

**SINTESIS KATALIS MAGNETIT TERMODIFIKASI
EKSTRAK KULIT BUAH NAGA (*Hylocereus polyrhizus*) DAN
PENERAPANNYA DALAM PROSES PIROLISIS LIMBAH
*STYROFOAM***

**Skripsi
Untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat Sarjana Kimia**



**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

HALAMAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1436/Un.02/DST/PP.00.9/08/2024

Tugas Akhir dengan judul : SINTESIS KATALIS MAGNETIT TERMODIFIKASI EKSTRAK KULIT BUAH NAGA (*Hylocereus polyrhizus*) DAN PENERAPANNYA DALAM PROSES PIROLISIS LIMBAH STYROFOAM

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : DEDE SISKI APRILIANI
Nomor Induk Mahasiswa : 20106030030
Telah diujikan pada : Kamis, 08 Agustus 2024
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR

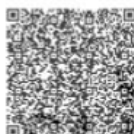


Valid ID: 66bde0474b464

Ketua Sidang

Prof. Dr. Maya Rahmayanti, S.Si. M.Si.

SIGNED



Valid ID: 66bb0d4476f17

Penguji I

Gunawan Budi Susilo, M.Eng.

SIGNED

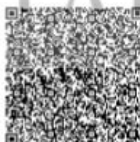


Valid ID: 66b5f582ba464

Penguji II

Endaraji Sedyadi, M.Sc.

SIGNED



Valid ID: 66b6434d7d4a5

Yogyakarta, 08 Agustus 2024

UIN Sunan Kalijaga

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.

SIGNED

PERSETUJUAN SKRIPS/TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi / Tugas Akhir

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

Assalamu 'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Dede Siska Apriliani

NIM : 20106030030

Judul Skripsi : Sintesis Katalis Magnetit Termodifikasi Ekstrak Kulit Buah Naga
(*Hylocereus polyrhizus*) dan Penerapannya dalam Proses Pirolisis Limbah
Styrofoam.

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam Program Studi Kimia.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqasyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu 'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 22 Juli 2024

Pembimbing

Prof. Dr. Maya Rahmayanti, S.Si., M.Si.

NIP: 19810627 200604 2 003

HALAMAN PERNYATAAN**SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Dede Siska Apriliani
NIM : 20106030030
Jurusan : Kimia
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **“Sintesis Katalis Magnetit Termodifikasi Ekstrak Kulit Buah Naga (*Hylocereus polyrhizus*) dan Penerapannya dalam Proses Pirolisis Limbah Styrofoam”** merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjana di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 23 Juli 2024



Dede Siska Apriliani
NIM 20106030030

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN MOTO

*“...Aku (Allah) sesuai prasangka hamba-Ku. Aku bersamanya ketika ia
mengingat-Ku...”*

(HR. Bukhari no 6970 dan Muslim no. 2675)

“You can if you think you can”

(Anonim)



KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, Puji syukur kehadiran Allah swt. yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Sintesis Katalis Magnetit Termodifikasi Ekstrak Kulit Buah Naga (*Hylocereus polyrhizus*) dan Penerapannya dalam Proses Pirolisis Limbah *Styrofoam*” sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Strata 1 (S1) pada Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Selama melakukan proses penulisan skripsi, penulis mendapatkan banyak bantuan, dorongan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak terkait. Ucapan terima kasih tersebut secara khusus penulis sampaikan kepada:

1. Ibu Dr. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Ibu Dr. Imelda Fajriyati, M.Si. selaku Ketua Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga.
3. Ibu Prof. Dr. Maya Rahmayanti, M. Si. selaku dosen Pembimbing skripsi yang secara ikhlas dan sabar memberikan motivasi dan dukungan yang tiada henti kepada penulis serta yang bersedia meluangkan waktunya untuk membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Seluruh Dosen Program Studi Kimia yang telah membagikan ilmunya dari awal perkuliahan hingga akhir.
5. Segenap Pranata Laboratorium Pendidikan (PLP) Laboratorium Kimia dan Teknik Industri UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah medampingi dan membantu selama pelaksanaan penelitian.
6. Kedua orang tua dan seluruh keluarga yang telah mendukung, berusaha serta memberikan do'a terbaik kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan studi.
7. Teman terdekat penulis Nada Hamida dan Mutik Ulya Audita yang telah bersedia menjadi partner dalam segala hal, menghibur, memberikan motivasi dan dukungan dari awal hingga akhir, serta kepada seluruh teman-teman “Hydroxyl” yang telah menemani penulis selama masa perkuliahan.
8. Fadhila Asyfi 'Indana, yang telah bersedia meluangkan waktunya mendengarkan cerita, memberikan *support*, memberikan do'a yang terbaik, serta menemani penulis selama proses penulisan skripsi.
9. Teman-teman satu bimbingan, Addina, Zaka, Siska, dan Intan yang telah membantu dan selalu memberikan dukungan satu sama lain.
10. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu selama proses penulisan skripsi.

Yogyakarta, 23 Juli 2024

Penulis

HALAMAN PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim, dengan izin Allah swt. skripsi ini penulis persembahkan kepada:

Diri sendiri, kedua orang tua serta seluruh keluarga yang telah mendukung dan membantu penulis hingga perkuliahan selesai. Skripsi ini menjadi salah satu bukti kasih sayang dan perjuangan penulis kepada mereka.

Skripsi ini juga penulis persembahkan kepada almamater tecinta,
Program Studi Kimia
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERSETUJUAN SKRIPS/TUGAS AKHIR.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN MOTO	v
KATA PENGANTAR	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
INTISARI.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Batasan Masalah	6
C. Rumusan Masalah	7
D. Tujuan Penelitian.....	8
E. Manfaat Penelitian.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	9
A. Tinjauan Pustaka	9
B. Landasan teori.....	13
1. <i>Styrofoam</i>	13
2. Pirolisis katalitik	14
3. Magnetit	16
4. Kulit buah naga (<i>Hylocereus polyrhizus</i>)	18
5. Metode kopresipitasi.....	19
6. Bahan bakar minyak	20
7. Parameter uji minyak	22
C. Kerangka Berpikir dan Hipotesis Penelitian	25
BAB III METODE PENELITIAN.....	29
A. Waktu dan Tempat Penelitian	29
B. Alat-alat Penelitian	29
C. Bahan Penelitian	29
D. Cara Kerja Penelitian.....	30
1. Proses sintesis	30
2. Karakterisasi magnetit ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$).....	31
4. Proses perhitungan konversi minyak	33
5. Analisis <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i>	33
6. Pengujian Kualitas Produk Minyak	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
A. Sintesis dan Karakterisasi Katalis Magnetit ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$)	37
1. Preparasi dan ekstraksi kulit buah naga	37
2. Sintesis katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$	38
3. Karakterisasi katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$	41

