

**KONVERSI MINYAK KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis* J.) MENJADI  
SENYAWA NITROGEN DAN UJI AKTIVITASNYA SEBAGAI *GREEN*  
INHIBITOR KOROSI BAJA LUNAK**

(Tesis)

Oleh

**Laila Hidayah  
NPM 2127011001**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

### **KONVERSI MINYAK KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis* J.) MENJADI SENYAWA NITROGEN DAN UJI AKTIVITASNYA SEBAGAI *GREEN* INHIBITOR KOROSI BAJA LUNAK**

Oleh

**Laila Hidayah**

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari sintesis senyawa nitrogen dari minyak sawit dan penerapan produk tersebut sebagai inhibitor korosi pada baja ringan dalam larutan air garam jenuh CO<sub>2</sub>. Sintesis senyawa nitrogen dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah konversi minyak sawit menjadi metil ester melalui transesterifikasi minyak sawit dengan metanol menggunakan zeolit-A dari hasil sintesa silika sekam padi dan aluminium foil sebagai katalis. Metil ester yang diperoleh kemudian direaksikan dengan dietanolamina menggunakan zeolit-A dan natrium metoksida (NaOCH<sub>3</sub>) yang baru dibuat dari NaOH (Pa) dan metanol (Pa) sebagai katalis. Kedua katalis tersebut dikarakterisasi menggunakan beberapa teknik, dimana zeolit-A dikarakterisasi menggunakan XRD dan SEM, sedangkan NaOCH<sub>3</sub> dikarakterisasi menggunakan FTIR, XRD, dan SEM. Senyawa metil ester dan senyawa nitrogen dianalisis menggunakan FTIR dan GC-MS. Aktivitas senyawa nitrogen sebagai inhibitor korosi dievaluasi menggunakan metode *Wheel test* dan SEM untuk memvisualisasikan permukaan sampel logam yang diberi senyawa nitrogen yang dihasilkan, dibandingkan dengan sampel asli dan sampel yang diberi perlakuan tanpa inhibitor. Hasil percobaan menunjukkan bahwa asam lemak dalam minyak sawit berhasil diubah seluruhnya menjadi metil ester yang sesuai. Analisis GC-MS menunjukkan terbentuknya senyawa nitrogen dengan persentase relatif tertinggi sebesar 63,7% dihasilkan dari reaksi menggunakan katalis NaOCH<sub>3</sub>. Percobaan korosi menunjukkan bahwa penggunaan senyawa nitrogen 150 ppm sebagai inhibitor mampu memberikan efisiensi penghambatan sebesar 96,85%. Aktivitas yang menjanjikan ini sesuai dengan hasil SEM yang menunjukkan permukaan sampel terlindungi dengan baik.

Kata kunci: Senyawa nitrogen, minyak kelapa sawit, inhibitor korosi, baja lunak, larutan garam.

## **ABSTRACT**

### **CONVERSION OF PALM OIL (*Elaeis guineensis* J.) INTO NITROGEN COMPOUNDS AND TEST ITS ACTIVITY AS A GREEN CORROSION INHIBITOR OF MILD STEEL**

**By**

**Laila Hidayah**

This research was conducted to study synthesis of nitrogen compounds from palm oil and application of the product as corrosion inhibitor for mild steel in CO<sub>2</sub> saturated brine solution. The synthesis of nitrogen compounds was conducted in two stages. The first stage was conversion of palm oil into methyl esters by transesterification of the oil with methanol using zeolite-A synthesized from rice husk silica and aluminum foil as catalyst. The methyl esters obtained were then reacted with diethanolamine using zeolite-A and sodium methoxide (NaOCH<sub>3</sub>) freshly prepared from reagent grade NaOH and methanol as catalysts. Both catalysts were characterized using several techniques, in which zeolite-A was characterized using XRD and SEM, while NaOCH<sub>3</sub> was characterized using FTIR, XRD, and SEM. The methyl esters and nitrogen compounds were analysed using FTIR and GC-MS. The activity of the nitrogen compounds as corrosion inhibitor was evaluated using wheel test method and SEM to visualize the surface of the metal sample treated with nitrogen compounds produced, compared to those of the original and treated sample without inhibitor. The experimental results revealed that fatty acids in palm oil were completely converted into their corresponding methyl esters. The GC-MS analysis confirmed the formation of nitrogen compounds with the highest relative percentage of 63.7% was produced from the reaction using NaOCH<sub>3</sub> as catalyst. The corrosion inhibition experiments revealed that the use of 150 ppm of nitrogen compounds as inhibitor was able to provide inhibition efficiency as high as 96.85%. This promising activity is in agreement with the SEM result which indicated the the surface of sample was well protected.

