinetika vulkanisasi umumnya dikembangkan dalam kondisi homogen dan isotermal, sehingga pada saat diterapkan ke skala produksi, diperlukan banyak kompromi berbasis pengalaman. Kini, pendekatan *multivariat* yang menggabungkan suhu, waktu, dan difusi panas telah memperkecil kesenjangan itu. Model-model terbaru memungkinkan simulasi yang lebih mendekati kondisi riil, sehingga pendekatan *trial-and-error* yang sebelumnya dominan perlahan tergantikan oleh pendekatan berbasis data. Perubahan paradigma ini tidak hanya menghemat waktu dan biaya, tetapi juga meningkatkan keandalan proses.

Di sisi lain, integrasi hasil laboratorium dengan praktik lapangan tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga organisatoris. Laboratorium *quality control* dan tim produksi perlu bekerja dalam satu siklus umpan balik yang terstruktur. Data *rheometer* seperti *scorch time*, *optimum cure time*, dan *cure rate index* menjadi *input* utama bagi pengaturan mesin. Pada saat yang sama, data penyimpangan produksi dikembalikan ke laboratorium untuk dianalisis. Penerapan alat statistik seperti *Z-score* dan *control chart* menjadi mekanisme penting untuk mendeteksi variasi sejak dini, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum variasi berkembang menjadi cacat produk yang sistemik.

Seluruh rangkaian pemikiran tersebut mengerucut pada satu kerangka operasional yang sebelumnya belum terformulasi secara eksplisit. Data laboratorium yang tervalidasi bukan lagi dipandang sebagai hasil akhir, melainkan sebagai titik awal dari sebuah siklus pengendalian mutu. Hasil ODR memberikan *baseline* kinetika. RPA menyediakan sarana untuk mensimulasikan kondisi lapangan. Informasi suhu, tekanan, dan waktu kemudian diformulasikan menjadi parameter mesin yang realistis. Selanjutnya, pengendalian statistik berfungsi sebagai sistem peringatan dini. Integrasi ketiga aspek ini menghasilkan sebuah kerangka pikir yang operasional: data laboratorium tervalidasi → simulasi kondisi lapangan berbasis RPA → penetapan parameter proses → pengendalian statistik berkelanjutan. Dengan demikian, tujuan penelitian keempat terpenuhi, yaitu tersusunnya suatu kerangka integratif untuk merumuskan strategi peningkatan konsistensi mutu secara berbasis ilmiah dan aplikatif.

Kesimpulan

Metode ODR berdasarkan ASTM D2084 terbukti valid dan reliabel untuk pengujian waktu vulkanisasi kompon karet. Evaluasi antar-analis menggunakan *Z-score* menunjukkan tingkat keterulangan *(repeatability)* dan keterbandingan *(reproducibility)* yang tinggi, dengan mayoritas hasil berada dalam kategori memuaskan ($|Z| \leq 2$) serta tidak ditemukan bias sistematis yang signifikan. Hal ini menegaskan bahwa ODR layak digunakan sebagai metode baku dalam pengendalian mutu waktu vulkanisasi. Variasi suhu 140-160 °C terbukti berpengaruh signifikan terhadap parameter kinetika, ditandai oleh penurunan t_{c90} dan t_{s2} serta peningkatan CRI yang mengikuti pola kinetika Arrhenius. Temuan ini menegaskan hubungan kuantitatif antara suhu dan waktu vulkanisasi. Tekanan berperan krusial dalam keberhasilan vulkanisasi pada skala industri dengan meningkatkan efektivitas transfer panas dan keseragaman derajat vulkanisasi, meskipun tidak secara langsung mengubah konstanta laju reaksi. Hal ini menjelaskan perbedaan cure time antara kondisi laboratorium dan produksi. Data ODR yang tervalidasi berperan sebagai baseline kinetika, RPA digunakan untuk mensimulasikan kondisi non-isotermal

industri, dan parameter suhu, tekanan, dan waktu diformulasikan menjadi pengaturan proses yang aplikatif, dengan pengendalian statistik sebagai mekanisme umpan balik. Kerangka ini memberikan dasar ilmiah dan operasional bagi strategi peningkatan konsistensi mutu produk karet secara berkelanjutan.

