

TESIS
SINTESIS ISOPRENA DARI PERENKAHAN KARET ALAM
PADA SUHU RENDAH MENGGUNAKAN KATALIS K_2O/KNO_3
SERTA PELARUT *DIETHYL PHATALATE*

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan
Gelar Magister Teknik (M.T) Pada Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya



AHMAD RIZKI JUNIANSYAH MUSBARI
03012622125012

PROGAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
JURUSAN TEKNOLOGI LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2023

HALAMAN PENGESAHAN

SINTESIS ISOPRENA DARI PERENKAHAN KARET ALAM PADA SUHU RENDAH MENGGUNAKAN KATALIS K_2O/KNO_3 SERTA PELARUT *DIETHYL PHATALATE*

TESIS

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Magister
Teknik (M.T.) Pada Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya

Palembang, 4 Januari 2024

Menyetujui,

Pembimbing I,



Prof. Dr. Ir. H.M. Dloni Bustan, M.Eng, IPU
NIP.19560307 198103 1010

Pembimbing II,



Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA, IPU
NIP. 19561024 198103 2001

Mengetahui,



Dekan
Wakil Dekan Bidang Akademik,

Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T, M.T, IPM
NIP 197502112003121002



Ketua Jurusan Teknik Kimia

Dr. Tuti Indah Sari, S.T., M.T.
NIP.19750201 200012 2001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Laporan Tesis ini dengan judul "Sintesis Isoprena Dari Perengkahan Karet Alam Pada Suhu Rendah Menggunakan Katalis K_2O/KNO_3 Serta Pelarut *Diethyl Phthalate*" telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Program Studi Magister Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tanggal 5 Januari 2024.

Palembang, Maret 2024

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Berupa Laporan Tesis

Ketua :

1. Prof. Dr. Ir. H. M. Said, M.Sc

NIP. 19610812 198703 1003


(.....Maret 2024)

Anggota :

2. Prof. Ir. Rimani Sipahutar, M.Sc., Ph.D

NIP. 19560604 198602 1001


(.....Maret 2024)

3. Dr. Ir. David Bahrin, S.T., M.T.


NIP. 19801031 200501 1003


(.....Maret 2024)

Mengetahui,



Dekan
Wakil Dekan Bidang Akademik,


Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T, M.T, IPM
NIP. 197502112003121002

Ketua Jurusan Teknik Kimia


Dr. Tuti Indah Sari, S.T., M.T.
NIP. 19750201 200012 2001

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang Bertanda Tangan Dibawah Ini :

Nama : Ahmad Rizki Juniansyah Musbari

NIM : 03012622125012

Judul : Sintesis Isoprena Dari Perengkahan Karet Alam Pada Suhu Rendah
Menggunakan Katalis K_2O/KNO_3 Serta Pelarut *Diethyl Phthalate*

Menyatakan bahwa Laporan Tesis saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Laporan Tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.

Palembang, Maret 2024

Yang membuat Pernyataan



Ahmad Rizki Juniansyah Musbari

NIM. 03012622125012

RINGKASAN

SINTESIS ISOPRENA DARI PERENKAHAN KARET ALAM PADA SUHU RENDAH MENGGUNAKAN KATALIS K_2O/KNO_3 SERTA PELARUT DIETHYL PHATALATE

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, 4 Januari 2024

Ahmad Rizki Juniansyah Musbari, Dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. H. M. Djoni Bustan, M. Eng., IPU. dan Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA., IPU.

Synthesis of Isoprene from Cracking of Natural Rubber at Low Temperature using Catalyst K_2O/KNO_3 and Solvent Diethyl Phthalate

Xv+ 114 Halaman, 7 Tabel, 22 Gambar

RINGKASAN

Sintesis isoprena selama ini yang terbentuk dari konversi polimer terjadi pada suhu di atas $400^{\circ}C$ dengan persentase komposisi isoprena kurang dari 20% dan rentan membentuk senyawa lain seperti senyawa aromatik. Penelitian ini bertujuan untuk melihat apakah penggunaan K_2O/KNO_3 dalam mengkonversi karet alam menjadi isoprena akan meningkatkan konversi dan berlangsung pada temperatur rendah. KNO_3 dapat menjaga terbentuknya produk samping lain dengan komposisi % yang bertujuan untuk mengisolasi pembentukan isoprena. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jumlah katalis, suhu, dan pelarut pada reaksi perengkahan sangat berpengaruh terhadap hasil akhir sintesis isoprena. Pada suhu $90^{\circ}C$, katalis 3 g diperoleh konversi sebesar 86,86%. Pada suhu $130^{\circ}C$, dihasilkan konversi sebesar 1,5 g 81,58%. Katalis K_2O/KNO_3 dapat bersifat amfoter, basa, atau asam, dipengaruhi oleh suhu operasi. Katalis K_2O/KNO_3 pada kondisi basa memiliki stabilitas dan aktivitas katalitik yang tinggi serta dapat menghasilkan konversi yang lebih baik dengan suhu rendah pada perengkahan karet alam untuk menghasilkan isoprena.

Kata Kunci : Karet alam, Isoprena, Kalium oksida, Kalium Nitrat, Dietil Ftalat.

SUMMARY

Synthesis of Isoprene from Cracking of Natural Rubber at Low Temperature using Catalyst K_2O/KNO_3 and Solvent Diethyl Phthalate

Scientific paper in the form of a thesis, 4 January 2024

Ahmad Rizki Juniansyah Musbari, Mentored by Prof. Dr. Ir. H. M. Djoni Bustan, M.Eng., IPU. and Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA., IPU.

Sintesis Isoprena Dari Perengkahan Karet Alam Pada Suhu Rendah Menggunakan Katalis K_2O/KNO_3 Serta Pelarut *Diethyl Phthalate*

Xv+ 114 Pages, 7 Table, 22 Pictures

SUMMARY

Synthesis of isoprene so far formed from polymer conversion occurs at temperatures above $400^{\circ}C$ with a percentage of less than 20% isoprene composition and is prone to forming other compounds such as aromatic compounds. This study aims to see if the use of K_2O/KNO_3 in converting natural rubber into isoprene will increase conversion and take place at low temperatures. KNO_3 can keep the formation of other side products with a composition of %, which aims to stabilize the catalyst to isolate the formation of isoprene. The results showed that variations in the amount of catalyst, temperature, and solvent in the cracking reaction significantly impacted the final result of isoprene synthesis. At $90^{\circ}C$, with the amount of catalyst 3 g, a conversion of 86.86% was obtained. This was due to the role of KNO_3 in stabilizing and increasing the catalytic activity of the catalyst. At $130^{\circ}C$, it produced a conversion of 1.5 g 81.58%. K_2O/KNO_3 catalyst can be amphoteric, basic, or acidic, influenced by the operating temperature. K_2O/KNO_3 catalyst in alkaline conditions has high stability and catalytic activity and can produce better conversion with low temperatures in natural rubber cracking to produce isoprene.

Keyword : Natural rubber, Isoprene, Potassium oxide, Potassium Nitrate, Diethyl Phthalate.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami pantakan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga kami dapat menyelesaikan laporan penelitian yang berjudul “**SINTESIS ISOPRENA DARI PERENKAHAN KARET ALAM PADA SUHU RENDAH MENGGUNAKAN KATALIS K_2O/KNO_3 SERTA PELARUT *DIETHYL PHATALATE***” ini tepat pada waktunya. Adapun tujuan dari Tesis ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat untuk mengikuti ujian pascasarjana pada program studi magister Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk dapat mengetahui pengaruh massa katalis K_2O/KNO_3 , serta *diethyl phatalate* sebagai pelarut dan suhu reaksi optimal untuk menghasilkan isoprene dengan konversi paling tinggi. Kami menyadari bahwa penulisan laporan penelitian ini tidak mungkin akan terwujud apabila tidak ada dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, kami menyampaikan ucapan rasa terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. David Bahrin, S.T., MT selaku Koordinator Program Studi Magister Jurusan Teknik Kimia Universitas Sriwijaya.
2. Prof. Dr. Ir. H. M Djoni Bustan, M. Eng. IPU selaku Dosen Pembimbing I Tesis Program Studi Magister Jurusan Teknik Kimia Universitas Sriwijaya.
3. Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA, IPU selaku Dosen Pembimbing II Program Studi Magister Jurusan Teknik Kimia Universitas Sriwijaya.
4. Kedua orang tua dan saudara-saudara yang selalu memberikan doa terbaik dan nasihat-nasihat terbaik untuk kami selama ini
5. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Kami sangat berharap semoga laporan penelitian ini dapat bermanfaat untuk mahasiswa maupun masyarakat.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam penyusunan, Penulis mengharapkan saran dan kritik yang bertujuan untuk membangun proposal penelitian ini lebih baik lagi.