B. Pirolisis Katalitik Limbah <i>Styrofoam</i> Menggunakan Fe_3O_4 -HP	46
1. Pirolisis katalitik limbah <i>styrofoam</i>	47
2. Uji Karakteristik Produk Minyak Hasil Pirolisis	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	60
A. Kesimpulan	60
B. Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN	69
CURRICULUM VITAE	83



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Tabel perbandingan ukuran kristal yang diperoleh dari ekstrak tanaman yang berbeda.....	45
Tabel 4.2 Hasil produk minyak pirolisis	49
Tabel 4.3 Kondisi reaksi pirolisis limbah <i>styrofoam</i>	49
Tabel 4.4 Produk minyak, gas, dan arang dari pirolisis menggunakan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$	52
Tabel 4.5 Komposisi produk minyak yang diperoleh dari pirolisis limbah <i>styrofoam</i> dengan massa katalis 0,75 gram.	55
Tabel 4.6 Sifat fisik dan sifat kimia minyak hasil pirolisis menggunakan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$ sebanyak 0,75	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Penggunaan katalis dalam reaktor (Eze, <i>et al.</i> , 2021)	16
Gambar 2.2 Struktur kristal magnetit (Fe_3O_4).....	17
Gambar 2.3 Diagram Pourbaix besi oksida dalam air.....	18
Gambar 3.1 Desain alat reaktor pirolisis (Ifa, <i>et al.</i> , 2020).....	32
Gambar 3.2 Alat uji cawan terbuka <i>Cleveland</i> (Roni, 2020).....	35
Gambar 4.1 Ilustrasi mekanisme reaksi sintesis magnetit (Fe_3O_4 -HP).....	40
Gambar 4.2 Spektrum FTIR (a) Fe_3O_4 murni, (b) ekstrak kulit buah naga (HP) dan (c) Fe_3O_4 -HP	41
Gambar 4.3 Difraktogram XRD magnetit (Fe_3O_4 -HP).....	44
Gambar 4.4 Mekanisme reaksi pirolisis katalitik limbah Styrofoam.....	48
Gambar 4.5 Kromatogram GC-MS minyak hasil pirolisis	53
Gambar 4.6 Komponen utama dalam minyak hasil pirolisis	54
Gambar 4.7 Grafik perbandingan minyak hasil pirolisis dengan standar solar	59

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Difraktogram XRD dan Perhitungan ukuran kristal.....	69
Lampiran 2. Data Pirolisis	70
Lampiran 3. Perhitungan rendemen produk hasil pirolisis	71
Lampiran 4. Perhitungan densitas untuk minyak hasil pirolisis	77
Lampiran 5. Perhitungan nilai viskositas kinematic	78
Lampiran 6. Perhitungan nilai kalor.....	79
Lampiran 7. Dokumentasi Penelitian.....	80



INTISARI

Sintesis Katalis Magnetit Termomodifikasi Ekstrak Kulit Buah Naga (*Hylocereus polyrhizus*) dan Penerapannya dalam Proses Pirolisis Limbah Styrofoam.

Oleh:

Dede Siska Apriliani

Pembimbing:

Prof. Dr. Maya Rahmayanti, M.Si.

Jumlah limbah plastik khususnya *styrofoam* terus meningkat dalam 10-15 tahun terakhir, sehingga diperlukan pengolahan yang efisien untuk permasalahan tersebut. Pirolisis limbah *styrofoam* dengan katalis magnetit termomodifikasi ekstrak kulit buah naga (*Hylocereus polyrhizus*) telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik gugus fungsi dan kristalinitas katalis magnetit termomodifikasi ekstrak kulit buah naga ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$) dan pengaruh penggunaan katalis tersebut terhadap kualitas minyak hasil pirolisis berdasarkan parameter densitas, viskositas, titik nyala dan nilai kalor serta komposisi kimia minyak hasil pirolisis berdasarkan analisis GC-MS. Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$ dilakukan menggunakan metode kopresipitasi terbalik. Hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan spektroskopi *fourier transformer infrared* (FTIR) dan *X-ray diffraction* (XRD). Hasil FTIR menunjukkan serapan khas Fe-O pada bilangan gelombang $587,64\text{ cm}^{-1}$ dan $447,49\text{ cm}^{-1}$, sedangkan hasil analisis XRD menunjukkan lima difraksi utama yaitu $30,24^\circ$; $35,47^\circ$; $43,15^\circ$; $57,30^\circ$; dan $62,67^\circ$ dengan rata-rata ukuran kristal sebesar $5,08\text{ nm}$. Pengaplikasian katalis magnetit dalam proses pirolisis dilakukan dalam lima variasi, yaitu 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; dan 1,25 g. Pirolisis dengan massa katalis 0,75 g menunjukkan hasil minyak paling optimal dengan perolehan rendemen sebanyak 60,95%. Karakterisasi minyak hasil pirolisis berdasarkan parameter densitas, viskositas, titik nyala dan nilai kalor masing-masing memiliki nilai sebesar 19 cP ($2,19\text{ mm}^2/\text{s}$), $867,7\text{ kg/m}^3$, 39°C dan $10.077,7718\text{ kJ/kg}$ ($42,19\text{ MJ/kg}$). Analisis GC-MS minyak hasil pirolisis limbah *styrofoam* menunjukkan adanya tiga komponen senyawa terbesar yaitu stirena, 2-butenil-benzenal, dan 2-pentenal. Berdasarkan hasil tersebut menunjukkan bahwa katalis magnetit berhasil disintesis dengan ukuran kristal rata-rata $5,08\text{ nm}$ dan memiliki gugus Fe-O yang khas. Penggunaan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$ pada massa 0,75 g dalam pirolisis limbah *styrofoam* menghasilkan minyak dengan kualitas optimal yang ditunjukkan oleh rendemen sebesar 60,95% serta analisis GC-MS dan analisis sifat fisik kimia yang mendekati standar bahan bakar solar.

Kata Kunci: *styrofoam*, magnetit, ekstrak kulit buah naga, pirolisis, bahan bakar.

ABSTRACT

Synthesis of Modified Magnetite Catalyst Using Dragon Fruit Peel Extract (*Hylocereus polyrhizus*) and Its Application in the Pyrolysis Process of Styrofoam Waste.

By:

Dede Siska Apriliani

Supervisor:

Prof. Dr. Maya Rahmayanti, M.Si.

