

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

(Skripsi)

Oleh

**AZIZAH ROSIHANA TIARA PUTRI
2117011008**



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

ABSTRAK

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

Oleh

AZIZAH ROSIHANA TIARA PUTRI

Baja lunak merupakan material logam yang rentan terhadap korosi dan mengalami degradasi struktural sehingga perlu dikendalikan. Salah satu metode pengendalian korosi adalah penambahan inhibitor korosi. Penelitian ini difokuskan pada sintesis senyawa inhibitor korosi melalui konversi minyak kelapa sawit menjadi senyawa nitrogen menggunakan katalis zeolit-A terprotonasi dan uji aplikasinya sebagai *green corrosion inhibitor*. Konversi ini dilakukan melalui dua tahap, yaitu reaksi transesterifikasi minyak kelapa sawit, metanol, dan zeolit-A terprotonasi (H-A) menjadi metil ester, dilanjutkan dengan reaksi amidasi antara metil ester dan dietanolamina menggunakan katalis yang sama.

Zeolit-A disintesis dari silika sekam padi dan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang menunjukkan bahwa zeolit-A telah terbentuk dengan baik. Zeolit-A diprotonasi menggunakan larutan amonium nitrat 3,5 M dan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Zeolit H-A yang terbentuk menghasilkan konversi Na menjadi H sebesar 17,26%. Produk reaksi transesterifikasi dan amidasi dikarakterisasi menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) untuk mengetahui komposisi senyawa. Hasil konversi minyak kelapa sawit menjadi metil ester pada reaksi transesterifikasi yaitu sebesar 60% dengan kemurnian 100% yang ditunjukkan oleh hasil GC-MS.

Reaksi amidasi antara metil ester dan dietanolamina menggunakan katalis zeolit H-A menghasilkan senyawa nitrogen sebesar 25,34%. Senyawa nitrogen hasil sintesis diuji aktivitasnya sebagai inhibitor korosi baja lunak dalam larutan NaCl 3% jenuh CO₂ menggunakan metode kehilangan berat (*wheel test*) dengan persen proteksi sebesar 96,11%. Hasil proteksi ini didukung oleh data SEM yang menunjukkan permukaan baja lunak dalam medium korosif yang mengandung senyawa inhibitor korosi lebih halus dibandingkan tanpa inhibitor korosi.

Kata kunci: *green corrosion inhibitor*, senyawa nitrogen, amidasi, minyak kelapa sawit, zeolit-A terprotonasi.

ABSTRACT

CONVERSION OF PALM OIL INTO NITROGEN COMPOUNDS USING PROTONATED ZEOLITE-A CATALYST AND CORROSION INHIBITOR ACTIVITY TEST

By

AZIZAH ROSIHANA TIARA PUTRI

Mild steel is a metallic material that is susceptible to corrosion and undergoes structural degradation, thus requiring proper control. One method of corrosion control is the addition of corrosion inhibitors. This research focuses on the synthesis of corrosion inhibitor compounds through the conversion of palm oil into nitrogen-containing compounds using protonated zeolite-A as a catalyst and testing its application as a green corrosion inhibitor. This conversion is carried out in two stages: the transesterification reaction of palm oil, methanol, and protonated zeolite-A (H-A) into methyl esters, followed by an amidation reaction between methyl esters and diethanolamine using the same catalyst. Zeolite-A was synthesized from rice husk silica and characterized using X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM), which confirmed the successful formation of zeolite-A. The zeolite-A was protonated using a 3.5 M ammonium nitrate solution and characterized using X-Ray Fluorescence (XRF). The resulting H-A zeolite showed a Na-to-H conversion rate of 17.26%. The products of the transesterification and amidation reactions were characterized using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) to determine compound composition. The conversion of palm oil into methyl esters in the transesterification reaction yielded 60% with a purity of 100%, as indicated by the GC-MS results. The amidation reaction between methyl esters and diethanolamine using H-A zeolite as a catalyst produced nitrogen-containing compounds at 25.34%. The synthesized nitrogen compounds were tested for their activity as corrosion inhibitors for mild steel in a 3% NaCl solution saturated with CO₂ using the weight loss method (wheel test), showing a protection efficiency of 96.11%. This protective effect was supported by SEM data, which revealed that the surface of mild steel in the corrosive medium containing the corrosion inhibitor compound was smoother compared to that without the inhibitor.

Keywords: green corrosion inhibitor, nitrogen compound, amidation, palm oil, protonated zeolite-A.

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

Oleh

AZIZAH ROSIHANA TIARA PUTRI

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-A
TERPROTONASI SEBAGAI KATALIS DAN UJI
AKTIVITAS INHIBITOR KOROSI

Nama : *Azizah Rosihana Tiara Putri*

NPM : 2117011008

Program Studi : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



[Signature]
Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S.
NIP. 196505251990032002

[Signature]
Devi Nur Anisa., S.Pd., M.Sc.
NIP. 199227092019032022

2. Wakil Dekan Bidang Akademik dan Kerja Sama FMIPA

[Signature]
Mulyono, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 197406112000031002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

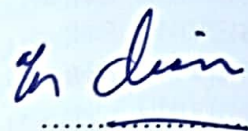
Ketua : Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S.



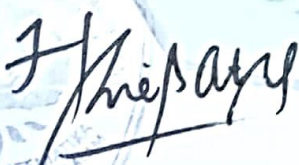
Sekretaris : Devi Nur Anisa, S.Pd., M.Sc.



Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




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

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 19 Juni 2025

**LEMBAR PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama : Azizah Rosihana Tiara Putri
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011008
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-A 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, 19 Juni 2025


Azizah Rosihana Tiara Putri
NPM. 2117011008

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis yang bernama lengkap Azizah Rosihana Tiara Putri lahir di Bandar Jaya, Kabupaten Lampung Tengah, pada tanggal 24 November 2004. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Supadi Handoyo dan Ibu Sudarsih.

Penulis memulai pendidikan di Sekolah Dasar Negeri 1 Tanjung Anom pada tahun 2009 dan lulus pada tahun 2015. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Terusan Nunyai pada tahun 2015 dan lulus pada tahun 2018. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Terbanggi Besar dan lulus pada tahun 2021.

Pada tahun 2021, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai organisasi, di antaranya sebagai kader muda dan anggota inti Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada tahun 2021 dan 2022. Pada tahun 2022, penulis menjabat sebagai anggota Biro Penerbitan (BP) HIMAKI, serta menjadi anggota Komisi 4 Bidang di Dewan Perwakilan Mahasiswa (DPM). Penulis juga aktif dalam Unit Kegiatan Mahasiswa Fakultas (UKMF) Rohani Islam (ROIS), pada tahun 2022 di Bidang Akademik dan Riset, serta pada tahun 2023 di Bidang *Media Centre Rois*.

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 Rejomulyo, Karang Anyar, Lampung Selatan, 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 dan Kimia Fisik II untuk mahasiswa angkatan 2023 di Jurusan Kimia.

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

MOTTO

"Janganlah kamu bersikap lemah, dan jangan (pula) bersedih hati, padahal kamulah orang-orang yang paling tinggi (derajatnya) jika kamu orang-orang yang beriman."

(Q.S. Ali 'Imran Ayat 139)

"Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal itu baik bagimu, dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal itu buruk bagimu. Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui."

(Q.S. Al-Baqarah Ayat 216)

"Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya."

(Q.S. Al-Baqarah Ayat 286)

"Berikan dirimu hadiah. Meskipun bukan benda, istirahat yang baik atau melakukan hal terbaik untuk dirimu sendiri adalah hadiah. Aku harap, meskipun hanya sebentar, kamu bisa menghadiahinya dirimu sendiri."

(Na Jaemin)

"Aku mungkin tidak sempurna, tapi aku bangga karena tidak menyerah ketika segala hal terasa berat."

(Azizah Rosihana Tiara Putri)



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:

Nenek, Almarhum Kakek, dan Almarhumah Ibunda Tercinta Ibu Suti, Bapak Sumardi, dan Ibu Sudarsih, yang telah menjadi cahaya dalam setiap langkah, mencintai tanpa syarat, dan mendoakan tanpa lelah..

Keluarga Tersayang Bapak Agus, Ibu Umi, Raasya, Nabila, dan Nashwa, terima kasih atas segala perhatian, semangat, dan do'a yang menjadi kekuatan dalam setiap perjuangan.

Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S., Ibu Devi Nur Anisa, S.Pd., M.Sc., Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., dan Prof. Ir. Suharso, S.Si., Ph.D. yang telah membimbing dengan penuh dedikasi, membagikan ilmu dan motivasi yang menjadi bekal berharga dalam proses ini.

Para Sahabat yang telah menemani dalam suka dan duka, memberi senyum saat sedih, dan pelukan saat lelah.

Untuk diriku sendiri,
Azizah, terima kasih telah bertahan sejauh ini. You did it. Proud of you!

**Almamater Tercinta
Universitas Lampung**

SANWACANA

Puji syukur saya ucapkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Konversi Minyak Kelapa Sawit Menjadi Senyawa Nitrogen Menggunakan Zeolit-A 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. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapat bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya 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. Ibu Devi Nur Anisa, S.Pd., M.Sc. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan masukan dan saran selama penulis mengerjakan penelitian ini.
3. Ibu Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembahas I sekaligus Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan kritik dan saran.
4. Prof. Ir. Suharso, S.Si., Ph.D. selaku dosen pembahas II yang telah bersedia menggantikan dosen pembahas I untuk memberikan kritik dan saran kepada penulis.
5. Prof. Wasinton Simanjuntak, M.Sc., Ph.D. dan Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, S.Si., M.Si. yang secara tidak langsung telah memberikan arahan dan pengetahuan baru selama penelitian ini.
6. Prof. Andi Setiawan, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik atas segala saran yang telah diberikan.

7. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Unila beserta jajaran FMIPA lainnya.
8. Utu, Bapak Agus Sutiyono, dan Ibu Umi Afianda, serta ketiga adik sepupu Nur Raasya Intan Azzahra, Nabila Khaira Lubna, dan Fazia Nashwa Laskhira yang selalu mendukung baik materi maupun moral, cinta, kasih sayang, ketulusan, dan memberi semangat serta mendoakan penulis.
9. Almarhumah ibunda Sudarsih, almarhum Kakek Sumardi, serta almarhumah adik sepupu Anas Nur Faiha dan Anis Nur Faiha yang menjadikan penulis menjadi sosok yang kuat hingga mencapai titik ini.
10. Ayah Supadi Handoyo dan Ibu Siti Maisyaroh dan keluarga lainnya yang telah mendoa'akan penulis dari jauh.
11. H.P. Subakti yang merupakan motivasi bagi penulis untuk menyelesaikan studi ini.
12. Novemberiady selaku sosok berharga yang sudah memberikan bahu dan semangat bagi penulis selama 6 tahun kebelakang.
13. Chusnul Khotimah selaku sosok sahabat bagi penulis selama 16 tahun yang selalu menemani penulis sampai di titik ini
14. Tim *Corrosion* 21 Melissaputri, Bella Agustin, dan Ayu Fortune Lisa Hutabarat yang selalu membersamai penelitian penulis hingga akhir dan menjadi saksi perjalanan penelitian penulis.
15. Sahabat KIW 21 Adryan Daffa Dzulfiqar, 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.
16. Sahabat seperjuangan Aulia Reyzifa Husin Putri, Nina Nurullita, dan Azzahra Qurota Aini yang telah membersamai penulis selama penulis menyelesaikan studinya.
17. Kedua adik laki-laki, Raharjo dan M. Rizal Fernando yang telah menemani dan mendukung penulis hingga akhir masa studi. Jangan pernah menyerah ya.
18. Adik MCR kebanggaan, Trio Sakti Ardika yang telah menemani penulis untuk menemukan banyak pengalaman baru.