Palembang, Januari 2024

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	iv
RINGKASAN	v
SUMMARY	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
BAB I.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan Penelitian.....	8
1.4. Manfaat Penelitian.....	11
BAB II	12
2.1. Sejarah Penelitian	12
2.2. Perengkahan Karet Alam.....	19
2.3. Karet Alam	20
2.4. Polyisoprene	23
2.5. Termokimia Konversi Karet Alam.....	27
2.6. Pirolisis	28

2.6.1.	Klasifikasi Proses Pirolisis.....	30
2.6.2.	Jenis Reaktor Pirolisis Produk Cair.....	32
2.6.3.	Aplikasi pirolisis	36
2.7.	<i>Cracking</i>	38
2.8.	<i>Cracking</i> karet alam	39
2.7.1.	Metode <i>Cracking</i> dan Degradasi Karet Alam.....	40
2.9.	Potassium Oxide (K ₂ O).....	48
2.9.1.	Sifat Fisika <i>Potassium Oxide</i> (K ₂ O)	49
2.9.2.	Sifat Kimia <i>Potassium Oxide</i> (K ₂ O)	50
2.10.	Potassium Nitrate (KNO ₃)	51
2.10.	Tinjauan Termodinamika.....	53
2.11.	Tinjauan Kinetika Reaksi.....	57
2.12.	Mekanisme Katalis Basa Terhadap Proses Perengkahan Karet Alam...58	
2.13.	Pengaruh Senyawa Basa Pada Proses Perengkahan Karet Alam	60
2.14.	Penelitian Terkait	63
BAB III		67
3.1.	Langkah-Langkah Penelitian	67
3.1.1.	Pengaplikasian katalis K ₂ O/KNO ₃ serta pelarut Diethyl Phthalate (DEP) pada proses cracking karet alam SIR 10 menjadi isoprene.....	67
3.2.	Analisa Penelitian	69
3.2.1.	Analisa Produk	69
3.3.	Skema Proses Penelitan	70
3.3.1.	Diagam Alir Penelitian.....	71
BAB IV		72
4.1.	Pengaruh Jumlah Katalis Terhadap Reaksi Perengkahan Karet Alam SIR	

10 Menjadi Isoprena.....	72
4.2. Pengaruh Suhu Terhadap Reaksi Perengkahan Karet Alam SIR 10 Menjadi Isoprena.....	74
4.3. Pengaruh KNO_3 Pada Katalis K_2O Terhadap Reaksi Perengkahan Karet Alam SIR 10 Menjadi Isoprena.....	79
4.4. Pengaruh Pelarut <i>Diethyl Phatalate</i> Pada Proses Perengkahan Karet Alam SIR 10 Menggunakan Katalis K_2O/KNO_3	81
BAB V.....	83
5.1. Kesimpulan	83
5.2. Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Struktur Kimia Karet Alam (cis-1,4-polyisoprene)	20
Gambar 2.2 Mekanisme Pirolisis Pembentukan Isoprena dari Bahan Baku <i>Natural Rubber</i> (JungDan and Choi, 2023).....	29
Gambar 2.3. Klasifikasi proses pirolisis (Devi dkk., 2020)	31
Gambar 2. 4. Aplikasi proses pirolisis diberbagai produksi dan pengolahan (Devi dkk., 2020)	36
Gambar 2.5. Mekanisme reaksi <i>cracking</i> metatetik hidroksi telechelic cis-1,4-poliisoprena (Solanky dkk., 2005)	41
Gambar 2.6 Mekanisme reaksi ozon pada ikatan rangkap polidiena (Criegee, 1975)	42
Gambar 2.7 Mekanisme ozonolisis pada cis-1,4-poliisoprena	43
Gambar 2.8. Mekanisme degradasi karet alam menjadi LNR.....	45
Gambar 2.9. Reaksi utama yang berpartisipasi dalam degradasi oksidatif polimer	47
Gambar 2.10. Disproporsionasi radikal hidroperoksil source singlet oxygen dan luminescence (Vohlídal, 2021).....	48
Gambar 2.11. Senyawa KNO_3	51
Gambar 2.12. Skema Umum Proses Perengkahan Karet Alam	56
Gambar 2.13. Mekanisme Reaksi Katalis Basa Terhadap Isoprena.....	58
Gambar 2.14. Pengaruh Senyawa Basa Terhadap Konversi Produk.....	60
Gambar 2.15. Mekanisme Penguraian Karet Alam	61
Gambar 3. 1. Blok Diagram Alir Penelitian	71
Gambar 3. 2. Skema Rangkaian Alat	70
Gambar 4. 1 Grafik Penambahan Massa Katalis Terhadap % Komposisi Isoprena	73
Gambar 4. 2 Peningkatan Suhu Terhadap % Komposisi Isoprena.....	74
Gambar 4. 3 Pengaruh pH katalis dan suhu terhadap % Komposisi Isoprena	77
Gambar 4. 4 Mekanisme Reaksi Pembentukan Isoprena Dari Karet Alam	78
Gambar 4. 5 Struktur Kimia <i>Diethyl phatalate</i> dan Isoprena.....	81

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu.....	12
Tabel 2. 2. Karakteristik Karet Alam	21
Tabel 2. 3. Degradasi dan Suhu Kelarutan Beberapa Jenis Karet	22
Tabel 2. 4. Properties of Isoprene.....	25
Tabel 2. 5. Boiling Points Of Isoprene	25
Tabel 2. 6. Spesific Heat, Entropy, Enthalpy and Gibbs Free Energy of Isoprene.....	54
Tabel 2. 7. Spesific Heat, Entropy, Enthalpy and Gibbs Free Energy of Natural Rubber.....	55

DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN

NR	<i>Natural Rubber</i>
K ₂ O	<i>Pottasium Oxide</i>
KNO ₃	<i>Kallium Nitrate</i>
DEP	<i>Diethyl Phatalate</i>
GC	<i>Gas Chromatografy</i>

DAFTAR SIMBOL

ml	Volume
cal	Energy
T	Suhu Absolut
P	Tekanan
g	Satuan Berat

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengelolaan karet alam merupakan sektor agoindustri yang menjanjikan bagi Indonesia dan memiliki peran yang signifikan dalam kontribusi devisanya sebagai subsektor perkebunan. Indonesia, dalam periode 2014-2018, menduduki peringkat kedua dalam produksi karet dunia dengan jumlah rata-rata 3,37 juta ton. Pangsa rata-rata produksi karet Indonesia mencapai 23,44% dari total produksi global. Pada tahun 2019, produksi karet meningkat menjadi 3,6 juta ton, menjadikan Indonesia sebagai produsen terbesar kedua setelah Thailand. Lebih dari 85% dari total produksi karet Indonesia saat ini diekspor ke negara-negara seperti Amerika Serikat, China, Jepang, dan beberapa negara lainnya. Dalam periode dari Januari 2017 hingga Januari 2019, harga karet dunia menurun sebanyak 48,1%. Menurut penelitian oleh (Abdullahi dkk., 2023), faktor penyebab penurunan harga karet alam adalah dominasi industri ban sebagai konsumen utama dari karet alam.

Mayoritas produksi karet alam Indonesia ditujukan untuk pasar internasional. Dalam konteks industri, karet alam memiliki potensi yang signifikan dan termasuk dalam kelompok bahan elastomer. Sebagian besar karet alam yang dihasilkan di Indonesia berasal dari perkebunan rakyat, sehingga ekspor karet alam Indonesia sebagian besar berasal dari karet remah crumb rubber, Standard Indonesian Rubber (SIR), dan jenis lain seperti Ribbed Smoke Sheet (RSS), lateks pekat, dan lainnya (Chaikumpollert dkk., 2012). Sesuai dengan standar SNI 06-1903-2000, SIR didefinisikan sebagai karet alam yang dihasilkan melalui proses pengolahan bahan olah karet yang berasal dari getah pohon *Hevea Brasiliensis* dengan metode mekanis tanpa melibatkan bahan kimia. Kualitasnya dapat ditentukan sesuai spesifikasi yang berlaku.

Komposisi karet alam melibatkan berbagai komponen seperti senyawa protein, lipida, karbohidrat, hidrokarbon, mineral, dan air. Oleh karena itu, penggunaan produk hasil degradasi dari poly(cis-1,4-isoprene) yang berasal dari karet alam telah menjadi subjek penelitian yang luas untuk berbagai aplikasi. Hal

ini disebabkan oleh sifat karet alam sebagai sumber daya terbarukan yang berpotensi menjadi bahan baku untuk berbagai oligomer. Karet alam memiliki sifat fisik yang sangat khas, termasuk elastisitas yang tinggi, ketahanan terhadap benturan dan abrasi, kemampuan penghantar panas yang efisien, serta fleksibilitas bahkan pada suhu rendah. Kombinasi unik ini menjadikan karet alam sangat penting dalam pembuatan berbagai produk dari karet dan lateks. Keunggulan ini membuat karet alam menjadi bahan baku sangat relevan dalam berbagai industri, terutama dalam produksi barang-barang industri seperti ban (Katzenberg and Tiller, 2016).

Kekurangan karet alam, yang dibentuk oleh monomer isoprena yang memiliki ikatan rangkap, dalam konfigurasi *cis*-1,4, melibatkan rendahnya keelektronegatifannya yang mengakibatkan polaritas yang rendah, serta kerentanannya terhadap reaksi substitusi atau adisi. Kondisi semacam ini mengakibatkan karet memiliki kerentanan terhadap oksidasi, sensitivitas terhadap panas dan ozon, degradasi pada suhu tinggi, dan kemungkinan perluasan saat berada dalam minyak atau pelarut organik (Yamashita and Takahashi, 2020).

Pemanfaatan sumber daya karet alam untuk lebih bernilai ekonomis, dapat dikembangkan dengan mengkonversikannya ke produk baru yang bernilai tinggi. Salah satu cara konversi karet alam dengan jalur termokimia. Konversi karet alam melalui proses termokimia merupakan suatu proses kimia yang melibatkan perubahan secara termal (panas) yang menyebabkan karet alam mengalami transformasi kimia menjadi produk-produk yang berbeda (Cataldo, 2023). Proses termokimia ini dapat mencakup beberapa reaksi kimia, seperti pirolisis, gasifikasi, dan oksidasi, yang dapat mengubah karet alam menjadi bahan bakar, gas, cairan, atau senyawa kimia lainnya (Ahmad dkk., 2016). Pirolisis adalah proses termal di mana bahan organik dipanaskan dalam lingkungan dengan sedikit atau tanpa oksigen. Pada suhu yang tinggi, karet alam mengalami dekomposisi menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana seperti hidrokarbon, karbon, dan gas seperti hidrogen dan metana (Tomczyk dkk., 2020).

Proses pirolisis memiliki keunggulan dalam menghasilkan konversi karet alam yang terdiri dari produk gas, cair, dan padatan, yang memungkinkan untuk lebih mudah mengarahkan konversi karet alam menjadi produk tertentu seperti

isoprene. Dalam konversi karet alam, isoprene dapat terbentuk sebagai produk cair yang lebih menjanjikan melalui proses pirolisis. Pada pirolisis, karet alam akan mengalami proses *cracking* untuk membentuk *isoprene* dimana pada proses membutuhkan bantuan katalis dan pelarut (Khan and Poh, 2011).

