

**KONVERSI MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI SENYAWA
NITROGEN MENGGUNAKAN ZEOLIT-X TERPROTONASI
SEBAGAI KATALIS DAN UJI AKTIVITAS INHIBITOR KOROSI**

(Skripsi)

Oleh

**BELLA AGUSTIN
2117011074**



**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

KONVERSI MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI SENYAWA NITROGEN MENGGUNAKAN ZEOLIT-X TERPROTONASI SEBAGAI KATALIS DAN UJI AKTIVITAS INHIBITOR KOROSI

Oleh

BELLA AGUSTIN

Korosi logam, terutama pada baja lunak yang banyak digunakan dalam industri, menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan. Salah satu pendekatan untuk mengatasi permasalahan ini adalah penggunaan inhibitor berbasis senyawa organik yang ramah lingkungan, seperti senyawa nitrogen. Penelitian ini bertujuan untuk mengkonversi minyak kelapa sawit menjadi senyawa nitrogen dengan memanfaatkan zeolit-X terprotonasi (H-X) sebagai katalis serta menguji potensinya sebagai inhibitor korosi pada baja lunak dalam media korosif jenuh CO₂.

Sintesis katalis dilakukan dengan memanfaatkan silika dari sekam padi untuk membentuk zeolit-X dan dikarakterisasi menggunakan XRD dan SEM. Zeolit-X dimodifikasi menjadi zeolit H-X melalui metode *ion exchange* menggunakan larutan NH₄NO₃ dan dikarakterisasi menggunakan XRF. Proses konversi terdiri dari dua tahap, yaitu transesterifikasi minyak kelapa sawit menjadi metil ester dan reaksi amidasi dengan dietanolamin untuk menghasilkan senyawa nitrogen, dengan menggunakan katalis zeolit-X dan H-X pada kedua tahapan reaksi tersebut. Metil ester dan senyawa nitrogen yang didapatkan dikarakterisasi menggunakan GC-MS. Senyawa nitrogen diuji aktivitasnya sebagai inhibitor korosi baja lunak dalam medium korosif yang jenuh CO₂ menggunakan metode *wheel test* dan SEM.

Berdasarkan hasil XRD dan SEM, zeolit-X berhasil disintesis dan berdasarkan hasil XRF, zeolit-X berhasil dimodifikasi menjadi zeolit H-X dengan persen konversi Na menjadi H sebesar 13,55%. Reaksi transesterifikasi menghasilkan metil ester dengan konversi sebesar 32% dan reaksi amidasi menghasilkan senyawa nitrogen dengan komposisi 55,63% menggunakan katalis yang lebih baik yaitu zeolit H-X. Hasil uji aktivitas sebagai inhibitor korosi baja lunak menunjukkan persen proteksi sebesar 90,23% dan morfologi permukaan baja lunak menggunakan inhibitor korosi lebih baik dibandingkan tanpa inhibitor korosi.

Kata kunci: inhibitor korosi, senyawa nitrogen, amidasi, minyak kelapa sawit, zeolit-X.

ABSTRACT

CONVERSION OF PALM OIL TO NITROGEN COMPOUNDS USING PROTONATED ZEOLITE-X AS CATALYST AND CORROSION INHIBITOR ACTIVITY TEST

By

BELLA AGUSTIN

Metal corrosion, especially in mild steel which is widely used in industry, causes significant economic losses. One approach to overcome this problem is the use of environmentally friendly organic compound-based inhibitors, such as nitrogen compounds. This study aims to convert palm oil into nitrogen compounds by utilizing protonated zeolite-X (H-X) as a catalyst and to test their performance as corrosion inhibitors on mild steel in CO₂-saturated corrosive media.

Catalyst synthesis was carried out by utilizing silica from rice husk to form zeolite-X and characterized using X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM). Zeolite-X was modified into zeolite H-X through ion exchange method using NH₄NO₃ solution and characterized using X-Ray Fluorescence (XRF). The conversion process consists of two stages, namely transesterification of palm oil into methyl ester and amidation reaction with diethanolamine to produce nitrogen compounds, using zeolite-X and H-X catalysts in both reaction stages. The obtained methyl esters and nitrogen compounds were characterized using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Nitrogen compounds were tested for their activity as corrosion inhibitors of mild steel in a CO₂ saturated corrosive medium using the wheel test and SEM methods.

Based on the results of XRD and SEM, zeolite-X was successfully synthesized and based on the results of XRF, zeolite-X was successfully modified into zeolite H-X with a conversion percentage of Na to H of 13,55%. The transesterification reaction produced methyl ester with a conversion of 32% and the amidation reaction produced nitrogen compounds with a composition of 55.63% using a better catalyst, namely zeolite H-X. The result of the activity test as a mild steel corrosion inhibitor showed a protection percentage of 90.23% and the surface morphology of mild steel using a corrosion inhibitor was better than without a corrosion inhibitor.

Keywords: corrosion inhibitor, nitrogen compound, amidation, palm oil, zeolite-X.

**KONVERSI MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI SENYAWA
NITROGEN MENGGUNAKAN ZEOLIT-X TERPROTONASI SEBAGAI
KATALIS DAN UJI AKTIVITAS INHIBITOR KOROSI**

Oleh

BELLA AGUSTIN

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

Jurusan Kimia

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul : KONVERSI MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI
SENYAWA NITROGEN MENGGUNAKAN
ZEOLIT-X TERPROTONASI SEBAGAI KATALIS
DAN UJI AKTIVITAS INHIBITOR KOROSI

Nama : Bella Agustin

NPM : 2117011074

Program Studi : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S
NIP. 196505251990032002

Prof. Wasinton Simanjuntak, M.Sc., Ph.D
NIP. 195907061988111001

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung

Dr. Mita Rihanti, S.Si., M.Si
NIP. 197205302000032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S.

Sekretaris

**: Prof. Wasinton Simanjuntak, M.Sc.,
Ph.D.**

Penguji

Bukan Pembimbing

: Prof. Dr. Sutopo Hadi, S.Si., M.Sc.

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 26 Juni 2025

**LEMBAR PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama	: Bella Agustin
Nomor Pokok Mahasiswa	: 2117011074
Jurusan	: Kimia
Fakultas	: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi	: Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **"Konversi Minyak Kelapa Sawit Menjadi Senyawa Nitrogen Menggunakan Zeolit-X Terprotonasi Sebagai Katalis dan Uji Aktivitas Inhibitor Korosi"** adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruhnya data didalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Bandar Lampung, 26 Juni 2025
Yang menyatakan,



Bella Agustin
NPM. 2117011074

RIWAYAT HIDUP



Penulis yang bernama lengkap Bella Agustin lahir di Sinar Bandung, Kabupaten Pesawaran, pada tanggal 07 Agustus 2003. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bapak Khojam dan Ibu Supriyatin Ningsih.

Penulis memulai pendidikan di TK ABA pada tahun 2008. Kemudian, Sekolah Dasar Negeri 10 Tegineeng pada tahun 2009 dan lulus pada tahun 2015. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Negeri 15 Pesawaran pada tahun 2015 dan lulus pada tahun 2018. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Atas Negeri 2 Tegineneg dan lulus pada tahun 2021.

Pada tahun 2021, penulis diterima sebagai mahasiswa baru Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai organisasi, di antaranya sebagai kader muda dan anggota inti Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada tahun 2021, 2022, dan 2023. Pada tahun 2022 dan 2023, penulis menjabat sebagai anggota Bidang Sosial dan Masyarakat (SOSMAS) HIMAKI.

Penulis dikenal aktif dan bertanggung jawab dalam setiap kegiatan organisasi yang diikuti, serta tetap menunjukkan komitmen tinggi dalam bidang akademik. Penulis mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Pengabdian Masyarakat selama 40 hari di Desa Talang Mulya, Teluk Pandan, Pesawaran, yang dikonversi menjadi Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada tahun 2024.

Setelah mengikuti program MBKM Pengabdian, penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Laboratorium Polimer dan Anorganik/Fisik dari bulan Juni hingga Agustus 2024. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Praktikum Kimia Fisik I untuk mahasiswa angkatan 2023 di Jurusan Kimia dan Praktikum Kimia Dasar I dan II untuk mahasiswa Teknik Geologi angkatan 2024.

Penulis menyelesaikan penelitian di Laboratorium Polimer dan Anorganik/Fisik dengan judul *"Konversi Minyak Kelapa Sawit Menjadi Senyawa Nitrogen Menggunakan Zeolit-X Terprotonasi sebagai Katalis dan Uji Aktivitas Inhibitor Korosi"* pada tahun 2025.

MOTTO

"Setiap langkah punya tujuan, setiap nafas ada kehidupan, setiap harapan ada kepastian, dan setiap doa punya jawaban. Setiap orang memiliki perjuangan hidup sendiri. Selesaikan satu-persatu dengan tenang, tanpa perlu membandingkan dengan orang lain. Teruslah berjalan di jalur takdirmu sendiri."

"Pertanyaannya bukan lagi seberapa besar cita-cita kita. Tapi, seberapa besar kita untuk cita-cita itu. Sebab ada harga yang harus dibayar untuk sebuah mimpi besar."

-Dr. Gamal Albinsaid-

"Allah tidak menyegerakan sesuatu kecuali itu yang baik, dan tidak pula melambat-lambatkan sesuatu kecuali itu yang terbaik."

*"Dan aku menyerahkan urusanku kepada Allah."
(Q.S. al-Ghafir:44)*

"Biasakanlah untuk selalu berharap dan bergantung hanya kepada Allah"

-Mama tercinta-



Segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat, kasih sayang, dan hidayah-Nya yang tiada henti, sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan di jenjang perguruan tinggi ini. Dengan penuh rasa syukur dan cinta, penulis mempersembahkan karya ini kepada:

Kedua Orang Tua Tercinta,

Ayah Khojam dan Ibu Supriyatin Ningsih yang telah membimbingku dari kecil hingga menyelesaikan studi sarjana ini, memberikan semangat, dukungan, dan selalu mendoakan tanpa henti.

Adikku Tersayang, Kaffa Ramadani yang telah menjadi semangat bagi penulis.

Keluarga Tersayang,

Nini (Almh) Sutarmi, Kaki (Alm) Madsolim, Mama Siti Khodijah, Bapak (Alm) Lamiran, Bude Nurimah, Pakde Suparmanto, Mba Ika Suswantari, Mas Setyadi Tri Hartanto, dan Fathul Ailani Utama yang selalu mendoakan dan memberiku semangat serta dukungan.

Pembimbing Penelitianku, Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S. dan Prof. Wasinton Simanjuntak, M.Sc., Ph.D. yang selalu sabar dalam membimbingku.

Bapak/Ibu Dosen Jurusan Kimia, yang telah membimbing, memberi ilmu, dan motivasi kepada penulis selama menjalankan studi ini.

Para Sahabat-sahabat, yang telah memberikan motivasi dan dukungan.

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

SANWACANA

Puji syukur saya ucapkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Konversi Minyak Kelapa Sawit Menjadi Senyawa Nitrogen Menggunakan Zeolit-X Terprotonasi Sebagai Katalis dan Uji Aktivitas Inhibitor Korosi”**. Skripsi ini disusun berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan di Labotarium Anorganik/Fisik, Jurusan Kimia, Fakultas MIPA Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam proses pengerjaan dan penulisan skripsi ini tidak terlepas dari kesulitan dan rintangan yang penulis hadapi. Namun itu semua dapat terlewati berkat rahmat dan ridho Allah SWT serta bantuan, pengarahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini sebagai wujud rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S. selaku dosen pembimbing I sekaligus orang tua kedua bagi penulis atas segala bimbingan, nasehat, serta saran yang telah diberikan hingga selesainya penelitian ini.
2. Prof. Wasinton Simanjuntak, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan masukan dan saran selama penulis mengerjakan penelitian ini.
3. Prof. Dr. Sutopo Hadi, S.Si., M.Sc. selaku dosen pembahas yang telah memberikan kritik dan saran.
4. Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, S.Si., M.Si. yang secara tidak langsung telah memberikan arahan dan pengetahuan baru selama penelitian ini.