19. Mba Evita Wulandari, Mba Anissa Salsabila, Mba Oktavia Nur Azizah, dan Mba Husnul Nur Afifah yang selalu menjadi tempat mengeluh dan memberikan semangat kepada penulis.
20. Damar Jati Panuluh dan Wahyuni Eka Putri selaku sahabat yang selalu memberikan semangat dan nasihat kepada penulis.
21. Kak Rekia Enrik yang telah bersedia mengajarkan penulis dan tim hingga akhirnya bisa menyelesaikan penelitian ini dengan baik.
22. Kak Uli Asari, Kak Wikka Septiyana, Kak Risvania Nisa, Kak Qori Hikmah Faranida, Kak Nadia Mutiara, Kak Nurul Fajriyati, Kak Franky Gom Gom, Kak Muhammad Sabil, dan Kak Maulana Bintang yang telah membantu penulis dalam mengerjakan penelitiannya baik dalam *sharing* ilmu dan pengalaman.
23. Adik-adik *Corrosion* 22 Rizky Putra Pradana, Fahrez Isnanta, Risa Dwi, Naghmah Syifa, Annisa Aulia, Kenita Hupeza, dan Zafira Anargya yang akan meneruskan ilmu ini, selalu semangat ya.
24. Adik-adik MBKM Maula Rayyanie, Pinkan Aling, Ester Wanitri, Giovani Ramadhan, Garneta Heppy, dan Muthiara Wamiga serta adik-adik Polimer 22 lainnya yang telah memberikan kesan baik kepada penulis.
25. Teman-teman seperjuangan Kimia angkatan 2021 khususnya anggota kelas A. Terima kasih telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk menjadi bagian dari kalian semua.
26. Teman-teman KKN Rejomulyo 4 dan keluarga Bapak Sugeng, serta Riffaldi yang telah memberikan penulis pengalaman dan kenangan yang berharga.
27. Adik-adik praktikan Kimia 2023 Kelas C, khususnya Desla, Ocra, Tiffani, dan Rendi serta anak-anakku di kelompok 5 dan 6 yang telah memperlakukan penulis dengan baik selama penulis menjadi asisten praktikum.
28. Teman-teman Rois FMIPA 2022, 2023, dan 2024 khususnya Ariz, Irvandi, Harry, Sayyid, Anam, Whisnu, Naimah, Sayyidah, Rara, Yulina, Utami, Dila, dan Azzet. Terima kasih karena telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk menjadi bagian dari kalian dan memberikan kesan menyenangkan.
29. Kakak dan teman di DPM 2023 yang telah memberikan pelajaran, pengalaman, dan kepercayaan yang berharga bagi penulis.

30. Teman-teman Himaki 2022 khususnya Biro Penerbitan yang telah banyak memberikan penulis pengalaman dan pelajaran baru yang berharga.
31. *Last but special*, untuk Na Jaemin, EXO, dan seluruh unit NCT yang menjadi penguat bagi penulis sehingga mampu bertahan sampai di titik ini.
32. 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, 19 Juni 2025
Penulis

Azizah Rosihana Tiara Putri

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
I. PENDAHULUAN.....	iii
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	5
1.3 Manfaat Penelitian.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Baja Lunak.....	7
2.2 Korosi	8
2.2.1 Pengertian Korosi	8
2.2.2 Korosi CO ₂	9
2.2.3 Dampak Korosi	9
2.3 Inhibitor Korosi	10
2.3.1 Inhibitor Anorganik.....	10
2.3.2 Inhibitor Organik	11
2.4 Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit.....	11
2.4.1 Transesterifikasi.....	11
2.4.2 Minyak Kelapa Sawit.....	12
2.5 Katalis Zeolit-A.....	13

2.5.1 Sintesis zeolit-A.....	13
2.5.2 Protonasi zeolit-A.....	14
2.6 Senyawa Nitrogen	14
2.6.1 Alkanolamida	14
2.6.2 Reaksi amidasi	15
2.7 Karakterisasi Produk	16
2.7.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	16
2.7.2 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	17
2.7.3 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	18
2.7.4 <i>Gas Chromatography – Mass Spectrometry</i> (GC-MS)	19
2.8 Uji Aktivitas Inhibitor Korosi	19
2.8.1 Metode <i>Weight Loss (Wheel Test)</i>	19
III. METODE PENELITIAN	21
3.1 Waktu dan Tempat	21
3.2 Alat dan Bahan	21
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	22
3.4 Prosedur Penelitian.....	23
3.4.1 Preparasi Sekam Padi.....	23
3.4.2 Ekstraksi Silika Sekam Padi.....	23
3.4.3 Sintesis Katalis Zeolit-A.....	23
3.4.4 Modifikasi Zeolit-A dengan Metode <i>Ion Exchange</i>	24
3.4.5 Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit	25
3.4.6 Sintesis Senyawa Nitrogen (Reaksi Amidasi).....	25
3.4.7 Persiapan Sampel Baja Lunak.....	26
3.4.8 Persiapan Larutan	26
3.4.9 Penentuan Laju Korosi (<i>Weight Loss Method</i>).....	26
3.4.10 Analisis SEM	27
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Preparasi dan Ekstraksi Silika	28
4.2 Sintesis Katalis Zeolit-A.....	29
4.3 Karakterisasi Zeolit-A	30

4.3.1 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	30
4.3.2 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	33
4.4 Modifikasi Zeolit-A dengan Metode <i>Ion Exchange</i>	34
4.5 Karakterisasi Zeolit-A Terprotonasi (H-A)	34
4.6 Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit.....	35
4.7 Sintesis Senyawa Nitrogen (Reaksi Amidasi)	37
4.8 Karakterisasi Produk Menggunakan <i>Gas Chromatography – Mass Spectrometry (GC-MS)</i>	38
4.8.1 Karakterisasi Metil Ester	38
4.8.2 Karakterisasi Senyawa Nitrogen.....	39
4.8 Uji Aktivitas Inhibitor Korosi Menggunakan Metode <i>Weight Loss (Wheel Test)</i>	44
4.9 Analisis Permukaan Menggunakan SEM	46
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	48
5.1 Kesimpulan.....	48
5.2 Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA.....	550
LAMPIRAN	59

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Perbandingan data XRD untuk zeolit-A standar IZA dan zeolit-A sintesis.....	32
2. Perbandingan data XRD untuk sodalit standar IZA dan zeolit-A sintesis.....	32
3. Data XRF komposisi zeolit induk dan protonasi zeolit	35
4. Konversi minyak kelapa sawit menjadi metil ester.....	36
5. Komponen senyawa MS produk metil ester	39
6. Komponen senyawa MS produk amidasi variasi minyak kelapa sawit dan zeolit H-A.....	41
7. Komponen senyawa MS produk amidasi variasi metil ester dan zeolit-A	41
8. Komponen senyawa MS produk amidasi variasi metil ester dan zeolit-A	42
9. Komponen senyawa MS produk amidasi variasi metil ester dan zeolit H-A ...	43
10. Data hasil rata-rata pengukuran dan perhitungan laju korosi dengan metode <i>wheel test</i>	46
11. Data pengukuran dimensi baja lunak dan perhitungan minyak kelapa sawit dengan zeolit-A	76
12. Data pengukuran dimensi baja lunak dan perhitungan minyak kelapa sawit dengan zeolit H-A	76
13. Data pengukuran dimensi baja lunak dan perhitungan metil ester dengan zeolit-A	76
14. Data pengukuran dimensi baja lunak dan perhitungan metil ester dengan zeolit H-A	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Mekanisme reaksi esterifikasi.....	12
2. Struktur zeolit-A.....	13
3. Molekul surfaktan	15
4. Struktur dietanolamina.....	15
5. Skema alat XRD	16
6. Difraktogram standar dari zeolit-A	17
7. Mikrograf zeolit-A	17
8. Interaksi sinar-X dengan materi	18
9. Kromatogram metil ester minyak kelapa sawit.....	19
10. Diagram alir penelitian.....	22
11. Tahapan ekstraksi silika	29
12. Tahapan sintesis zeolit-A	30
13. Perbandingan difraktogram zeolit-A hasil sintesis dengan zeolit-A standar IZA.....	31
14. Mikrograf zeolit-A hasil sintesis.....	33
15. Hasil zeolit-A terprotonasi (H-A)	34
16. Hasil proses transesterifikasi.....	36
17. Produk Amidasi dengan variasi	38
18. Kromatogram GC produk metil ester.....	39

19. Kromatogram GC produk amidasi variasi minyak kelapa sawit dan zeolit H-A	40
20. Kromatogram GC produk amidasi variasi metil ester dan zeolit-A.....	41
21. Kromatogram GC produk amidasi variasi metil ester dan zeolit H-A.....	42
22. Kromatogram GC produk amidasi variasi metil ester dan zeolit H-A pada waktu retensi 20 hingga 60 menit	43
23. Mikrograf sampel baja lunak	46

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja lunak telah menjadi pilihan yang semakin populer di berbagai industri karena keunggulannya yang tak tertandingi. Material ini memberikan kombinasi kekuatan yang signifikan sekaligus fleksibilitas yang baik, menjadikannya sangat sesuai untuk berbagai aplikasi, terutama dalam bidang konstruksi yang membutuhkan material dengan ketahanan tinggi terhadap tekanan. Pada industri minyak dan gas, baja digunakan untuk membangun infrastruktur penting seperti pipa, tangki penyimpanan, dan *platform* pengeboran lepas pantai. Kelebihan tersebut membuat baja lunak sangat diminati dalam industri tersebut. Selain memiliki kekuatan yang memadai, baja lunak juga dikenal ekonomis dan mudah diolah, menjadikannya solusi yang efisien baik dari sisi performa maupun biaya (Nešić, 2011). Namun, pengoperasian baja lunak sebagai pipa dalam industri minyak dan gas rentan mengalami korosi karena adanya interaksi dengan lingkungan yang agresif seperti air laut, gas H_2S , atau CO_2 (Elgaddafi *et al.*, 2021). Hal ini mengakibatkan kerugian finansial dan degradasi lingkungan (Basdeki *et al.*, 2022).

Korosi yang umum terjadi pada industri minyak dan gas disebabkan oleh adanya interaksi dari gas CO_2 dengan material yang digunakan pada pipa penyalur. Selain itu, fluida yang mengalir di dalam pipa, seperti senyawa hidrokarbon dari golongan alkana yang terdiri dari C_1 - C_6 dan beberapa senyawa non-hidrokarbon *impurities* lainnya seperti N_2 , CO_2 , H_2O , dan H_2S juga dapat menyebabkan korosi *internal* pada pipa tersebut (Wulandari dan Widiono, 2023). Gas CO_2 yang terlarut dalam media air atau larutan akan membentuk suatu lingkungan yang korosif (Suryaningsih dkk., 2015). Korosi tidak dapat dicegah namun dapat dikendalikan

dengan berbagai metode, seperti pelapisan pada permukaan logam (Putra and Tanjung, 2020), perlindungan katodik (Sofian dkk., 2022), dan penambahan inhibitor korosi (Nurini dkk., 2022). Dari berbagai metode tersebut, penambahan inhibitor korosi merupakan salah satu cara yang paling praktis dan hemat biaya untuk mencegah korosi pada pipa.

Inhibitor korosi merupakan bahan kimia yang efisien memperlambat laju korosi logam dan paduan saat dalam konsentrasi yang relatif rendah, terutama dalam sistem pendingin, bejana penyimpanan dan *boiler*, jaringan pipa minyak dan gas, serta dalam konstruksi (Amiery *et al.*, 2022). Inhibitor korosi bekerja melalui proses adsorpsi ion atau molekul di atas permukaan logam (Stiadi dkk., 2019). Kinerja inhibitor ditunjukkan dengan efektivitas dalam bentuk persentase penurunan laju korosi. Inhibitor korosi dapat dibagi menjadi inhibitor anorganik dan organik. Inhibitor anorganik bekerja secara agresif dengan memasifkan permukaan logam tanpa memerlukan oksigen. Ion nitrat dan kromat menjadi contoh ion yang bereaksi saat mengoksidasi permukaan logam untuk membentuk lapisan oksida pasif (Anwo *et al.*, 2019). Sedangkan inhibitor organik terdiri dari hidrokarbon rantai panjang yang mengandung nitrogen, belerang, hidrogen, dan oksigen. Inhibitor organik bertindak sebagai pelindung logam dengan membentuk lapisan hidrofobik pada permukaan logam (Raphael *et al.*, 2023).