Penelitian-penelitian dalam beberapa tahun terakhir telah mengungkap berbagai proses perengkahan dan degradasi karet alam. (Osorio-Vargas dkk., 2022) melakukan penelitian pirolisis limbah ban bekas menggunakan reactor fixed bed dengan katalis logam Ni/SiO₂, Co/SiO₂, dan Pd/SiO₂ pada suhu 350 °C yang menghasilkan senyawa alkena (isoprena), terpen aromatik (p-cymene), terpena alifatik (D-limonena), dan senyawa aromatik lainnya seperti benzena, toluena, dan xilena (BTX). Katalis Pd/SiO₂ adalah yang paling selektif terhadap senyawa aromatic (sekitar 40%). Penelitian (Osorio-Vargas dkk., 2021b) melakukan *cracking* limbah karet dengan menggunakan katalis logam oksida CaO yang menunjukkan hasil isoprene dengan *peak area percentage* kurang dari 20% dengan masih banyaknya produk lain seperti aromatic, sulfur organic, senyawa karbon dan BTX dengan suhu pirolisis 450°C. (Chen dkk., 2022a) melakukan kajian paduan logam oksida Zn dengan zeolit ZSM-5 dimana menunjukkan pemuatan logam oksida Zn meningkatkan produk kearah BTX dibandingkan dengan minyak pirolisis dengan adanya suhu pirolisis 500°C.

Logam oksida non-konvensional yang menarik jadi perhatian salah satunya adalah kalium oksida (K₂O). Kalium oksida telah diaplikasikan diberbagai reaksi salah satunya seperti pada penelitian (Li dkk., 2014) dimana K₂O dikompositkan Mg – MCM-41 untuk perengkahan hidrokarbon cair dimana kalium meningkatkan rendemen hingga 11% setelah konsentrasinya ditingkatkan. K₂O digunakan sebagai katalis dalam perengkahan biji karet dalam penelitian (Hafriz dkk., 2022), dimana konversinya 93,2% dan rendemen biofuel nya 78,3%. Reaksi transesterifikasi dibantu oleh K₂O oleh (A dkk., 2017) yang dapat menghasilkan konversi hingga 80% dengan stabilitas katalis yang baik.

(Nun - anan dkk., 2020) mempelajari proses pirolisis NR, BR, dan SBR dimana suhu pirolisis <390°C akan membentuk olefin sedangkan suhu lebih tinggi akan membentuk aromatik. (Abraham dkk., 2013) melakukan pirolisis limbah ban

mobil yang menunjukkan isoprena sebagai senyawa utama terbentuk pada suhu dibawah 500°C Hal ini menunjukkan suhu pirolisis antara 400-950°C untuk membentuk minyak pirolisis masih sedikit. Penelitian Aydın dan İlkılıç (Aydın and İlkılıç, 2012) melakukan pirolisis limbah karet pada suhu 400-700°C dimana minyak pirolisis yang didapatkan berkisar 40% wt. Pirolisis limbah karet dengan reaktor pirolisis kapasitas 1 ton dengan suhu 950°C oleh (Kammert dkk., 2020) mendapatkan minyak pirolisis 23,9% wt. (Zhao dkk., 2021) melakukan pirolisis limbah karet ban sepeda dimana menunjukkan pirolisis terjadi 2 tahap. Pirolisis tahap pertama pada suhu 285-531°C sebagai reaksi primer yang akan membentuk produk seperti alkena, sikloalkena, dan produk-produk rantai pendek.

(Lopez dkk., 2010b) Pirolisis limbah ban di bawah kondisi vakum (25 dan 50 kPa) telah dilakukan di pabrik percontohan yang dilengkapi dengan reaktor bed spouted berbentuk kerucut dan beroperasi dengan feed secara kontinyu pada 425 dan 500 °C. Efek utama vakum adalah peningkatan hasil fraksi diesel dari produk cair. Hasil isoprena yang luar biasa telah diperoleh dengan beroperasi di bawah vakum, mencapai hasil lebih tinggi dari 7% berat pada 500 °C dan 25 kPa.

Butiran ban bekas dipirolisis dalam kondisi vakum (3,5–10 kPa), dan pengaruh suhu serta bahan aditif Na₂CO₃ dan NaOH. Dengan adanya tambahan zat aditif, hasil minyak pirolisis meningkat secara bertahap hingga maksimum dan selanjutnya menurun dengan kenaikan suhu dari 450 C menjadi 600 C. Penambahan NaOH memfasilitasi pirolisis secara dramatis, sebagai hasil minyak pirolisis maksimal sekitar 48% berat dicapai pada 550 C (Zhang dkk., 2008)

(Tomczyk dkk., 2020) menjelaskan dengan menggunakan metode cracking lignin memperoleh hasil cracking yang lebih baik. Hasil produk larut pada petroleum eter meningkat dari 50,4 menjadi 56,4%. K₂O yang digunakan dalam pupuk yang juga mengandung KNO₃ akan memunculkan situs asam dan basa untuk memfasilitasi *cracking* karet alam menjadi *isoprene*. Penelitian yang dilakukan oleh (Sadaka dkk., 2012) menyelidiki degradasi karet alam menggunakan asam periodik, mengendalikan tingkat kerusakan dengan memvariasikan waktu reaksi dan jumlah asam periodik. (Biswas dkk., 2021) menjelaskan bahwa reaksi depolimerisasi lignin alkali menggunakan CeO₂ yang dipadukan dengan CaO menunjukkan perolehan

produk mencapai 50% berat. Katalis CaO/CeO_2 memiliki karakteristik luas permukaan dan volume pori yang lebih rendah dan produk yang dihasilkan lebih rendah. Penelitian yang dilakukan oleh (Banan and Mehdipour, 2021) berfokus pada degradasi karet alam memanfaatkan ozon dengan cara ozonolisis untuk degradasi karet alam dengan menggunakan pelarut organik kloroform dimana menunjukkan berat molekul karet alam dapat diturunkan.

Beberapa penelitian tersebut belum secara khusus untuk membentuk isoprene dan produk isoprene yang didapatkan relatif masih sedikit. Hal ini menjadi perhatian khusus dan menarik ditindaklanjuti untuk dikembangkan dengan mencari cara untuk mendapatkan produk isoprene dari karet alam yang signifikan dengan dapat ditinjau dari pengaturan katalis yang digunakan, penggunaan bantuan pelarut serta pengaturan kondisi operasi yang pas dalam proses perengkahan karet alam menjadi isoprene.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang membahas tentang perengkahan karet alam menjadi monomer isoprena, maka ditetapkan perumusan masalah (Osorio-Vargas dkk., 2021b) melakukan penelitian pirolisis limbah ban bekas menggunakan reactor fixed bed dengan katalis logam Ni/SiO_2 , Co/SiO_2 , dan Pd/SiO_2 pada suhu 350°C yang menghasilkan senyawa alkena (isoprena), terpen aromatik (p-cymene), terpena alifatik (D-limonena), dan senyawa aromatik lainnya seperti benzena, toluena, dan xilena (BTX). Penelitian tersebut dapat dirumuskan permasalahan seperti :

- 1) Katalis Ni/SiO_2 , Co/SiO_2 , dan Pd/SiO_2 terjadi pada suhu tinggi dan biaya produksi yang tinggi.
- 2) Katalis Ni/SiO_2 , Co/SiO_2 , dan Pd/SiO_2 sulit untuk didapatkan dengan mudah sehingga perlu dilakukan preparasi katalis khusus dan sulit didapatkan apabila digunakan dengan skala yang lebih besar kedepannya.

(Nun - anan dkk., 2020) mempelajari proses pirolisis NR, BR, dan SBR dimana suhu pirolisis $<390^\circ\text{C}$ akan membentuk olefin sedangkan suhu lebih tinggi akan membentuk aromatik. (Abraham dkk., 2013) melakukan pirolisis limbah ban mobil yang menunjukkan isoprena sebagai senyawa utama terbentuk pada suhu

dibawah 500°C. Hal ini menunjukkan suhu pirolisis antara 400-950°C. Dari penelitian tersebut dapat dirumuskan permasalahan seperti :

- 1) Proses perengkahan untuk mensintesis dilakukan pada suhu tinggi antara 400-950°C.
- 2) Isoprene tidak terbentuk pada suhu dibawah 400°C, sedangkan pada suhu diatas 400°C isoprene mulai terbentuk

Penelitian (Aydın and İlkılıç, 2012) melakukan pirolisis limbah karet pada suhu 400-700°C, dimana minyak pirolisis yang didapatkan berkisar 40% wt. Pirolisis limbah karet dengan reaktor pirolisis kapasitas 1 ton dengan suhu 950°C mendapatkan minyak pirolisis 23,9% wt. Xu dkk melakukan pirolisis limbah karet ban sepeda dimana menunjukkan pirolisis terjadi 2 tahap. Pirolisis tahap pertama pada suhu 285-531°C sebagai reaksi primer yang akan membentuk produk seperti alkena, sikloalkena, dan produk-produk rantai pendek. Dari penelitian tersebut dapat dirumuskan permasalahan seperti :

- 1) Pada proses perengkahan ini suhu yang digunakan sangat tinggi yaitu 950°C
- 2) Pada proses perengkahan ini memiliki 2 tahap sintesis dan isoprene yang terbentuk masih sedikit dan hasil *yield* minyak pirolisis berkisar 40% wt

Butiran ban bekas dipirolisis dalam kondisi vakum (3,5–10 kPa), dan pengaruh suhu serta bahan aditif Na₂CO₃ dan NaOH. Dengan adanya tambahan zat aditif, hasil minyak pirolisis meningkat secara bertahap hingga maksimum dan selanjutnya menurun dengan kenaikan suhu dari 450°C menjadi 600°C. Penambahan NaOH memfasilitasi pirolisis secara dramatis, sebagai hasil minyak pirolisis maksimal sekitar 48% berat dicapai pada 550°C (Zhang dkk., 2008). Dari penelitian tersebut dapat dirumuskan permasalahan seperti :

- 1) Proses perengkahan dengan menggunakan bahan aditif Na₂CO₃ dan NaOH berlangsung pada suhu 400°C-600°C
- 2) Hasil minyak pirolisis dan isoprene yang terbentuk masih sedikit

(Li dkk., 2014) menjelaskan bahwa katalis $K_2O/Mg-MCM-41$ menggunakan pelarut KNO_3 melalui proses perengkahan katalitik. Berdasarkan penelitian ini dapat dirumuskan beberapa permasalahan, seperti :

- 1) Proses sintesis dengan $K_2O/Mg-MCM-41$ menggunakan KNO_3 dilakukan pada suhu dan tekanan yang tinggi sehingga akan membutuhkan biaya operasi dan biaya investasi yang sangat tinggi.
- 2) Peningkatan suhu yang tinggi akan mengarahkan produk perengkahan karet alam menjadikannya lebih banyak menjadi produk gas.