5. Prof. Andi Setiawan, M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing akademik atas segala saran yang telah diberikan.
6. Ibu Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
7. Bapak dan Ibu dosen jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas seluruh dedikasi dan ilmu yang diberikan kepada penulis selama perkuliahan.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Unila beserta jajaran FMIPA lainnya.
9. Mamaku sayang, Ibu Ningsih dengan hati yang lembut. Terima kasih telah membimbing sejauh ini, selalu menguatkan, menjadi tempat untuk bertukar cerita dan mendoakan tanpa henti. Mengajarkanku untuk selalu ikhlas dalam menjalani takdir dari-Nya dan selalu mengusahakan segala hal untuk penulis. Mama terima kasih karna sudah selalu ada disaat suka maupun duka.
10. Kakek (Alm) Madsohim dan Nenek (Almh) Sutarmi, yang telah merawat penulis dari kecil hingga remaja. Terimakasih sudah selalu menemani penulis, memberikan dukungan, nasihat serta canda dan tawa yang selalu dirindukan oleh penulis. Semoga kakek dan nenek tenang di sisi-Nya.
11. Ayah Khojam yang selalu memberikan nasihat dan dukungan kepada penulis. Terima kasih ayah, sudah membimbing penulis sejauh ini, walaupun terhalang jarak diantara kita. Semoga ayah sehat selalu.
12. Mama Tijah dan Bapak (Alm) Lamiran yang sudah penulis anggap sebagai orang tua. Terima kasih sudah kebersamaan sejauh ini dan selalu mendoakan tanpa henti untuk kebaikan penulis. Semoga mama sehat selalu dan bapak tenang di sisi-Nya.
13. Bude Nurimah yang selalu kebersamaan penulis, memberikan dukungan dan pengarahan kedalam hal-hal yang positif. Terima kasih atas semua hal yang telah diusahakan untuk penulis serta doa yang selalu dipanjatkan tanpa henti.
14. Kakak Ika Suswantari yang selalu mendorong penulis untuk tetap kuat dan semangat dalam menjalani kehidupan dengan apapun rintangannya.

15. Adikku Kaffa Ramadani dan keponakanku Fathul Ailani Utama yang telah menjadi penghibur disaat penulis merasa lelah. Terima kasih karena kalian menjadi salah satu alasan penulis untuk cepat menyelesaikan studi ini.
16. Sepupuku, Setyadi Tri Hartanto yang telah memberikan banyak pengetahuan dan menjadi saudara sekaligus sahabat untuk tempat saling bertukar cerita.
17. Sahabatku, Dian Febyola yang selalu kebersamai penulis, menjadi tempat untuk berkeluh kesah, dan memberikan banyak dukungan serta motivasi. Terima kasih karna selalu ada untuk menjadi salah satu *support system* terbaik.
18. Tim *Corrosion* 21 Melissaputri, Azizah Rosihana Tiara Putri, dan Ayu Fortune Lisa Hutabarat yang selalu kebersamai penelitian penulis hingga akhir dan menjadi saksi perjalanan penelitian penulis.
19. Teman-teman penelitian: Adryan Daffa Dzulfikar, Aditya Anugrah Sahyani, Khairi Hayad Febriana, Desrita Pratiwi, Tyas Nurfitria, Hanna Luthfia Maghfiroh, Erwanda Lili Utari, dan Nurul Natasha Berliani yang senantiasa membantu penulis dalam menyelesaikan tugasnya baik dalam suka maupun duka.
20. Sahabat seperjuangan Aulia Reyzifa Husin Putri, Nina Nurulita, dan Azzahra Qurota Aini yang telah kebersamai penulis selama penulis menyelesaikan studinya.
21. M. Rizal Fernando yang sudah penulis anggap seperti adik. Terima kasih atas semua dukungan yang selalu diberikan untuk penulis.
22. Kak Rekia Enrik yang telah bersedia mengajarkan penulis hingga akhirnya bisa menyelesaikan penelitian ini dengan baik.
23. Kak Uli Asari, Kak Qori Hikmah Faranida, Kak Franky Gom Gom, Kak Muhammad Sabil, dan Kak Maulana Bintang yang telah memberikan banyak pengetahuan serta pengalaman selama penelitian.
24. Adik-adik MBKM Maula Rayyanie, Pinkan Aling, Ester Wanitri, Giovani Ramadhan, Raharjo, Garneta Heppy, dan Muthiara Wamiga HS yang telah banyak membantu penulis. Terima kasih atas ketersediaan waktunya.

25. Teman-teman Himaki 2022 khususnya Bidang Sosial dan Masyarakat yang telah banyak memberikan penulis pengalaman dan pelajaran baru yang berharga.
26. Teman-teman Teknik Geologi 2024 yang telah memberikan kesan berharga pada penulis. Terima kasih atas ketersediaan waktunya untuk saling berbagi pengalaman, memberikan canda tawa disaat penulis merasa lelah.
27. Serta seluruh pihak lain yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, terimakasih telah memberikan pengalaman yang baik terhadap penulis dalam masa studinya.

Dengan kerendahan hati penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis juga berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca.

Bandar Lampung, 26 Juni 2025

Penulis

Bella Agustin

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Baja	6
2.2 Korosi.....	7
2.3 Jenis-Jenis Korosi	9
2.4 Korosi Karbon Dioksida (CO ₂).....	10
2.5 Penanganan Korosi	11
2.6 Inhibitor Korosi.....	13
2.6.1 Inhibitor anorganik.....	13
2.6.2 Inhibitor organik.....	14
2.7 Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit	14
2.8 Zeolit-X.....	15
2.9 Sintesis Senyawa Nitrogen	16
2.10 Uji Aktivitas Inhibitor Korosi	17
2.10.1 Metode kehilangan berat (<i>Wheel test</i>).....	17
2.11 Karakterisasi Produk.....	19
2.11.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	19
2.11.2 <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS).....	21
2.11.3 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	22
2.11.4 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	23
III. METODE PENELITIAN	25
3.1 Waktu dan Tempat.....	25
3.2 Alat dan Bahan.....	25

3.3	Prosedur Kerja	27
3.3.1	Preparasi Sekam Padi	27
3.3.2	Ekstraksi Silika Sekam Padi	27
3.3.3	Sintesis Katalis Zeolit-X	28
3.3.4	Modifikasi Zeolit-X dengan Metode <i>Ion Exchange</i>	28
3.3.5	Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit	29
3.3.6	Sintesis Senyawa Nitrogen (Reaksi Amidasi)	29
3.3.7	Persiapan Sampel Baja Lunak	30
3.3.8	Persiapan Larutan	30
3.3.9	Penentuan Laju Korosi (<i>Weight Loss Method</i>)	30
3.3.10	Analisis SEM	31
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1	Lingkup Penelitian	32
4.2	Preparasi dan Ekstraksi Silika Sekam Padi	32
4.3	Sintesis Katalis Zeolit-X	34
4.4	Karakterisasi Zeolit-X	35
4.4.1	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	35
4.4.2	<i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	36
4.5	Modifikasi Zeolit-X dengan <i>Ion Exchange</i>	37
4.6	Karakterisasi Zeolit H-X	38
4.7	Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit	39
4.8	Karakterisasi Produk Metil Ester	40
4.9	Sintesis Senyawa Nitrogen (Reaksi Amidasi)	42
4.10	Karakterisasi Produk Amida	43
4.11	Uji Aktivitas Sebagai Inhibitor Korosi Menggunakan Metode <i>Wheel Test</i>	48
4.12	Analisis Permukaan Baja Lunak	49
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	52
	DAFTAR PUSTAKA	53
	LAMPIRAN	60

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Data hasil puncak antara zeolit-X standar IZA dan zeolit-X sintesis	36
2. Data XRF komposisi zeolit-X dan zeolit terprotonasi (HX)	38
3. Komposisi proses transesterifikasi.....	40
4. Komponen senyawa MS pada produk metil ester.....	41
5. Komponen senyawa MS pada produk amidasi minyak kelapa sawit dengan dietanolamin menggunakan katalis zeolit-X.....	44
6. Komponen senyawa MS pada produk amidasi minyak kelapa sawit dengan dietanolamin menggunakan katalis zeolit H-X.....	45
7. Komponen senyawa MS pada produk amidasi metil ester dengan dietanolamin menggunakan katalis zeolit-X.....	46
8. Komponen senyawa MS pada produk amidasi metil ester dengan dietanolamin menggunakan katalis zeolit H-X.....	47
9. Data hasil rata-rata uji <i>wheel test</i> produk amidasi	48
10. Data pengukuran dimensi baja lunak dan perhitungan minyak kelapa sawit dengan zeolit-X.....	87
11. Data pengukuran dimensi baja lunak dan perhitungan minyak kelapa sawit dengan zeolit H-X	87

12. Data pengukuran dimensi baja lunak dan perhitungan metil ester dengan zeolit-X 87
13. Data pengukuran dimensi baja lunak dan perhitungan metil ester dengan zeolit H-X..... 87

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur zeolit-X	16
2. Skema diagram sistem difraktometer.....	20
3. XRD difraktogram	21
4. Kromatogram sampel metil ester minyak kelapa sawit.....	22
5. Hasil morfologi SEM dari zeolit H-X <i>aging</i> 24 jam.....	23
6. Interaksi sinar-X kontak dengan materi.....	24
7. Diagram alir penelitian.....	26
8. Proses ekstraksi silika	33
9. Proses sintesis zeolit-X	34
10. Perbandingan difraktogram zeolit-X hasil sintesis dengan IZA	35
11. Morfologi permukaan zeolit-X	37
12. Hasil protonasi zeolit-X	38
13. Proses transesterifikasi minyak kelapa sawit.....	39
14. Kromatogram GC produk metil ester.....	41
15. Hasil amidasi minyak kelapa sawit menggunakan katalis	42

16. Kromatogram GC produk amidasi minyak kelapa sawit dengan dietanolamin menggunakan katalis zeolit-X.....	43
17. Kromatogram GC produk amidasi minyak kelapa sawit dengan dietanolamin menggunakan katalis zeolit H-X.....	44
18. Kromatogram GC produk amidasi minyak metil ester dengan dietanolamin menggunakan katalis zeolit-X.....	46
19. Kromatogram GC produk amidasi metil ester dengan dietanolamin menggunakan katalis zeolit H-X.....	47
20. Mikrograf sampel baja lunak	49

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja banyak digunakan dalam berbagai industri, seperti pembuatan kapal, petroleum, dan konstruksi karena ketersediaannya dan kekuatannya (Rizi *et al.*, 2023). Baja merupakan salah satu jenis logam yang mengandung unsur seperti karbon (C), Sulfur (S), Fosfor (P), Silikon (Si), dan Mangan (Mn) (Waas, 2020). Berdasarkan berat, material logam pada baja sebagian besar terdiri dari besi (Fe) dengan kandungan karbon antara 0,02-2,1%. Salah satu jenis baja yang digunakan dalam industri adalah baja lunak. Baja lunak atau *mild steel* adalah jenis baja yang memiliki kandungan karbon rendah, dengan jumlah kurang dari 0,25%. Kandungan karbon yang rendah, dapat memberikan sifat-sifat tertentu, seperti keuletan, kemampuan las yang baik, serta mudah untuk dibentuk (Cafferty, 2010). Baja lunak biasanya digunakan dalam konstruksi bangunan, pembuatan pipa, dan kendaraan karena biayanya yang relatif murah dan mudah dibentuk. Namun, baja sangat rentan terhadap korosi yang dapat mengakibatkan kerugian finansial bagi industri.

Korosi telah menjadi kajian yang sangat menarik bagi ilmuwan, karena keberadaannya dapat dikatakan sebagai musuh besar yang dapat menimbulkan kerugian pada ekonomi, lingkungan, dan keselamatan (Windarta, 2022). Korosi adalah proses degradasi atau kerusakan logam yang terjadi karena reaksi kimia dengan lingkungannya, terutama dengan oksigen dan air. Kerugian yang disebabkan oleh korosi di Indonesia diperkirakan mencapai triliunan rupiah atau 1-5% dari Pendapatan Domestik Nasional (PDN) (Taqwa *et al.*, 2021). Umumnya,

korosi dapat disebabkan karena adanya kandungan gas CO₂ yang menjadi masalah utama dalam industri minyak dan gas, terutama pada pipa yang beroperasi di bawah tekanan dan suhu yang tinggi. Dampak yang diakibatkan dari korosi CO₂ dapat menyebabkan kebocoran pada pipa, kegagalan sistem, dan biaya perbaikan yang relatif tinggi (Elgaddafi *et al.*, 2021). Untuk mengurangi terjadinya korosi CO₂ terdapat beberapa cara yang dapat dilakukan seperti pemilihan material, proteksi katodik atau anodik, *coating*, serta penggunaan inhibitor korosi (Ilim *et al.*, 2007).

Inhibitor korosi adalah senyawa kimia dalam jumlah sedikit yang ditambahkan ke dalam medium korosif. Penggunaan inhibitor korosi menjadi salah satu metode yang paling efektif untuk mencegah terjadinya serangan korosi. Prinsip kerja inhibitor korosi adalah ion-ion atau molekul-molekul teradsorpsi pada permukaan logam, yang menyebabkan laju korosi berkurang karena peningkatan atau penurunan reaksi anodik atau katodik, penurunan laju difusi reaktan ke permukaan logam, dan penurunan tahanan listrik permukaan logam (Erna *et al.*, 2016).