Daftar Pustaka

Alam, M. N., Kumar, V., Jeong, S. U., & Park, S.-S. (2024). Enhancing Rubber Vulcanization Cure Kinetics: Lowering Vulcanization Temperature by Addition of MgO as Co-Cure Activator in ZnO-Based Cure Activator Systems. Polymers, 16(7). https://doi.org/10.3390/polym16070876.

Alcalá, N., Castrillón, M., Viejo, I., Izquierdo, S., & Gracia, L. A. (2022). Rubber Material-Model Characterization for Coupled Thermo-Mechanical Vulcanization Foaming Processes. Polymers, 14(6), 1101. https://doi.org/10.3390/polym14061101.

Alnersson, G., Tahir, M. W., Ljung, A.-L., & Lundström, T. S. (2020). Review of the Numerical Modeling of Compression Molding of Sheet Molding Compound. Processes, 8(2), 179. https://doi.org/10.3390/pr8020179.

Amarta, Z., Soepangkat, B. O. P., Sutikno, & Norcahyo, R. (2019). Multi response optimization in vulcanization process using backpropagation neural network-genetic algorithm method for reducing quality loss cost. AIP Conference Proceedings, 2114(1), 020003. https://doi.org/10.1063/1.5112387.

Azevedo, M., Monks, A.-M., Kerschbaumer, R. C., Schlögl, S., & Holzer, C. (2022). Peroxide-Based Crosslinking of Solid Silicone Rubber, Part I: Insights into the Influence of Dicumylperoxide Concentration on the Curing Kinetics and Thermodynamics Determined by a Rheological Approach. Polymers, 14(20), 4404. https://doi.org/10.3390/polym14204404.

Bellander, M. (1998). High pressure vulcanization: Crosslinking of diene rubbers without vulcanization agents [Dissertation, Royal Institute of Technology]. https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A8417&dswid=-5070.

Bont, M., Barry, C., & Johnston, S. (2021). A review of liquid silicone rubber injection molding: Process variables and process modeling. Polymer Engineering & Science, 61(2), 331–347. https://doi.org/10.1002/pen.25618.

Buback, M., & Russell, G. T. (2023). Detailed analysis of termination kinetics in radical polymerization. Polymer International, 72(10), 869–880. https://doi.org/10.1002/pi.6501.

Cataldo, F. (2023). Thermochemistry of Sulfur-Based Vulcanization and of Devulcanized and Recycled Natural Rubber Compounds. International Journal of Molecular Sciences, 24(3), 2623. https://doi.org/10.3390/ijms24032623.

Cifriadi, A., Falaah, A. F., & Puspitasari, S. (2021). Korelasi antara sistem vulkanisasi dengan sifat mekanis dan sifat redaman vulkanisat karet butil tanpa pengisi. Majalah Kulit, Karet, dan Plastik, 37(2), 77. https://doi.org/10.20543/mkkp.v37i2.7042.

Colom, X., Farrés, L., Mujal, R., Wang, S., & Cañavate, J. (2024). Analyzing Thermal Degradation Effects on Devulcanized GTR-Based NR/SBR/NBR Rubber Compounds Reinforced with SiO2 Particles. Polymers, 16(23), 3270. https://doi.org/10.3390/polym16233270.

Cordeiro, F., Emons, H., & Robouch, P. (2022). Is the z score sufficient to assess participants' performance in proficiency testing? The hidden corrective action. Accreditation and Quality Assurance, 27(3), 145–153. https://doi.org/10.1007/s00769-022-01496-w.