Bahan yang kaya nitrogen, seperti inhibitor organik, menjadi pilihan yang menarik sebagai inhibitor korosi. Kandungan nitrogen yang tinggi dalam senyawa organik tersebut mampu meningkatkan efektivitas inhibitor dalam menghambat proses korosi, karena atom nitrogen dapat berinteraksi langsung dengan permukaan logam (Yudistira *et al.*, 2020). Inhibitor organik menutupi seluruh luas permukaan logam dengan beberapa lapisan tunggal dan mengubah struktur lapisan ganda listrik pada antarmuka logam (Raphael *et al.*, 2023). Interaksi ini membentuk lapisan pelindung yang kuat, sehingga laju reaksi korosi pada permukaan logam berkurang. Inhibitor organik memiliki ikatan π , pasangan elektron bebas, dan gugus heteroatom (N, O, P, dan S). Unsur-unsur dengan pasangan elektron bebas inilah yang berfungsi sebagai ligan untuk membentuk senyawa kompleks dengan logam (Setiawan dan Nasrulloh, 2020).

Pada penelitian sebelumnya, telah digunakan beberapa inhibitor organik seperti oligomer 4-vinilpiridin dengan persen proteksi 90% (Ilim *et al.*, 2016), ekstrak tanaman dengan persen proteksi 91% (Asmara *et al.*, 2018), 2-vinilpiridin dengan persen proteksi 64,8% (Ilim *et al.*, 2021), dan senyawa nitrogen dengan persen proteksi 97,9% (Ilim *et al.*, 2022). Pada penelitian Ilim *et al.* (2022), digunakan senyawa nitrogen sebagai inhibitor organik karena memiliki kelompok hidrofilik dan hidrofobik yang memungkinkan interaksi dengan atom logam, sehingga membentuk lapisan pelindung yang efektif. Senyawa nitrogen dapat diperoleh dari beberapa sumber minyak nabati, seperti minyak biji karet (Yuliyanda, 2023; Enrik, 2024), minyak kelapa (Afifah, 2023; Nadhief, 2023), dan minyak kelapa sawit (Hidayah, 2023; Kamilah, 2024).

Minyak kelapa sawit mengandung sekitar 50% asam lemak jenuh, dengan komposisi utama yang meliputi 44% asam palmitat, 5% asam stearat, serta sejumlah kecil asam miristat. Selain itu, minyak kelapa sawit juga memiliki kandungan asam lemak tak jenuh yang signifikan, dengan sekitar 40% terdiri dari asam oleat, 10% asam linoleat, serta sedikit asam linolenat, seperti yang dilaporkan oleh Montoya *et al.* (2014). Sebelum menghasilkan senyawa nitrogen, minyak kelapa sawit perlu dikonversi menjadi metil ester melalui proses esterifikasi atau transesterifikasi. Proses ini penting untuk memecah trigliserida dalam minyak kelapa sawit menjadi metil ester. Metil ester tersebut yang nantinya akan direaksikan dengan alkanolamina atau dietanolamina menghasilkan senyawa nitrogen (Yuliyanda, 2023).

Proses transesterifikasi berlangsung secara lambat sehingga memerlukan katalis untuk mempercepat pemutusan ikatan rangkap pada trigliserida sehingga menghasilkan gliserol dan metil ester (Abdoulmoumine, 2010). Katalis pada proses transesterifikasi dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu katalis homogen, katalis heterogen, dan katalis enzimatis (biokatalis) (Noviana, 2023). Dari ketiga jenis katalis tersebut, katalis heterogen menjadi pilihan yang lebih tepat karena dapat dipisahkan dengan mudah dari produk. Zeolit-A dilaporkan menjadi salah satu jenis katalis heterogen yang memiliki aktivitas katalitik yang baik pada proses transesterifikasi (Pandiangan *et al.*, 2019; Ilim *et al.*, 2022). Kemampuan

katalitik yang baik dari zeolit-A tersebut menyebabkan produksi zeolit-A terus dikembangkan menggunakan berbagai bahan baku dengan metode hidrotermal, antara lain zeolit alam dari Lampung (Ginting dkk., 2019), bubuk batu dan abu aluminium (Kuroki *et al.*, 2019), bentonit (Srilai *et al.*, 2020), serta silika dari sekam padi dan aluminium foil (Simanjuntak *et al.*, 2019; Pandiangan *et al.*, 2019; Herliana *et al.*, 2021; Nadhief, 2023).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Herliana *et al.* (2021), katalis zeolit-A yang disintesis dari silika sekam padi dan aluminium foil memiliki kinerja yang sangat baik dalam proses transesterifikasi. Hal ini dikonfirmasi oleh Hidayah *et al.* (2023) bahwa zeolit-A yang digunakan mampu mengkonversi minyak kelapa sawit menjadi metil ester sebesar 100% dan menghasilkan senyawa nitrogen sebesar 63,7%. Pada penelitian yang dilakukan oleh Nadhief (2023) dan Yuliyanda (2023), zeolit-A juga mampu mengkonversi senyawa nitrogen dari metil ester minyak kelapa dan minyak biji karet hingga 25,31% dan 26,1%. Konversi tersebut sudah cukup baik namun masih belum optimal. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh suhu dan keasaman katalis yang rendah (Martín and Cirujano, 2022). Keasaman katalis memiliki peran penting dalam proses amidasi senyawa nitrogen karena mempengaruhi reaktivitas reaksi. Proses ini dapat mempercepat laju reaksi amidasi, di mana pH optimal mendorong interaksi yang lebih baik antara katalis dan substrat meningkatkan pembentukan intermediat yang stabil (Gernigon *et al.*, 2012). Pada zeolit, sifat keasaman ini dapat direkayasa dengan proses pertukaran kation untuk mengganti kation Na^+ dengan kation H^+ , sehingga keasaman katalis akan meningkat tergantung pada jumlah pergantian yang terjadi (Rezani, 2022).

Pada penelitian sebelumnya, Surani (2022) telah berhasil memodifikasi zeolit-A menjadi zeolit-A terprotonasi (H-A). Pada penelitian tersebut, zeolit H-A yang dihasilkan digunakan sebagai katalis dalam proses pirolisis. Peningkatan keasaman katalis tersebut memberikan hasil yang sangat optimal dengan biohidrokarbon mencapai 100%. Berdasarkan potensinya tersebut, maka penelitian tentang zeolit H-A sangat menarik untuk dikembangkan. Namun, zeolit tersebut belum pernah digunakan dalam proses transesterifikasi dan amidasi

sehingga perlu dilakukan upaya untuk mengetahui kemampuan zeolit H-A untuk mengkonversi metil ester dan menghasilkan senyawa nitrogen.

Berdasarkan uraian di atas, pada penelitian ini digunakan katalis zeolit-A terprotonasi (H-A) yang diharapkan mampu menghasilkan senyawa nitrogen dari hasil transesterifikasi minyak kelapa sawit yang lebih baik dari penelitian sebelumnya. Zeolit-A yang sudah dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) kemudian diprotonasi melalui proses pertukaran ion menggunakan amonium nitrat dengan mengadopsi metode yang dilaporkan oleh Surani (2022). Zeolit-A terprotonasi (H-A) yang terbentuk akan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Kemudian dilakukan transesterifikasi minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-A terprotonasi (H-A) serta melakukan reaksi amidasi dengan mereaksikan metil ester dari minyak kelapa sawit, dietanolamina, dan katalis zeolit-A terprotonasi (H-A). Senyawa nitrogen yang diperoleh dikarakterisasi menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) dan kemudian diaplikasikan sebagai inhibitor korosi pada baja lunak dalam medium korosif yang jenuh CO₂. Baja lunak tanpa dan dengan inhibitor korosi dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh katalis zeolit-A dari silika sekam padi melalui metode hidrotermal dan mengkarakterisasinya menggunakan XRD dan SEM.
2. Memodifikasi katalis zeolit-A menjadi zeolit-A terprotonasi (H-A) melalui metode pertukaran ion menggunakan larutan amonium nitrat (NH₄NO₃) dan mengkarakterisasinya menggunakan XRD, SEM, dan XRF.
3. Memperoleh metil ester dari minyak kelapa sawit dengan bantuan katalis zeolit H-A melalui proses transesterifikasi dan mengkarakterisasinya menggunakan GC-MS.

4. Memperoleh senyawa nitrogen melalui reaksi amidasi metil ester minyak kelapa sawit dan dietanolamina menggunakan katalis zeolit H-A dan mengkaraktisasinya menggunakan GC-MS.
5. Memperoleh aktivitas inhibisi senyawa nitrogen dari hasil konversi metil ester dari minyak kelapa sawit sebagai inhibitor korosi baja lunak dalam medium jenuh CO₂ serta analisis permukaan baja lunak menggunakan SEM.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui potensi zeolit-A terprotonasi (H-A) dari limbah sekam padi sebagai katalis dalam proses transesterifikasi minyak kelapa sawit dan reaksi amidasi.
2. Mampu mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam yaitu minyak kelapa sawit menjadi senyawa nitrogen alkanolamida.
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 Lunak

Baja adalah logam paduan dengan besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon dalam baja berkisar antara 0,2% hingga 2,1% berat sesuai *grade*-nya. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat. Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah mangan, krom, vanadium, dan nikel. Berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarikannya, namun di sisi lain membuatnya menjadi getas serta menurunkan keuletannya. Menurut Nasution (2020), berdasarkan sedikitnya karbon, baja karbon dibagi menjadi tiga jenis sebagai berikut:

a. Baja Karbon Rendah

Baja karbon dengan kandungan karbon kurang dari 0,3%. Meskipun lunak, baja ini memiliki keuletan tinggi, bisa dituang, dikeraskan permukaannya, mudah dilas, dan ditempa. Biasanya digunakan untuk konstruksi jembatan, mur, baut, pelat, kawat, roda gigi, dan pipa.

b. Baja Karbon Sedang

Baja karbon dengan kandungan karbon antara 0,3 hingga 0,7%. Baja ini lebih kuat dan keras daripada baja karbon rendah, dapat dikeraskan, dilas, dan dikerjakan mesin dengan baik. Baja ini cocok untuk konstruksi beban berat yang memerlukan kekuatan dan kekerasan tinggi.

c. Baja Karbon Tinggi

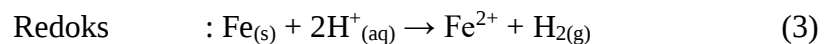
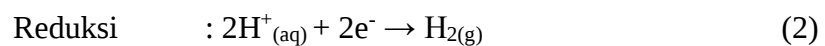
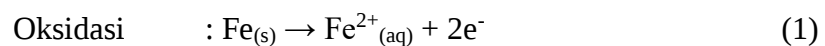
Baja karbon dengan kandungan karbon antara 0,7 hingga 1,7%. Baja ini lebih keras daripada kedua baja karbon sebelumnya namun keuletannya rendah, tahan aus, serta biasa digunakan untuk pahat, kayu, dan kikir.

Dalam penelitian ini, baja lunak termasuk dalam kategori baja karbon rendah yang mengandung kurang dari 0,03% karbon. Jenis baja ini relatif lunak dan memiliki ketangguhan yang luar biasa, mudah ditempa, dan dilas.

2.2 Korosi

2.2.1 Pengertian Korosi

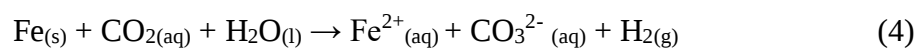
Korosi adalah kerusakan permanen pada permukaan logam akibat reaksi kimia yang mengakibatkan konversi logam murni menjadi bentuk kimia yang lebih stabil seperti sulfida, oksida, dan hidroksida dalam lingkungan yang korosif. Lingkungan korosif dapat berupa apa saja, misalnya padat, cair, atau gas (Harsimran *et al.*, 2021). Prinsip reaksi elektrokimia yang terjadi pada proses korosi melibatkan dua reaksi setengah sel, yaitu reaksi oksidasi pada anoda dan reaksi reduksi pada katoda (Ilim *et al.*, 2017). Reaksi tersebut meliputi:



Dalam kasus ini, besi teroksidasi menjadi Fe^{2+} dan ion hidrogen direduksi menjadi gas hidrogen. Elektron yang bermuatan negatif akan mengalir dari anoda ke katoda, sedangkan ion hidrogen yang bermuatan positif berpindah ke katoda. Laju korosi yang cepat akan meningkatkan arus yang mengalir dan jumlah produk korosi (Ilim *et al.*, 2017). Proses alami ini dapat berdampak pada berbagai bahan seperti bahan teknik (logam, paduan, plastik, cat, dan karet), zat kovalen dan ionik, dan agregat (bahan komposit) (Ibrahimi *et al.*, 2021).