Penelitian (Zhang dkk., 2020) melakukan cracking limbah karet dengan suhu pirolisis $450^\circ C$ dengan menggunakan katalis logam oksida. Berdasarkan penelitian ini dapat dirumuskan beberapa permasalahan, seperti :

- 1) Hasil isoprene dengan peak-area percentage kurang dari 20% dengan masih banyaknya produk lain seperti aromatic, sulfur organic, senyawa karbon dan BTX dengan suhu pirolisis $450^\circ C$.
- 2) Kondisi operasi pada cracking limbah karet alam dilakukan pada suhu tinggi

(Lopez dkk., 2010a), Pirolisis limbah ban di bawah kondisi vakum (25 dan 50 kPa) telah dilakukan di pabrik percontohan yang dilengkapi dengan reaktor bed spouted berbentuk kerucut dan beroperasi dengan feed secara kontinyu pada 425 dan $500^\circ C$. Berdasarkan penelitian ini dapat dirumuskan beberapa permasalahan, seperti :

- 1) Hasil isoprena yang beroperasi di bawah vakum, sebesar 7% berat pada $500^\circ C$ dan 25 kPa.
- 2) Suhu yang digunakan tinggi sehingga biaya operasi juga tinggi

Berdasarkan uraian diatas, maka dapat dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Proses perengkahan katalitik masih beroperasi pada suhu tinggi
2. *Yield* isoprene yang dihasilkan dari proses perengkahan katalitik masih dibawah 20%
3. Katalis yang digunakan mahal dan susah di dapat

1.3. Tujuan Penelitian

(Chueaphetr dkk., 2023) melakukan penelitian dengan menggunakan metode gabungan sintesis satu pot dan impregnasi basah, beberapa saringan molekul dasar mesopori $K_2O/MeO-SBA-15$ (Me=Ca, Mg atau Ba) disiapkan, dikarakterisasi, dan digunakan dalam perengkahan katalitik minyak biji karet. Hasilnya menunjukkan bahwa katalis $K_2O/MeO-SBA-15$ memiliki kinerja katalitik yang lebih baik daripada $MeO-SBA-15$, menunjukkan kebasahan yang lebih kuat. Katalis $K_2O/MgO-SBA-15$ yang diperoleh dengan konsentrasi impregnasi 15% berat KNO_3 menunjukkan kinerja katalitik yang sangat baik dengan konversi sekitar 93,2% dan rendemen biofuel hidrokarbon cair sebesar 78,3%. Bahkan setelah digunakan kembali sebanyak lima kali, RSO untuk menghasilkan lebih banyak produk sampingan. Katalis $K_2O/MgO-SBA-15$ memiliki stabilitas termal dan aktivitas katalitik yang baik pada suhu 550 °C selama 3 jam. (Istadi dkk., 2016) melakukan penelitian terhadap katalis kalium oksida yang bertujuan untuk menguji usabilitas dan stabilitas katalis berbasis kalsium oksida ($K_2O/CaO-ZnO$) pada reaksi transesterifikasi. Penambahan K_2O sebagai promotor membuat aktivitas dan selektivitas katalis $K_2O/CaO-ZnO$ menjadi lebih baik, oleh karena itu, promotor K_2O berperan sebagai aktivitas dan selektivitas.

(J. Wang dkk., 2020) menjelaskan dengan menggunakan metode *cracking* lignin memperoleh hasil *cracking* yang lebih baik, suhu yang lebih tinggi setelah sekitar 320°C dan waktu reaksi lebih lama minimal 12 jam. Metode ini dapat meningkatkan hidredeoksigenasi dan desulfurisasi. situs asam dan basa muncul, dan S_2O_8 dan K_2O saling meningkatkan kekuatan asam dan basa katalis secara luar biasa, ini memang memfasilitasi *cracking* lignin. Dalam kondisi yang sesuai, hasil produk cair, produk yang larut dalam petroleum eter dan total produk monomer masing-masing adalah 83,76%, 50,4% dan 28,96%. Konstituen dari fraksi yang larut dalam petroleum eter, yang terutama berupa monomer dan dimer, dapat digunakan sebagai bahan bakar cair atau aditif. Nilai kalor tinggi (HHV) tertinggi

dari produk cair (33,6 MJ/kg) diperoleh, dan hasil produk larut pada petroleum eter meningkat dari 50,4 menjadi 56,4%. K_2O yang digunakan dalam pupuk yang juga mengandung KNO_3 akan memunculkan situs asam dan basa.

(Khemthong and Wantala, 2023) melakukan penelitian limbah minyak sawit goreng (WCPO) digunakan sebagai bahan baku untuk menghasilkan biofuel melalui *pyrolytic catalysis cracking* (PCC) menggunakan katalis basa K_2O - MgO / CaO dengan variasi suhu 500, 525 dan 550 °C dengan tekanan dibawah atmosfer. Kebasaan katalis meningkat dengan meningkatnya kandungan K_2O . K_2O tidak hanya meningkatkan hasil produk pirolitik cair tetapi juga secara signifikan mengurangi senyawa oksigen dalam biofuel melalui proses deoksigenasi untuk meningkatkan kualitas biofuel. Pada suhu reaksi 500 °C menghasilkan minyak pirolis sekitar 92 vol% dibandingkan dengan suhu reaksi yang tinggi.

(Zhibo dkk., 1996), Melakukan penelitian *cracking catalytic* polietilen menjadi bahan bakar minyak dan polistirena menjadi monomer stirena telah dipelajari dengan menggunakan asam padat dan basa sebagai katalis. Asam padat seperti alumina silika dan zeolit ZSM-5 ditemukan efektif untuk mendegradasi limbah polietilen menjadi bahan bakar minyak, dan basa padat seperti BaO dan K_2O disimpulkan efektif untuk mengubah limbah polistirena menjadi monomer stirena. Dengan katalis basa K_2O dan BaO didapatkan hasil 90% berat polistirena diubah menjadi monomer stirena dan dimer pada 623 K.

(Hafriz dkk., 2022) melakukan perbandingan kinerja katalis K_2O/SiO_2 dan dolomit terkalsinasi dilakukan melalui deoksigenasi minyak jelantah (WCO). Hasilnya menemukan bahwa katalis K_2O/SiO_2 dapat digunakan dalam deoksigenasi WCO menghasilkan minyak pirolisis yang tinggi dibandingkan dengan deoksigenasi termal dan katalis dolomit terkalsinasi dengan waktu reaksi 30 menit, suhu reaksi 390 C. Hasil minyak pirolisis dengan katalis K_2O/SiO_2 memberikan selektivitas yang lebih tinggi terhadap produk diesel (C13-C24).

Kinerja katalitik dari serangkaian basa padat KNO_3 yang didukung untuk sintesis metilsiklopentadiena melalui Metilasi siklopentadiena dengan metanol lebih baik dibandingkan MgO pada suhu 450°C. Konversi siklopentadiena dan selektivitas untuk metilsiklopentadiena sekitar 32% dan 86% menggunakan KNO_3

/ γ -Al₂O₃ (Sun dkk., 2006). Proses Perengkahan Katalitik Limbah Polystyrene dengan katalis fly ash/KNO₃ dengan rasio 1: 4 katalis untuk Produksi Bahan Bakar Bensin kondisi operasi optimal 425 °C dan 60 menit menghasilkan *yield liquid* maksimum 88,4%. (Thambiyapillai and Ramanujam, 2021)

Produksi biodiesel dari limbah minyak goreng dengan methanol menggunakan KNO₃/Minyak heterogen Katalis abu serpih dengan konversi minyak biodiesel maksimum sekitar 100% pada suhu reaksi 65 °C, rasio metanol terhadap minyak 45:1, dan waktu reaksi 2 jam. (Al-Hamamre dkk., 2023) Dietil ftalat (DEP) adalah zat sintesis yang digunakan sebagai plasticizer dan pelarut. Ini adalah cairan berminyak yang tidak berwarna dengan sedikit bau aromatik dan rasa pahit dan tidak menyenangkan. Ini adalah ester dietil dari asam ftalat. *Diethyl Phthalate* (DEP) merupakan bahan yang sensitif terhadap panas, dan mereka memiliki kesulitan besar dalam pemisahan dan pemurnian melalui distilasi. Kelarutan dietil ftalat dalam cairan ionik diukur dalam kisaran suhu $T = 283,15 - 353,15$ K dan pada tekanan atmosfer, dan komposisi suhu yang sesuai diagam fase diperoleh. Kelarutan dietil ftalat dalam cairan ionic akan meningkat dengan adanya peningkatan suhu (Zhang dkk., 2017).

Lodge et al. mempelajari *micciel* silindris, dan vesikular dari larutan PS yang merupakan senyawa non polar (13K) -b-PI (71K) asimetris 1 vol% dalam serangkaian campuran pelarut dibuthyl phthalate (DBP), dietil ftalat (DEP), dan dimetil ftalat (DMP), untuk menyesuaikan tingkat selektivitas pelarut untuk stirena.²² Dengan peningkatan selektivitas pelarut, bentuk *micciel* dominan berubah dari bola ke silinder ke vesikel, sehingga mencerminkan kelengkungan antarmuka yang berubah. Parameter kelarutan dan volume molar DEP dan toluena mewakili efek entropic. Namun pelarut yang kurang selektif mungkin memberikan lebih banyak derajat kebebasan dalam rantai inti daripada pelarut yang lebih selektif (Bang dkk., 2006).