Plastic waste particularly Styrofoam, has continuously increased over the past 10-15 years, necessitating efficient processing solutions. Pyrolysis of styrofoam waste using magnetite catalyst modified with dragon fruit peel extract (*Hylocereus polyrhizus*) has been conducted. This study aims to determine the characteristics of functional groups and crystallinity of the magnetite catalyst modified with dragon fruit peel extract (Fe₃O₄-HP) and the effect of using this catalyst on the quality of pyrolysis oil based on parameters such as density, viscosity, flash point, calorific value, and chemical composition of the pyrolysis oil based on GC-MS analysis. The synthesis of Fe₃O₄-HP was carried out using the reverse coprecipitation method. The synthesized product was characterized using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and X-ray diffraction (XRD). FTIR results showed the characteristic absorption of Fe-O at wavenumbers 587,64 cm⁻¹ and 447,49 cm⁻¹, while XRD analysis results showed five prominent diffraction peaks at 30,24°; 35,60°; 43,15°; 57,30°; and 62,83° with an average crystal size of 5,08 nm. The application of the magnetite catalyst in the pyrolysis process was carried out in five variations: 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; and 1,25 g. Pyrolysis with 0,75 g catalyst mass showed the most optimal oil yield with a yield of 60,95%. Characterization of the pyrolysis oil based on density, viscosity, flash point, and calorific value parameters yielded values of 19 cP (2,19 mm²/s), 867,7 kg/m³, 39 °C, and 10.077,7718 calories/gram (42,19 MJ/kg), respectively. GC-MS analysis of the pyrolysis oil from styrofoam waste showed three major components styrene, 2-butenyl-benzene, and 2-pentenal. Based on these results, the magnetite catalyst was successfully synthesized with an average crystal size of 5,08 nm and characteristic Fe-O functional groups. The use of 0,75 g of Fe₃O₄-HP catalyst in the pyrolysis of styrofoam waste produced oil with optimal quality, indicated by a yield of 60,95%, as well as GC-MS analysis and physicochemical properties that closely align with standard diesel fuel.

Keyword: Styrofoam, magnetite, dragon fruit peel extract, pyrolysis, fuel.

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Plastik merupakan salah satu bahan yang umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari (Shoaib, *et al.*, 2021). Hal tersebut menyebabkan produksi plastik di seluruh dunia terus meningkat, sampai pada tahun 2021 produksi plastik mencapai 390,7 Mt (Europe, 2022). Penggunaan plastik meningkat sangat cepat, terutama dalam industri makanan karena separuh dari hasil produksi plastik banyak digunakan sebagai kemasan. Hal itu menyebabkan timbulnya berbagai masalah. Salah satu masalah yang ditimbulkan adalah meningkatnya limbah plastik hingga 50% dalam 10-15 tahun terakhir (Mishra & Mohanty, 2020). Salah satu jenis plastik yang sering digunakan sebagai kemasan makanan adalah jenis plastik polistirena (PS) (Nisar, *et al.*, 2019).

Polistirena merupakan jenis polimer termoplastik yang terbuat dari monomer stirena. Berdasarkan data yang diperoleh dari *Plastics Europe Enabling a Sustainable Future*, produksi polistirena mencapai 5,3% dari seluruh plastik yang berhasil diproduksi pada tahun 2021. Polistirena dapat berbentuk padat atau berbusa, salah satu jenis polystyrene yang dikenal luas adalah *styrofoam* (Czajczynska, *et al.*, 2017). *Styrofoam* merupakan jenis PS yang banyak digunakan oleh masyarakat sebagai pembungkus makanan, penyangga barang elektronik dan sebagainya. Sifat *styrofoam* yang ringan dan lembut menjadi alasan bahan ini banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Permasalahan muncul ketika *styrofoam* yang sudah tidak terpakai menjadi limbah dan dibuang begitu saja tanpa

pengolahan. Limbah PS termasuk *styrofoam* tidak terdegradasi dengan cepat, membutuhkan waktu selama 200 tahun untuk terdegradasi sepenuhnya (Anom, 2021). Limbah-limbah plastik yang dibuang biasanya masuk ke tempat pembuangan akhir atau dibuang ke laut, yang kemudian membentuk mikroplastik dan memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, satwa liar dan kesehatan manusia (Xu & Scharder, 2022).

Salah satu solusi yang dapat dipertimbangkan oleh beberapa negara untuk mengatasi masalah limbah plastik adalah dengan melarang penggunaan beberapa produk plastik tertentu. Namun, larangan ini mungkin hanya efektif untuk produk non-esensial seperti sedotan, sedangkan untuk produk lainnya bahan plastik masih diperlukan (Jeswani, *et al.*, 2021). Oleh karena itu, selain menerapkan larangan diperlukan alternatif lain seperti penerapan prinsip ekonomi sirkular. Prinsip utama dari ekonomi sirkular adalah pencegahan, penggunaan kembali, daur ulang, dan pemulihan limbah (Payne, *et al.*, 2019). Daur ulang merupakan prinsip ekonomi sirkular yang paling banyak digunakan untuk pengelolaan limbah plastik yang telah habis masa pakainya. Daur ulang dapat menghindari pembuangannya dan mengurangi penggunaan bahan baru (Jeswani, *et al.*, 2021).

Plastik dapat di daur ulang menggunakan teknologi daur ulang secara mekanik atau kimia. Proses daur ulang mekanik terdiri dari beberapa tahap yaitu pemilahan, pencucian, pencacahan, dan peleburan limbah plastik untuk menghasilkan produk plastik baru (Ragaert, *et al.*, 2017). Kekurangan dari proses daur ulang mekanik adalah dapat menurunkan sifat mekanik dari bahan plastik yang dihasilkan (Jeswani, *et al.*, 2021). Limbah plastik yang diproses melalui daur ulang

mekanik biasanya menghasilkan produk sekunder yang kurang bernilai. Selain itu, cara ini tidak efisien untuk plastik yang sulit di daur ulang secara mekanik seperti plastik berlapis-lapis yang digunakan untuk kemasan (Singh, *et al.*, 2017).

Daur ulang secara kimia merupakan proses yang mengubah limbah plastik menjadi bahan baku yang lebih bernilai. Bahan baku yang dihasilkan dari proses daur ulang secara kimia dapat digunakan untuk memproduksi plastik murni tanpa penurunan kualitas dan tanpa batasan jenis penggunaan (Coates & Getzler, 2020). Salah satu proses daur ulang secara kimia yang telah banyak digunakan adalah pirolisis (Solis & Silveira, 2020). Pirolisis merupakan suatu proses penguraian senyawa organik secara termal dan tidak memerlukan oksigen saat reaksi. Pirolisis dapat menghasilkan tiga produk utama yaitu arang padat, minyak serta gas organik dan anorganik (Amit, *et al.*, 2022). Selain menjadi solusi untuk pengolahan limbah plastik yang menumpuk, proses pirolisis juga menjadi solusi untuk permasalahan yang timbul mengenai peningkatan permintaan energi dengan menipisnya sumber energi fosil konvensional. Hal tersebut dikarenakan 85% dari konsumsi energi dunia berasal dari bahan bakar fosil, sedangkan cadangan bahan bakar fosil seperti gas alam dan minyak bumi diperkirakan akan habis dalam waktu dekat. Oleh karena itu, penggunaan metode pirolisis dalam pengolahan limbah plastik dianggap menjadi salah satu strategi alternatif yang dapat digunakan (Xu & Scharder, 2022).