2.2.2 Korosi CO₂

Di sektor minyak dan gas, korosi karbon dioksida merupakan salah satu jenis korosi yang paling banyak dipelajari (Fonseca *et al.*, 2024). Hal ini disebabkan oleh minyak mentah dan gas alam (Hameed and Rashid, 2022). Walaupun minyak tidak bersifat korosif, namun minyak mengandung fasa hidrokarbon yang sebagian besar merupakan emulsi kompleks yang mengandung oksigen, air, dan gas korosif terlarut lainnya (Mazumder, 2020). Istilah "korosi CO₂" merujuk pada korosi yang disebabkan oleh CO₂ terlarut (Askari *et al.*, 2021). Gas CO₂ di dalam air dapat mempercepat reaksi korosi pada logam karena gas CO₂ yang terlarut dalam air akan terhidrasi dan membentuk senyawa asam karbonat. Ion karbonat akan bertindak sebagai ligan dan mengkatalisis reaksi pelarutan logam sehingga akan terjadi reaksi yang menyebabkan korosi (Avelino *et al.*, 2018). Reaksi korosi yang terjadi akan menghasilkan FeCO₃ sebagai produk korosi. Proses terbentuknya besi karbonat dapat dilihat pada Persamaan (4):



Laporan menyatakan bahwa pada tahun 1970an, korosi CO₂ bertanggung jawab atas 28% kerugian akibat korosi, namun saat ini korosi CO₂ bertanggung jawab atas hampir 60% pada masalah serupa (Obot *et al.*, 2023).

2.2.3 Dampak Korosi

Secara umum, serangan korosi memiliki dampak langsung pada sektor ekonomi, teknologi, keselamatan, dan lingkungan. Menurut Putra dan Kasuma (2018), korosi menimbulkan dampak negatif yang terlihat dalam kehidupan sehari-hari, antara lain:

1. Korosi dapat membatasi umur pemakaian material.
2. Besi yang teroksidasi bisa mengakibatkan keroposnya jembatan, bodi mobil, dan struktur besi lainnya.

3. Kerugian akibat korosi bisa mencapai jumlah signifikan, seperti yang terjadi di Amerika Serikat dengan kerugian mencapai 276 miliar dolar AS.
4. Korosi juga menimbulkan kerugian di negara-negara tropis seperti Indonesia, meskipun data kerugian tahunan belum jelas.

Dampak korosi dalam kehidupan sehari-hari sangat merugikan, baik di industri maupun di rumah tangga. Saat ini, berbagai cara telah dilakukan untuk mencegah serangan korosi, seperti pelapisan (*coating*), proteksi katodik, dan penambahan inhibitor (Córdoba *et al.*, 2016).

2.3 Inhibitor Korosi

Inhibitor korosi adalah zat kimia yang, jika ditambahkan dalam jumlah kecil ke dalam media korosif di mana suatu bahan logam akan terkorosi sehingga menurunkan laju korosi bahan tersebut (Asmara *et al.*, 2018). Inhibitor mampu memberikan perlindungan dari lingkungan yang kurang agresif sampai pada lingkungan yang tingkat korosifitasnya sangat tinggi (Priyotomo dkk., 2020). Inhibitor komersial yang umum digunakan dalam ladang minyak dan gas untuk menghambat korosi CO₂ pada jaringan pipa baja karbon internal adalah senyawa berbasis nitrogen. Literatur melaporkan bahwa inhibitor ini menunjukkan sifat anti korosi yang sangat baik (Palumbo, 2019).

2.3.1 Inhibitor Anorganik

Inhibitor anorganik adalah inhibitor yang diperoleh dari mineral-mineral yang tidak mengandung unsur karbon dalam senyawanya (Pakpahan *et al.*, 2015). Inhibitor anorganik umumnya melibatkan garam kimia kristal seperti natrium kromat, fosfat, atau molibdat. Inhibitor anorganik dapat menghambat material logam baik secara anodik atau katodik karena memiliki gugus aktif (da Silva *et al.*, 2019). Hanya ion negatif dari senyawa ini yang dapat mengurangi korosi logam (Fayomi *et al.*, 2019). Tetapi penggunaan inhibitor tersebut tidak ramah

lingkungan sehingga untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan inhibitor korosi yang ramah lingkungan.

2.3.2 Inhibitor Organik

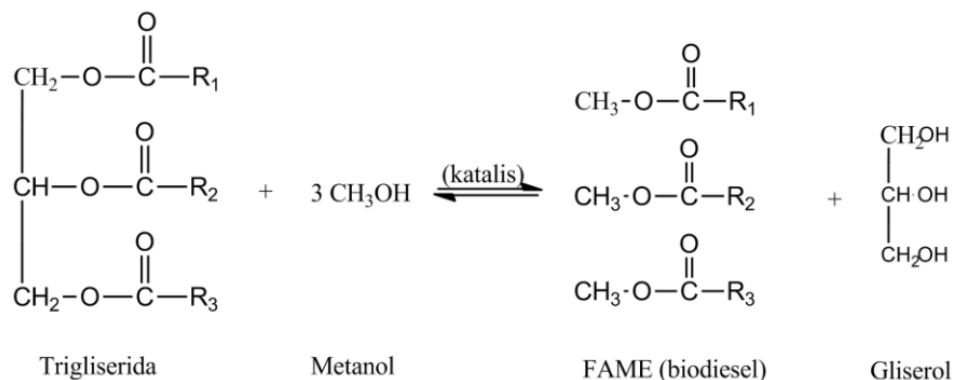
Inhibitor organik berasal dari bagian tumbuhan yang mengandung tanin. Tanin adalah zat kimia yang terdapat pada daun, akar, kulit, buah, dan batang tumbuhan. Senyawa ekstrak bahan alam yang dijadikan inhibitor harus mengandung atom N, O, P, S, dan atom-atom yang memiliki pasangan elektron bebas yang dapat berfungsi sebagai ligan yang akan membentuk senyawa kompleks dengan logam (Pakpahan *et al.*, 2015). Atom O, N, dan S adalah pusat aktif untuk proses adsorpsi pada permukaan logam. Efisiensi inhibisi mengikuti urutan $O < N < S < P$ (Ilim *et al.*, 2016). Interaksi antara inhibitor organik (atau inhibitor pembentukan film) menghasilkan adsorpsi dan pembentukan lapisan pada permukaan logam dan antarmuka lingkungan elektrolit, yang memisahkan logam dari lingkungan korosif dan mencegah korosi (Ilim *et al.*, 2021).

2.4 Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit

2.4.1 Transesterifikasi

Transesterifikasi biasa disebut dengan reaksi alkoholisis yaitu tahap konversi dari trigliserida (minyak nabati) menjadi metil ester melalui reaksi dengan alkohol dan menghasilkan produk samping yaitu gliserol (Heryani, 2018). Transesterifikasi merupakan tipe reaksi kesetimbangan (reversibel), di mana penambahan katalis NaOH dapat mempercepat tercapainya keadaan kesetimbangan tersebut (Ningtyas, 2013). Pada dasarnya proses transesterifikasi ini bertujuan untuk mengubah (tri, di, mono) gliserida yang mendominasi komposisi minyak kelapa sawit dan berviskositas tinggi menjadi metil ester asam lemak di mana metanol

atau etanol menggantikan gliserin (Suleman dkk., 2019). Mekanisme reaksi esterifikasi dapat dilihat pada Gambar 1.



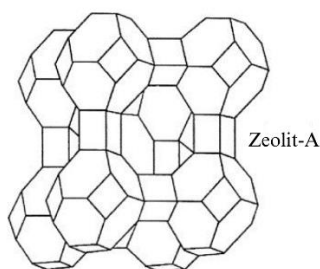
Gambar 1. Mekanisme reaksi esterifikasi (Amelia dkk., 2021).

2.4.2 Minyak Kelapa Sawit

Kelapa sawit (*Elaenis guineensis*) telah menjadi spesies tanaman dan komoditas penting di dunia. Minyak kelapa sawit adalah jenis tanaman yang paling produktif dalam menghasilkan minyak nabati yang digunakan sebagai bahan baku industri farmasi, minyak goreng, margarin, sabun, dan kosmetik (Rafika, 2023). Minyak kelapa sawit mengandung lebih dari 99% lipid, di mana sekitar 95%-nya berupa molekul minyak/lemak (trigliserida) dan sisanya berupa molekul asam lemak bebas (*free fatty acid*). Sementara komposisi lain yang totalnya tidak lebih dari 1% berupa komponen non minyak seperti air, fosfatida, karoten, aldehid, dan komponen lainnya dalam jumlah yang lebih kecil (Nugroho, 2019). Rantai asam lemak yang terdapat pada trigliserida minyak sawit dapat bervariasi jumlah atom karbon dan strukturnya (adanya ikatan rangkap seperti ketidakjenuhan). Variasi struktur dan jumlah karbon pada rantai asam lemak menggambarkan sifat fisik dan kimia minyak sawit (Morad and Aziz, 2006).

2.5 Katalis Zeolit-A

Salah satu jenis katalis yang biasa digunakan pada reaksi transesterifikasi adalah zeolit-A. Zeolit adalah mineral dengan komponen utama alumina dan silika yang membentuk struktur kubus seperti pada Gambar 2. Alumina dan silika bergabung membentuk kerangka dan terhubung dengan atom O sebagai pengikat (Yuliyanda, 2023a). Zeolit memiliki satu formula umum yaitu $M_{x/n} [(AlO_2)_x(SiO_2)_y]_w H_2O$, yang mana (M) adalah kation alkali atau alkali tanah, (n) adalah valensi kation, (w) adalah jumlah molekul air per unit sel, x dan y adalah jumlah total tetrahedral per unit sel. Rasio y/x biasanya memiliki nilai 1 hingga 5, meskipun untuk zeolit silika, y/x dapat berkisar dari 10 hingga 100 (Petrov and Michalev, 2012). Zeolit-A adalah jenis katalis heterogen yang dapat dipisahkan dengan mudah dari campuran reaksi karena memiliki fasa yang berbeda antara reaktan dan produk dengan katalis, kestabilan termal yang tinggi, memungkinkan penggunaan pada suhu tinggi, dan regenerasi katalis (Pandiangan *et al.*, 2019).



Gambar 2. Struktur zeolit-A (Şen *et al.*, 2008).

2.5.1 Sintesis zeolit-A

Zeolit-A umumnya dapat disintesis dengan kondisi hidrotermal yang berbahan dasar gel reaktif di dalam media alkali pada suhu 80-200 °C (Wuntu, 2008). Dalam proses pembentukan sintesis zeolit-A dilakukan pada suhu optimum sebesar 100 °C. Bahan baku pembuatan sintesis zeolit-A yaitu silika dan alumina, dapat diperoleh dengan memanfaatkan limbah yang ada industri dan bahan alam seperti limbah tebu, sekam padi, abu batubara, dan zeolit alam (Wang *et al.*,

2008). Menurut penelitian Simanjuntak *et al.* (2019), sekam padi mengandung 18-20% silika dan memiliki kemurnian yang tinggi, yakni sekitar 95%. Sintesis zeolit-A dari sekam padi dapat dilakukan dengan cara mencampurkan silika sekam padi dengan logam alumunium yang kemudian dikalsinasi sehingga diperoleh katalis.

2.5.2 Protonasi zeolit-A

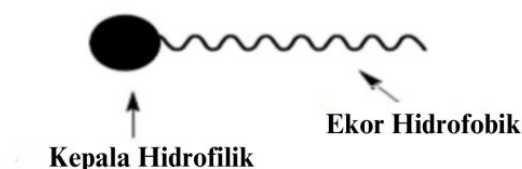
Struktur kerangka dari zeolit tersusun dari tetrahedral alumina dan silika yang membentuk struktur bermuatan negatif berongga terbuka/berpori. Muatan negatif ini dinetralkan oleh kation seperti K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} yang muncul pada tahap sintesis dan terikat secara lemah. Kation inilah yang bertanggung jawab saat proses pertukaran ion (*ion exchange*). Pertukaran ion terjadi karena adanya penggantian kation yang ada di dalam material berpori mikro terhadap kation yang terdapat di dalam larutan eksternal atau melelehkan material berpori mikro yang direndam (Murtaza and Attfield, 2011). Riset mengenai protonasi zeolit-A telah dilakukan sebelumnya pada konversi pirolitik minyak kelapa sawit menjadi bahan bakar cair menggunakan zeolit-A terprotonasi, zeolit-A pada percobaan ini dimodifikasi menjadi zeolit terprotonasi dengan mengganti ion Na^+ menjadi H^+ yang dilarutkan ke dalam larutan NH_4NO_3 (Surani, 2022).