Berdasarkan uraian diatas, maka dapat dirumuskan tujuan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Mempelajari pengaruh jumlah katalis K₂O/KNO₃ terhadap pembentukan isoprene pada cracking karet alam
2. Mengevaluasi *yield* dan konversi isoprena pada kondisi suhu operasi yang rendah menggunakan katalis K₂O/KNO₃

3. Mempelajari pengaruh pelarut terhadap kondisi suhu operasi reaksi cracking karet alam yang menggunakan Katalis K_2O/KNO_3
4. Mempelajari pengaruh suhu operasi terhadap cracking karet alam yang menggunakan katalis K_2O/KNO_3

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan mendapatkan proses cracking karet alam untuk menjadi isoprene dengan bantuan katalis logam K_2O/KNO_3 yang ditinjau dari % konversi reaksi cracking serta pengaruh pelarut DEP terhadap kelarutan isoprene dari karet alam yang ditinjau dari perubahan suhu. Penelitian ini juga menunjukkan proses pirolisis craking karet alam yang berlangsung pada kondisi operasi suhu yang rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- A, K.T., Tiana, Y., Liua, X., Roodb, M.J., Yana, Z., Artikel, I., 2017. Machine Translated by Google Katalisis Terapan A , Umum Kajian kokas yang diendapkan pada katalis VOx-K2O / γ -Al2O3 di lingkungan non-oksidatif dehidrogenasi isobutana Machine Translated by Google 545, 1–9.
- Abdullahi, S.S., Abu Bakar, N.H.H., Yusof, N.H., 2023. Facile synthesis of nickel-based supported halloysite nanotube catalysts and their role in photocatalytic degradation of liquid epoxidized natural rubber. *Iran. Polym. J.* 32, 337–351. <https://doi.org/10.1007/s13726-022-01127-8>
- Abraham, E., Deepa, B., Pothan, L.A., John, M., Narine, S.S., Thomas, S., Anandjiwala, R., 2013. Physicomechanical properties of nanocomposites based on cellulose nanofibre and natural rubber latex. *Cellulose* 20, 417–427. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9830-1>
- Ahmad, I., Khan, M.I., Khan, H., Ishaq, M., Tariq, R., Gul, K., Ahmad, W., 2015. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. *Int. J. Green Energy* 12, 663–671. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.880146>
- Ahmad, N., Abnisa, F., Daud, W.M.A.W., 2016. Potential use of natural rubber to produce liquid fuels using hydrous pyrolysis – a review. *RSC Adv.* 6, 68906–68921. <https://doi.org/10.1039/C6RA09085K>
- Al-Hamamre, Z., Sandouqa, A., Al-Saida, B., Shawabkeh, R.A., Alnaief, M., 2023. Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous KNO3/Oil shale ash catalyst. *Renew. Energy* 211, 470–483. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.025>
- Anachkov, M., Rakovski, S., Stefanova, R., 2000. Ozonolysis of 1,4-cis-polyisoprene and 1,4-trans-polyisoprene in solution. *Polym. Degrad. Stab.* 67, 355–363. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00137-8](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00137-8)
- Aydın, H., İlkılıç, C., 2012. Optimization of fuel production from waste vehicle tires by pyrolysis and resembling to diesel fuel by various desulfurization methods. *Fuel* 102, 605–612. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.067>

- Aylón, E., Fernández-Colino, A., Navarro, M. V., Murillo, R., García, T., Mastral, A.M., 2008. Waste Tire Pyrolysis: Comparison between Fixed Bed Reactor and Moving Bed Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 47, 4029–4033. <https://doi.org/10.1021/ie071573o>
- Azhar, N.N.H., Cheng, A., Lee, S.Y., Ang, D.T.C., 2022. Thermal and photo oxidative degradation of natural rubber film in the presence of iron (III) stearate. *J. Polym. Res.* 29, 476. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03316-8>
- Azhar, N.N.H., Cheng, A., Lee, S.Y., Rahman, N.M.M., Ang, D.T.-C., 2023. Development of natural rubber with enhanced oxidative degradability. *Polym. Bull.* 80, 3927–3948. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04240-z>
- Bahrudin, Fadhillah, I., Septian, Wiranata, A., Zahrina, I., 2020. Molecular Weight of Liquid Natural Rubber (LNR) Product from the Chemical Depolymerization Process of High Molecular Weight Natural Rubber Latex. *J. Phys. Conf. Ser.* 1655. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012091>
- Baker, R.R., 1987. A review of pyrolysis studies to unravel reaction steps in burning tobacco. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 11, 555–573. [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(87\)85054-4](https://doi.org/10.1016/0165-2370(87)85054-4)
- Ballauff, M., Wolf, B.A., 1984. Degradation of chain molecules. 2. Thermodynamically induced shear degradation of dissolved polystyrene. *Macromolecules* 17, 209–216. <https://doi.org/10.1021/ma00132a016>
- Banan, A., Mehdipour, H., 2021. Controlled degradation and functionalization of natural rubber by ozonolysis in organic solvent. *J. Polym. Res.* 28, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02671-2>
- Bang, J., Jain, S., Li, Z., Lodge, T.P., Pedersen, J.S., Kesselman, E., Talmon, Y., 2006. Sphere, cylinder, and vesicle nanoaggregates in poly(styrene-*b*-isoprene) diblock copolymer solutions. *Macromolecules* 39, 1199–1208. <https://doi.org/10.1021/ma052023+>
- Barth, H.G., Carlin, F.J., 1984. A Review of Polymer Shear Degradation in Size-Exclusion Chromatography. *J. Liq. Chromatogr.* 7, 1717–1738. <https://doi.org/10.1080/01483918408068832>
- Biswas, B., Kumar, A., Krishna, B.B., Bhaskar, T., 2021. Effects of solid base

- catalysts on depolymerization of alkali lignin for the production of phenolic monomer compounds. *Renew. Energy* 175, 270–280. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.039>
- Bondarev, D., Zedník, J., Plutnarová, I., Vohlídal, J., Sedláček, J., 2010. Molecular weight and configurational stability of poly[(fluorophenyl)acetylene]s prepared with metathesis and insertion catalysts. *J. Polym. Sci. Part A Polym. Chem.* 48, 4296–4309. <https://doi.org/10.1002/pola.24218>
- Branca, C., Di Blasi, C., 2006. Multistep Mechanism for the Devolatilization of Biomass Fast Pyrolysis Oils. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 5891–5899. <https://doi.org/10.1021/ie060161x>
- Bridgwater, A.V., 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy* 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Cai, X., Cai, H., Shang, C., Du, C., 2021. Two-Stage Pyrolysis/Gasification and Plasma Conversion Technology for the Utilization of Solid Waste. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 49, 191–213. <https://doi.org/10.1109/TPS.2020.3044534>
- Cataldo, F., 2023. Thermochemistry of Sulfur-Based Vulcanization and of Devulcanized and Recycled Natural Rubber Compounds. *Int. J. Mol. Sci.* 24, 2623. <https://doi.org/10.3390/ijms24032623>
- Chaikumpollert, O., Yamamoto, Y., Suchiva, K., Kawahara, S., 2012. Protein-free natural rubber. *Colloid Polym. Sci.* 290, 331–338. <https://doi.org/10.1007/s00396-011-2549-y>
- Chen, Q., Xu, F., Zong, P., Song, F., Wang, B., Tian, Y., Wu, F., Zhao, X., Qiao, Y., 2022a. Influence of CaO on the thermal kinetics and formation mechanism of high value-added products during waste tire pyrolysis. *J. Hazard. Mater.* 436, 129220. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129220>
- Chen, Q., Xu, F., Zong, P., Song, F., Wang, B., Tian, Y., Wu, F., Zhao, X., Qiao, Y., 2022b. Influence of CaO on the thermal kinetics and formation mechanism of high value-added products during waste tire pyrolysis. *J. Hazard. Mater.* 436, 129220. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129220>
- Chueaphetr, R., Suwannaruang, T., Khunphonoi, R., Khemthong, P., Wantala, K.,

2023. Enhancing deoxygenation of waste cooking palm oil over CaO-MgO catalyst modified by K₂O for green bio-fuel. *Fuel* 354, 129350. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129350>
- Collard, F.-X., Blin, J., 2014. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38, 594–608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.013>
- Criegee, R., 1975. Mechanism of Ozonolysis. *Angew. Chemie Int. Ed. English* 14, 745–752. <https://doi.org/10.1002/anie.197507451>
- Cundy, V.A., 1993. *Combustion*, 2nd Editio. ed, Academic Press, Inc. Orlando. <https://doi.org/10.1002/ep.670120219>
- Cunliffe, A.M., Williams, P.T., 1998. Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 44, 131–152. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(97\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(97)00085-5)
- Dan, E., Guillet, J.E., 1973. Photochemistry of Ketone Polymers. X. Chain Scission Reaction in the Solid State. *Macromolecules* 6, 230–235. <https://doi.org/10.1021/ma60032a016>
- Danon, B., Van Der Gryp, P., Schwarz, C.E., Görgens, J.F., 2015. A review of dipentene (dl-limonene) production from waste tire pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 112, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.12.025>
- Devi, M., Rawat, S., Sharma, S., 2020. A comprehensive review of the pyrolysis process: from carbon nanomaterial synthesis to waste treatment. *Oxford Open Mater. Sci.* 1. <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itab014>
- Ding, K., Zhong, Z., Zhang, B., Wang, J., Min, A., Ruan, R., 2016. Catalytic pyrolysis of waste tire to produce valuable aromatic hydrocarbons: An analytical Py-GC/MS study. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 122, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.10.023>
- Effendy, S., Rusnadi, I., Aina, N., Rossa, B., Waltin, M., Teknik Kimia, J., Negeri Sriwijaya Jalan Sriwijaya Negara, P., Besar Palembang, B., 2021. Unjuk Kerja Proses Pirolisis Katalitik Limbah Ban Bekas Menjadi Bahan Bakar Cair Ditinjau Dari Jumlah Katalis, Variasi Temperatur, Dan Waktu Operasi