Berdasarkan zat penyusunnya, inhibitor korosi dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu inhibitor anorganik dan inhibitor organik. Inhibitor anorganik relatif memiliki harga yang mahal dan berbahaya bagi lingkungan, sehingga inhibitor organik lebih banyak digunakan karena lebih aman dan ramah lingkungan (Al-Amiery *et al.*, 2023). Inhibitor organik mengandung senyawa seperti; nitrogen (N), oksigen (O), sulfur (S), dan fosfor (P) dalam sistem terkonjugasi. Senyawa-senyawa tersebut mampu terserap pada permukaan logam dengan membentuk lapisan tipis yang mencegah kontak langsung antara baja dan lingkungan (Ahmad dkk., 2023). Beberapa contoh sumber inhibitor organik alami adalah tumbuhan tembakau, teh, dan kopi (Ilim *et al.*, 2007). Beberapa contoh inhibitor sintesis yang mengandung nitrogen adalah oligomer 4-vinilpiridin (Ilim *et al.*, 2016), dan oligomer 2-vinilpiridin (Ilim *et al.*, 2021).

Senyawa nitrogen memiliki potensi sebagai inhibitor korosi karena adanya pasangan elektron bebas pada atom nitrogen yang dapat berikatan dengan permukaan logam, sementara rantai hidrokarbon membentuk lapisan film hidrofobik di atas permukaan logam tersebut. Salah satu metode untuk

menghasilkan senyawa nitrogen sebagai inhibitor korosi adalah melalui reaksi antara metil ester asam lemak dan dietanolamin dengan penambahan katalis tertentu (Wongwanichkangwarn *et al.*, 2021). Metil ester asam lemak dapat diperoleh dari minyak nabati melalui reaksi transesterifikasi, salah satu minyak nabati yang tersedia dalam jumlah besar di Indonesia adalah minyak kelapa sawit. Komposisi asam lemak minyak kelapa sawit terdiri dari asam lemak meliputi; asam palmitat (40,5%), asam oleat (43,5%), asam linoleat (9,3%), dan asam stearat (5,2%) (Montoya *et al.*, 2014). Dalam penelitian ini, minyak kelapa sawit diubah menjadi metil ester melalui reaksi transesterifikasi yang selanjutnya, diubah menjadi senyawa nitrogen melalui reaksi amidasi menggunakan dietanolamin dan zeolit-X dan H-X sebagai katalis.

Pada penelitian sebelumnya, Afifah (2021) dan Ilim *et al.* (2022) telah melakukan reaksi transesterifikasi minyak kelapa serta amidasi metil ester dengan dietanolamin menggunakan katalis zeolit-A yang disintesis dari silika sekam padi menggunakan reaktor autoklaf pada suhu 100 °C selama 48 jam, diperoleh persen konversi 53,54% dan 58,01%. Penelitian lainnya, Herliana (2022) telah melakukan konversi metil ester dari minyak kelapa dengan bantuan katalis zeolit-A untuk mendapatkan senyawa nitrogen menggunakan refluks pada suhu 160 °C selama 3 jam, diperoleh persen konversi 40,3%.

Hidayah (2023) yang telah melakukan reaksi transesterifikasi minyak sawit serta amidasi metil ester menggunakan katalis zeolit-A, diperoleh persen konversi 63,7%, dan Enrik (2024) melakukan reaksi transesterifikasi minyak biji karet serta amidasi menggunakan katalis zeolit-X dengan metode autoklaf pada suhu 100 °C selama 96 jam, menghasilkan senyawa nitrogen dengan jumlah relatif sebesar 55,05%.

Berdasarkan uraian di atas, maka pada penelitian ini sintesis zeolit-X berbasis sekam padi, dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Zeolit-X yang dihasilkan selanjutnya diprotonasi menggunakan larutan amonium nitrat untuk menghasilkan zeolit-X terprotonasi (H-X) dengan mengadopsi metode yang telah dilakukan oleh Rezani (2022).

Zeolit-X terprotonasi (H-X) yang terbentuk, kemudian dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Zeolit-X terprotonasi (H-X) digunakan untuk reaksi transesterifikasi minyak kelapa sawit dan reaksi amidasi metil ester yang terbentuk dengan dietanolamin. Hasil reaksi transesterifikasi dan amidasi dikarakterisasi menggunakan GC-MS. Produk amidasi berbasis minyak kelapa sawit diuji analisisnya sebagai *green corrosion inhibitor* baja lunak dalam medium korosif jenuh CO₂ menggunakan metode kehilangan berat (*wheel test*) dan analisis permukaan menggunakan SEM.

Konversi zeolit-X menjadi H-X dilakukan karena zeolit H-X diketahui memiliki aktivitas yang lebih baik dibanding zeolit-X dalam reaksi pirolisis (Rezani, 2022), namun belum pernah dilakukan uji menggunakan reaksi transesterifikasi untuk menghasilkan metil ester dan reaksi amidasi untuk senyawa nitrogen.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh katalis zeolit H-X melalui metode pertukaran ion menggunakan larutan amonium nitrat (NH₄NO₃) dan mengkarakterisasinya menggunakan XRD, SEM, dan XRF.
2. Memperoleh metil ester dari minyak kelapa sawit dengan bantuan katalis zeolit-X dan H-X melalui proses transesterifikasi.
3. Memperoleh senyawa nitrogen melalui reaksi amidasi ester minyak kelapa sawit menggunakan katalis zeolit-X dan H-X dan mengkarakterisasinya menggunakan GC-MS.
4. Memperoleh aktivitas inhibisi senyawa nitrogen dari hasil konversi metil ester dari minyak kelapa sawit sebagai inhibitor korosi baja lunak dalam medium yang mengandung CO₂ menggunakan *Wheel Test*.
5. Mendapatkan morfologi permukaan baja lunak dengan dan atau tanpa inhibitor korosi hasil sintesis menggunakan SEM.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memanfaatkan limbah sekam padi sebagai sumber silika dalam pembuatan katalis zeolit-X.
2. Mampu mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam yaitu minyak kelapa sawit menjadi sumber inhibitor korosi.
3. Mengetahui potensi senyawa nitrogen hasil konversi metil ester dari minyak kelapa sawit sebagai *green corrosion inhibitor* pada baja lunak.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja

Baja merupakan logam paduan dengan besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon baja berkisar antara 0,2% sampai 2,1% tergantung pada gradenya. Dalam baja, karbon berfungsi sebagai unsur pengeras, dan unsur paduan lain seperti nikel, mangan, krom, vanadium, dan lainnya biasanya ditambahkan. Variasi dalam kandungan karbon dan unsur paduan lainnya memungkinkan pembuatan baja dengan berbagai jenis. Titanium, krom, nikel, vanadium, kobalt, dan tungsten adalah bahan paduan lain yang sering digunakan selain karbon. Untuk meningkatkan kualitas baja, kandungan karbon dan unsur paduan lainnya dapat diubah. Jika baja dilapisi dengan karbon, itu dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tarik (*tensile strength*), tetapi membuatnya lebih keras (*brittle*), dan menurunkan keuletannya (*ductility*) (Afandi dkk., 2015).

Baja konstruksi menjadi salah satu *alloy steels* (baja paduan), yang pada umumnya mengandung lebih dari 98% besi dan biasanya kurang dari 1% karbon. Sekalipun komponen aktual kimiawi sangat bervariasi untuk sifat-sifat yang diinginkan, seperti kekuatannya dan tahanannya terhadap korosi, baja dapat juga mengandung elemen paduan lainnya, seperti silikon, magnesium, sulfur, fosfor, tembaga, krom, dan nikel, dalam berbagai jumlah. Baja merupakan sumber yang tidak dapat diperbaharui (*renewable*), tetapi dapat mempunyai sifat daur ulang (*recycled*), dan komponen besi yang sangat banyak. Salah satu keuntungan baja adalah keseragaman bahan dan sifat-sifatnya yang dapat diduga secara cepat.

Kestabilan dimensional, kemudahan pembuatan, dan cepatnya pelaksanaan juga merupakan hal-hal yang menguntungkan dari baja struktural ini. Kita dapat juga menuliskan kerugian-kerugiannya seperti mudahnya bahan ini mengalami korosi (kebanyakan baja, tapi tidak semua jenis baja) dan berkurangnya kekuatan pada temperatur tinggi (Supit dan Mait, 2020).

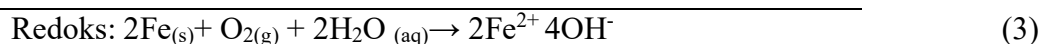
2.2 Korosi

Korosi (karat) adalah pengrusakan material disebabkan adanya reaksi kimia antara material tersebut dengan lingkungannya (Hakim dkk., 2020). Korosi dapat didefinisikan sebagai penurunan mutu material terutama logam karena berinteraksi dengan lingkungan. Korosi logam dalam larutan *aqueous* didapatkan dengan melibatkan reaksi perpindahan muatan. Suatu perubahan dalam potensial elektrokimia atau aktivitas elektron sangat mempengaruhi laju korosi logam dalam lingkungannya (Jones, 1996). Proses pencegahan korosi salah satunya adalah dengan menggunakan inhibitor. Inhibitor korosi didefinisikan sebagai suatu zat yang apabila ditambahkan ke dalam lingkungan akan menurunkan serangan korosi lingkungan terhadap logam.

Korosi adalah perubahan kualitas logam yang dapat terjadi karena suhu dan tingkat keasaman. Logam yang terkorosi dengan cepat kehilangan kualitasnya. Logam banyak digunakan dalam berbagai industri. Besi (Fe), Seng (Zn), Timbal (Pb), Perak (Ag), Nikel (Ni), dan lainnya adalah beberapa jenis logam yang biasa kita lihat dalam kehidupan sehari-hari. Korosi logam terjadi ketika permukaannya terbuka dan menyebar ke bagian lain dengan waktu. Karena terjadinya ikatan kimiawi antara atom logam dengan oksigen, bagian yang terkena korosi mengalami perubahan susunan molekul (Ahmad dkk., 2023).

Korosi yang terjadi di dalam suatu larutan berawal dari logam yang teroksidasi di dalam larutan, dan melepaskan elektron untuk membentuk ion logam yang bermuatan positif. Reaksi ini terjadi di permukaan logam yang akan menyebabkan pengelupasan akibat pelarutan logam ke dalam larutan secara berulang-ulang

(Yanuar dkk., 2017). Proses korosi melibatkan dua reaksi setengah sel yaitu reaksi oksidasi pada anoda dan reaksi reduksi pada katoda. Contoh yang paling umum yaitu korosi yang terjadi pada logam besi (Fe), reaksinya dituliskan dalam Persamaan 1-3.



Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi proses korosi antara lain:

1. Suhu kenaikan akan menyebabkan bertambahnya kecepatan korosi. Hal ini terjadi karena semakin tinggi suhu, maka energi kinetik dari partikel-partikel yang bereaksi akan meningkat dan melampaui besarnya harga aktivasi dan akibatnya laju korosi juga akan semakin cepat, begitu juga sebaliknya.
2. Kecepatan alir fluida atau kecepatan pengadukan laju korosi akan bertambah jika laju atau kecepatan aliran fluida bertambah besar. Hal ini karena kontak antara zat pereaksi dan logam semakin besar, sehingga ion-ion logam semakin banyak yang lepas dan logam akan mengalami kerapuhan.
3. Oksigen (O_2) yang terdapat di dalam udara dapat bersentuhan dengan permukaan logam yang lembab, sehingga kemungkinan menjadikan laju korosi lebih besar, di dalam air (lingkungan terbuka) adanya oksigen menyebabkan korosi.
4. Waktu kontak dapat mempengaruhi laju korosi, semakin lama baja terendam dalam medium korosif, maka akan menghasilkan produk korosi yang lebih banyak, sehingga mengalami kerusakan yang lebih parah, dan hal ini akan terus berlanjut jika tidak ada lapisan pelindung.
5. Konsentrasi bahan korosif berhubungan dengan pH suatu larutan. Larutan yang bersifat asam sangat korosif terhadap logam dimana logam yang berada di dalam media larutan asam akan lebih cepat terkorosi karena merupakan reaksi anoda. Larutan yang bersifat basa dapat menyebabkan korosi pada 8 reaksi katodanya karena reaksi katoda selalu serentak dengan reaksi anoda. Gas CO_2 merupakan salah satu penyebab bahan korosif bersifat asam yang

dapat meningkatkan laju korosi terutama pada industri gas dan minyak bumi, sehingga sering disebut dengan korosi CO₂ (Kahyarian *et al.*, 2016).

2.3 Jenis-Jenis Korosi

Logam yang terserang korosi akan lebih mudah untuk diklasifikasikan menurut bentuk atau penampilan. Hanya dengan melakukan pengamatan secara visual masing-masing bentuk korosi dapat diketahui (Wibowo dan Ghofur, 2021).

Berikut beberapa jenis-jenis korosi yang sering dijumpai di lingkungan :

2.3.1 Korosi Umum

Korosi ini terjadi pada permukaan logam yang sering dijumpai dengan dampak logam berubah warna menjadi kecoklatan. Biasanya peralatan yang ada sudah didesain sedemikian rupa untuk mengantisipasi terjadinya korosi ini dengan cara menambah ekstra ketebalan yang dibuat oleh *design engineer* untuk mengatasi kondisi tersebut atau disebut sebagai *corrosion allowance*.