2.6 Senyawa Nitrogen

2.6.1 Alkanolamida

Alkanolamida merupakan senyawa amida yang banyak digunakan dalam industri kimia, kosmetik, maupun otomotif. Senyawa ini memiliki sifat “deterjensi” karena memiliki molekul *amphiphilic*. *Amphiphilic* adalah suatu molekul yang sekaligus memiliki gugus hidrofilik dan gugus hidrofobik di mana bagian polar yang suka akan air (hidrofilik) dan bagian nonpolar yang suka akan minyak/lemak

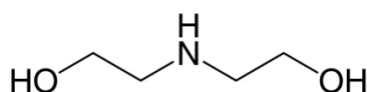
(hidrofobik). Karena sifatnya, alkanolamida dapat berperan sebagai surfaktan (Lubis, 2018). Molekul surfaktan merupakan zat aktif permukaan dengan dua sifat yang berbeda. Bagian kepala bersifat polar dan bagian rantai alkil bersifat non-polar. Molekul surfaktan pada bagian kepala disebut bagian hidrofilik dan bagian ekor disebut hidrofobik seperti pada Gambar 3. Surfaktan menyebabkan penurunan tegangan permukaan yang signifikan atau mengurangi tegangan permukaan antara dua cairan. Dengan menambah sejumlah kecil surfaktan, akan menyebabkan berkurangnya tegangan permukaan dan keadaan antarmuka akan berubah (Ashari dkk., 2017).



Gambar 3. Molekul surfaktan (Ashari dkk., 2017).

2.6.2 Reaksi amidasi

Reaksi amidasi merupakan reaksi yang masih jarang digunakan. Reaksi amidasi terjadi dengan mereaksikan asam lemak, metil ester atau trigliserida dengan alkanolamina atau dietanolamina. Struktur dietanolamina dapat dilihat pada Gambar 4. Bahan baku yang sering digunakan adalah metil ester, tetapi penggunaan metil ester perlu dipertimbangkan dikarenakan dapat menimbulkan busa yang berlebih dalam penggunaannya (Lubis, 2018). Dietanolamina berfungsi sebagai penyedia gugus amina yang akan menggantikan gugus metoksi pada metil ester sehingga terbentuk dietanolamina dengan hasil samping metanol (Nadhief, 2023).



Gambar 4. Struktur dietanolamina (Albert, 2013).

Senyawa amina hanya dapat bereaksi dengan senyawa ester pada suhu tinggi. Apabila dilakukan pada suhu rendah, maka reaksi akan berjalan lambat sekalipun dengan bantuan katalis (Marliana, 2019).

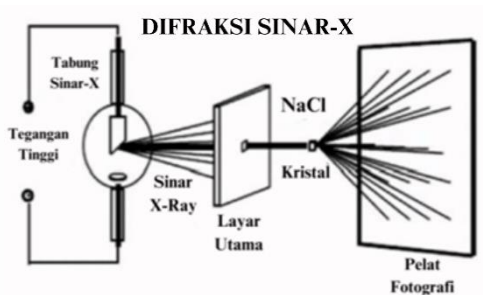
2.7 Karakterisasi Produk

2.7.1 X-Ray Diffraction (XRD)

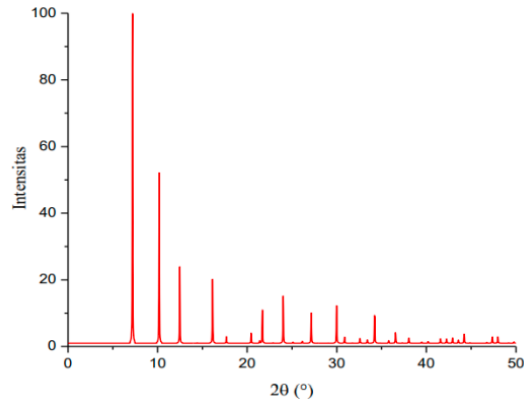
X-Ray Diffraction (XRD) adalah metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi material kristalit. Selain itu, XRD juga berguna untuk mengetahui susunan atom dalam kristal, kehadiran cacat, orientasi, dan cacat kristal. Prinsip dasar XRD melibatkan difraksi cahaya melalui celah kristal seperti yang dilihat pada Gambar 5. Difraksi ini menghasilkan pola berdasarkan intensitas puncak yang mencerminkan parameter kisi kristal atau indeks Miller (hkl) sebagai fungsi 2θ (2 theta), di mana θ (theta) adalah sudut difraksi berdasarkan persamaan Bragg yang ditunjukkan oleh Persamaan (5):

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (5)$$

di mana n adalah bilangan bulat, λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antar bidang yang menghasilkan difraksi, dan θ adalah sudut difraksi. Hukum ini menghubungkan panjang gelombang radiasi elektromagnetik dengan sudut difraksi dan jarak kisi dalam sampel kristal (Adams, 2005). Difraktogram standar untuk zeolit-A dapat dilihat pada Gambar 6.



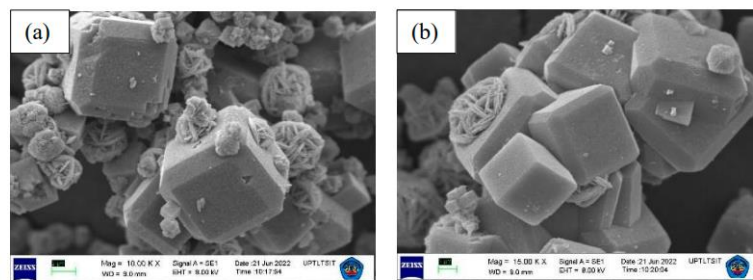
Gambar 5. Skema alat XRD (Anonim, 2024).



Gambar 6. Difraktogram standar dari zeolit-A (*Structure Commission of the International Zeolite Association (IZA-SC, 2017)*).

2.7.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

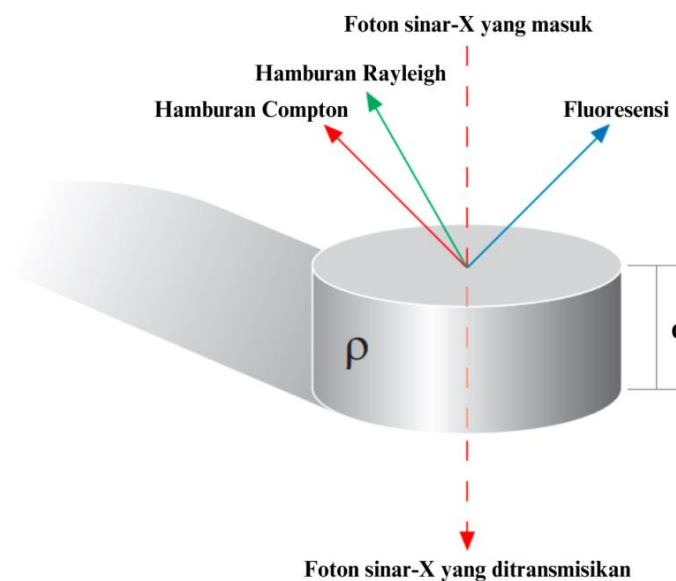
Scanning Electron Microscope (SEM) adalah jenis mikroskop elektron yang memvisualisasikan permukaan sampel melalui proses pemindaian dengan menggunakan energi tinggi dari elektron dalam pola *scan* (Rafika, 2023). SEM menggunakan serangkaian elektron yang diarahkan pada permukaan objek untuk menghasilkan citra yang diperbesar. SEM digunakan untuk memeriksa topografi secara menyeluruh. Penggunaan SEM dalam karakterisasi zeolit H-A bertujuan untuk mengidentifikasi mikrostruktur dengan menampilkan dengan jelas morfologi permukaan yang ditandai oleh pembentukan *cluster* dengan ukuran dan bentuk yang bervariasi (Yuliyanda, 2023a). Pada Gambar 7. diberikan contoh mikrograf dari sampel zeolit-A.



Gambar 7. Mikrograf zeolit-A dengan perbesaran (a) 10.000x dan (b) 15.000x (Nadhief, 2023).

2.7.3 X-Ray Fluorescence (XRF)

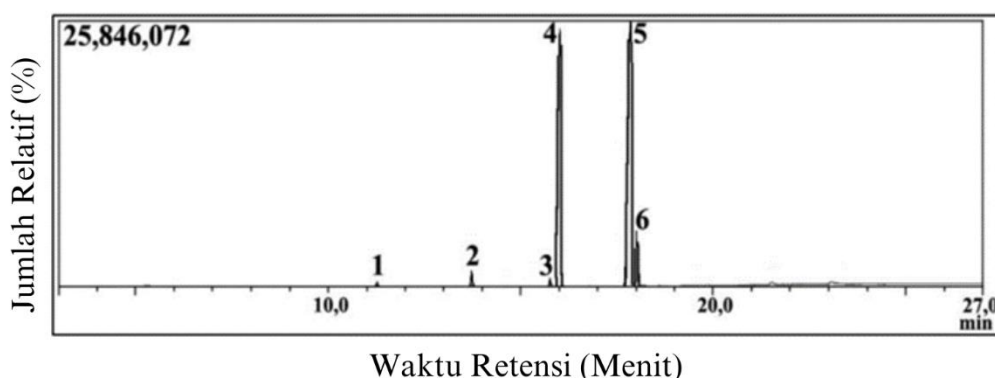
X-Ray Fluorescence (XRF) adalah metode analisis yang digunakan untuk menentukan komposisi kimia berbagai bahan, termasuk padatan, cairan, dan serbuk. *X-Ray Fluorescence* (XRF) adalah alat karakterisasi yang digunakan untuk analisis kualitatif dan kuantitatif komposisi kimia serta konsentrasi unsur dalam sampel. Prinsip dasar analisis XRF bergantung pada interaksi sinar-X dari sumber dengan atom-atom di permukaan material (Shen and Shen, 2011). 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 seperti yang terlihat pada Gambar 8. Metode ini cepat, akurat, tidak merusak, dan memerlukan persiapan sampel yang minimalis. XRF banyak diterapkan di berbagai industri seperti logam, semen, minyak, polimer, plastik, makanan, pertambangan, mineralogi, geologi, dan analisis lingkungan. Akurasi dan reproduktifitas analisis ini tinggi, terutama dengan standar referensi yang baik dan waktu pengukuran bervariasi dari beberapa detik hingga 30 menit, tergantung pada jumlah elemen yang dianalisis dan ketelitian yang dibutuhkan (Brouwer, 2010).



Gambar 8. Interaksi sinar-X dengan materi (Brouwer, 2010).

2.7.4 Gas Chromatography – Mass Spectrometry (GC-MS)

Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) adalah metode analisis yang menggabungkan gas kromatografi dan spektrometri massa untuk mengidentifikasi berbagai zat dalam sampel uji. GC-MS terdiri dari dua blok instrumen utama yaitu gas kromatografi dan spektrometer massa. Tujuan utama analisis instrumen GC-MS adalah mengidentifikasi zat berbeda dalam sampel uji. Hal ini dilakukan dengan membandingkan konsentrasi relatif antara massa atom dalam spektrum yang dihasilkan. Instrumen ini digunakan untuk menganalisis senyawa yang mudah menguap atau semi-mudah menguap. Sampel yang mengandung senyawa mudah menguap disuntikkan ke dalam sistem GC untuk dipisahkan dalam kolom berdasarkan sifat polaritas. Setelah elusi dari sistem GC, setiap senyawa yang dipisahkan akan memasuki sistem MS untuk fragmentasi dengan energi ionisasi spesifik (Nadhief, 2023). Berikut adalah kromatogram dari metil ester minyak kelapa sawit yang ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kromatogram metil ester minyak kelapa sawit (Hidayah, 2023).