Key words: Nitrogen compounds, palm oil, corrosion inhibitor, mild steel, brine solution.

**KONVERSI MINYAK KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis* J.) MENJADI  
SENYAWA NITROGEN DAN UJI AKTIVITASNYA SEBAGAI *GREEN*  
INHIBITOR KOROSI BAJA LUNAK**

**Oleh**

**Laila Hidayah**

**Tesis**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
MAGISTER SAINS**

**Pada**

**Program Pascasarjana Magister Kimia  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

Judul Tesis : **KONVERSI MINYAK KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis* J.) MENJADI SENYAWA NITROGEN DAN UJI AKTIVITASNYA SEBAGAI GREEN INHIBITOR KOROSI BAJA LUNAK**

Nama Mahasiswa : **Laila Hidayah**

No. Pokok Mahasiswa : 2127011001

Program Studi : Magister Kimia

Jurusan : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**Dr. Ilim, M.S.**  
NIP. 196505251990032002

**Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.**  
NIP. 195907061988111001

2. Ketua Program Studi Magister Kimia

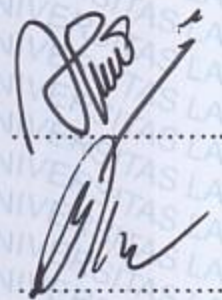
**Dr. Nurhasanah, M.Si.**  
NIP. 197412111998022001



**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

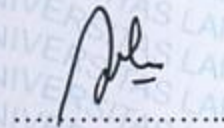
Ketua : **Dr. Ilim, M.S.**



Sekretaris : **Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.**

Penguji Bukan Pembimbing

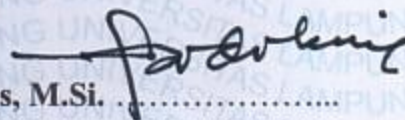
Anggota : **Dr. Yuli Ambarwati, M.Si.**



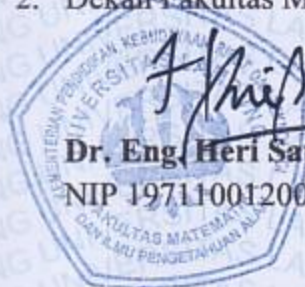
Anggota : **Dr. Eng. Suripto Dwi Yuwono, M.T.**



Anggota : **Prof. Dr. Hardoko Insan Qudus, M.Si.**

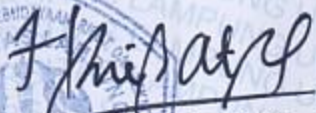


2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP 197110012005011002



3. Direktur Program Pascasarjana



**Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.**

NIP 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis: 07 Agustus 2023

**SURAT PERNYATAAN  
KEASLIAN TESIS**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Laila Hidayah  
Nomor Pokok Mahasiswa : 2127011001  
Jurusan : Kimia  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa tesis yang berjudul “Konversi Minyak Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* J.) Menjadi Senyawa Nitrogen dan Uji Aktivitasnya Sebagai *Green Inhibitor* Korosi Baja Lunak” adalah benar karya saya sendiri, dan tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data dalam tesis tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan.

Bandar Lampung, 29 September 2023

Menyatakan



Laila Hidayah  
NPM 2127011001

## RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama lengkap Laila Hidayah, dilahirkan di Lubuk Gobing, Sumatera Barat pada tanggal 14 Desember 1997. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan ayah Nurdin dan Umak Erlisna.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SDN 5 Ranah Batahan pada tahun 2010, Sekolah Menengah Pertama di MTS Islamiah Batahan pada tahun 2013, dan Sekolah Menengah Atas di SMA N 1 Ranah Batahan pada tahun 2016.