2.3.2 *Uniform attack* (korosi seragam)

Korosi yang terjadi pada permukaan logam akibat reaksi kimia karena pH air yang rendah dan udara yang lembab, sehingga makin lama logam makin menipis. Biasanya ini terjadi pada pelat baja atau profil logam homogen. Korosi jenis ini bisa dicegah dengan cara diberi lapis lindung yang mengandung inhibitor seperti pelumas.

2.3.3 *Pitting corrosion* (korosi sumur)

Korosi yang disebabkan karena komposisi logam yang tidak homogen, yang dimana pada daerah batas timbul korosi yang berbentuk sumur.

Korosi jenis ini dapat dicegah dengan cara:

- a. Pilih bahan yang homogen
- b. Diberikan inhibitor
- c. Diberikan coating dari zat agresif

2.3.4 Korosi Celah

Korosi celah terjadi pada daerah celahan atau daerah-daerah yang tersembunyi pada permukaan logam yang berada pada lingkungan korosif, korosi ini terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi oksigen dicelah dengan lingkungan. Permukaan logam yang konsentrasi O_2 lebih tinggi logam bersifat lebih katodik sedangkan konsentrasi O_2 jauh lebih rendah dalam celah sehingga bersifat jauh lebih anodik dan mengalami korosi dengan laju yang tinggi. Korosi celah dapat dikendalikan dengan cara menghindari terbentuknya celah-celah dalam suatu konstruksi.

2.3.4 Korosi erosi

Korosi yang terjadi karena keausan dan menimbulkan bagian-bagian yang tajam dan kasar, bagian-bagian inilah yang mudah terjadi korosi dan juga diakibatkan karena fluida yang sangat deras dan dapat mengikis film pelindung pada logam. Korosi ini biasanya terjadi pada pipa dan *propeller*.

2.3.5 *Galvanis corrosion* (korosi galvanis)

Korosi yang terjadi karena adanya 2 logam yang berbeda dalam satu elektrolit sehingga logam yang lebih bersifat anodik akan terkorosi. Korosi ini dapat dicegah dengan cara:

- a. Beri isolator yang cukup tebal hingga tidak ada aliran elektrolit
- b. Pasang proteksi katodik
- c. Penambahan anti korosi inhibitor pada cairan (Utomo, 2012).

2.4 Korosi Karbon Dioksida (CO_2)

Korosi CO_2 adalah jenis korosi yang terjadi ketika logam, terutama baja, bereaksi dengan gas CO_2 dalam lingkungan berair. Korosi internal akibat gas CO_2 merupakan korosi yang terjadi pada pipa. Korosi internal adalah proses degradasi logam yang terjadi secara perlahan seiring waktu, disebabkan oleh reaksi elektrokimia di mana kualitas air memainkan peran penting dalam mempercepat korosi dan menyebabkan terbentuknya endapan pada dinding pipa (Bastian *et al.*,

2019). Korosi CO₂ dipengaruhi oleh temperatur, tekanan, konsentrasi, aliran fluida, dan lain sebagainya (Ilim *et al.*, 2016). Gas CO₂ tidak bersifat korosif jika berada dalam keadaan kering dan tidak terlarut dalam air. Jika terlarut dalam air gas ini akan membentuk suatu asam lemah H₂CO₃ yang bersifat korosif. Laju korosi pada korosi CO₂ ditentukan oleh sifat lapisan produk korosi yang terbentuk pada permukaan logam. Jika lapisan terbentuk pada keadaan yang sesuai maka akan terbentuk lapisan protektif yang dapat menurunkan laju korosi (Tang, 2019). Secara umum, CO₂ yang terlarut dalam air akan membentuk asam karbonat dengan reaksi;



Dibandingkan dengan oksigen, reaksi tersebut cenderung terjadi akibat daya larut CO₂ yang lebih tinggi dari oksigen. Jika korosi CO₂ dapat dikategorikan sebagai korosi yang diakibatkan oleh asam lemah, dimana baja terkorosi akibat reduksi dari H⁺ dan oksidasi dari Fe, seharusnya dari reaksi di atas tingkat korosif dari CO₂ seharusnya sangat lemah. Hal ini dikarenakan tingkat disosiasi yang rendah. Nyatanya, tingkat korosif dari asam karbonat adalah lebih tinggi dari nilai dari reaksi diatas (Sudiarti, 2017).

2.5 Penanganan Korosi

Menurut (Córdoba *et al.*, 2016) korosi tidak dapat dihentikan, namun laju korosi dapat diminimalisir, tujuannya untuk mengurangi bahkan menghindari kerugian akibat korosi. Pencegahan korosi dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu:

2.5.1 Pemilihan Material (*Material Selection*)

Prinsip dasar dari pemilihan material ini adalah mengenai tepat atau tidaknya pengaplikasian suatu material terhadap suatu lingkungan tertentu. Pemilihan material yang sesuai lingkungan dapat meminimalisir kerugian akibat terjadinya korosi, namun pemilihan material ini sangat

membutuhkan biaya yang relatif tinggi terutama dalam industri gas dan minyak bumi, karena akan memerlukan banyak pipa untuk mencapai dasar tambang hingga ke penyaluran.

2.5.2 Pelapisan (*Coating*)

Coating merupakan proses pelapisan permukaan logam dengan cairan atau serbuk yang akan melekat secara kontinyu pada logam yang akan dilindungi. Adanya lapisan pada permukaan logam akan meminimalkan kontak antara logam dengan lingkungannya, pelapisan yang umum adalah dengan menggunakan cat atau melapisi dengan logam yang tidak mudah teroksidasi.

2.5.3 Proteksi Katodik

Proteksi katodik merupakan salah satu cara perlindungan terhadap korosi yaitu dengan pemberian arus searah (DC) dari suatu sumber eksternal untuk melindungi permukaan logam dari korosi. Metode ini efektif dan berhasil melindungi logam dari korosi khususnya di lingkungan yang terendam air maupun di dalam tanah, seperti perlindungan pada kapal laut, instalasi pipa bawah tanah, dan sebagainya. Untuk memberikan arus searah dalam sistem proteksi katodik terdapat dua cara yaitu dengan cara menerapkan anoda (*Sacrificial Anode*) atau dengan cara menerapkan arus tanding (*Impressed Current*).

2.5.4 Penambahan Inhibitor

Inhibitor adalah senyawa tertentu yang ditambahkan pada elektrolit untuk membatasi korosi logam. Inhibitor terdiri dari anion atom ganda yang dapat masuk ke permukaan logam, dengan demikian dapat menghasilkan lapisan film tipis yang melindungi logam dari korosi.

2.6 Inhibitor Korosi

Inhibitor korosi adalah zat yang ketika ditambahkan dalam jumlah kecil ke lingkungan dapat mengurangi korosi logam. Inhibitor korosi biasanya berasal dari senyawa organik dan anorganik dengan pasangan elektron bebas. Contohnya termasuk senyawa seperti nitrit, kromat, fosfat, urea, fenilalanin, dan senyawa amina yang berbahaya dan tidak ramah lingkungan. Untuk mencegah korosi, penggunaan inhibitor yang aman, mudah diakses, *biodegradable*, murah, dan ramah lingkungan sangat penting. Inhibitor yang memenuhi ketentuan tersebut adalah inhibitor senyawa organik, seperti senyawa turunan imidazol, yang banyak dikembangkan dalam industri minyak untuk mencari inhibitor dengan efisiensi inhibisi terbaik. Banyak penelitian telah dilakukan tentang efisiensi senyawa turunan imidazol sebagai inhibitor korosi, yang menunjukkan berbagai aktivitas inhibisi korosi berdasarkan struktur molekul dan gugus fungsinya. Penggunaan inhibitor ini disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan jenis logam yang digunakan (Ichsanudin dkk., 2023).

2.6.1 Inhibitor anorganik

Inhibitor anorganik berasal dari mineral-mineral yang tidak memiliki unsur karbon dalam keadaan senyawanya. Inhibitor anorganik terdiri dari bahan seperti kromat, nitrit, silikat, dan fosfat. Senyawa tersebut berfungsi sebagai inhibitor anodik karena memiliki gugus aktif, yaitu anion negatif yang membantu mengurangi korosi. Namun, inhibitor anorganik memiliki beberapa kelemahan, yaitu bersifat toksik dan tidak ramah lingkungan (Li *et al.*, 2019). Dengan demikian, penggunaan inhibitor organik lebih unggul dan efisien daripada menggunakan inhibitor anorganik (Abi dkk., 2023).

2.6.2 Inhibitor organik

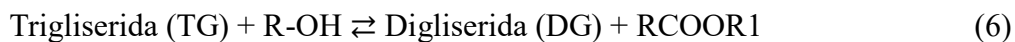
Berdasarkan bahan dasar pembuatannya, inhibitor korosi organik adalah inhibitor yang dibuat dari bahan organik yang tersedia secara alami (Wulan dkk., 2022).

Inhibitor organik selain dapat menghambat laju korosi juga memiliki sifat non-toksik, murah, mudah didapatkan dan dapat diperbaharui. Senyawa organik yang berfungsi sebagai inhibitor korosi adalah senyawa yang mengandung atom nitrogen, oksigen, fosfor, dan sulfur, yang memiliki pasangan elektron bebas.

Unsur-unsur yang mengandung pasangan elektron bebas ini nantinya dapat berfungsi sebagai ligan yang akan membentuk senyawa kompleks dengan logam (Haryono dkk., 2010). Senyawa inhibitor organik yang banyak dikembangkan saat ini salah satunya senyawa yang mengandung unsur nitrogen seperti senyawa alkanolamida.

2.7 Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit

Reaksi transesterifikasi merupakan reaksi kimia yang melibatkan trigliserida dan alkohol sebagai reaktan, serta penambahan katalis untuk meningkatkan laju reaksi dengan hasil berupa ester dan gliserol. Reaksi transesterifikasi bersifat *reversible* dan reaksi ini hampir sama dengan reaksi hidrolisis tetapi menggunakan alkohol. Reaksi transesterifikasi dimulai saat asam lemak, alkohol, dan katalis dicampur dan diaduk dalam bejana reaksi baik dalam labu kecil skala laboratorium atau skala yang lebih besar. Reaksi transesterifikasi dipengaruhi oleh beberapa parameter antara lain jenis bahan baku dan alkohol. Rasio molar minyak terhadap alkohol, suhu reaksi, jenis katalis, dan konsentrasi serta intensitas pengadukannya. Transesterifikasi melibatkan tiga reaksi *reversible* berturut-turut, yaitu konversi trigliserida menjadi digliserida, selanjutnya konversi digliserida menjadi monogliserida, dan terakhir konversi monogliserida menjadi ester. Gliserida diubah menjadi gliserol, dan menghasilkan satu ester pada setiap tahap yang mana prosesnya dapat dilihat pada Persamaan reaksi 6-8.



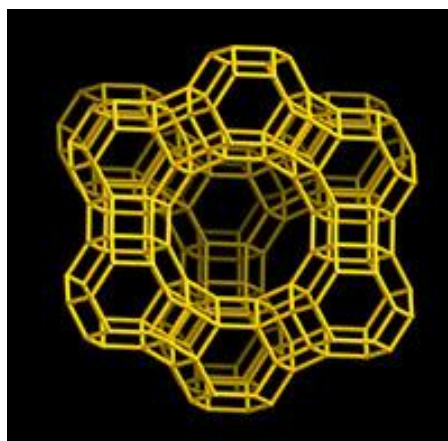
Tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan salah satu tanaman komoditas perkebunan yang memiliki peranan penting di Indonesia sebagai penghasil minyak nabati. Kelapa sawit merupakan tumbuhan tropis yang tergolong dalam *family palmae* dan berasal dari Afrika Barat. Meskipun demikian, kelapa sawit dapat tumbuh di luar daerah asalnya, termasuk di Indonesia. Kelapa sawit merupakan tanaman dengan nilai ekonomis yang cukup tinggi karena merupakan salah satu tanaman penghasil minyak nabati. Sebagai bahan oleopangan, minyak sawit umumnya digunakan untuk minyak goreng, margarin, vanaspati, dan pengganti lemak coklat (*cocoa butter*), sedangkan sebagai bahan non-pangan (oleokimia) dapat berupa asam lemak, gliserin, sabun, deterjen, pelumas, *plasticizer*, kosmetik, dan alternatif bahan bakar diesel. Salah satu produk oleokimia yang dapat diperoleh dari minyak sawit adalah asam lemak (Maulinda dkk., 2018).