2.8 Uji Aktivitas Inhibitor Korosi

2.8.1 Metode *Weight Loss* (*Wheel Test*)

Metode kehilangan berat adalah prosedur standar untuk menentukan laju korosi. Prinsipnya adalah dengan menghitung jumlah material yang hilang setelah

pengujian, mengukur massa logam yang telah dibersihkan dari oksida sebagai massa awal, dan merendamnya dalam lingkungan korosif seperti air laut untuk jangka waktu tertentu (Hidayah, 2023). Data luaran yang diperoleh dari metode *weight loss* adalah berat yang hilang (W), laju korosi (CR), dan % proteksi (% P) yang dapat dihitung sesuai persamaan berikut (Ilim *et al.*, 2016):

$$W = W_{(l)} - W_{(t)} \quad (6)$$

$$CR = \frac{10 \cdot W \cdot 365}{A \cdot D \cdot t} \quad (7)$$

$$\% P = \frac{(CR_0 - CR_i)}{CR_0} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan W = berat yang hilang (g), $W_{(l)}$ = berat awal (g), $W_{(t)}$ = berat akhir (g), CR = laju korosi (mm/y = milimeter per year), A = luas permukaan sampel uji (cm^2), D = massa jenis logam (g/cm^3) sama dengan $7,86 \text{ g/cm}^3$ untuk baja karbon, t = waktu paparan (hari), % P = persen proteksi, CR_0 = laju korosi tanpa penambahan inhibitor, dan CR_i = laju korosi dengan penambahan inhibitor.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

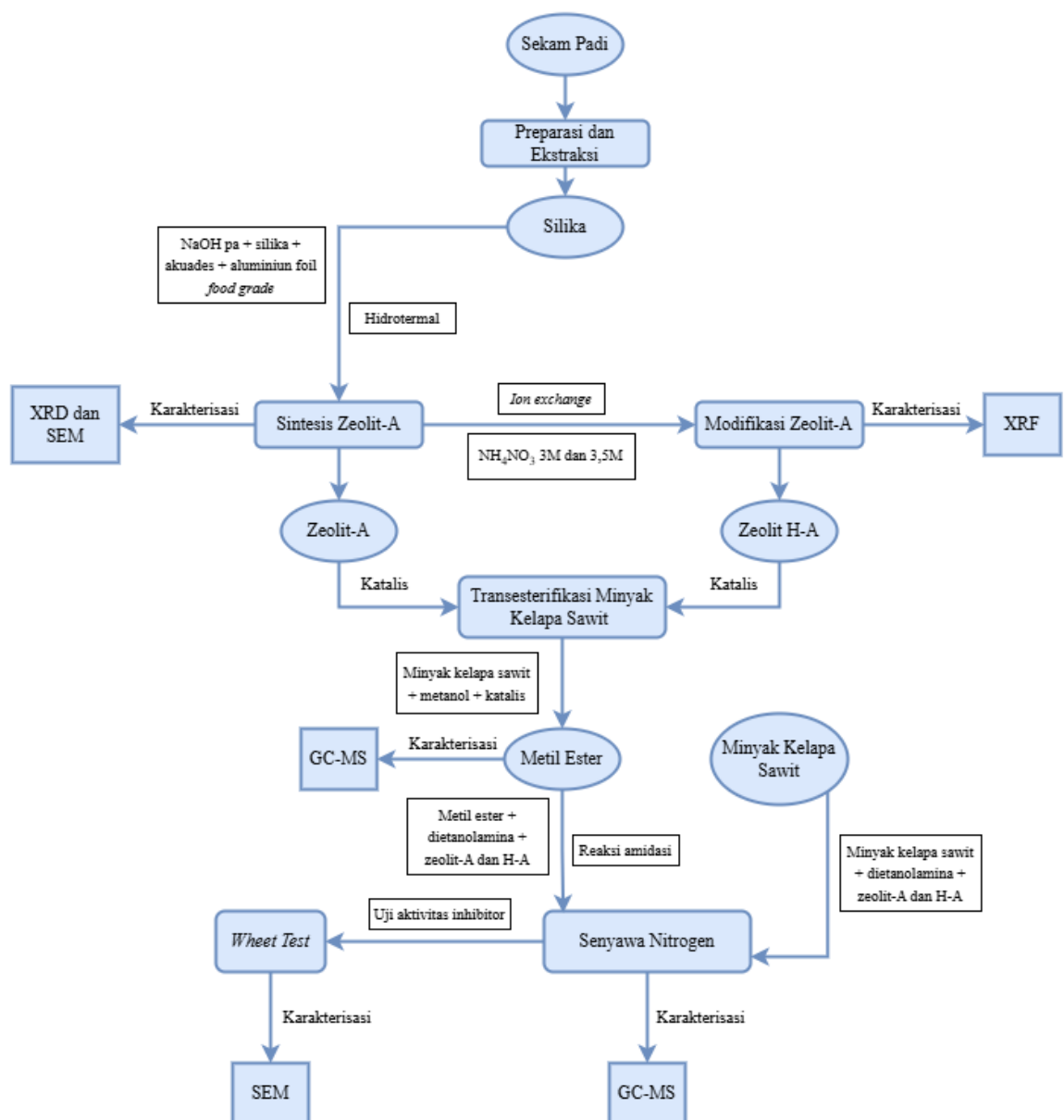
Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober 2024 hingga Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Karakterisasi zeolit-A menggunakan XRD dan analisis komposisi zeolit H-A menggunakan XRF dilaksanakan di Laboratorium Instrumen Kimia, Universitas Negeri Padang (UNP). Karakterisasi untuk mengidentifikasi senyawa kimia menggunakan GC-MS produk transesterifikasi dan amidasi dilaksanakan di Laboratorium Instrumen Universitas Islam Indonesia (UII). Analisis morfologi permukaan katalis zeolit-A 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; *hot plate*, oven, *magnetic stirrer*, autoklaf, labu bundar, corong pisah, *furnace*, alat refluks, *water bath*, termometer, saringan mesh ukuran 300 nm, mikropipet, cawan krus, jangka sorong, desikator, neraca analitik, gelas kimia, spatula, labu ukur, Erlenmeyer, gelas ukur, *Scanning Electron Microscope* (SEM) ZEISS EVO® MA 10, *X-Ray Diffraction* (XRD) PANalytical tipe X'Pert Pro 3040/60, *X-Ray Fluorescence* (XRF) 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; baja lunak (SAE/AISI Grade 1022), NaCl, NaOH, metanol, NaHCO₃, NH₄NO₃, HNO₃, dietanolamina, Sb₂O₃, SnCl₂, HCl pekat, sekam padi, aluminium foil *food grade*, gas CO₂, minyak kelapa sawit, akuades, indikator pH, kertas saring, dan kertas silikon karbida (*grade 200, 400, 600, 800, dan 1200*).

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram alir penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Preparasi Sekam Padi

Sekam padi yang digunakan diperoleh dari industri penggilingan lokal di Pringsewu dan Tegineneng. Sebelum digunakan, sekam padi dicuci terlebih dahulu dengan cara direndam dalam air bersih untuk menghilangkan kotoran yang menempel. Kemudian dilakukan pemisahan antara sekam padi yang terapung dan terendam. Sekam padi yang terendam kemudian dicuci dengan air hingga bersih dan dijemur hingga kering.

3.4.2 Ekstraksi Silika Sekam Padi

Sekam padi yang sudah bersih sebelumnya kemudian ditimbang sebanyak 2000 g dan dilarutkan dalam 20 liter larutan NaOH 1,5% dalam gelas kimia. Kemudian dilakukan pemanasan hingga mendidih selama 30 menit, lalu diangkat dan didiamkan selama 24 jam hingga suhu ruang. Setelah didiamkan selama 24 jam, hasilnya menunjukkan 2 fasa yang berbeda berupa filtrat dan residu. Kedua fasa tersebut kemudian disaring dan filtrat yang mengandung silika dikumpulkan dalam wadah terpisah. Sol silika (filtrat) yang telah terkumpul kemudian ditambahkan larutan HNO₃ 10% hingga pH menjadi netral dan didiamkan selama 24 jam hingga diperoleh gel yang diinginkan. Gel kemudian dicuci dengan air panas hingga berwarna putih dan dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 24 jam. Setelah kering, padatan silika gel dihaluskan dengan mortar dan diayak menggunakan saringan mesh 300 nm.

3.4.3 Sintesis Katalis Zeolit-A

Zeolit-A disintesis dengan cara melarutkan 20 g NaOH padat ke dalam 250 mL akuades. Sebanyak 150 mL dari larutan NaOH tersebut diambil dan dicampurkan

dengan 30 g silika, lalu diaduk menggunakan *stirrer* pada suhu 70 °C selama 3 jam. Larutan natrium silikat yang terbentuk kemudian disaring selama 24 jam. Selanjutnya, sebanyak 13,5 g aluminium foil dilarutkan dalam 100 mL larutan NaOH dan diaduk selama 3 jam. Larutan natrium aluminat hasil pelarutan tersebut ditambahkan ke dalam larutan natrium silikat, kemudian diaduk kembali selama 3 jam. Selanjutnya dilakukan *aging* selama 24 jam. Setelah di-*aging*, dilakukan kristalisasi dalam oven dengan suhu 100 °C selama 96 jam. Diperoleh sampel zeolit-A dengan bentuk gel yang kemudian gel tersebut dicuci kembali setelah didinginkan hingga pH 7-8 dengan akuades. Dikeringkan kembali di dalam oven dengan suhu 100 °C selama 24 jam. Setelahnya dilakukan penghalusan dengan mortar dan disaring kembali dengan saringan mesh 300 nm. Dilakukan kalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam hingga diperoleh zeolit-A. Untuk membuktikan hasil yang diperoleh itu sesuai dengan yang diinginkan, maka zeolit-A dikarakterisasi dengan XRD dan SEM.

3.4.4 Modifikasi Zeolit-A dengan Metode *Ion Exchange*

Modifikasi zeolit-A dilakukan melalui metode pertukaran ion (ion exchange) untuk menghasilkan zeolit dalam bentuk proton (H-A). Proses dimulai dengan mencampurkan zeolit-A dengan larutan amonium nitrat (NH_4NO_3) pada dua variasi konsentrasi, yaitu 3M dan 3,5M. Campuran ini kemudian dipanaskan menggunakan hotplate stirrer pada suhu konstan 80 °C selama 6 jam untuk memastikan proses pertukaran ion berlangsung optimal. Rasio massa zeolit terhadap volume larutan yang digunakan adalah 2 gram zeolit per 20 mL larutan NH_4NO_3 . Setelah proses pemanasan selesai, campuran disaring untuk memisahkan padatan dari larutan, dan padatan (zeolit NH_4^+ -A) dicuci dengan air suling (akuades) hingga pH filtrat mencapai kondisi netral, yang menunjukkan bahwa sisa larutan asam atau garam telah benar-benar hilang. Selanjutnya, zeolit dikeringkan di dalam oven pada suhu 80 °C untuk menghilangkan sisa kelembaban. Terakhir, dilakukan kalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam. Zeolit H-A yang terbentuk kemudian dikarakterisasi menggunakan XRF.

3.4.5 Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit

Transesterifikasi dilakukan dengan rasio minyak kelapa sawit dan reaktan 1:4. 25 mL minyak kelapa sawit dicampur dengan 100 mL metanol dan ditambahkan katalis dengan variasi zeolit-A dan zeolit H-A sebanyak 10% berat minyak dalam labu bundar 250 mL. Campuran direfluks pada suhu 70 °C selama 4 jam menggunakan *hotplate stirrer*. Hasil refluks didinginkan, lalu disaring untuk memisahkan katalis dengan produk. Filtrat didiamkan selama 24 jam agar metil ester terpisah dari minyak. Kemudian metil ester di-*stirrer* untuk memisahkan metanol dengan produk. Metil ester yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan GC-MS dan kemudian digunakan sebagai bahan baku pembuatan senyawa nitrogen dalam reaksi amidasi dengan penambahan senyawa dietanolamina (DEA) dengan perbandingan yang telah ditentukan.