Peningkatan kualitas produk hasil pirolisis dapat dilakukan dengan penggunaan katalis (Park, *et al.*, 2018). Katalis dapat mempercepat reaksi pirolisis, menghasilkan produk yang lebih berkualitas dan meningkatkan nilai bahan bakar yang dihasilkan serta penggunaan katalis dalam proses pirolisis juga dapat

menurunkan suhu yang diperlukan sehingga proses pirolisis dapat berjalan pada suhu yang lebih rendah tetapi hasil yang diperoleh lebih besar, sedangkan pirolisis termal tanpa menggunakan katalis suhu yang digunakan selama proses pirolisis terhitung lebih tinggi dan minyak yang diperoleh lebih sedikit (Anom, 2021). Maka dari itu, pirolisis katalitik dianggap lebih efisien jika dibandingkan dengan pirolisis termal (Shoaib, *et al.*, 2021). Salah satu katalis yang dapat digunakan dalam proses pirolisis adalah jenis katalis oksida logam. Katalis oksida logam dapat digunakan untuk pengolahan air tanah, air permukaan sebagai penghilang unsur-unsur beracun dan lebih banyak digunakan untuk mendegradasi produk akhir dekomposisi non-biodegradable (Din, *et al.*, 2019). Magnetit merupakan salah satu jenis katalis oksida logam, penggunaan katalis magnetit dalam proses pirolisis dapat membantu mengurangi pembentukan produk samping yang tidak diinginkan dalam proses pirolisis dan menunjukkan kinerja yang baik dalam menghasilkan produk minyak hasil pirolisis dengan menghasilkan lebih banyak senyawa aromatik monosiklik dibandingkan dengan senyawa aromatik polisiklik (Oyeleke, *et al.*, 2021).

Katalis magnetit dapat disintesis melalui beberapa metode seperti metode kimia, elektrokimia, dan fotokimia. Namun, metode-metode tersebut dalam prosesnya melibatkan konsumsi energi tinggi dan biaya operasional yang tinggi (Kiran, *et al.*, 2021). Kelemahan-kelemahan tersebut menjadi alasan metode sintesis hijau dilakukan. Metode sintesis hijau dapat dilakukan pemanfaatan tanaman, bakteri, fungi dan ganggang sebagai *capping agent* atau penstabil (Kiran, *et al.*, 2021). Sintesis katalis magnetit termodifikasi ekstrak tanaman relatif lebih murah, tidak beracun dan ramah lingkungan. Selain itu, ekstrak tanaman dapat

menghasilkan katalis logam yang lebih stabil dan lebih cocok untuk produksi berkelanjutan dalam jumlah besar (Jegadeesan, *et al.*, 2019).

Penelitian terkait penggunaan katalis magnetit (Fe_3O_4) yang termodifikasi ekstrak tanaman untuk proses pirolisis telah dilakukan oleh Din, *et al.* (2018) katalis berhasil disintesis dari ekstrak kaktus barel (*Ferocactus echidne*) dan menghasilkan konversi produk minyak yang lebih baik jika dibandingkan dengan proses tanpa menggunakan katalis. Konsentrasi katalis yang digunakan dalam proses pirolisis berpengaruh terhadap % rendemen produk minyak yang dihasilkan, dimana semakin tinggi konsentrasi katalis maka semakin tinggi % rendemen yang dihasilkan (Din, *et al.*, 2019).

Buah naga (*Hylocereus polyrhizus*) merupakan buah yang tumbuh di negara tropis. Buah naga mengandung banyak nutrisi penting seperti vitamin, mineral, dan serat makanan (Putra, *et al.*, 2024). Buah naga banyak dikonsumsi langsung atau diolah menjadi jus untuk dijadikan sebagai minuman fungsional, konsumsi buah naga tersebut mengakibatkan limbah kulit buah naga semakin menumpuk (Phongtongpasuk, *et al.*, 2016). Pembuangan kulit buah naga sebagai limbah pertanian dapat menimbulkan permasalahan lingkungan dan menyebabkan pemanfaatan sumber daya menjadi tidak optimal, sehingga pengelolaan limbah kulit buah naga perlu diperhatikan. Kulit buah naga memiliki banyak kandungan senyawa bioaktif seperti polifenol, flavonoid, karotenoid dan serat pangan (Putra, *et al.*, 2024). Selain itu, dalam kulit buah naga juga mengandung aktivitas morfologi seperti antitumor, antiinflamasi, dan antioksidan. Hal tersebut menunjukkan bahwa kulit buah naga memiliki ketersediaan elektron untuk menetralkan radikal bebas

yang secara tidak langsung kulit buah naga memiliki kemampuan untuk mereduksi ion garam logam pada sintesis logam (Phongtongpasuk, *et al.*, 2016).

Penelitian terkait sintesis logam dari ekstrak kulit buah naga telah dilakukan oleh Phongtongpasuk, *et al.* (2016) yang melakukan sintesis perak (AgNPs) dan memperoleh AgNPs dengan ukuran 25-26 nm. Selain itu, Bui, *et al.* (2021) melakukan sintesis magnetit kobalt (CoFe_2O_4) dan diperoleh partikel seperti bola yang berukuran nano. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut dapat diketahui bahwa ekstrak kulit buah naga dapat dijadikan sebagai bahan pereduksi dan bahan pembatas (*capping agent*) dalam proses sintesis katalis logam termasuk magnetit.

Penelitian mengenai pemanfaatan ekstrak kulit buah naga dalam proses sintesis katalis magnetit belum banyak dilakukan, terutama pengaplikasiannya dalam proses pirolisis katalitik untuk mengkonversi limbah *styrofoam* menjadi bahan bakar. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dilakukan sintesis magnetit dari ekstrak kulit buah naga untuk diaplikasikan dalam proses pirolisis limbah *styrofoam*. Penggunaan katalis dalam proses pirolisis diharapkan dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas produk minyak yang dihasilkan

B. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Limbah *styrofoam* berasal dari limbah rumah tangga yang berada di daerah sekitar tempat tinggal peneliti yaitu Sopen, Demangan, Kota Yogyakarta.
2. Limbah kulit buah naga diperoleh dari kedai jus yang berada di daerah sekitar tempat tinggal peneliti, yaitu Sopen, Demangan, Kota Yogyakarta.