- Performance of Tires Waste Catalytic Pyrolysis Into Fuel Oil Observed By the Number of Catalyst, Temperaturu. *J. Kinet.* 12, 32–39.
- Fan, Y., Fowler, G.D., Zhao, M., 2020. The past, present and future of carbon black as a rubber reinforcing filler – A review. *J. Clean. Prod.* 247, 119115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119115>
- Farida, E., Bukit, N., Ginting, E.M., Bukit, B.F., 2019. The effect of carbon black composition in natural rubber compound. *Case Stud. Therm. Eng.* 16, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100566>
- Galvagno, S., Casu, S., Casabianca, T., Calabrese, A., Cornacchia, G., 2002. Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results. *Waste Manag.* 22, 917–923. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00083-1)
- Gan, Y.X., 2021. Activated Carbon from Biomass Sustainable Sources. *C* 7, 39. <https://doi.org/10.3390/c7020039>
- García, M.Á.G., Dobrosz-Gómez, I., Ojeda Toro, J.C., 2020. Potassium Nitrate Solubility in (Water + Ethanol) Mixed Solvents at Different Temperatures and Hydrochloric Acid Concentrations. Experimental Study and Modeling Using the Extended UNIQUAC Model. *J. Chem. Eng. Data* 65, 567–576. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00753>
- Gholami, Z., Gholami, F., Tišler, Z., Tomas, M., Vakili, M., 2021. A review on production of light olefins via fluid catalytic cracking. *Energies* 14, 1–36. <https://doi.org/10.3390/en14041089>
- Gholizadeh, M., Li, C., Zhang, S., Wang, Y., Niu, S., Li, Y., Hu, X., 2020. Progress of the development of reactors for pyrolysis of municipal waste. *Sustain. Energy Fuels* 4, 5885–5915. <https://doi.org/10.1039/D0SE01122C>
- Goshi, N., Castagnola, E., Vomero, M., Gueli, C., Cea, C., Zucchini, E., Bjanes, D., Maggiolini, E., Moritz, C., Kassegne, S., Ricci, D., Fadiga, L., 2018. Glassy carbon MEMS for novel origami-styled 3D integrated intracortical and epicortical neural probes. *J. Micromechanics Microengineering* 28, 065009. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/aab061>
- Guillet, J., 1985. *Polymer photophysics and photochemistry : an introduction to the*

study of photoprocesses in macromolecules. Cambridge University Press, Cambridge.

- Hafriz, R.S.R.M., Nor Shafizah, I., Arifin, N.A., Maisarah, A.H., Salmiaton, A., Shamsuddin, A.H., 2022. Comparative, reusability and regeneration study of potassium oxide-based catalyst in deoxygenation reaction of WCO. *Energy Convers. Manag.* X 13, 100173. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100173>
- Han, W., Han, D., Chen, H., 2023. Pyrolysis of Waste Tires: A Review. *Polymers (Basel)*. 15. <https://doi.org/10.3390/polym15071604>
- Han, Y., Yu, J., Chen, T., Liu, X., Sun, L., 2021a. Study on catalytic pyrolysis mechanism of natural rubber (NR) over Zn-modified ZSM5 catalysts. *J. Energy Inst.* 94, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.09.005>
- Han, Y., Yu, J., Chen, T., Liu, X., Sun, L., 2021b. Study on catalytic pyrolysis mechanism of natural rubber (NR) over Zn-modified ZSM5 catalysts. *J. Energy Inst.* 94, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.09.005>
- He, M., Xiao, B., Liu, S., Hu, Z., Guo, X., Luo, S., Yang, F., 2010. Syngas production from pyrolysis of municipal solid waste (MSW) with dolomite as downstream catalysts. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 87, 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.11.005>
- Heinze, L.R., 1995. Decision Tree For Selection of Artificial Lift Method.
- Henk L. C. Meuzelaar, Haverkamp, J., Hileman, F.D., 1982. Pyrolysis mass spectrometry of recent and fossil biomaterials: compendium and atlas. Elsevier Scientific, Amsterdam.
- Hernández Santana, M., den Brabander, M., García, S., van der Zwaag, S., 2018. Routes to Make Natural Rubber Heal: A Review. *Polym. Rev.* 58, 585–609. <https://doi.org/10.1080/15583724.2018.1454947>
- Hu, G., Lin, S., Zhao, B., Pan, Q., 2021. Synthesis and characterization of natural rubber-based telechelic oligomers via olefin metathesis. *J. Appl. Polym. Sci.* 138, 49899. <https://doi.org/10.1002/app.49899>
- Idris, R., Chong, W.W.F., Ali, A., Idris, S., Tan, W.H., Md Salim, R., Mong, G.R., Chong, C.T., 2021. Pyrolytic oil with aromatic-rich hydrocarbons via microwave-induced in-situ catalytic co-pyrolysis of empty fruit bunches with

- a waste truck tire. *Energy Convers. Manag.* 244, 114502. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114502>
- Ilyin, S.O., Makarova, V. V., 2022. Bio-Oil: Production, Modification, and Application. *Chem. Technol. Fuels Oils* 58, 29–44. <https://doi.org/10.1007/s10553-022-01348-w>
- Istadi, I., Mabruro, U., Kalimantanini, B.A., Buchori, L., Anggoro, D.D., 2016. Reusability and stability tests of calcium oxide based catalyst (K₂O/CaO-ZnO) for transesterification of soybean oil to biodiesel. *Bull. Chem. React. Eng. Catal.* 11, 34–39. <https://doi.org/10.9767/bcrec.11.1.413.34-39>
- Itoh, Y., Gu, H.S., 2009. Prediction of Aging Characteristics in Natural Rubber Bearings Used in Bridges. *J. Bridg. Eng.* 14, 122–128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2009\)14:2\(122\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2009)14:2(122))
- Janus, M., 2019. DLC layers created using CVD techniques and their application, in: *Chemical Vapor Deposition for Nanotechnology*. IntechOpen, Rijeka.
- Jellinek, H.H.G., 1978. *Aspects of degradation and stabilization of polymers*. Elsevier Scientific Pub. Co, North Holland.
- Jenkins, G.M., K. Kawamura, 1977. Polymeric carbons, carbon fibre, glass and char. *J. Mol. Struct.* 36, 172. [https://doi.org/10.1016/0022-2860\(77\)85028-X](https://doi.org/10.1016/0022-2860(77)85028-X)
- Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., Chumsamrong, P., Ruksakulpiwat, Y., 2012. Effect of glycidyl methacrylate-grafted natural rubber on physical properties of polylactic acid and natural rubber blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 125, 745–754. <https://doi.org/10.1002/app.36263>
- Kabátek, Z., Gaš, B., Vohlídal, J., 1997. Gel permeation chromatography of polymers degrading randomly in the column Theoretical treatment and practical aspects. *J. Chromatogr. A* 786, 209–218. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(97\)00604-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(97)00604-3)
- Kaminsky, W., Mennerich, C., Zhang, Z., 2009. Feedstock recycling of synthetic and natural rubber by pyrolysis in a fluidized bed. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 85, 334–337. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.012>
- Kammert, J., Moon, J., Wu, Z., 2020. A review of the interactions between ceria and H₂ and the applications to selective hydrogenation of alkynes. *Chinese J.*

- Catal. 41, 901–914. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(19\)63509-6](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63509-6)
- Katzenberg, F., Tiller, J.C., 2016. Shape memory natural rubber. *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.* 54, 1381–1388. <https://doi.org/10.1002/polb.24040>
- Kenny, J.C., McBrierty, V.J., Rigbi, Z., Douglass, D.C., 1991. Carbon black filled natural rubber. 1. Structural investigations. *Macromolecules* 24, 436–443. <https://doi.org/10.1021/ma00002a015>
- Khan, I., Poh, B.T., 2011. Natural Rubber-Based Pressure-Sensitive Adhesives: A Review. *J. Polym. Environ.* 19, 793–811. <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0299-z>
- Khan, M.Z.H., Sultana, M., Al-Mamun, M.R., Hasan, M.R., 2016. Pyrolytic Waste Plastic Oil and Its Diesel Blend: Fuel Characterization. *J. Environ. Public Health* 2016, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2016/7869080>
- Khemthong, P., Wantala, K., 2023. Machine Translated by Google Peningkatan deoksigenasi minyak sawit jelantah dengan katalis CaO-MgO yang dimodifikasi oleh K₂O untuk bahan bakar nabati hijau Ratchadaphon Chueaphetr , Totsaporn Suwannaruang , Rattabal Khunphonoi CD , Machine Translated by 354.
- Korai, Y., Mochida, I., 1985. Preparation and properties of carbonaceous mesophase-i soluble mesophase produced from A240 and coal tar pitch. *Carbon N. Y.* 23, 97–103. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(85\)90203-9](https://doi.org/10.1016/0008-6223(85)90203-9)
- Kumar, M., Srivastava, N., Upadhyay, S.N., Mishra, P.K., 2023. Thermal degradation of dry kitchen waste: kinetics and pyrolysis products. *Biomass Convers. Biorefinery* 13, 2779–2796. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01309-z>
- Lahijani, P., Mohammadi, M., Mohamed, A.R., 2019. Catalytic CO₂ gasification of rubber seed shell-derived hydrochar: reactivity and kinetic studies. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 11767–11780. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04613-4>
- Learmonth, G.S., Nesbitt, A., Thwaite, D.G., 1969. Flammability of plastics I. relation between pyrolysis and burning. *Br. Polym. J.* 1, 149–153. <https://doi.org/10.1002/pi.4980010401>

- Li, G.-Y., Koenig, J.L., 2005. A Review of Rubber Oxidation. *Rubber Chem. Technol.* 78, 355–390. <https://doi.org/10.5254/1.3547888>
- Li, L., Quan, K., Xu, J., Liu, F., Liu, S., Yu, S., Xie, C., Ge, X., 2014. Preparation of basic mesoporous molecular sieves K₂O/Mg-MCM-41 and its catalytic performance on the cracking of soybean oils. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 110, 313–317. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.09.019>
- Li, S.-Q., Yao, Q., Chi, Y., Yan, J.-H., Cen, K.-F., 2004. Pilot-Scale Pyrolysis of Scrap Tires in a Continuous Rotary Kiln Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 43, 5133–5145. <https://doi.org/10.1021/ie030115m>
- Liu, D., Lou, B., Li, M., Qu, F., Yu, R., Yang, Y., Wu, C., 2016. Study on the Preparation of Mesophase Pitch from Modified Naphthenic Vacuum Residue by Direct Thermal Treatment. *Energy & Fuels* 30, 4609–4618. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00392>
- Lopez, G., Olazar, M., Aguado, R., Elordi, G., Amutio, M., Artetxe, M., 2010a. Translated by Google Pirolisis Vakum Ban Limbah dengan Mengumpankan Secara Terus-Menerus ke Conical Spouted Machine Translated by Google 8990–8997.
- Lopez, G., Olazar, M., Aguado, R., Elordi, G., Amutio, M., Artetxe, M., Bilbao, J., 2010b. Vacuum pyrolysis of waste tires by continuously feeding into a conical spouted bed reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49, 8990–8997. <https://doi.org/10.1021/ie1000604>
- Lu, J.-S., Chang, Y., Poon, C.-S., Lee, D.-J., 2020. Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review. *Bioresour. Technol.* 312, 123615. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123615>
- Ma, C., Wu, L., Zheng, L., Gan, R., Fan, Q., Song, Y., Shi, J., 2019. Preparation and capacitive performance of modified carbon black-doped porous carbon nanofibers. *J. Nanoparticle Res.* 21, 33. <https://doi.org/10.1007/s11051-019-4471-z>
- Manawi, Y., Ihsanullah, Samara, A., Al-Ansari, T., Atieh, M., 2018. A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method. *Materials (Basel)*. 11, 822. <https://doi.org/10.3390/ma11050822>