3.4.6 Sintesis Senyawa Nitrogen (Reaksi Amidasi)

Metil ester yang sebelumnya diperoleh dicampurkan dengan dietanolamina (DEA) dalam perbandingan molar 1:1, kemudian ditambahkan katalis sebanyak 5% dari total massa reaktan dengan variasi penggunaan zeolit-A dan zeolit H-A sebagai katalis. Campuran tersebut di-*stirrer* selama 1 jam untuk memastikan homogenisasi reaksi, kemudian dimasukkan ke dalam autoklaf dan dipanaskan di oven pada suhu 100 °C selama 48 jam. Selanjutnya campuran didinginkan hingga mencapai suhu ruang dan kemudian disaring untuk memisahkan katalis padat dari campuran reaksi. Campuran hasil penyaringan kemudian didiamkan selama 24 jam untuk memungkinkan pemisahan antara senyawa nitrogen hasil reaksi dengan metil ester yang tidak bereaksi. Senyawa hasil reaksi selanjutnya dikarakterisasi menggunakan GC-MS untuk mengetahui komposisi kimianya. Senyawa ini kemudian diuji efektivitasnya sebagai inhibitor korosi pada baja lunak.

3.4.7 Persiapan Sampel Baja Lunak

Baja lunak dipotong dengan ukuran 2x1 cm menjadi bentuk kupon, kemudian diampas dengan kertas amplas dengan *grade* 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. Kemudian dipipet larutan inhibitor sebanyak 1,75 mL ke dalam botol duran untuk membuat larutan korosif dengan konsentrasi 150 ppm dan dialiri gas CO₂ selama 45 menit. Kupon-kupon baja lunak yang sudah diketahui ukurannya dimasukkan

ke dalam botol. Aliran gas CO₂ dihentikan, botol ditutup dengan hati-hati tanpa kontaminasi oksigen, lalu didiamkan selama 24 jam. Setelah itu, botol dibuka dan kupon dikeluarkan kemudian dibilas dengan *Clarke's solution* selama 5 detik, dicuci dengan akuades, dan dibilas dengan metanol. Kupon yang sudah kering ditimbang dengan neraca analitik. Laju korosi dihitung menggunakan Persamaan (9).

$$W = W_{(l)} - W_{(t)} \quad (9)$$

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

$$\% P = \frac{(CR_0 - CR_i)}{CR_0} \times 100\% \quad (11)$$

3.4.10 Analisis SEM

Prosedur ini dilakukan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel baja lunak menggunakan SEM guna mengamati tingkat korosi yang terjadi serta efektivitas penggunaan inhibitor korosi. Tiga jenis perlakuan diberikan pada sampel baja lunak, yaitu baja tanpa perlakuan sebagai kontrol, baja yang direndam dalam medium korosif tanpa inhibitor (blanko), dan baja yang direndam dalam medium korosif yang ditambahkan 1,75 mL larutan inhibitor dengan konsentrasi 15.000 ppm. Setelah direndam dalam medium korosif selama 24 jam, semua sampel baja dibilas menggunakan akuades dan metanol tanpa menggunakan larutan *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 bahwa:

1. Zeolit-A telah berhasil disintesis ditandai dengan terbentuknya fasa kristalin yang ditunjukkan oleh hasil XRD yang mirip dengan standar IZA serta didukung oleh hasil karakterisasi SEM yang menunjukkan morfologi permukaan yang berbentuk kubus.
2. Zeolit-A telah berhasil dimodifikasi menjadi zeolit H-A dibuktikan dengan konversi Na menjadi H sebesar 17,26% pada konsentrasi amonium nitrat 3,5M yang dianalisis menggunakan XRF.
3. Minyak kelapa sawit berhasil terkonversi menjadi senyawa metil ester dengan bantuan katalis zeolit H-A menghasilkan persen konversi sebesar 60%.
4. Hasil analisis GC-MS produk amidasi pada variasi metil ester dan zeolit H-A mengandung senyawa nitrogen sebesar 25,34%, namun masih didominasi oleh senyawa asam dan metil ester.
5. Aktivitas inhibitor korosi terbaik ditunjukkan oleh produk amidasi dengan variasi metil ester dan zeolit H-A dengan persen proteksi sebesar 96,11% dan didukung oleh analisis SEM yang menunjukkan morfologi baja lunak terlindungi dengan cukup baik.

5.2 Saran

Beberapa hal yang perlu dikaji pada penelitian berikutnya sebagai berikut:

1. Konversi Na menjadi H pada protonasi zeolit-A masih cukup kecil sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut menggunakan konsentrasi amonium nitrat yang lebih tinggi.
2. Mengoptimalkan reaksi antara metil ester dan dietanolamina untuk menghasilkan jumlah senyawa nitrogen yang lebih tinggi, seperti melakukan variasi reaktan, waktu pengadukan, dan suhu reaksi.
3. Melakukan pengujian aktivitas inhibitor korosi menggunakan metode lain, seperti *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) dan analisis Tafel untuk memperoleh data yang lebih akurat mengenai kinerja inhibitor.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdoulmoumine, N. 2010. *Sulfate and Hydroxide Supported on Zirconium Oxide Catalysts for Biodiesel Production*. Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia.
- Adams, F. 2005. *X-Ray Absorption and Diffraction*. University of Antwerp. Belgium.
- Afifah, A. I. N. 2023. Conversion of Coconut Oil Derived Methyl Esters Into Nitrogen Compounds As Green Corrosion Inhibitor. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Albert, T. 2013. *Some Chemicals Present in Industrial and Consumer Products , Food and Drinking-Water*. International Agency for Research on Cancer. France.
- Amelia, R., Pratilastiarso, J., and Laili, E. S. N. 2021. Produksi Metil Ester Menggunakan Nanokatalis Heterogen. *Journal of Research and Technology*. 7(2460). 113–122.
- Amiery, A. A. Al, Mohamad, A. B., Kadhum, A. A. H., and Shaker, L. M. 2022. Experimental and Theoretical Study On The Corrosion Inhibition Of Mild Steel By Nonanedioic Acid Derivative In Hydrochloric Acid Solution. *Scientific Reports*. 12(1). 1–21.
- Anonim. 2024. Prinsip Kerja dan Proses Terjadinya Sinar-X (XRD). <https://carafisika.blogspot.com/2020/07/prinsip-kerja-dan-proses-terjadinya>. Diakses Pada Tanggal 24 Mei 2024 09:13.
- Anwo, A. B., Ajanaku, K. O., Fayomi, O. S. I., and Olanrewaju, A. 2019. Efficacy of Corrosion Phenomena, Challenges and Control in Steel Industry: An overview. *Journal of Physics: Conference Series*. 1378(3). 1-1.

- Ashari, M., Annisa, N., dan Masyithah, Z. 2017. Sintesis Palmitoil dan Lauroil Etanolamida Menggunakan Pelarut Campuran : Pengaruh Temperatur dan Waktu Reaksi. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 6(4). 29–33.
- Askari, M., Aliofkhazraei, M., Jafari, R., Hamghalam, P., and Hajizadeh, A. 2021. Downhole Corrosion Inhibitors For Oil and Gas Production – A Review. *Applied Surface Science Advances*. 6.
- Asmara, Y. P., Kurniawan, T., Geter, A., Sutjipto, E., and Jafar, J. 2018. Plants Extracts as Green Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete - A Review *Indonesian Journal of Science & Technology Application*. 3(2), 158–170.
- Avelino, A. F., Araújo, W. S., Dias, D. F., dos Santos, L. P. M., Correia, A. N., and de Lima-Neto, P. 2018. Corrosion Investigation of the 18Ni 300 Grade Maraging Steel in Aqueous Chloride Medium Containing H₂S and CO₂. *Electrochimica Acta*. 286. 339–349.
- Basdeki, M., Koulouris, K., and Apostolopoulos, C. (2022). Effect of Corrosion on the Hysteretic Behavior of Steel Reinforcing Bars and Corroded RC Columns. *Applied Sciences (Switzerland)*. 12(15). 1-22.
- Brouwer, P. 2010. *Theory of XRF*. PANalytical BV. Netherlands.
- Córdoba, L. C., Montemor, M. F., Coradin, T., Córdoba, L. C., Montemor, M. F., Coradin, T., and Tio, S. 2016. Silane / TiO₂ Coating to Control the Corrosion Rate Of Magnesium Alloys In Simulated Body Fluid. *Open Science*.
- da Silva, R. C., Heinen, M., Lorenzi, G. A., Lima, D. W., Lingner Moura, J. H., de Freitas, J. M., Martini, E. M. A., and Petzhold, C. L. 2019. Carbon Steel Corrosion Controlled by Vegetable Polyol Phosphate, In Medium Containing Chloride and Glyoxal: Influence of Phosphate Content and CO₂. *Heliyon*. 5(5).
- Danks, A. E., Hall, S. R., and Schnepf, Z. (2016). The Evolution of “Sol-Gel” Chemistry as A Technique for Materials Synthesis. *Materials Horizons*. 3(2). 91–112.
- Elgaddafi, R., Ahmed, R., and Shah, S. 2021. The Effect of Fluid Flow On CO₂ Corrosion of High-Strength API Carbon Steels. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 86. 103739.
- 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.

- Fayomi, O. S. I., Akande, I. G., and Odigie, S. 2019. Economic Impact of Corrosion in Oil Sectors and Prevention: An Overview. *Journal of Physics: Conference Series*. 1378(2). 1-8.
- Fonseca, D., Tagliari, M. R., Guaglianoni, W. C., Tamborim, S. M., and Borges, M. F. 2024. Carbon Dioxide Corrosion Mechanisms : Historical Development and Key Parameters of CO₂-H₂O Systems. *Hindawi International Journal of Corrosion*. 1-23.
- Gernigon, N., Al-Zoubi, R. M., and Hall, D. G. 2012. Direct Amidation Of Carboxylic Acids Catalyzed By Ortho-Iodo Arylboronic Acids: Catalyst Optimization, Scope, and Preliminary Mechanistic Study Supporting A Peculiar Halogen Acceleration Effect. *Journal of Organic Chemistry*. 77(19). 8386–8400.
- Ginting, S. B., Arya Perdana, G., Darmansyah, D., Agustina Iryani, D., dan Wardono, H. 2019. Pengaruh Waktu Aging pada Sintesis Zeolit Linde Type-A (LTA) dari Zeolit Alam Lampung (ZAL) dengan Metode Step Change Temperature of Hydrothermal. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*. 14(1). 1–11.
- Ginting, S. B., dan Nurfiqih, M. Y. 2018. Sintesis Zeolit A dari *Coal Bottom Ash* Dengan Metode *Step Change Of Synthesis Temperature* dengan Variasi Suhu Kalsinasi Diaplikasikan Untuk Dehidrasi Etanol. *Jurnal Mechanical*. 9(1).
- Hameed, W. F. and Rashid, K. H. 2022. New Developments in Inhibition of the Sweet Environment in a Variety of Corrosive Media : A Review. *Engineering and Technology Journal*. 4. 1117–1130.
- Harsimran, S., Santosh, K., and Rakesh, K. 2021. Overview of Corrosion and Its Control: a Critical Review. *Proceedings on Engineering Sciences*. 3(1). 13–24.
- Herliana, Ilim, Simanjuntak, W., and Pandiangan, K. D. 2021. Transesterification of Coconut Oil (*Cocos nucifera* L.) into Biodiesel Using Zeolite-A Zatalyst Based On Rice Husk Silica and Aluminum Foil. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1). 1-8.
- Heryani, H. 2018. *Teknologi Produksi Biodiesel*. Lambung Mengkurat Universitas Press. Banjarmasin.
- Hidayah, L. 2023. Konversi Minyak Kelapa Sawit (*Elaeis giuneensis* J.) Menjadi Senyawa Nitrogen dan Uji Aktivitasnya Sebagai Green Inhibitor Korosi Baja Lunak. *Tesis*. Universitas Lampung.