3. Sintesis magnetit termodifikasi ekstrak kulit buah naga menggunakan metode kopresipitasi terbalik.
4. Variasi massa katalis yang digunakan dalam proses pirolisis *styrofoam* yaitu 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; dan 1,25 g.
5. Karakterisasi katalis magnetit menggunakan instrumen *fourier transform infrared Spectrometry* (FTIR) untuk identifikasi gugus fungsi dan *x-ray diffractometry* (XRD) untuk mengetahui kristalinitas katalis magnetit.
6. Analisis sifat fisika dan sifat kimia produk minyak hasil pirolisis menggunakan parameter densitas, viskositas, titik nyala dan, nilai kalor serta analisis komposisi kimia menggunakan instrumen *gas chromatography mass Spectrometry* (GC-MS).

C. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik gugus fungsi, dan kristalinitas katalis magnetit yang termodifikasi ekstrak kulit buah naga ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$) berdasarkan spektroskopi FTIR dan XRD ?
2. Bagaimana pengaruh variasi massa katalis pada proses pirolisis limbah *styrofoam* terhadap produk minyak yang dihasilkan?
3. Bagaimana komposisi kimia minyak hasil pirolisis berdasarkan analisis menggunakan GC-MS?
4. Bagaimana kualitas minyak hasil pirolisis berdasarkan parameter densitas, viskositas, titik nyala, dan nilai kalor?

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi gugus fungsi dan kristalinitas katalis magnetit yang termodifikasi ekstrak kulit buah naga ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-HP}$) berdasarkan spektroskopi FTIR dan XRD.
2. Mengetahui pengaruh katalis terhadap kuantitas produk minyak yang dihasilkan dari proses pirolisis limbah *styrofoam*.
3. Menganalisis komposisi kimia yang terkandung dalam minyak hasil pirolisis menggunakan GC-MS.
4. Menganalisis kualitas minyak hasil pirolisis berdasarkan parameter densitas, viskositas, titik nyala dan nilai kalor.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai cara pengelolaan limbah plastik menjadi bahan bakar melalui proses pirolisis, dengan begitu penelitian ini dapat membantu untuk mengurangi akumulasi limbah plastik yang menumpuk.
2. Produk minyak yang diperoleh dari hasil pirolisis diharapkan dapat menjadi salah satu sumber energi alternatif. Hal ini dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil konvensional.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil analisis menggunakan spektroskopi FTIR dan XRD, karakteristik gugus fungsi dan kristalinitas dari katalis magnetit yang termodifikasi ekstrak kulit buah naga menunjukkan serapan khas Fe-O pada bilangan gelombang 587,64 cm^{-1} dan lima difraksi utama pada sudut 30,24°; 35,47°; 43,15°; 57,30°; dan 62,67°. Rata-rata ukuran kristal yang diperoleh berdasarkan persamaan *Debye-Scherrer* yaitu 5,08 nm, yang menunjukkan bahwa penggunaan ekstrak kulit buah naga dalam proses sintesis katalis magnetit berhasil berperan sebagai *capping agent*, penstabil juga pereduksi.
2. Penggunaan katalis termodifikasi ekstrak kulit buah naga (Fe_3O_4 -HP) dalam proses pirolisis limbah *styrofoam* berpengaruh terhadap produk minyak yang dihasilkan. Penggunaan katalis dengan massa 0,75 g menunjukkan hasil paling optimal dengan memperoleh rendemen sebesar 60,95%.
3. Nilai densitas, viskositas, titik nyala dan nilai kalor untuk minyak hasil pirolisis masing-masing sebesar 867,7 kg/m^3 , 19 cP (2,19 cSt), 39°C, dan 10.077,7718 kal/gram atau 42,19 MJ/kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa minyak yang dihasilkan dapat dikategorikan sebagai bahan bakar jenis solar karena sesuai dengan SNI 8220-2017 dan ASTM D975-2013 tentang bahan bakar solar.

4. Komponen-komponen yang dihasilkan dari analisis GC-MS menghasilkan 3 senyawa utama dalam komposisi minyak hasil pirolisis, yaitu stirena, 3-butenil-benzena, dan 2-pentenal, ketiga senyawa tersebut termasuk ke dalam senyawa aromatik dan alifatik. Secara keseluruhan, komposisi senyawa aromatik dan alifatik dari minyak hasil pirolisis memiliki fraksi karbon C_6-C_{24} . Fraksi tersebut sesuai dengan fraksi solar yaitu C_5-C_{20} .

B. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan karakterisasi lebih lanjut untuk katalis magnetit termodifikasi ekstrak kulit buah naga, seperti analisis *Particle Size Analysis* (PSA) dan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX).
2. Pengujian viskositas terhadap minyak hasil pirolisis yang dilakukan lebih baik jika jenis pengujian viskositas adalah viskositas kinematik.
3. Perlu adanya penelitian lanjutan untuk menganalisis lebih dalam bagaimana karakteristik minyak pirolisis untuk masing-masing sampel minyak yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Dief, A. M., & Abdel-Fatah, S. M. (2018). Development and Functionalization of Magnetic Nanoparticles and Powerful and Green Catalyst for Organic Synthesis. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1), 55-67. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.05.008
- Altaf, S., Zafar, R., Zaman, W. Q., Ahmad, S., Yaqoob, K., Syed, A., . . . Arshad, M. (2021). Removal of Levofloxacin from Aqueous Solution by Green Synthesized Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles Using *Moringa oleifera*: Kinetics and Reaction Mechanism Analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 226, 1-11. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112826
- Amit, H. R., Lemont, F., Nes, G. B., David, O. K.-B., Banano, N., Gelfer, S., . . . Rousset, F. (2022). Catalytic Pyrolysis of High-Density Polyethylene: Decomposition Efficiency and Kinetics. *Catalyst*, 12(140), 1-14. doi:https://doi.org/10.3390/catal12020140
- Anom, I. D. (2021). Kinetic Study of Das Formation on Styrofoam Pyrolysis. *Acta. Chim. Asiana*, IV(2), 114-119. doi:DOI:10.29303/aca.v4i1.76
- ASTM International. (2013). ASTM D975-13: Standard Specification for Diesel Fuel Oils. Retrieved from <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c3d87bf3-1615-4c68-8ee4-10f5dc8f52d0/astm-d975-13>
- ASTM International. (2017). ASTM D445-17a, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). *ASTM International*. doi:https://doi.org/10.1520/D0445-17A
- Awad, A. H., Gamasy, R. E., Wahab, A. A., & Abdellatif, M. H. (2019). Mechanical and Physical Properties of PP and HDPE. *Engineering Science*, 4(2), 34-42. doi:http://www.sciencepublishinggroup.com/j/es
- Azis, H. A., & Rante, H. B. (2021). Produksi Bahan Bakar Cair dari Limbah Plastik Polypropylene (PP) Metode Pirolisis. *Journal of Chemical Process Engineering*, 18-23.
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). *SNI 8220-2017; Standar dan mutu (spesifikasi) bahan bakar minyak jenis solar 48 murni*. Badan Standarisasi Nasional.
- Bajaj, N. S., & Joshi, R. A. (2021). Energy Materials: Synthesis and Characterization Techniques. *Energy Materials*, 61-82. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823710-6.00019-4
- Chaves, J. O., Souza, M. C., Silva, L. C., Perez, D. L., Torres-Mayanga, P. C., Machado, A. P., . . . Rostagno, M. A. (2020). Extraction of Flavonoids From Natural Sources Using Modern Techniques. *Frontiers in Chemistry*, 8, 1-25. doi:doi: 10.3389/fchem.2020.507887
- Coates, G. W., & Getzler, Y. D. (2020). Chemical Recycling to Monomer for an Ideal, Circular Polymer Economy. *Nature Review Material*, 5, 501-516. doi:https://doi.org/10.1038/s41578-020-0190-4