2.8 Zeolit-X

Zeolit merupakan kristal mineral komposit yang terdiri dari alumina dan silika. Kristal zeolit yang terdiri dari SiO_2 dan $[\text{AlO}_4]^-$ dengan membentuk struktur tetrahedral. Zeolit dapat ditemukan secara alami (zeolit alam) dan dapat pula dibuat dengan teknik tertentu (zeolit sintesis). Zeolit sintetis memiliki karakteristik yang berbeda dengan zeolit alam. Zeolit alam dipengaruhi oleh kondisi geologis dan geografis alam sedangkan, zeolit sintesis hanya dipengaruhi oleh teknik sintesis, proses pembuatan, dan komposisi bahan baku. Bahan baku yang sering digunakan dalam zeolit sintesis adalah silika sekam padi. Menurut, (Simanjuntak *et al.*, 2016), sekam padi mengandung 18-20% silika dan memiliki kemurnian yang tinggi, yakni sekitar 95%. Pada penelitian ini silika sekam padi digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan sintesis katalis zeolit-X.

Zeolit-X memiliki ukuran pori 8 Å dengan morfologi permukaan kubik. Zeolit-X memiliki topologi kerangka yang sama dengan zeolit-Y, tetapi rasio Si/Al zeolit-X lebih rendah (1,1-1,5) dibandingkan zeolit-Y (1,5-3,0) (Qiang *et al.*, 2019).

Zeolit-X memiliki bentuk kristal tetrahedral dan memiliki luas permukaan dan volume pori yang sangat besar. Karakteristik lain dari kristal ini adalah ukuran pori yang seragam dan struktur yang mirip dengan sarang lebah. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan pada tahun 2019 oleh Zhu *et al.*, zeolit-X yang disintesis dari *ash fly coal* dan residu aluminium menunjukkan luas permukaan spesifik BET 990,3 m² / g, dengan diameter pori sekitar 1,6 nm, dan ukuran partikel antara 1 dan 3 µm, yang menunjukkan distribusi ukuran partikel yang seragam. Struktur zeolit-X dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur zeolit-X (*International Zeolite Association*, 2017).

2.9 Sintesis Senyawa Nitrogen

Senyawa nitrogen dan turunannya dapat diperoleh dengan cara mereaksikan asam lemak atau metil ester dengan dietanolamina yang sering disebut dengan reaksi amidasi. Turunan senyawa nitrogen yang dihasilkan dari dietanolamina memiliki tingkat kepolaran yang lebih baik karena adanya dua gugus hidroksil dalam molekul senyawa nitrogen yang dihasilkan. Parameter yang mempengaruhi reaksi amidasi diantaranya; jumlah katalis, waktu, perbandingan jumlah reaktan, dan temperatur. Katalis diperlukan dalam reaksi amidasi karena

katalis mampu mempercepat laju reaksi dan meningkatkan efisiensi proses serta produk yang dihasilkan. Katalis yang umum digunakan dalam reaksi amidasi yaitu: NaOH, KOH, CaO, enzim, dan modifikasi zeolit alam (Khoirulfatihin dan Kusumawardani, 2018). Amida adalah senyawa turunan nitrogen, sehingga natrium metoksida memiliki potensi yang baik sebagai katalis dalam reaksi amidasi (Wongwanichkangworn *et al.*, 2021).

Pada penelitian sebelumnya Ilim *et al.* (2022) telah melakukan reaksi amidasi untuk memperoleh derivat senyawa nitrogen melalui reaksi metil ester asam lemak minyak kelapa dan dietanolamina menggunakan katalis zeolit-A dengan metode autoklaf pada suhu 100 °C dalam waktu 48 jam, diperoleh hasil derivat senyawa nitrogen sebesar 58,01%. Reaksi amidasi melalui jalur yang sama juga telah dilakukan Herliana (2022) dengan menggunakan metode refluks pada suhu 160 °C diperoleh amida (turunan senyawa nitrogen) sebesar 40,3%.

Berdasarkan hasil senyawa nitrogen yang diperoleh peneliti sebelumnya, maka perlu adanya katalis yang lain untuk meningkatkan senyawa nitrogen yang diperoleh, sehingga pada penelitian ini dalam reaksi amidasi untuk memperoleh senyawa nitrogen menggunakan katalis zeolit-X.

2.10 Uji Aktivitas Inhibitor Korosi

Uji aktivitas inhibitor korosi bertujuan untuk mengetahui bagaimana aktivitas inhibitor dalam menghambat laju korosi suatu logam. Uji aktivitasnya dapat dilakukan dengan metode kehilangan berat (*wheel test*) (Ramos-Negrón *et al.*, 2019).

2.10.1 Metode kehilangan berat (*Wheel test*)

Metode kehilangan berat atau *wheel test* merupakan prosedur standar yang dapat digunakan untuk menentukan laju korosi. Prinsip dari metode ini adalah dengan

menghitung banyaknya material yang hilang atau kehilangan berat setelah dilakukan pengujian, menghitung massa logam yang telah dibersihkan dari oksida dan massa tersebut dinyatakan sebagai massa awal, lalu direndam pada suatu lingkungan yang korosif seperti pada air laut selama waktu tertentu. Setelah itu dilakukan penghitungan massa kembali dari suatu logam setelah dibersihkan logam tersebut dari hasil korosi yang terbentuk dan massa tersebut dinyatakan sebagai massa akhir. Data logam yang dihitung seperti luas permukaan yang terendam, berat awal dan akhir, waktu perendaman, dan massa jenis logam yang diuji maka dihasilkan suatu laju korosi. Metode *wheel test* sering digunakan pada skala industri dan laboratorium karena menggunakan peralatan sederhana, namun dari pengujian ini untuk mendapatkan suatu laju korosi memiliki kelemahan. Kelemahan tersebut adalah tidak dapat mendeteksi secara cepat perubahan yang terjadi saat proses korosi (Ilim *et al.*, 2017). Metode kehilangan berat dapat ditentukan menggunakan Persamaan 9 dan untuk menghitung laju korosi (CR) digunakan Persamaan 10 berikut ini (Ilim *et al.*, 2017):

$$W = W_i - W_t \quad (9)$$

$$CR = \frac{10 \times W \times 365}{A \times D \times t} \quad (10)$$

Keterangan:

- W = kehilangan berat (g)
- W_i = berat awal (g)
- W_t = berat akhir (g)
- CR = laju korosi (mm/th)
- A = luas permukaan sampel (cm²)
- D = density (g cm⁻³)
- t = waktu (hari)

Untuk mengetahui kemampuan proteksi dari inhibitor dalam menghambat laju korosi dapat dilakukan dengan menghitung persen proteksi inhibitor menggunakan Persamaan 11.

$$\%P = \frac{(CRo - CRi)}{CRo} \times 100\% \quad (11)$$

Keterangan:

%P = persen proteksi

CRo = laju korosi tanpa inhibitor (blanko)

CRi = laju korosi dengan inhibito

2.11 Karakterisasi Produk

2.11.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Analisis XRD adalah teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi bahan kristalin. XRD memberikan informasi tentang struktur, fase, orientasi kristal (tekstur), dan parameter struktural lainnya, seperti ukuran butiran rata, kristalinitas, ketegangan, dan cacat kristal. (Muttaqin, 2023). Difraksi sinar-X merupakan teknik yang mempelajari struktur kristal dan jarak atom. Difraksi sinar-X didasarkan pada *constructive interference* sinar-X monokromatik dan sampel kristal. Sinar-X dihasilkan oleh tabung sinar katoda, disaring untuk menghasilkan radiasi monokromatik. Interaksi sinar dengan sampel menghasilkan interferensi konstruktif dan sinar yang difraksi ketika kondisi sesuai dengan hukum *Bragg* (Persamaan 12):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (12)$$

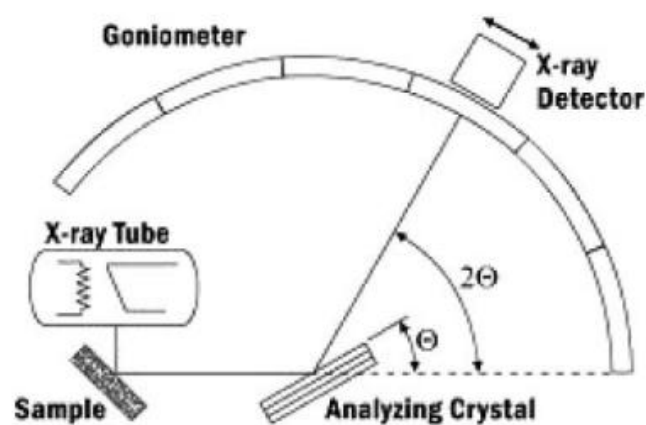
Lambang (n) adalah bilangan bulat, (λ) panjang gelombang sinar-X, (d) adalah jarak inter planar yang menghasilkan difraksi, dan (θ) adalah sudut difraksi. Hukum ini menghubungkan panjang gelombang radiasi elektromagnetik dengan sudut difraksi dan jarak kisi dalam sampel kristal.

Prinsip kerja dari alat ini adalah ketika elektron memiliki energi yang cukup untuk melepaskan elektron, spektrum sinar-X diproduksi. Spektrum ini terdiri dari

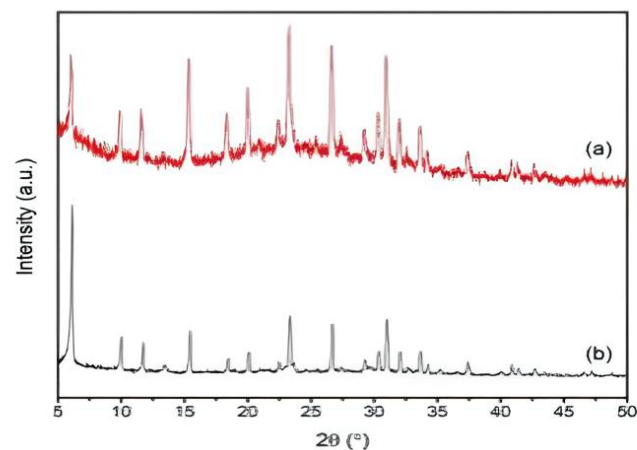
beberapa komponen seperti $K\alpha$ dan $K\beta$. $K\alpha$ terdiri dari $K\alpha_1$ dan $K\alpha_2$. $K\alpha_1$ memiliki panjang gelombang yang sedikit lebih pendek dan dua kali intensitas $K\alpha_2$. Panjang gelombang spesifik adalah karakteristik dari bahan target (Cu, Fe, Mo, Cr). Penyaringan, dengan foil atau monokrometer kristal, diperlukan untuk menghasilkan sinar-X monokromatik yang diperlukan untuk difraksi. $K\alpha_1$ dan $K\alpha_2$ memiliki panjang gelombang yg cukup dekat sehingga rata-rata keduanya digunakan (Bunaciu *et al.*, 2015). Skema diagram sistem difraktometer dapat terlihat pada Gambar 2.

Pada penelitian ini, XRD digunakan untuk menganalisis katalis zeolit-X yang disintesis menggunakan bahan baku silika sekam padi yang kemudian diprotonasi melalui proses pertukaran ion dan menghasilkan zeolit-X terprotonasi (H-X), seperti yang pernah dilakukan oleh Febriyanti *et al.* (2021). Hasil contoh dari difraktogram XRD dapat terlihat pada Gambar 3.

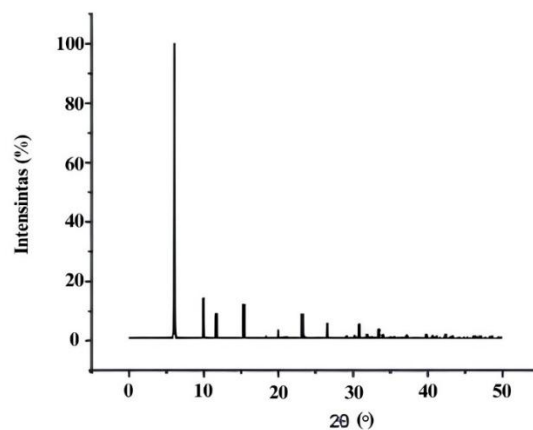
Difraktogram zeolit-X hasil sintesis akan disesuaikan puncaknya dengan standar IZA untuk menentukan apakah zeolit yang disintesis memiliki kesamaan dengan puncak difraktogram IZA, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 2. Skema diagram sistem difraktometer.



Gambar 3. XRD difraktogram (a) zeolit H-X, (b) zeolit-X



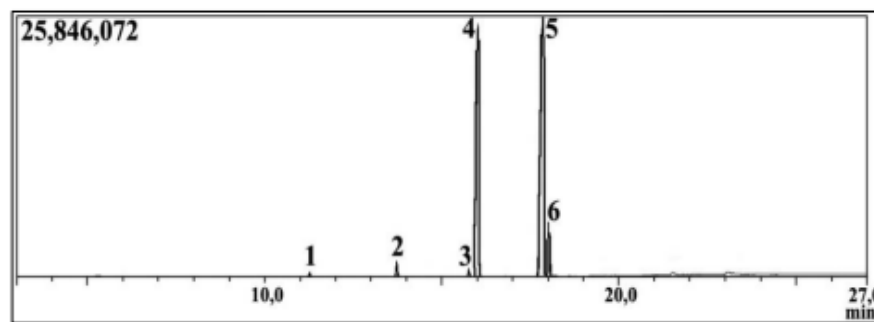
Gambar 4. Difraktogram standar zeolit-X (*International Zeolit Association, 2017*)

2.11.2 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

Analisis (GC-MS) merupakan metode analitik yang menggabungkan fitur-fitur kromatografi gas dan spektrometri massa untuk mengidentifikasi berbagai zat dalam sampel uji. GC bekerja berdasarkan prinsip bahwa campuran akan terpisah menjadi zat individu pada waktu retensi yang berbeda ketika dipanaskan. Gas yang dipanaskan dibawa melalui kolom dengan gas inert (seperti helium). Sebagai

zat yang terpisah muncul dari pembukaan kolom, kemudian mengalir ke MS. Spektrometri massa mengidentifikasi senyawa dengan massa molekul analit.