- Mattevi, C., Kim, H., Chhowalla, M., 2011. A review of chemical vapour deposition of graphene on copper. *J. Mater. Chem.* 21, 3324–3334. <https://doi.org/10.1039/C0JM02126A>
- McSweeney, G.P., 1968. Ozonolysis of natural rubber. *J. Polym. Sci. Part A-1 Polym. Chem.* 6, 2678–2680. <https://doi.org/10.1002/pol.1968.150060923>
- Melinda, A., 2022. Jurnal Review : Perbandingan Penggunaan Katalis K₂O dan Li₂O pada Pembuatan Biodiesel Berbasis Minyak Rapeseed. *Maj. Ilm. Swara Patra* 12, 50–58. <https://doi.org/10.37525/sp/2022-2/350>
- Mente, K.F., Gustave, G.P., 1985. Method for reducing the molecular weight of rubber latex. GB2183663A.
- Miao, Y., von Jouanne, A., Yokochi, A., 2021. Current Technologies in Depolymerization Process and the Road Ahead. *Polymers (Basel)*. 13, 449. <https://doi.org/10.3390/polym13030449>
- Mohammad, N., Mohamad Ishak, W.W., Mustapa, S.I., Ayodele, B.V., 2021. Natural Gas as a Key Alternative Energy Source in Sustainable Renewable Energy Transition: A Mini Review. *Front. Energy Res.* 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.625023>
- Montaudo, G., Scamporrino, E., Vitalini, D., Rapisardi, R., 1992. Fast atom bombardment mass spectrometric analysis of the partial ozonolysis products of poly(isoprene) and poly(chloroprene). *J. Polym. Sci. Part A Polym. Chem.* 30, 525–532. <https://doi.org/10.1002/pola.1992.080300402>
- Moore, A.W., 2001. Pyrolytic Carbon and Graphite, in: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier, pp. 7933–7937. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01428-5>
- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M.S., Thabet, A.A., Pawar, P.P., 2021. Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environ. Chem. Lett.* 19, 2057–2090. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>
- Muto, T., Asahara, M., Miyasaka, T., Asato, K., Uehara, T., Koshi, M., 2023. Methane pyrolysis characteristics for the practical application of hydrogen production system using permalloy plate catalyst. *Chem. Eng. Sci.* 274, 117931. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117931>

- Netopilík, M., Kubín, M., Vohlídal, J., Kössler, I., Kratochvíl, P., 1990. Degradation of polystyrene by shear stress in isopropylphenyl phosphate solution. *J. Appl. Polym. Sci.* 40, 1115–1130. <https://doi.org/10.1002/app.1990.070400704>
- Nie, S.Q., Chen, M.Q., Li, Q.H., 2022. Investigation of the depolymerization process of hydrothermal gasification natural rubber with ReaxFF-MD simulation and DFT computation. *J. Therm. Anal. Calorim.* 147, 9999–10011. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11321-8>
- Norrish, R.G.W., Bamford, C.H., 1937. Photo-decomposition of Aldehydes and Ketones. *Nature* 140, 195–196. <https://doi.org/10.1038/140195b0>
- Nun-anan, P., Wisunthorn, S., Pichaiyut, S., Nathaworn, C.D., Nakason, C., 2020. Influence of nonrubber components on properties of unvulcanized natural rubber. *Polym. Adv. Technol.* 31, 44–59. <https://doi.org/10.1002/pat.4746>
- Olaitan Kolawole, F., Kolade Kolawole, S., Bernardo Varela, L., Felix Owa, A., Antonio Ramirez, M., Paulo Tschiptschin, A., 2021. Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings for Automobile Applications, in: *Engineering Applications of Diamond*. IntechOpen, Rijeka. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95063>
- Osorio-Vargas, P., Campos, C.H., Torres, C.C., Herrera, C., Shanmugaraj, K., Bustamante, T.M., Diaz de Leon, J.N., Medina, F., Arteaga-Pérez, L.E., 2022. Catalytic pyrolysis of used tires on noble-metal-based catalysts to obtain high-value chemicals: Reaction pathways. *Catal. Today* 394–396, 475–485. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.06.029>
- Osorio-Vargas, P., Lick, I.D., Sobrevía, F., Correa-Muriel, D., Menares, T., Manrique, R., Casella, M.L., Arteaga-Pérez, L.E., 2021a. Thermal Behavior, Reaction Pathways and Kinetic Implications of Using a Ni/SiO₂ Catalyst for Waste Tire Pyrolysis. *Waste and Biomass Valorization* 12, 6465–6479. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01494-y>
- Osorio-Vargas, P., Menares, T., Lick, I.D., Casella, M.L., Romero, R., Jiménez, R., Arteaga-Pérez, L.E., 2021b. Tuning the product distribution during the catalytic pyrolysis of waste tires: The effect of the nature of metals and the reaction temperature. *Catal. Today* 372, 164–174.

- <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.10.035>
- Peterson, G.I., Noh, J., Bang, K.-T., Ma, H., Kim, K.T., Choi, T.-L., 2020. Mechanochemical Degradation of Brush Polymers: Kinetics of Ultrasound-Induced Backbone and Arm Scission. *Macromolecules* 53, 1623–1628. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b02721>
- Rial-Otero, R., Galesio, M., Capelo, J.-L., Simal-Gándara, J., 2009. A Review of Synthetic Polymer Characterization by Pyrolysis–GC–MS. *Chromatographia* 70, 339–348. <https://doi.org/10.1365/s10337-009-1254-1>
- Richter, H., Mamić, J., Morsy, M., Jähnig, K., Trautmann, C., Werner, A., 2017. Coke production from low rank coals, in: *Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production*. Elsevier, pp. 269–299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00012-7>
- Sadaka, F., Campistron, I., Laguerre, A., Pilard, J.F., 2012. Controlled chemical degradation of natural rubber using periodic acid: Application for recycling waste tyre rubber. *Polym. Degrad. Stab.* 97, 816–828. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.01.019>
- Saebea, D., Ruengrit, P., Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y., 2020. Gasification of plastic waste for synthesis gas production. *Energy Reports* 6, 202–207. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.043>
- Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F., Kolb, T., 2020. State of the Art of Hydrogen Production via Pyrolysis of Natural Gas. *ChemBioEng Rev.* 7, 150–158. <https://doi.org/10.1002/cben.202000014>
- Sevilla, M., Díez, N., Fuertes, A.B., 2021. More Sustainable Chemical Activation Strategies for the Production of Porous Carbons. *ChemSusChem* 14, 94–117. <https://doi.org/10.1002/cssc.202001838>
- Sharma, S., 2018. Glassy Carbon: A Promising Material for Micro- and Nanomanufacturing. *Materials (Basel)*. 11, 1857. <https://doi.org/10.3390/ma11101857>
- Sharma, S., Shyam Kumar, C.N., Korvink, J.G., Kübel, C., 2018. Evolution of Glassy Carbon Microstructure: In Situ Transmission Electron Microscopy of the Pyrolysis Process. *Sci. Rep.* 8, 16282. <https://doi.org/10.1038/s41598-018->

34644-9

- Shi, J., Ma, C., 2019. Preparation and characterization of spinnable mesophase pitches: A review. *Carbon N. Y.* 153, 804. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.06.091>
- Shimanoë, H., Mashio, T., Nakabayashi, K., Inoue, T., Hamaguchi, M., Miyawaki, J., Mochida, I., Yoon, S.-H., 2020. Manufacturing spinnable mesophase pitch using direct coal extracted fraction and its derived mesophase pitch based carbon fiber. *Carbon N. Y.* 158, 922–929. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.11.082>
- Solanky, S.S., Campistron, I., Laguerre, A., Pilard, J.-F., 2005. Metathetic Selective Degradation of Polyisoprene: Low-Molecular-Weight Telechelic Oligomer Obtained from Both Synthetic and Natural Rubber. *Macromol. Chem. Phys.* 206, 1057–1063. <https://doi.org/10.1002/macp.200400416>
- Song, B., Collard, F.-X., Torr, K., Ranjith Vellacheri, Linda Sandström, A.-C.J., Venderbosch, R., 2022. Electrochemical transformations of fast pyrolysis bio-oils and related bio-oil compounds. IEA Bioenergy, Scion.
- Sowmya Dhanalakshmi, C., Madhu, P., 2021. Biofuel production of neem wood bark (*Azadirachta indica*) through flash pyrolysis in a fluidized bed reactor and its chromatographic characterization. *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 43, 428–443. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1624893>
- Stianto, 2020. Sifat Fisika dan Kimia, serta Pembuatan Alkena & Alkadiena.
- Striegel, A.M., 2008. Observations Regarding On-Column, Flow-Induced Degradation During SEC Analysis. *J. Liq. Chromatogr. Relat. Technol.* 31, 3105–3114. <https://doi.org/10.1080/10826070802480024>
- Subramaniam, A., 1987. Natural Rubber, in: *Rubber Technology*. Springer US, Boston, MA, pp. 179–208. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7823-9_6
- Sun, L., Wu, Z., Kou, J., Chun, Y., Wang, Y., Zhu, J., Zou, Z., 2006. Catalytic performance of supported KNO₃ solid bases for methylation of cyclopentadiene. *Chinese J. Catal.* 27, 725–731. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(06\)60039-9](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(06)60039-9)