- Czajczynska, D., Angualiano, L., Ghazal, H., Krzyzynska, R., Reynolds, A. J., Spencer, N., & Jouhara, H. (2017). Potential of Pyrolysis Processes in the Waste Management Sector. *Thermal Science and Engineering Progress*, 171-197. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003
- Demirezen, D. A., Yildiz, Y. S., & Yilmaz, D. D. (2019). Amoxicillin Degradation Using Green Synthesized Iron Oxide Nanoparticles: Kinetics and Mechanism Analysis. *Environmental Nanotechnology, Monitoring, and Management*, 11, 1-11. doi:https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100219
- Dhar, P. K., Saha, P., Hasan, M. K., Amin, M. K., & Haque, M. R. (2021). Green Synthesis of Magnetite Nanoparticles Using Lathyrus sativus Peel Extract and Evaluation of Their Catalytic Activity. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 1-8. doi:https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100117
- Din, M. I., Raza, M., Hussain, Z., & Mehmood, H. A. (2019). Fabrication of Magnetite Nanoparticles (Fe₃O₄-NPs) for Catalytic Pyrolysis of Nutshells Biomass. *Soft Materials*, 17(1), 24-31. doi:https://doi.org/10.1080/1539445X.2018.1542315
- Dippong, T., Levei, E. A., & Cadar, O. (2021). Recent Advances in Synthesis and Application of MFe₂O₄ (M= Co, Cu, Mn, Ni, Zn) Nanoparticles. *Nanomaterials*, 11, 1-33. doi:https://doi.org/10.3390/nano11061560
- Elarbaoui, S. (2024). Magnetite Nanoparticles (Fe₃O₄ NPs) Performed by the Co-Precipitation and Green Synthesis Processes. *Main Group Metal Chemistry*, 47, 1-6. doi:https://doi.org/10.1515/mgmc-2023-0029
- Europe, P. (2022). *Plastics - the Facts 2022*. Europe: Plastics Europe Enabling a Sustainable Future.
- Eze, W. U., Umunakwe, R., Obasi, H. C., Ugbaja, M. I., Uche, C. C., & Madufor, I. C. (2021). Plastics Waste Management: A Review of Pyrolysis Technology. *Clean Technologies and Recycling*, 1(1), 50-69. doi:10.3934/ctr.2021003
- Fu, J. (2019). Flash Point Measurements and Prediction of Biofuels and Biofuel Blends with Aromatic Fluids. *Fuel*, 241, 892-900. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.105
- Ganapathe, L. S., Mohamed, M. A., Yunus, R. M., & Berhanuddin, D. D. (2020). Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles in Biomedical Application: From Synthesis to Surface Functionalization. *Magnetochemistry*, 6(68), 1-35. doi:https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068
- Gin, A. W., Hassan, H., Ahmad, M. A., Hameed, B. H., & Din, A. M. (2021). Recent Progress on Catalytic Co-Pyrolysis of Plastic Waste and Lignocellulosic Biomass to Liquid Fuel: The Influence of technical and Reaction Kinetic Parameters. *Arabian Journal of Chemistry*, 14, 1-20. doi:https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103035
- Ho, B. T., Roberts, T. K., & Lucas, S. (2018). An Overview on Biodegradation of Polystyrene and Modified Polystyrene: the Microbial Approach. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(2), 308-320. doi:https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1355293
- Hoang, A. T. (2021). Prediction of The Density and Viscosity of Biodiesel and The Influence of Biodiesel Properties on a Diesel Engine Fuel Supply System.

- Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(5), 299-311.
doi:<https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1532734>
- Hsu, Hsu, C. S., & Robinson, P. R. (2019). *Petroleum Science and Technology*. Switzerland: Springer Nature Switzerland. doi:doi.org/10.1007/978-3-030-16275-7
- Ifa, L., Yani, S., Nurjannah, Darnengsih, Rusnaenah, A., Mel, M., . . . Kusuma, H. S. (2020). Techno-economic Analysis of Bio-briquette From Cashew Nut Shell Waste. *Heliyon*, 6, 1-9.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05009>
- Jegadeesan, G. B., Srimathi, K., Srinivas, N. S., Manishkanna, N. S., & Vignesh, D. (2019). Green Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles Using Terminalia bellirica and Moringa oleifera Fruit and Leaf Extracts: Antioxidant, Antibacterial, and Thermoacoustic Properties. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21, 1-17.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101354>
- Jeswani, H., Kruger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., & Azapagic, A. (2021). Life Cycle Environmental Impacts of Chemical Recycling Via Pyrolysis of Mixed Plastic Waste in Comparison with Mechanical Recycling and Energy Recovery. *Science of the Total Environment*, 769, 1-15.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>
- Jittin, V., Tripti, S. R., Bahurudeen, A., & Hammadhu, R. J. (2022). Cleaner Construction of Durable Green Rooftop in Residential Buildings with Municipal Water Supply. *Cleaner Materials*, 5, 1-13.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100125>
- Joo, J., Kwon, E. E., & Lee, J. (2021). Achievements in Pyrolysis Process in E-Waste Management Sector. *Environmental Pollution*, 287, 1-12.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117621>
- Kaisan, M. U., Anafi, F. O., Nuszowski, J., Kulla, D. M., & Umaru, S. (2017). Calorific Value, Flash Point, and Cetane Number of Biodiesel from Cotton, Jatropha and Neem Binary and Multi-Blends With Diesel. *Biofuels*, 1-7.
doi:<https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1358944>
- Karimi, M., Tabrizi, S. A., & Teluri, A. S. (2017). In Situ Reverse Co-Precipitation Synthesis and Magnetic Properties of CuO/CuOFe₂O₄ Nanocomposite. *Journal Sol-Gel Science Technology*, 1-8. doi:[10.1007/s10971-017-4386-z](https://doi.org/10.1007/s10971-017-4386-z)
- Kauwo, F. A., Anom, I. D., & Lombok, J. Z. (2021). Pyrolysis Reaction Kinetics of Styrofoam Plastic Waste. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 9(1), 57-62. doi:[10.30598/ijcr.2021.9-fey](https://doi.org/10.30598/ijcr.2021.9-fey)
- Khoirotin, Faaizatunnisa, N., & Munasir. (2022). Green Synthesis of Fe₃O₄ Nanoparticles Using Green Betel Leaf Extract for Methylene Blue Adsorption. *Natural Life Science Communications*, 22(3), 1-18.
doi:<https://doi.org/10.12982/NLSC.2023.042>
- Kiran, M. S., Kumar, C. R., Shwetha, U. R., Onkarappa, H. S., Betageri, V. S., & Latha, M. S. (2021). Green Synthesis and Characterization of Gold Nanoparticles from Moringa Oleifera Leaves and Assessment of