Costa, N. L., Hiranobe, C. T., Cardim, H. P., Dognani, G., Sanchez, J. C., Carvalho, J. A., Torres, G. B., Paim, L. L., Pinto, L. F., Cardim, G. P., Cabrera, F. C., dos Santos, R. J., & Silva, M. J. (2024). A Review of EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) Rubber-Based Nanocomposites: Properties and Progress. Polymers, 16(12), 1720. https://doi.org/10.3390/polym16121720.

de Souza, V. C., Cardim, H. P., Hiranobe, C. T., Cardim, G. P., Zapelini, I. W., Paim, L. L., Santos, G. T., Teixeira, S. R., da Silva, E. A., dos Santos, R. J., & Cabrera, F. C. (2025). Reuse of Activated Carbon Filter Waste as Filler in Vulcanized Rubber Composites. Journal of Composites Science, 9(8), 406. https://doi.org/10.3390/jcs9080406.

Dhupia, D. (2022, November 30). Cure Cycle Optimization of Rubber Compounds Using VTA. https://www.alpha-technologies.com/blog/cure-cycle-optimization-of-rubber-compounds-using-vta/.

Diaz Armas, N., Bhandari, G., Kodra, S., Zhang, J., Kazmer, D., & Mead, J. (2025). Additive Manufacturing of Thermoset Elastomer-Thermoplastic Composites Using Dual-Extrusion Printing. Polymers, 17(13), 1–18. https://doi.org/10.3390/polym17131800.

Fang, H., He, Y., Li, Y., & Du, J. (2024). A study on the preparation of a vulcanizing mixture and its application in natural rubber latex. Polymers, 16(9), 1256. https://doi.org/10.3390/polym16091256.

Ghani, A. A. A., Mohamad, N., Abd Razak, J., Ahsan, Q., Siang Yee, C., Ani, M. A., Teng, M. M., & Ul-Hamid, A. (2020). Optimization of Hot Press Parameters to Maximize the Physical and Mechanical Properties of Natural Rubber Composites for Elastomeric Mount. Malaysian Journal on Composites Science and Manufacturing, 1(1), 27–37. https://doi.org/10.37934/mjcsm.1.1.2737.

Habieb, A. B., Milani, F., Milani, G., Pianese, G., & Torrini, D. (2022). Vulcanization degree influence on the mechanical properties of Fiber Reinforced Elastomeric Isolators made with reactivated EPDM. Polymer Testing, 108, 107496. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107496.

Hayeemasae, N., & Ismail, H. (2020). Application of silane-treated tea waste powder as a potential filler for natural rubber composites. BioResources, 16(1), 1230–1244. https://doi.org/10.15376/biores.16.1.1230-1244.

Indonesia Investments. (2024, December 24). Karet (Alam). https://www.indonesia-investments.com/id/bisnis/komoditas/karet/item185

Isra, M., Irdoni, I., & Bahruddin, B. (2014). Pengaruh Suhu dan Tekanan Vulkanisasi terhadap Morfologi dan Sifat Karet Alam Vulkanisat (Thermoset Rubber) dengan Filler Abu Sawit/Carbon Black. JOMFTEKNIK, 1(1), 1–12.

Kaczewiak, K., G b, P., & Maciejewska, M. (2025). Vulcanization Temperature Impact on Cross-Linking Density and Compression Set of Sulfur-Cured Ethylene–Propylene–Diene Monomer. Journal of Applied Polymer Science, 142(29), e57188. https://doi.org/10.1002/app.57188.

Likozar, B., & Krajnc, M. (2008). A study of heat transfer during molding of elastomers. Chemical Engineering Science, 63(12), 3181–3192. https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.03.031.

Limrungruengrat, S., Chaikittiratana, A., Chantrasmi, T., Pornpeerakeat, S., & Suripa, U. (2020). Effects of Rubber and Mould Temperatures on the Solid Tire Curing Process. Key Engineering Materials, 856, 323–330. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.856.323.

Limrungruengrat, S., Chaikittiratana, A., Pornpeerakeat, S., & Chantrasmi, T. (2022). Thermo-mechanical finite element simulation and validation of rubber curing process. Journal of Mechanical Science and Technology, 36(6), 3039–3046. https://doi.org/10.1007/s12206-022-0534-7.

Lubura, J., Koji , P., Pavli evi , J., Ikoni , B., Balaban, D., & Bera, O. (2023). A Novel Approach for Simulation and Optimization of Rubber Vulcanization. Polymers, 15(7), 1750. https://doi.org/10.3390/polym15071750.