Prinsip kerja dari GC-MS yaitu molekul- molekul gas bermuatan akan diseleksi berdasarkan massa dan beratnya, spektrum yang didapat dari pengubahan sampel menjadi ion-ion yang bergerak, kemudian dipisahkan berdasarkan perbandingan massa terhadap muatan (m/e). Ionisasi menghasilkan fragmen-fragmen yang akan menghasilkan spektrum. Spektrum massa merupakan gambaran limpahan relatif dengan perbandingan massa per muatan (m/e) (Hotmian dkk., 2021). Hasil contoh kromatogram dari GC dapat terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kromatogram sampel metil ester minyak kelapa sawit (Hidayah, 2023).

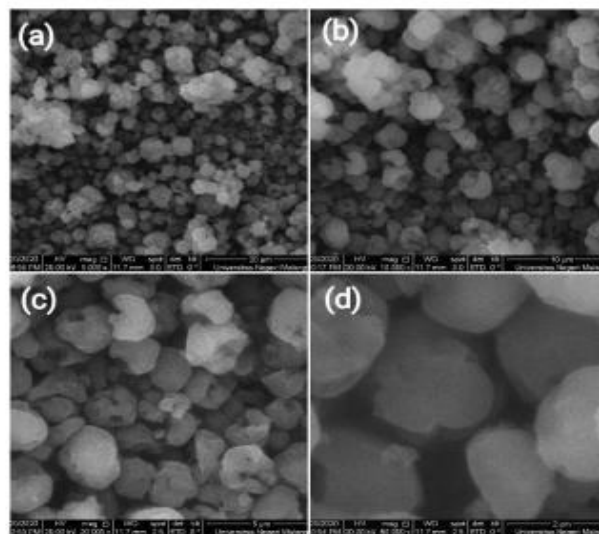
2.11.3 *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Analisis (SEM) adalah alat pembesaran yang memanfaatkan sinar elektron yang terfokus untuk mendapatkan informasi. Pengujian SEM pada dasarnya merupakan pemeriksaan dan analisa morfologi. Gambar morfologi diperoleh dari penangkapan elektron sekunder yang dipancarkan oleh spesimen (Kardiman *et al.*, 2018). Prinsip kerja alat ini adalah ketika filamen yang terbuat dari tungsten memancarkan berkas elektron sebagai sumber elektron, elektron tersebut akan berinteraksi dengan bahan (spesimen) dan menghasilkan elektron sekunder serta sinar-X karakteristik. Scanning pada permukaan bahan yang dikehendaki dapat

dilakukan dengan mengatur *scanning generator* dan *scanning coils* (Abdullah and Mohammed, 2018).

Febriyanti *et al.* (2021) berhasil mensintesis zeolit-X terprotonasi (H-X) dari silika sekam padi dan alumunium foil *food grade* dengan metode hidrotermal.

Morfologi dari sampel ditunjukkan pada Gambar 6 dengan waktu *aging* selama 24 jam.



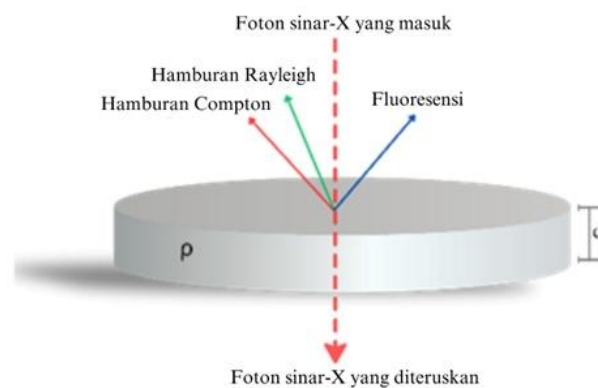
Gambar 6. Hasil morfologi SEM dari zeolit H-X *aging* 24 jam dengan perbesaran (a) 5000x, (b) 10000x, (c) 20000x, dan (d) 50000x.

2.11.4 X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF adalah teknik analisis atom yang efektif untuk melakukan analisis kimia kualitatif dan kuantitatif pada suatu sampel. Teknik ini mampu mendeteksi berbagai unsur dari Boron (B) hingga Uranium (U) berdasarkan urutan nomor atom. XRF memberikan hasil analisis multi-elemen yang cepat, non-destruktif, serta memiliki sensitivitas yang tinggi, mencapai 10^{-8} g, tergantung pada elemen yang dianalisis. Keunggulan XRF dapat dilihat dari kemampuannya untuk menganalisis sampel padat secara langsung tanpa adanya proses tambahan. Teknik

ini banyak digunakan dalam penelitian lingkungan, analisis lapangan agronomi, dan aplikasi industri (Marguí *et al.*, 2022).

Prinsip kerjanya adalah sebagai berikut: Terdapat tiga interaksi utama ketika sinar-X kontak dengan materi; *Fluorescence*, *Compton scatter*, dan *Rayleigh scatter*. Jika seberkas foton sinar-X diarahkan ke lempengan material pada fraksi yang akan ditransmisikan, sebagian kecil diserap menghasilkan radiasi *fluorescent* dan sebagian kecil tersebar kembali. Hamburan dapat terjadi dengan hilangnya energi atau tanpa kehilangan energi. Hamburan pertama dikenal sebagai *compton scatter* dan yang kedua adalah *Rayleigh*. Fluoresensi dan hamburan tergantung pada ketebalan (d), densitas (ρ) komposisi bahan dan pada energi sinar-X (Brouwer, 2003). Interaksi dari sinar-X dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Interaksi sinar-X kontak dengan materi.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober 2024 hingga Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Karakterisasi zeolit-X menggunakan XRD dan analisis komposisi zeolit H-X menggunakan XRF dilaksanakan di Laboratorium Instrumen Kimia, Universitas Negeri Padang (UNP). Karakterisasi untuk mengidentifikasi senyawa kimia menggunakan GC-MS produk transesterifikasi dan amidasi dilaksanakan di Laboratorium Instrumentasi FMIPA Terpadu Universitas Islam Indonesia (UII). Analisis morfologi permukaan katalis zeolit-X dan baja lunak menggunakan SEM dilaksanakan di Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT) FMIPA Universitas Lampung.

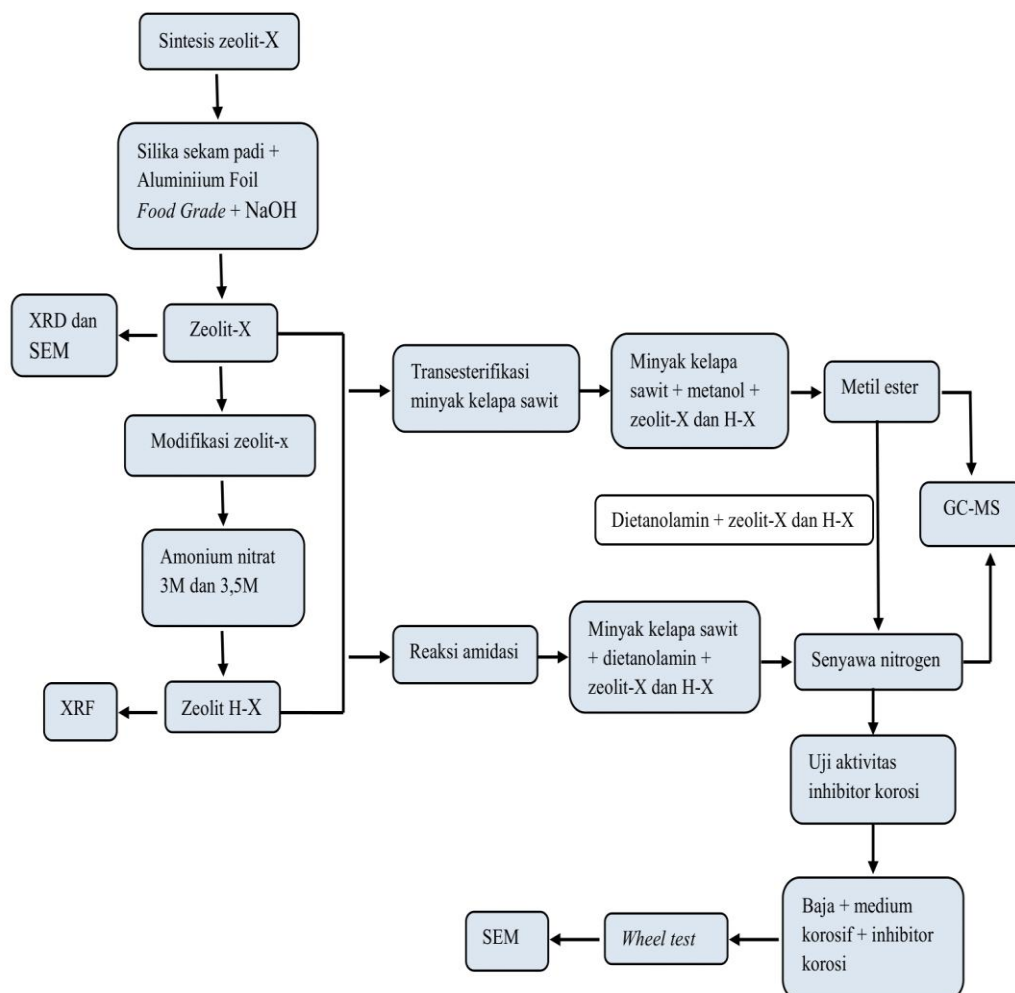
3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah; autoklaf, *furnace*, alat refluks, desikator, hot *plate*, oven, *magnetic stirrer*, labu bundar, corong pisah, *water bath*, termometer, saringan mesh ukuran 300 nm, mikropipet, cawan krus, jangka sorong, neraca analitik, gelas kimia, spatula, labu ukur, Erlenmeyer, gelas ukur, *Scanning Electron Microscope* (SEM) tipe ZEISS EVO® MA 10, *X-Ray Diffraction* (XRD) PANalytical tipe X'Pert Pro 3040/60, *X-Ray Fluorescence* (XRF) tipe PANalytical Epsilon 3^{XLE}, dan *Gas Chromatography-Mass Spectroscopy* (GC-MS) tipe Shimadzu QP 2010 SE.

Adapun bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah; NaCl, NaOH, metanol, NaHCO_3 , gas CO_2 , NH_4NO_3 , HNO_3 , dietanolamina, Sb_2O_3 , SnCl_2 , HCl pekat, baja lunak jenis SAE/AISI Grade 1022, sekam padi, aluminium foil *food grade*, minyak kelapa sawit, akuades, indikator pH, kertas saring, dan kertas silikon karbida (grade 200, 400, 600, 800, 1000 dan 1200).

3.3 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 8. Diagram alir penelitian

3.4 Prosedur Kerja

3.4.1 Preparasi Sekam Padi

Sekam padi dipreparasi terlebih dahulu yaitu dengan merendam sekam padi dalam air untuk menghilangkan pengotornya dan dipisahkan antara sekam padi yang mengapung dan tenggelam. Sekam padi yang mengapung dibuang, sedangkan sekam padi yang tenggelam dikumpulkan karena mengandung silika yang tinggi. Kemudian, sekam padi yang mengandung silika dicuci kembali secara berulang dengan air mengalir untuk menghilangkan pengotor yang diperkirakan masih menempel pada permukaan sekam padi. Sekam padi yang telah bersih selanjutnya dikeringkan di bawah sinar matahari.

3.4.2 Ekstraksi Silika Sekam Padi

Sekam padi yang sudah bersih, ditimbang sebanyak 2000 g dan dilarutkan dalam larutan NaOH 1,5% sebanyak 20 L ke dalam gelas beaker. Selanjutnya dipanaskan hingga mendidih selama 30 menit, lalu diangkat dan didiamkan selama 24 jam hingga suhu ruang. Hasil setelah didiamkan selama 24 jam yaitu terdapat 2 fasa (filtrat dan residu). Kedua fasa tersebut kemudian disaring dan filtrat yang mengandung silika dikumpulkan. Sol silika (filtrat) yang sudah dikumpulkan kemudian ditambahkan larutan HNO₃ 10% hingga pH 7 dan di-*aging* selama 24 jam agar diperoleh gel yang diinginkan. Setelah itu, gel dicuci dengan air panas hingga berwarna putih dan dikeringkan di dalam oven pada suhu 100 °C selama 24 jam. Setelah kering, padatan gel silika kemudian digerus dan diayak menggunakan saringan mesh 300 nm.