- Antioxidant, Antidiabetic, and Anticancer Properties. *Chemical Data Collections*, 33, 1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cdc.2021.100714>
- Klik, K., Bukowska, B., & Sicinska, P. (2020). Polystyrene Nanoparticles: Sources, Occurrence in the Environment, Distribution in Tissues, Accumulation and Toxicity to Various Organisms. *Environmental Pollution*, 262, 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114297>
- Kurniawati, D., Putra, N., Abdullah, N., Hakim, I. I., & Nurrokhmat, A. (2021). An Experimental Analysis of Diesel Fuel Produced from HDPE (High-Density Polyethylene) Waste Using Thermal and Catalytic Pyrolysis With Passive Heat Pipe Cooling System. *Thermal Science and Engineering Progress*, 23, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100917>
- Li, W., Lu, J., Dong, M., Lu, S., Yu, J., Li, S., . . . Liu, J. (2017). Quantitative Analysis of Calorific Value of Coal Based on Spectral Preprocessing by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). *Energy Fuels*, 32(1), 24-32. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01718>
- Liu, Y., Wang, X.-y., Wei, X.-m., Gao, Z.-t., & Han, J.-p. (2018). Values, Properties and Utility of Different Parts of *Moringa oleifera*: an Overview. *Chinese Herbal Medicines*, 10(4), 371-378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chmed.2018.09.002>
- Luna, L. R., Martinez, D. B., & Valenzuela, E. (2021). Two-Step Pyrolysis for Waste HDPE Valorization. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 526-536. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.038>
- Ma, J., Shashavar, A., Al Rashed, A., Karomipour, A., Yarmand, H., & Rostami, S. (2019). Viscosity, Cloud Point, Freezing Point and Flash Point of Zinc Oxide/SAE50 Nanolubricant. *Journal of Molecular Liquids*, 1-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112045>
- Masfitra, E., Anwar, S., & Rizal, Y. (2021). Pengujian Bahan Bakar Minyak (BBM) Alternatif dari Pirolisis Limbah Plastik Jenis PP (Polypropylene). *Jurnal Energi dan Inovasi Teknologi*, 1(1), 6-10.
- Mathews, A., Arbal, A. V., Kaarunya, A., Jha, P. K., Le-Bail, A., & Rawson, A. (2024). Conventional Vs Modern Extraction Techniques in The Food Industry. *Extraction Processes in the Food Industry*, 97-146. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819516-1.00013-2>
- McKeen, L. (2018). *The Effect of Sterilization Methods on Plastics and Elastomers* (4th ed.). Chennai: Matthews Deans.
- Mishra, R. K., & Mohanty, K. (2020). Co-Pyrolysis of Waste Biomass and Waste Plastics (Polystyrene and Waste Nitrile Gloves) into Renewable Fuel and Value-added Chemicals. *Carbon Resources Conversion*, 3, 145-155. doi:<https://doi.org/10.1016/j.crcon.2020.11.001>
- Murthy, K., Shetty, R., & Shiva, K. (2020). Plastic Waste Conversion to Fuel: a Review on Pyrolysis Process and Influence of Operating Parameters. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-21. doi:<https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1818892>
- Naaz, F., Dubey, H. K., Kumari, C., & Lahiri, P. (2020). Structural and Magnetic Properties of MgFe₂O₄ Nanopowder Synthesized Via Co-Precipitation

- Route. A *Springer Nature Journal*, 2(808). doi:https://doi.org/10.1007/s42452-020-2611-9
- Nanda, S., & Berruti, F. (2020). Thermochemical Conversion of Plastic Waste to Fuels: a Review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 123-148. doi:https://doi.org/10.1007/s10311-020-01094-7
- Nisar, J., Ali, G., Shah, A., Iqbal, M., Khan, R. A., Sirajuddin, . . . Akhter, M. S. (2019). Fuel Production from Waste Polystyrene Via Pyrolysis: Kinetics and Products Distribution. *Waste Management*, 88, 236-247. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.035
- Oyeleke, O. O., Ohunakin, O. S., & Adelekan, D. S. (2021). Catalytic Pyrolysis in Waste to Energy Recovery Applications: A Review. *International Conference on Engineering for Sustainable Word (ICESW 2020)*, 1-16. doi:doi:10.1088/1757-899X/1107/1/012226
- Oyeyinka, A. T., & Oyeyinka, S. A. (2018). Moringa oleifera as a Food Fortificant: Recent Trends and Prospects. *Journal of the Study Society Agricultural Sciences*, 17, 127-136. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2016.02.002
- Panda, S. K., Anggarwai, I., Kumar, H., Prasad, L., Kumar, A., Sharma, A., . . . Mishra, V. (2021). Magnetite Nanoparticles as Sorbents for Dye Removal: a Review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-39. doi:https://doi.org/10.1007/s10311-020-01173-9
- Panda, S. K., Anggarwal, I., Kumar, H., Prasad, L., Kumar, A., Sharma, A., . . . Mishra, V. (2021). Magnetite Nanoparticles as Sorbents for Dye Removal: a Review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-39. doi:https://doi.org/10.1007/s10311-020-01173-9
- Parajuli, K., Sah, A. K., & Paudyal, H. (2020). Green Synthesis of Magnetite Nanoparticles Using Aqueous Leaves Extracts of Azadirachta indica and Its Application for the Removal of As(V) from Water. *Green and Sustainable Chemistry*, 10, 117-132. doi:https://doi.org/10.4236/gsc.2020.104009
- Park, Y. K., Lee, H. W., & Kim, Y. M. (2018). The Use of High Density Polyethylene (HDPE) as A Co-Feeding Feedstock on the Catalytic Pyrolysis of Yellow Poplar Over Al-MCM-48 and Al-MSU-F. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 1-54. doi:https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.08.008
- Payne, J., McKeown, P., & Jones, M. D. (2019). A Circular Economy Approach to Plastic Waste. *Polymer Degradation and Stability*, 165, 170-181. doi:https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.014
- Phongtongpasuk, S., Padang, S., & Yongvanich, N. (2016). ENvironmental-Friendly Method for Synthesis of Silver Nanoparticles From Dragon Fruit Peel Extract and Their Antibacterial Activities. *Energy Procedia*, 89, 239-247. doi:doi: 10.1016/j.egypro.2016.05.031
- Prasad, C., Sreenivasulu, K., Gangadhara, S., & Venkateswarlu, P. (2016). Bio Inspired Green Synthesis of Ni/Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles Using Moringa oleifera Leaves Extract: A Magnetically Recoverable Catalyst For Organic Dye Degradation in Aqueous Solution. *Journal of Alloys and Compounds*, 1-27. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.363
- Prathiba, R., M, S., & Miranda, L. R. (2018). Pyrolysis of Polystyrene Waste in the Presence of Activated Carbon in Conventional and Microwave Heating