Mensah, B., Bensah, Y. D., Nbelayim, P. S. F., & Oduro, E. (2022). Vulcanization kinetics of acrylonitrile-butadiene rubber reinforced with graphene oxide and reduced graphene oxide in the absence of co-cure accelerator. Polymer Engineering & Science, 62(12), 4156–4172. https://doi.org/10.1002/pen.26175.

Patan Alper, M. (2023). Inter-laboratory comparison of a digital multimeter measurement in Turkey. Scientific Reports, 13(1), 19406. https://doi.org/10.1038/s41598-023-46617-8.

Pentakota, L. K., Albertelli, P., & Strano, M. (2023). Energy Efficiency of the Vulcanization Process of a Bicycle Tyre. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 10(4), 979–998. https://doi.org/10.1007/s40684-023-00507-6.

Puspitasari, S., Chalid, M., Ferdian Falaah, A., & Cifriadi, A. (2023). Karet alam hidrogenasi sebagai matriks polimer alternatif pada komposit elastomer bantalan jembatan. Jurnal Penelitian Karet, 41(2), 139–152. https://doi.org/10.22302/ppk.jpk.v41i2.872.

Sarojini Narayana, S., Khoun, L., Trudeau, P., Milliken, N., & Hubert, P. (2024). Numerical and experimental investigation of resin flow, heat transfer and cure in a 3D compression resin transfer moulding process using fast curing resin. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 10(1), 2378586. https://doi.org/10.1080/20550340.2024.2378586.

Schieppati, J., Gehling, T., Azevedo, M., Kerschbaumer, R. C., Christöfl, P., Oreski, G., Fasching, M. A., Schwarz, T., & Pinter, G. (2024). Investigation into the state of cure of elastomers through nanoindentation. Polymer Testing, 133, 108417. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108417.

Song, Y., Wu, G., Peng, J., Zhang, C., Wang, D., & Zheng, Q. (2022). Vulcanization kinetics of natural rubber and strain softening behaviors of gum vulcanizates tailored by deep eutectic solvents. Polymer, 263, 125504. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125504.

Surya, I. & Philbert. (2021). Pengaruh Oleamida Terhadap Karakteristik Pematangan Karet Alam Terisi Silika. Jurnal Teknik Kimia USU, 10(2), 90–94. https://doi.org/10.32734/jtk.v10i2.6606

Traintinger, M., Kerschbaumer, R. C., Hornbachner, M., Lechner, B., & Lucyshyn, T. (2024). Investigation on strategies for optimizing process definition in rubber processing: A study on mechanical and chemical properties of vulcanizates as basis for the development of a new calculation model for quality prediction. Journal of Applied Polymer Science, 141(6), e54901. https://doi.org/10.1002/app.54901.

Umunakwe, R., Madueke, C. I., Umunakwe, I. J., Adebayo, A. O., Oyetunji, A., Borisade, S. G., Adigun, O. D., & Malomo, D. (2024). Effect of Varied Cure Temperature on the Cure Behavior, Mechanical Properties and Heat Build-Up of Solid Tire Tread Compound Containing Different Particles Sizes of Ground Tire Rubber. Journal of Applied Science & Process Engineering, 11(1), 60–77. https://doi.org/10.33736/jaspe.6501.2024.

Yulianto, P. (2006). Pengendalian Kualitas pada Proses Produksi di Pabrik Ban PT. Sehat Komodo Sidoarjo [Undergraduate thesis, Universitas Surabaya]. http://repository.ubaya.ac.id/id/eprint/30390.

Zhao, C., Cao, A., Wang, L., Chen, Z., Wang, H., Liu, Z., He, S., & Gao, M. (2024). Analysis of effect on temperature field of tire curing process by initial temperatures and condensate discharging. Applied Thermal Engineering, 257, 124424. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124424.

Zhao, Y., & Drummer, D. (2019). Influence of Filler Content and Filler Size on the Curing Kinetics of an Epoxy Resin. Polymers, 11(11), 1797. https://doi.org/10.3390/polym11111797.