3.4.3 Sintesis Katalis Zeolit-X

Pembuatan katalis zeolit-X ($4,8\text{Si}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{Na}_2\text{O}_3 \cdot 120\text{H}_2\text{O}$) diawali dengan pembuatan larutan NaOH terlebih dahulu dengan cara melarutkan 22,22 g NaOH (Pa) di dalam 240 mL akuades. Kemudian larutan NaOH dicampurkan dengan silika yang sudah diayak sebanyak 20 g dan diaduk dengan menggunakan *hot plate stirrer* pada suhu $70\text{ }^\circ\text{C}$ selama 3 jam. Kemudian disaring dan di diamkan selama 24 jam. Natrium silikat yang diperoleh kemudian digunakan untuk melarutkan aluminium foil sebanyak 3,75 g. Selanjutnya, dimasukkan ke dalam autoklaf dan di-*aging* selama 24 jam dan dilakukan kristalisasi dalam oven pada suhu $100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 96 jam. Prekursor zeolit-X yang diperoleh, dicuci dengan akuades hingga pH menjadi 7. Dikeringkan kembali di dalam oven pada suhu $100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 24 jam dan dilakukan penghalusan dengan mortar serta diayak menggunakan mesh ukuran 300 nm. Prekursor yang diperoleh dikalsinasi pada suhu $550\text{ }^\circ\text{C}$ selama 6 jam untuk memperoleh zeolit-X. Untuk membuktikan hasil yang diperoleh, maka zeolit-X hasil sintesis dikarakterisasi dengan XRD dan SEM.

3.4.4 Modifikasi Zeolit-X dengan Metode *Ion Exchange*

Modifikasi zeolit-X yang dilakukan menggunakan metode *ion exchange* dengan cara zeolit-X yang telah dikalsinasi dicampurkan ke dalam larutan NH_4NO_3 dengan variasi konsentrasi 3 dan 3,5 M. Selanjutnya, dipanaskan dengan *hotplate stirrer* pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ selama 6 jam dengan rasio zeolit/larutan sebesar 2 g/20 mL untuk memperoleh zeolit $\text{NH}_4^+\text{-X}$. Lalu filtrat $\text{NH}_4^+\text{-X}$ dicuci dengan akuades hingga pH netral, disaring, dan dikeringkan ke dalam oven pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ serta dikalsinasi selama 6 jam pada suhu $550\text{ }^\circ\text{C}$. Zeolit H-X yang terbentuk kemudian dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui persentase konversi dari Na menjadi H^+ .

3.4.5 Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit

Transesterifikasi dilakukan dengan nisbah minyak kelapa sawit dan reaktan 1:4. Sebanyak 25 mL minyak kelapa dicampur dengan 100 mL metanol dan kemudian ditambahkan katalis dengan variasi zeolit-X dan zeolit H-X sebanyak 10% dari berat minyak dalam labu bundar 250 mL. Campuran direfluks menggunakan *hotplate stirrer* pada suhu 70 °C selama 4 jam. Hasil refluks didinginkan hingga mencapai suhu ruang, lalu disaring dengan kertas saring ke dalam corong pisah dengan tujuan memisahkan katalis dengan produk yang dihasilkan. Filtrat kemudian didiamkan selama 24 jam agar terjadi pemisahan antara metil ester dengan minyak yang tersisa. Metil ester yang diperoleh kemudian di-*stirrer* selama 6 jam untuk menghilangkan metanol yang masih tersisa. Metil ester yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan GC-MS dan digunakan sebagai bahan baku pembuatan senyawa nitrogen dalam reaksi amidasi dengan dietanolamin.

3.4.6 Sintesis Senyawa Nitrogen (Reaksi Amidasi)

Metil ester yang sebelumnya diperoleh dicampurkan dengan dietanolamin (DEA) dalam perbandingan 1:1 dengan jumlah katalis zeolit H-X sebanyak 5%. Kemudian dimasukkan ke dalam autoklaf dan ditambahkan katalis dengan variasi zeolit-X dan zeolit H-X. Campuran tersebut kemudian di oven pada suhu 100 °C selama 48 jam dengan pengadukan selama 1 jam. Setelah itu, campuran didinginkan hingga suhu ruang dan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan katalis dari produk yang dihasilkan. Selanjutnya, sampel yang diperoleh didiamkan selama 24 jam untuk memisahkan senyawa nitrogen yang dihasilkan dari metil ester yang tersisa. Senyawa yang diperoleh kemudian dikarakterisasi menggunakan GC-MS dan digunakan sebagai inhibitor korosi.

3.4.7 Persiapan Sampel Baja Lunak

Baja lunak dipotong dengan ukuran 2x1 cm hingga menjadi bentuk seperti kupon, kemudian diampas dengan kertas amplas dengan grit 200, 400, 600, 800, 1000 dan 1200. Setelah permukaan baja lunak rata selanjutnya dibersihkan dengan akuades lalu dibilas dengan metanol kemudian diukur dimensi dan ditimbang massanya.

3.4.8 Persiapan Larutan

Persiapan larutan terdiri dari pembuatan larutan medium korosif, larutan induk inhibitor, dan *Clarke's Solution*.

1. Larutan Medium Korosif

Medium korosif yang digunakan adalah larutan air garam 3% (b/v) yang dibuat dengan cara melarutkan 30 g NaCl dan 0,1 g NaHCO₃ dalam labu ukur 1000 mL. Kemudian ditambahkan akuades hingga tanda tera dan dihomogenkan. Media korosif ini kemudian dijenuhkan dengan gas CO₂ *food grade* pada tekanan atmosfer dengan kecepatan sekitar 150-200 mL/menit.

2. Pembuatan larutan inhibitor

Larutan inhibitor dengan konsentrasi 15.000 ppm disiapkan dengan cara melarutkan inhibitor (senyawa nitrogen) sebanyak 0,15 g dalam 10 mL metanol.

3. Pembuatan *Clarke's solution*

Clarke's solution dibuat dengan melarutkan 5 g SnCl₂ dan 2 g Sb₂O₃ dalam 100 mL HCl pekat.

3.4.9 Penentuan Laju Korosi (*Weight Loss Method*)

Larutan korosif sebanyak 175 mL dimasukkan ke dalam botol duran 250 mL dan dialiri gas CO₂ selama 45 menit. Untuk mendapatkan larutan inhibitor dengan

konsentrasi 15.000 ppm, dipipetkan larutan inhibitor sebanyak 1,75 mL, dan dimasukkan ke dalam botol gelas menggunakan mikropipet. Kupon-kupon baja lunak yang telah diketahui massa dan dimensi nya dimasukkan ke dalam botol. Aliran gas CO₂ dihentikan dan botol langsung ditutup dengan hati-hati dengan memastikan tidak ada kontaminan oksigen, kemudian botol-botol didiamkan selama 24 jam. Kupon dikeluarkan dan dicelupkan dalam larutan *Clarke's solution* selama 5 detik. Setelah itu dicuci dengan akuades dan dibilas dengan metanol. Kupon yang telah kering ditimbang dengan neraca analitik. Perhitungan persen proteksi dapat dilihat pada Persamaan 11, untuk mengetahui kehilangan berat yang terjadi pada permukaan baja dapat dilihat pada Persamaan 9, dan laju korosi dapat dilihat pada Persamaan 10.

3.4.10 Analisis SEM

Metode ini digunakan untuk mempelajari morfologi permukaan sampel baja lunak untuk mengamati adanya korosi dan pengaruh inhibitor korosi pada permukaannya. Sebelum dilakukan analisis SEM, sampel direndam dalam larutan medium korosif dan dengan penambahan larutan inhibitor dengan konsentrasi 15.000 ppm sebanyak 1,75 mL yang di pipetkan ke dalam larutan medium korosif. Tiga jenis perlakuan pada sampel baja lunak, yaitu baja tanpa perlakuan, baja yang direndam dalam medium korosif tanpa inhibitor (blanko), dan baja yang direndam dalam medium dengan penambahan larutan inhibitor. Kemudian, sampel baja didiamkan selama 24 jam. Selanjutnya, sampel dibilas menggunakan akuades dan metanol tanpa menggunakan *Clarke's solution*. Perlakuan ini memungkinkan perbandingan morfologi permukaan antar sampel, sehingga korosi dan efek inhibitor dapat diamati dengan jelas.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Zeolit-X hasil sintesis memiliki karakteristik yang sesuai dengan standar IZA, berdasarkan karakterisasi dengan XRD menunjukkan pola difraksi pada daerah 2θ yang sesuai pada $6 - 23^\circ$, dan analisis dengan SEM menunjukkan morfologi permukaan berbentuk tetrahedral (piramida).
2. Zeolit-X terprotonasi telah berhasil terbentuk, dibuktikan melalui penurunan kandungan natrium dan peningkatan kadar hidrogen dengan nilai konversi ion Na^+ menjadi H^+ sebesar 13,55% pada konsentrasi 3,5 M berdasarkan analisis XRF.
3. Minyak kelapa sawit berhasil dikonversi menjadi senyawa metil ester melalui reaksi transesterifikasi dengan persen konversi sebesar 32%.
4. Hasil karakterisasi GC-MS terhadap produk amidasi pada variasi minyak kelapa sawit dengan zeolit H-X menunjukkan bahwa senyawa nitrogen terbentuk sebesar 55,63%.
5. Aktivitas inhibisi korosi terbaik diperoleh pada produk amidasi dengan kombinasi metil ester dan zeolit H-X, ditunjukkan oleh nilai persen proteksi sebesar 90,23%, serta diperkuat oleh hasil analisis SEM yang menunjukkan permukaan baja lunak terlindungi dengan baik dari serangan korosi.

5.2 Saran

Beberapa hal yang disarankan pada penelitian selanjutnya antara lain:

1. Meningkatkan efektivitas proses protonasi zeolit-X, khususnya dengan menggunakan konsentrasi larutan amonium nitrat yang lebih tinggi, untuk memperoleh konversi ion Na^+ menjadi H^+ yang lebih optimal.
2. Mengoptimalkan reaksi amidasi antara metil ester dan dietanolamin untuk meningkatkan hasil pembentukan senyawa nitrogen. Hal ini dapat dilakukan dengan memvariasikan rasio reaktan, waktu pengadukan, serta suhu reaksi.
3. Menggunakan metode elektrokimia, seperti *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) dan Polarisasi Tafel, dalam pengujian aktivitas inhibitor korosi, agar data yang diperoleh lebih akurat dan memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai mekanisme inhibisi yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A., and Mohammed, A. 2018. Scanning Electron Microscopy (SEM): A review. *Proceedings of International Conference on Hydraulics and Pneumatics*. 7(9). 77–85.
- Abi, N. G., Batu, M. S., dan Kolo, M. M. 2023. Penggunaan Minyak Biji Feun Kase (*Thevetia Peruviana*) Sebagai Inhibitor Korosi Logam Seng Dalam Media Asam. *Jurnal Saintek*. 6(1). 14–16.
- Afandi, Y. K., Arief, I. S., dan Amiadji. 2015. Analisa Laju Korosi pada Pelat Baja Karbon dengan Variasi Ketebalan Coating. *Jurnal Teknik ITS*. 4(1). 1–5.
- Afifah, A. I. N. 2022. Conversion of Coconut Oil Derived Methyl Esters Into Nitrogen Compounds as Green Corrosion Inhibitor. *Skripsi*. University of Lampung.
- Ahmad, F., Saputra, R. A., Syeptiani, S. 2023. Pengaruh Pemberian Disinfektan Terhadap Laju Korosi dan Jenis Korosi Yang Terjadi Pada Logam. *Jurnal Multidisiplin Raflesia*. 2(1). 55–59.
- Aisyah, N., dan Wahyu, A. 2022. Synthesis and Characterization of Zeolite-X from Boiler Ash and Aluminum Foil Waste. *Indonesian Journal of Chemical Science and Techonology*. 5(1). 31–41.
- Al-Amiery, A. A., Isahak, W. N. R. W., and Al-Azzawi, W. K. 2023. Corrosion Inhibitors: Natural and Synthetic Organic Inhibitors. *Lubricants*. 11(4). 1-29.
- Amrulloh, H., Simanjuntak, W., and Situmeang, R. T. M. 2017. Sintesis $Mg(OH)_2$ dari Bittern Menggunakan Metode Elektrokimia. *Alkimia : Jurnal Ilmu Kimia Dan Terapan*. 1(1). 10–15.
- Bastian, B. T., Jaspreeth, N., Ranjith, S. K., and Jiji, C. V. 2019. Visual Inspection and Characterization of External Corrosion in Pipelines Using Deep Neural Network. *NDT and E International*. 107.1-11.

- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. G., and Aboul-Enein, H. Y. 2015. X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 45(4). 289–299.
- Brouwer, P. 2003. *Theory of XRF*. PANalytical BV. Netherlands.
- Cafferty, M. 2010. *Introduction to Corrosion Science*. Springer. New York Dordrecht Heidelberg London.
- Cordoba, L. C., Montemor, M. F., and Coradin, T. 2016. Silane/TiO₂ Coating to Control the Corrosion Rate of Magnesium Alloys in Simulated Body Fluid. *Corrosion Science*. 152–161.
- Elgaddafi, R., Ahmed, R., and Shah, S. 2021. Corrosion of Carbon Steel in CO₂ Saturated Brine at Elevated Temperatures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2-35.
- Enrik, R. 2024. Konversi Metil Ester dari Minyak Biji Karet (*Hevea brasiliensis*) Menggunakan Katalis Zeolit-X dengan Reaktor Autoclave Menjadi Senyawa Nitrogen dan Uji Aktivitas Sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Erna, M., Emriadi, E., Alif, A., and Arief, S. 2016. Thermodynamic Properties and Characterizations of Chitosan Nano Particles Corrosion Inhibition on the Surface of Mild Steel in Peat Water Media. *Alchemy: Jurnal Penelitian Kimia*. 12(1). 27-35.
- Febriyanti, T.D. 2022. Sintesis Zeolit Terprotonasi dari Silika Sekam Padi dan *Aluminium Foil* Sebagai Katalis Pirolisis Campuran Ubi Kayu dan Minyak Kelapa Sawit Untuk Menghasilkan *Biogasoline*. *Tesis*. Universitas Lampung.
- Febriyanti, T. D., Simanjuntak, W., and Pandiangan, K. D. 2021. Pyrolytic Conversion of Palm Oil into Liquid Fuel Using Protonated Zeolite-X Prepared from Rice Husk Silica and Aluminum Foil as Catalyst. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751. 1-9.
- Hakim, M., Mulyaningsih, N., Suharno, K., dan Taufik, I. 2020. Analisis Pengaruh Penggunaan Inhibitor Minyak Biji Kapas Terhadap Laju Korosi Pipa Radiator Mobil. *Journal of Mechanical Engineering*. 4(1). 15–21.

- Haryono, G., Sugiarto, B., dan Farid, H. 2010. Ekstrak Bahan Alam sebagai Inhibitor Korosi. *Jurnal Teknologi Kimia*. 1–6.
- Herliana. 2022. Konversi Metil Ester Asam Lemak Minyak Kelapa menjadi Senyawa Amida menggunakan Dietanolamina dan Uji Aplikasinya sebagai Inhibitor Korosi. *Tesis*. Universitas Lampung.
- Hidayah, L. 2023. Konversi Minyak Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* J.) Menjadi Senyawa Nitrogen dan Uji Aktivitasnya Sebagai Green Inhibitor Korosi Baja Lunak. *Tesis*. Universitas Lampung.
- Hotmian, E., Suoth, E., Fatimawali, F., dan Tallei, T. 2021. Analisis GC-MS (Gas Chromatography Mass Spectrometry) Ekstrak Metanol dari Umbi Rumput Teki (*Cyperus rotundus* L.). *Pharmacon*. 10(2). 849-856.
- Ichsanudin, M., Prabowo, I., dan Nasirudin, M. 2023. Analisis Korosi pada Filter Feed Pump Studi Kasus pada Waste Water Treatment Plant. *Journal of Metallurgical Engineering and Processing Technology*. 3(2). 94-106.
- Jamil, M. A. R., Touchy, A. S., Poly, S. S., Rashed, M. N., Siddiki, S. M. A. H., Toyao, T., Maeno, Z., and Shimizu, K. ichi. 2020. High-silica HB zeolite catalyzed methanolysis of triglycerides to form fatty acid methyl esters (FAMEs). *Fuel Processing Technology*. 197 : 106204.
- Jones, D.A. 1996. *Principles and Prevention of Corrosion*. New Jersey. Prentice Hall.
- Ilim, I., Afifah, A. I. N., Hidayah, L., Herliana, H., Pandiangan, K. D., and Simanjuntak, W. 2022. Study on Corrosion Inhibition Activity of Nitrogen Compounds Derived from Coconut Oil Methyl Ester. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 11(4). 1639–1651.
- Ilim, I., Bahri, S., Marjunus, R., and Simanjuntak, W. 2021. The Effect of Initiator Concentrations on Corrosion Inhibition Activity of Polymeric Derivatives of 2-vinylpyridin. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1). 1-6.
- Ilim, I., Bahri, S., Simanjuntak, W., Syah, Y. M., Bundjali, B., and Buchari, B. 2017. Performance of Oligomer 4-vinylpiperidine as a Carbon Dioxide Corrosion Inhibitor of Mild Steel. *Journal of Materials and Environmental Science*. 8(7). 2381–2390.

- Ilim, Jefferson, A., Simanjuntak, W., Jeannin, M., Syah, Y. M., Bundjali, B., and Buchari. 2016. Synthesis and Characterization of Oligomer 4-vinylpyridine as a Corrosion Inhibitor for Mild Steel in CO₂ Saturated Brine Solution. *Indonesian Journal of Chemistry*. 16(2). 198–207.
- Ilim, Pandiangan K.D., and Sudrajat. 2007. Studi Penggunaan Tumbuhan Tembakau, Teh Dan Kopi Sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak Dalam Air Laut Buatan Yang Jenuh CO₂. *Jurnal Sains MIPA*. 13(2). 163–168.
- IZA. 2017. Framework Type FAU. International Zeolite Association. <https://Asia.Iza-Structure.Org/IZA-SC/Framework.Php?STC=FAU>.
- Kahyarian, A., Singer, M., and Nesic, S. 2016. Modeling of uniform CO₂ Corrosion of Mild Steel in Gas Transportation Systems. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 29(1). 530–549.
- Kardiman, K., Marno, M., dan Sumarjo, J. 2018. Analisis Sifat Mekanik Terhadap Bentuk Morfologi Papan Komposit Sekam Padi Sebagai Material Alternatif Pengganti Serat Kaca. *Jurnal Riset Sains Dan Teknologi*. 2(1). 21-26.
- Khoirulfatihin, D. H., dan Kusumawardani, C. 2018. Sintesis Senyawa TiO₂ Terdoping Nitrogen Sebagai Lapisan Mesopori Pada Sintesis Material TiO₂/CH₃NH₃PbI₃. *Jurnal Kimia Dasar*. 7(5). 214–222.
- Li, S., Zeng, Z., Harris, M. A., Sanchez, L. J., and Cong, H. 2019. CO₂ Corrosion of Low Carbon Steel Under the Joint Effects of Time-Temperature-Salt Concentration. *Frontiers in Materials*. 6(10). 1–17.
- Marguí, E., Queralt, I., and Almeida, E. De. 2022. Chemosphere X-Ray Fluorescence Spectrometry for Environmental Analysis : Basic principles, Instrumentation, Applications and Recent Trends. *Chemosphere*. 303. 1-18.
- Maulinda, L., Nasrul Z.A., dan Nurbaity, N. 2018. Hidrolisis Asam Lemak Dari Buah Sawit Sisa Sortiran. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*. 6(2). 1-15.
- Montoya, C., Cochard, B., Flori, A., Cros, D., Lopes, R., Cuellar, T., Espeout, S., Syaputra, I., Villeneuve, P., Pina, M., Ritter, E., Leroy, T., and Billotte, N. 2014. Genetic Architecture of Palm Oil Fatty Acid Composition in Cultivated Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Compared to its Wild Relative *E. Oleifera* Cortés. *PLOS ONE*. 9(5). 1-13.

- Munajad, A., Subroto, C., and Suwarno. 2018. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy Analysis of Transformer Paper in Mineral Oil-Paper Composite Insulation Under Accelerated Thermal Aging. *Energies*. 11(2). 1-12.
- Muttaqin, R. 2023. Pengembangan Buku Panduan Teknik Karakterisasi Material : X-ray Diffractometer (XRD) Panalytical Xpert3 Powder. *Indonesian Journal of Laboratory*. 1(1). 9-16.
- Na, K. 2021. Synthesis and Application of Zeolite Catalysts. *Catalysts*. 11(6). 685.
- Nora, S., dan Carolina, M. 2018. Buku Ajar Budidaya Perkebunan Kelapa Sawit. Pusat Pendidikan Pertanian. Jakarta Selatan.
- Qiang, Z., Shen, X., Guo, M., Cheng, F., and Zhang, M. 2019. A simple Hydrothermal Synthesis of Zeolite-X from Bauxite Tailings for Highly Efficient Adsorbing CO₂ at Room Temperature. *Microporous and Mesoporous Materials*. 287. 77–84.
- Ramos, N.O.J., Arellano, P.J.H., Escobar, J.R.F., Gomez, A.J.F., and Granados, L.D. 2019. Electrochemical Noise Analysis to Identify the Corrosion Type Using the Stockwell Transform and the Shannon Energy. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 836. 50–61.
- Rezani, A. 2022. Pengolahan Lanjut Bio Crude Oil Hasil Pirolisis Minyak Kelapa Sawit dengan Metode Catalytic Upgrading Menggunakan Zeolit-X Terprotonasi (H-X) Sebagai Katalis. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Rizi, A., Sedik, A., Acidi, A., Rachedi, K. O., Ferkous, H., Berredjem, M., Delimi, A., Abdenbouri, A., Alam, M., Ernst, B., and Benguerba, Y. 2023. Sustainable and Green Corrosion Inhibition of Mild Steel: Insights from Electrochemical and Computational Approaches. *ACS Omega*. 8(49). 47224–47238.
- Simanjuntak, W., Sembiring, S., Pandiangan, K. D., Syani, F., and Situmeang, R. T. M. 2016. The use of Liquid Smoke as a Substitute for Nitric Acid for Extraction of Amorphous Silica from Rice Husk Through Sol-Gel Route. *Oriental Journal of Chemistry*. 32(4). 2079–2085.
- Sudiarti, T. 2017. Adsorpsi Senyawa 2,3-Difenil-Imidazo 1,2-a Piridin Sebagai Inhibitor Korosi Baja Karbon Dalam Larutan Elektrolit Jenuh Karbon Dioksida. *Science and Technology*. (2). 182–196.

- Supit, S. W. M., dan Mait, R. E. G. 2020. *Dasar-Dasar Perencanaan Struktur Baja*. Polimdo Press. Manado.
- Tang, Z. 2019. A review of Corrosion Inhibitors for Rust Preventative Fluids. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 23(4). 1-19.
- Taqwa, M. L., Irwan, I., dan Pardi, P. 2021. Penggunaan Ekstrak Daun Pepaya Sebagai Inhibitor Korosi Baja Karbon Dalam Lingkungan *Crude Oil*. *Jurnal Teknologi*. 21(1). 6-11.
- Utomo, B. 2012. Jenis Korosi Dan Penanggulangannya. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Kelautan*. 6(2). 138–141.
- Waas, K. 2020. Pengaruh Holding Time (Waktu Tahan) Dan Variasi Media Quenching (Pendinginan) Terhadap Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah ST 42 Pada Proses Pengkarbonan Padat Menggunakan Arang Batok Biji Pala (*Myristica fragrans*). *Jurnal Simetrik*. 10(1). 269–278.
- Wibowo, D. A., dan Ghofur, A. 2021. Pengaruh Kadar Salinitas Air Terhadap Laju Korosi Baja St 60. *Jtam Rotary*. 3(2). 145–158.
- Windarta. 2022. Pengaruh Jenis Media Korosif Terhadap Laju Korosi Besi Cor Kelabu. *Jurnal Sintek*. 8(2). 1-6.
- Wongwanichkangwarn, I., Limtrakul, S., Vatanatham, T., and Ramachandran, P. A. 2021. Amidation Reaction System: Kinetic Studies and Improvement by Product Removal. *ACS Omega*. 6(45). 30451–30464.
- Wulan, D. R., Azkiya, N. I., Widjajanti, K., Wardani, N. B., dan Maryanty, Y. 2022. Asam Askorbat, Natrium Nitrit dan Natrium Fosfat sebagai Inhibitor Laju Korosi pada Alumunium dan Seng dalam Media Biosolar. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*. 6(1). 36–43.
- Yanuar, A. P., Pratikno, H., dan Titah, H. S. 2017. Pengaruh Penambahan Inhibitor Alami terhadap Laju Korosi pada Material Pipa dalam Larutan Air Laut Buatan. *Jurnal Teknik ITS*. 5(2). 8–13.
- Yuliyanda, D. 2023. Optimasi Waktu Konversi Metil Ester dari Minyak Biji Karet (*Hevea brasiliensis*) Menjadi Senyawa Nitrogen dan Uji Aktivitas Sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak. *Skripsi*. Universitas Lampung.

Zhu, T., Zhang, X., Han, Y., Liu, T., Wang, B., and Zhang, Z. 2019. Preparation of Zeolite-X by the Aluminum Residue from Coal Fly ash For the Adsorption of Volatile Organic Compounds. *Frontiers in Chemistry*. 7. 1–8.