- Using Modified Thermocouple. *Waste Management*, 76, 528-536. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.029>
- Purwanto, H. S., Sugiarto, B., & Irfandy, F. (2020). Plastic, Rubber, and Styrofoam Waste Management as Alternative for Green Energy. Yogyakarta: LPPM "Veteran" Yogyakarta Conference Series Proceeding on Engineering Science Series (ESS). doi:10.31098/ess.v1i1.162
- Putra, N. R., Rizkiyah, D. N., Faizal, A. N., & Aziz, A. H. (2024). Mini Review of Unlocking the Hidden Potential for Volarization of Dragon Fruit Peels Through Green Extraction Methods. *Waste Management Bulletin*, 2, 49-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.03.003>
- Ragaert, K., Delva, L., & Geem, K. V. (2017). Mechanical and Chemical Recycling of Solid Plastic Waste. *Waste Management*, 69, 24-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- Rahmayanti, M., Santosa, S. J., & Sutarno. (2016). Comparative Study on the Adsorption of [AuCl₄]- onto Salicylic Acid and Gallic Acid Modified Magnetite Particles. *Indonesia J. Chemistry*, 16(3), 329-337. doi:<https://doi.org/10.22146/ijc.21150>
- Rahmayanti, M., Syakina, A. N., Fatimah, I., & Sulistyaningsih, T. (2022). Green Synthesis of Magnetite Nanoparticles Using Pee Extract of Jengkol (*Archidendron pauciflorum*) for Methylene Blue Adsorption from Aqueous Media. *Chemical Physics Letters*, 803. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.139834>
- Rahmayanti, M., Syakina, A. N., Sulistyaningsih, T., & Hastuti, B. (2023). Synthesis of Magnetite Using Petai (*Parkia speciosa*) Peel Extract with Ultrasonic Waves as a Reusable Catalyst for Biodiesel Production from Waste Frying Oil. *Journal of Scientific and Applied Chemistry*, 26(4), 125-132. doi:<https://doi.org/10.14710/jksa.26.4.125-132>
- Rizal, R., Tua, L. M., & Ginting, S. B. (2019). Husk as a Substitute for Styrofoam Plastic Products Manufacturing Packaging. *Journal of Physics: Conference series*, 1-13. doi:[doi:doi:10.1088/1742-6596/1569/3/032016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/3/032016)
- Robinson, M. R., Abdelmoula, M., Mallet, M., & Coustel, R. (2019). Strach Functionalized Magnetite Nanoparticles: New Insight Into the Structural and Magnetic Properties. *Journal of Solid State Chemistry*, 277, 587-593. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.06.033>
- Roni, K. A. (2020). *Teknologi Minyak Bumi*. Palembang: Rafah Press UIN Raden Fatah Palembang.
- Santi, I. N., Utama, I. S., & Madrini, I. G. (2021). Pengaruh Suhu dan Waktu Pengeringan terhadap Karakteristik Fisikokimia Buah Naga Merah (*Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose) Kering. *J. Hoert. Indonesia*, 12(1), 69-80. doi:<http://dx.doi.org/10.29244/jhi.12.1.69-80>
- Santos, S. M., Nascimento, D. C., Costa, M. C., Neto, A. M., & Fregolente, L. V. (2019). Flash Point Prediction: Reviewing Empirical Models for Hydrocarbons, Petroleum Fraction, Biodiesel, and Blends. *Fuel*, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116375>

- Shanks, R. (2017). *Green Composites* (2nd ed.). (C. Baillie, & R. Jayasinghe, Eds.) Cambridge: Woodhead Publishing. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100783-9.00024-1>
- Shoaib, M., Sebesan, B., Khan, W. S., & Asmatulu, E. (2021). Catalytic Pyrolysis of Recycled HDPE, LDPE, and PP. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1177/14777606211019414>
- Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of Plastic Solid Waste: A State of Art Review and Future Applications. *Composites Part B*, 115, 409-422. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>
- Solis, M., & Silveira, S. (2020). Technologies for Chemical Recycling of Household Plastic - A Technical Review and TRL Assessment. *Waste Management*, 105, 128-138. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>
- Speight, J. G. (2020). *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes* (2nd ed.). Houston: Gulf Professional Publishing. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809923-0.00003-5>
- Still, K. R. (2023). Fuel Oils. *Reference Module in Biomedical Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00751-X>
- Vollmer, I., Jenks, M. J., Roelands, M. C., White, R. J., Harmelen, T. V., Wild, P. D., . . . Weckhusyen, B. M. (2020). Beyond Mechanical Recycling: Giving New Live to Plastic Waste. *Journal of the Gesellschaft Deutscher Chemiker*, 132(36), 15524-15548. doi:<https://doi.org/10.1002/ange.201915651>
- Wahyu, A., R, P., H, H., P, B. S., & P, W. (2016). Karakteristik Bahan Bakar Diesel dengan Penambahan Etanol dan Metanol. *Jurnal Teknologi Terpadu*, 4(2), 66-70.
- Wang, X., You, Y., Han, X., & Jiang, X. (2021). Product Distribution and Coke Formation During Catalytic Pyrolysis of Oil Shale With Zeolites. *Journal Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 8535-8549. doi:<https://doi.org/10.1007/s10973-021-11138-x>
- Xu, Y., & Scharder, W. (2022). Trash-to-Fuel: Converting Municipal Waste Into Transportation Fuels by Pyrolysis. *Science*, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1016/>
- Xue, Y., Johnston, P., & Bai, X. (2017). Effect of Catalyst Contact Mode and Gas Atmosphere During Catalytic Pyrolysis of Waste Plastics. *Energy Conversion and Management*, 142, 441-451. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.071>
- Zhang, F., Zhao, Y., Wang, D., Yan, M., Zhang, J., Zhang, P., . . . Chen, C. (2020). Current Technologies for Plastic Waste Treatment: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 1-103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124523>