- Hidayah, L., Khoeroni, A., Sinaga, A., Simanjuntak, W., Pandiangan, K., and Ilim, I. 2023. Conversion Of Palm Oil (*Elaeis guineensis* J.) Into Nitrogen Compounds Using Zeolite-A As Catalyst. *AIP Conference Proceedings*. 2970(1).
- Ibrahimi, B. El, Nardeli, J. V., and Guo, L. 2021. An Overview of Corrosion. *ACS Symposium Series*. 1403. 1–19.
- 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). 1-7.
- 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.
- IZA (International Zeolite Association). 2017. <https://www.iza-structure.org/databases/>. Diakses pada tanggal 20 Mei 2024 10:55.
- Jafar Mazumder, M. A. 2020. Global Impact of Corrosion: Occurrence, Cost and Mitigation. *Global Journal of Engineering Sciences*. 5(4). 1–4.
- 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.
- Kamilah, R. 2024. Variasi Waktu Untuk Optimasi Konversi Metil Ester dari Minyak Sawit (*Elaeis guineensis*) Menjadi Senyawa Nitrogen Menggunakan Autoclave dan Aplikasinya Sebagai Green Corrosion. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Kim, S. H., Kim, J. G., and Kim, Y. S. 2016. Effect of ethanolamines on corrosion inhibition of ductile cast iron in nitrite-containing solutions. *International Journal of Electrochemical Science*. 11. 5234–5247.

- Kroschwitz, J. I. 1990. *Polymers: Polymer Characterization and Analysis*. John Wiley & Sons. New York.
- Kuroki, S., Hashishin, T., Morikawa, T., Yamashita, K., & Matsuda, M. (2019). Selective synthesis of zeolites A and X from two industrial wastes: Crushed stone powder and aluminum ash. *Journal of Environmental Management*, 231. 749–756.
- Lubis, F. S. 2018. Karakteristik Senyawa Alkanolamida dari Minyak Jarak Castor dan Dietanolaminae dengan Katalis KOH. *Jurnal Konversi*. 7(2). 31–36.
- Made, N., Sanjiwani, S., Ayu, D., Paramitha, I., Chandra, A. A., Ariawan, I. M. D., Megawati, F., Wayan, N., Dewi, T., Ayu, P., Mariati, M., dan Wayan, I. (2020). Pembuatan Hair Tonic Berbahan Dasar Lidah Buaya dan Analisis Dengan Fourier Transform Infrared. *Jurnal Widyadari*. 21(1). 249-262.
- Marliana, N. K. D. D. E. 2019. Sintesis Surfaktan Dietanolamina dari Metil Ester Minyak Biji Bunga Matahari (*Helianthus annuus*. L) Melalui Reaksi Amidasi. *Jurnal Kimia Mulawarman*. 16(2). 83–89.
- Martín, N. and Cirujano, F. G. 2022. Heterogeneous catalytic direct amide bond formation. *Catalysis Communications*. 164.
- Mazumber, M.A.J. 2020, Global Impact of Corrosion: Occurrence, Cost and Mitigation. *Global Journal of Engineering Sciences*. 5(4). 1-8.
- 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's to Its Wild Relative *Eoleifera* (HBK) Corte. *Journal of PLOS ONE*. 9(5). 1-13.
- Morad, N. A. and Aziz, M. K. A. 2006. *Process Design in Degumming and Bleaching of Palm Oil*. Centre of Lipids Engeneering and Apllied Research (CLEAR) Universiti Teknologi Malaysia. Malaysia.
- Murtaza, G. and Attfield, M. P. 2011. *Ion-exchange Studies of Zeolite For Selective Removal of Transition Metal Ions From Mix Solutions*. University of Manchester. England.
- Na, K. 2021. Synthesis and Application of Zeolite Catalysts. *Catalysts*. 11(6). 685.
- Nadhief, M. A. 2023. Optimasi Waktu Konversi Metil Ester dari Minyak Kelapa (*Cocos nucifera* L.) Menjadi Senyawa Nitrogen Menggunakan Autoclave dan Aplikasinya Sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak. *Skripsi*. Universitas Lampung.

- Nandiyanto, B. A. D., Oktiani, R., and Ragadhita, R. 2019. How to Read and Interpret FTIR Spectroscopy of Organic Material. *Indonesian Journal of Science & Technology*. 1. 97–118.
- Nasution, M. N. 2020. Analisis Ekerasan Dan Struktur Mikro Baja Aisi1020 Terhadap Perlakuan Carburizing Dengan Arang Batok Kelapa. *Buletin Utama Teknik*. 15(2). 165.
- Nešić, S. 2011. Carbon Dioxide Corrosion of Mild Steel. *Uhlig's Corrosion Handbook: Third Edition*. 229–245.
- Ningtyas, D. P. 2013. Pengaruh Katalis Basa (NaOH) Pada Tahap Reaksi Transesterifikasi Terhadap Kualitas Biofuel dari Minyak Tepung Ikan Sardin. *Jurnal Teknosains*. 2(2). 103–114.
- Noviana, E. 2023. Study of Using Response Surface Methodology (RSM) For Product Optimization of Coconut Oil Transesterification Reactions Using Zeolite-A Catalyst. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Nugroho, A. 2019. *Buku Teknologi Agroindustri Kelapa Sawit*. Universitas Lambung Mangkurat. Banjarmasin.
- Nurini, U., Suka, E. G., dan Marjunus, R. 2022. Pengendalian Laju Korosi Baja AISI 1018 dalam Medium Korosif NaCl 3% Menggunakan Inhibitor Ekstrak Daun Ketapang (*Terminalia catappa* L.). *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*. 3(1). 31-38.
- Obot, I. B., Sorour, A. A., Verma, C., Al-Khalidi, T. A., and Rushaid, A. S. 2023. Key Parameters Affecting Sweet and Sour Corrosion: Impact On Corrosion Risk Assessment and Inhibition. *Engineering Failure Analysis*. 145.
- Pakpahan, M. S., Ediman, G., dan Suprihatin. 2015. Inhibisi Korosi Baja Karbon Rendah C-Mn Steel oleh Ekstrak Daun Teh (*Camelia Sinensis*) dalam Medium Korosif. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*. 3(2). 195–201.
- Palumbo, G. 2019. Corrosion Inhibition of Pipeline Carbon Steel (N80) in CO₂ Saturated Chloride (0.5 M of KCl) Solution Using Gum Arabic as a Possible Environmentally Friendly Corrosion Inhibitor for Shale Gas Industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 28(10). 6458–6470.
- Pandiangan, K. D., Nisa, K., Simanjuntak, W., Alista, D. I., Noviana, E., and Hasan, S. A. (2024). Application Of Response Surface Methodology (RSM) to Study Transesterification Of Palm Oil In The Presence Of Zeolite-A As Catalyst. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*. 4(1).

- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Pratiwi, E., and Rilyanti, M. 2019. Characteristics and Catalytic Activity of Zeolite-A Synthesized From Rice Husk Silica and Aluminium Metal By Sol-Gel Method. *Journal of Physics: Conference Series*. 1338(1). 170-178.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Hadi, S., Ilim, I., Alista, D. I., and Sinaga, D. A. 2023. Study On The Reaction Parameters On Transesterification Of Rubber Seed Oil Using MgO/zeolite-A Catalyst. *Trends in Sciences*. 20(8). 6480.
- Petrov, I. and Michalev, T. 2012. *Synthesis of Zeolite A: A Review*. НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ *Proceedings-Chemical Technologies*. 51.
- Priyotomo, S.T., M.Si., G., Sumada Sitepu, H., dan Dwiyantri, Y. 2020 Pengaruh Penambahan Konsentrasi Inhibitor Ekstrak Daun Talas Terhadap Laju Korosi Pada Baja Api 5L X-52 Dengan Media Korosif H₂SO₄ 0,5 M. *Jurnal Metalurgi Dan Material*. 5(1). 30.
- Putra, I. E. dan Kasuma, N.S. 2018. Pengaruh Inhibitor Daun Gambir Terhadap Laju Korosi Baja Karbon Rendah Dalam Larutan HCl 1%. *Jurnal Momentum*. 20(1). 25–30.
- Putra, I.E. and Tanjung, P. 2020. The Effect of Rambutan's Leaf Extract Inhibitor on Corrosion Rate on Cast Iron Block Car Sedan Nissan in HCl Solution 1%. *Jurnal Teknik Mesin*. 10(1). 41–45.
- Rafika, C. 2023. Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap Aktivitas CaO/SiO₂ dengan Komposisi Massa 1:5 Sebagai Katalis Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Raphael, W., Morais, D. S., Soares, J., Marcelino, N., Queiroz, P., Carmen, L., Paiva, D., Ribeiro, A. S., and Tonholo, J. 2023. Green Corrosion Inhibitors Based on Plant Extracts for Metals and Alloys in Corrosive Environment : A Technological and Scientific Prospection. *Applied Sciences (Switzerland)*. 13(4782). 1-16.
- 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.
- Şen, S., Bardakçı, B., Yavuz, A. G., and Gök, A. U. 2008. Polyfuran/zeolite LTA composites and adsorption properties. *European Polymer Journal*. 44(8), 2708–2717.
- Setiawan, S. dan Nasrulloh, Y. 2020. Sintesis Green Inhibitor Ekstrak Daun Trembesi (Samanea saman (Jacq.) Merr) Sebagai Pereduksi Laju Korosi Logam Baja Karbon. *Khazanah: Jurnal Mahasiswa*. 12(1). 83–87.

- Shen, W. and Shen, B. 2011. Synthesis and Characterization of Composite Structure Zeolite Y. 233. 1790–1793.
- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Sembiring, Z., and Simanjuntak, A. 2019. Liquid Fuel Production by Zeolite-A Catalyzed Pyrolysis of Mixed Cassava Solid Waste and Rubber Seed Oil. *ORIENTAL JOURNAL OF CHEMISTRY*. 35(1). 71–76.
- Sofian, M., Akmal R, M., Naura, D., Ayu, V., Hidayat, W., Fauzan, M., Yhuto, A., dan Putra, W. 2022. Perlindungan Korosi Di Perkapalan. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*. 22(2). 50.
- Srilai, S., Tanwongwal, W., Onpecth, K., Wongkitikun, T., Panpiemrasda, K., Panomsuwan, G., and Eiad-Ua, A. 2020. Synthesis of Zeolite X from Bentonite via Hydrothermal Method. *Nano Engineering and Materials Technologies IV*. 990. 144–148.
- Stiadi, Y., Arief, S., Aziz, H., Efdi, M., dan Emriadi, E. 2019. Inhibisi Korosi Baja Ringan Menggunakan Bahan Alami dalam Medium Asam Klorida: Review. *Jurnal Riset Kimia*. 10(1). 51–65.
- Suleman, N., Abas, dan Paputungan, M. 2019. Esterifikasi dan Transesterifikasi Stearin Sawit untuk Pembuatan Biodiesel. *Jurnal Teknik*. 17(1). 66–77.
- Surani, E. A. 2022. Upgrading Bio-Crude Oil Hasil Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biogasoline Menggunakan Zeolit-A Terprotonasi (H-A) Sebagai Katalis. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Suryaningsih, S., Alamsyah, W., Nurhilal, O., dan Permana, D. A. 2015. Analisis Pengaruh Waktu Injeksi Gas CO₂ Terhadap Laju Korosi Baja Karbon Api 5l Grade B Dalam Larutan NaCl 3,5% dan H₂S. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*. 5(1). 12–16.
- Wajilan, Fernandes, A., dan Wahyudianto, A. 2021. Pembuatan Ekstrak *Rhizophora mucronata* Sebagai Bahan Baku Inhibitor Korosi Skala Lab dan Skala Aplikasi. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, Dan Material*. 5(1). 11.
- Wang, C.-F., Li, J.-S., Wang, L.-J., and Sun, X.-Y. 2008. Influence of NaOH Concentrations On Synthesis of Pure-Form Zeolite A From Fly Ash Using Two-Stage Method. *Journal of Hazardous Materials*. 155(1). 58–64.
- Wulandari, P. dan Widiono, B. 2023. Penentuan Laju Korosi dan Remaining Life Pada Pipa Jembatan Gas Jrebeng 1, Jrebeng 2, Nginden dan Kali Surabaya dari Pt Perusahaan Gas Negara Tbk. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*. 7(2). 74–81.

- Wuntu, A. D. 2008. Derajat Kristalisasi Sebagai Fungsi Waktu Ageing dan Waktu Kristalisasi Pada Sintesis Zeolit A Dengan Radiasi Gelombang Mikro. *Chem. Prog.* 1(1). 19–24.
- Yudistira, M. A., Mora, L., and Friskila, D. 2020. Effect of Addition of Pyridine-Based Corrosion Inhibitors on Corrosion Behaviors of Carbon Steel in a CO₂-Containing Environment. *Test Engineering & Management*. 83. 23315–23326.
- 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.