- Tanaka, Y., Sakaki, T., Kawasaki, A., Hayashi, M., Kanamaru, E., Shibata, K., 1999. Production process of depolymerized natural rubber.
- Thambiyapillai, S., Ramanujam, M., 2021. An experimental investigation and aspen hysys simulation of waste polystyrene catalytic cracking process for the gasoline fuel production. *Int. J. Renew. Energy Dev.* 10, 891–900. <https://doi.org/10.14710/IJRED.2021.33817>
- Thumwong, A., Poltabtim, W., Kerdsang, P., Saenboonruang, K., 2021. Roles of Chitosan as Bio-Fillers in Radiation-Vulcanized Natural Rubber Latex and Hybrid Radiation and Peroxide-Vulcanized Natural Rubber Latex: Physical/Mechanical Properties under Thermal Aging and Biodegradability. *Polymers (Basel)*. 13, 3940. <https://doi.org/10.3390/polym13223940>
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., Boguta, P., 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* 19, 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Totong, S., Daorattanachai, P., Laosiripojana, N., Idem, R., 2020. Catalytic depolymerization of alkaline lignin to value-added phenolic-based compounds over Ni/CeO₂-ZrO₂ catalyst synthesized with a one-step chemical reduction of Ni species using NaBH₄ as the reducing agent. *Fuel Process. Technol.* 198, 106248. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106248>
- Treib, C., Loos, K., Johlitz, M., Lion, A., 2022. Ozone ageing: experimental methods on pristine and protected natural rubber. *Contin. Mech. Thermodyn.* 34, 1563–1577. <https://doi.org/10.1007/s00161-022-01148-x>
- Uebe, J., Kryzevicius, Z., Majauskienė, R., Dulevicius, M., Kosychova, L., Zukauskaitė, A., 2022. Use of polypropylene pyrolysis oil in alternative fuel production. *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.* 40, 1220–1230. <https://doi.org/10.1177/0734242X211068243>
- Uline, M.J., Corti, D.S., 2006. The ammonia synthesis reaction: An exception to the Le Châtelier principle and effects of nonideality. *J. Chem. Educ.* 83, 138–144. <https://doi.org/10.1021/ed083p138>
- Varghese, N., Varghese, S., Thomas, S., 2023. Radiation Processing of Natural

- Rubber Latex, in: *Applications of High Energy Radiations*. Springer, Singapore, pp. 279–315. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9048-9_9
- Vohlídal, J., 2021. Polymer degradation: a short review. *Chem. Teach. Int.* 3, 213–220. <https://doi.org/10.1515/cti-2020-0015>
- Vohlídal, J., 1994. Determination of the rate constant of random degradation from the time dependence of weight-average and z-average degrees of polymerization. *Macromol. Rapid Commun.* 15, 765–769. <https://doi.org/10.1002/marc.1994.030151003>
- Vomero, M., Mondragon, N.C., Stieglitz, T., 2019. Electrochemical Characterization and Surface Analysis of Activated Glassy Carbon Neural Electrodes, in: *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, pp. 3923–3926. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856997>
- Wampler, T.P., 2007. *Applied Pyrolysis Handbook*. CRC Press.
- Wang, G., Dai, Y., Yang, H., Xiong, Q., Wang, K., Zhou, J., Li, Y., Wang, S., 2020. A Review of Recent Advances in Biomass Pyrolysis. *Energy & Fuels* 34, 15557–15578. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03107>
- Wang, J., Li, W., Wang, H., Ogunbiyi, A.T., Dou, X., Ma, Q., 2020. Effects of the novel catalyst Ni-S₂O₈²⁻-K₂O/TiO₂ on efficient lignin depolymerization. *RSC Adv.* 10, 8558–8567. <https://doi.org/10.1039/c9ra10675h>
- Wang, X., Qin, G., Chen, M., Wang, J., 2016. Microwave-assisted pyrolysis of cotton stalk with additives. *BioResources* 11, 6125–6136. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.6125-6136>
- Warren-Thomas, E., Dolman, P.M., Edwards, D.P., 2015. Increasing Demand for Natural Rubber Necessitates a Robust Sustainability Initiative to Mitigate Impacts on Tropical Biodiversity. *Conserv. Lett.* 8, 230–241. <https://doi.org/10.1111/conl.12170>
- Wen, Z., Guo, J., Li, Y., Huang, Q., 2023. Molecular Dynamics Simulation of Waste Tire Pyrolysis at High Temperature. *Int. J. Environ. Res.* 17, 39. <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00531-z>
- Williams, P.T., 2013. Pyrolysis of waste tyres: A review. *Waste Manag.* 33, 1714–

1728. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.003>
- Williams, P.T., Besler, S., Taylor, D.T., 1990. The pyrolysis of scrap automotive tyres. *Fuel* 69, 1474–1482. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(90\)90193-T](https://doi.org/10.1016/0016-2361(90)90193-T)
- Williams, P.T., Bottrill, R.P., Cunliffe, A.M., 1998. Combustion of Tyre Pyrolysis Oil. *Process Saf. Environ. Prot.* 76, 291–301. <https://doi.org/10.1205/095758298529650>
- Williams, P.T., Brindle, A.J., 2003. Fluidised bed pyrolysis and catalytic pyrolysis of scrap tyres. *Environ. Technol.* 24, 921–929. <https://doi.org/10.1080/09593330309385629>
- Wisetkhamchai, K., Patthaveekongka, W., Arayapranee, W., 2023. Study on Degradation of Natural Rubber Latex Using Hydrogen Peroxide and Sodium Nitrite in the Presence of Formic Acid. *Polymers (Basel)*. 15, 1031. <https://doi.org/10.3390/polym15041031>
- Yahaya, M., Ramli, I., Muhamad, E.N., Ishak, N.S., Nda-Umar, U.I., Taufiq-Yap, Y.H., 2020. K₂O doped dolomite as heterogeneous catalyst for fatty acid methyl ester production from palm oil. *Catalysts* 10, 1–17. <https://doi.org/10.3390/catal10070791>
- Yamashita, S., Takahashi, S., 2020. Molecular Mechanisms of Natural Rubber Biosynthesis. *Annu. Rev. Biochem.* 89, 821–851. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-013118-111107>
- Yu, J., Liu, S., Cardoso, A., Han, Y., Bikane, K., Sun, L., 2019. Catalytic pyrolysis of rubbers and vulcanized rubbers using modified zeolites and mesoporous catalysts with Zn and Cu. *Energy* 188, 116117. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116117>
- Yu, S., Cao, X., Li, L., Liu, S., Wu, Q., 2018. Catalytic cracking of rubber seed oil using basic mesoporous molecular sieves K₂O/MeO-SBA-15 (Me = Ca, Mg or Ba) as heterogeneous catalysts for the production of liquid hydrocarbon fuels. *Catal. Letters* 148, 3787–3796. <https://doi.org/10.1007/s10562-018-2555-5>
- Zahir Hussain, A., Santhoshkumar, A., Ramanathan, A., 2020. Assessment of pyrolysis waste engine oil as an alternative fuel source for diesel engine. *J.*

- Therm. Anal. Calorim. 141, 2277–2293. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09516-y>
- Zakharyan, E.M., Maksimov, A.L., 2021. Tire Pyrolysis. Process Features and Composition of Reaction Products. *Russ. J. Appl. Chem.* 94, 1351–1388. <https://doi.org/10.1134/S1070427221100013>
- Zakhurdaeva, A., Dietrich, P.-I., Hölscher, H., Koos, C., Korvink, J., Sharma, S., 2017. Custom-Designed Glassy Carbon Tips for Atomic Force Microscopy. *Micromachines* 8, 285. <https://doi.org/10.3390/mi8090285>
- Zeng, L., Wang, Y., Mou, J., Liu, F., Yang, C., Zhao, T., Wang, X., Cao, J., 2020. Promoted catalytic behavior over γ -Al₂O₃ composited with ZSM-5 for crude methanol conversion to dimethyl ether. *Int. J. Hydrogen Energy* 45, 16500–16508. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.115>
- Zhang, F., Gong, Z., Cai, W., Qian, H. jun, Lu, Z. yuan, Cui, S., 2022. Single-chain mechanics of cis-1,4-polyisoprene and polysulfide. *Polymer (Guildf)*. 240, 124473. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124473>
- Zhang, K., Cui, X., Feng, T., Zhang, Y., Liu, H., 2017. Solubilities of Diethyl Phthalate, Dicyclopentadiene, and Styrene in Ionic Liquid 1-Ethyl-3-methylimidazolium Acetate. *J. Chem. Eng. Data* 62, 857–863. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00901>
- Zhang, X., Wang, T., Ma, L., Chang, J., 2008. Vacuum pyrolysis of waste tires with basic additives. *Waste Manag.* 28, 2301–2310. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.009>
- Zhang, Y., Ji, G., Chen, C., Wang, Y., Wang, W., Li, A., 2020. Liquid oils produced from pyrolysis of plastic wastes with heat carrier in rotary kiln. *Fuel Process. Technol.* 206, 106455. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106455>
- Zhao, B., Li, H., Wang, H., Hu, Y., Gao, J., Zhao, G., Ray, M.B., Xu, C.C., 2021. Synergistic effects of metallic Fe and other homogeneous/heterogeneous catalysts in hydrothermal liquefaction of woody biomass. *Renew. Energy* 176, 543–554. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.115>
- Zheng, T., Zheng, X., Zhan, S., Zhou, J., Liao, S., 2021. Study on the ozone aging mechanism of Natural Rubber. *Polym. Degrad. Stab.* 186, 109514.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109514>

Zhibo, Z., Nishio, S., Morioka, Y., Ueno, A., Ohkita, H., Tochihara, Y., Mizushima, T., Kakuta, N., 1996. Thermal and chemical recycle of waste polymers. *Catal. Today* 29, 303–308. [https://doi.org/10.1016/0920-5861\(95\)00296-0](https://doi.org/10.1016/0920-5861(95)00296-0)