Pada tahun 2016 penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung dan mendapatkan gelar Sarjana Sains pada tahun 2021. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif mengikuti organisasi UKM-P, mengikuti Lomba, serta sebagai Juri, dan sebagai Pemateri dalam berbagai kegiatan Karya Tulis Ilmiah tingkat regional dan Nasional. Penulis melanjutkan pendidikan di Program Studi Magister Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung pada bidang ilmu Kimia Fisik. Penulis memiliki artikel yang berjudul “Conversion of Palm Oil (*Elaeis giuneensis* J.) into Nitrogen Compounds using Zeolite-A as Catalyst” yang dipresentasikan pada “*The 4<sup>th</sup> International Conference on Applied Sciences, Mathematics, and Informatics (ICASMI)* tanggal 8-9 September 2022 di Bandar Lampung, dan telah diterima untuk dipublikasi di *International Proceeding*, IOP terindeks Scopus.



*Dipersembahkan kepada*

*Kedua orang tuaku tercinta,  
Ayah Nurdin dan Umak Erlisna (Almh)*

*Bapak Exsa Hadibrata dan Ibu Ninoy Friza Amalia, Riskon Hasan,  
Nurhasanah, Anil Hawa, Nabil Hadi, dan Adib Nabhan*

*Pembimbing penelitianku  
Ibu Dr. Ilim, M.S. dan Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.*

*Orang terkasih, sahabat, kerabat, dan teman.*

*Almamater tercinta*

**Ibda' Binafsik "Mulai dari Diri Sendiri"**

**Sekecil apapun teruslah menebarkan kebaikan dan menjadi orang yang bermanfaat.**

... لَا يُكَلِّفُ اللَّهُ نَفْسًا إِلَّا وُسْعَهَا

*Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kemampuannya  
(Q.S. Al-Baqarah :286)*

*Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan,  
Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan  
(Q.S. Al-Insyirah :5-6)*

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis ucapkan atas berkat rahmat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan karunia, rezeki, taufik, dan hidayah-Nya sehingga Tesis ini dapat diselesaikan.

Tesis dengan judul “Konversi Minyak Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* J.) Menjadi Senyawa Nitrogen dan Uji Aktivitasnya sebagai *Green Inhibitor* Korosi Baja Lunak” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Jurusan Kimia FMIPA di Universitas Lampung.

Pada kesempatan kali ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ilim, M.S. selaku pembimbing I dan pembimbing akademik. Terima kasih atas kesediaannya dengan kesabaran dan kasih dalam membimbing, memberikan saran, arahan, motivasi, serta nasehat selama penelitian berlangsung dan hingga penulisan tesis ini selesai.
2. Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. selaku pembimbing II. Terima kasih kesediaannya telah membimbing dengan sabar dan kasih, memberikan kritik, saran, motivasi, serta nasehat dalam menyelesaikan tesis ini.
3. Ibu Dr. Yuli Ambarwati, M.Si. selaku pembahas. Terima kasih untuk masukan dan saran, serta kritik yang sangat membangun dalam penulisan Tesis ini.
4. Bapak Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T. selaku pembahas. Terima kasih untuk masukan dan saran, serta kritik yang sangat membangun dalam penulisan Tesis ini.
5. Bapak Prof. Dr. Hardoko Insan Qudus, M.Si. selaku pembahas. Terima kasih untuk masukan dan saran, serta kritik yang sangat membangun dalam penulisan Tesis ini.

6. Ibu Dr. Nurhasanah, M.Si., selaku Ketua Program Studi Pascasarjana Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung yang telah memberikan bantuan, kesempatan, dan ilmu pengetahuan kepada penulis.
7. Bapak dan Ibu Dosen Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah mendidik serta memberikan ilmu pengetahuan yang sangat bermanfaat kepada penulis selama kuliah, dan semoga ilmu yang diberikan dapat berguna dan berkah.
8. Seluruh laboran, staf, dan karyawan khususnya Jurusan Kimia, dan FMIPA Universitas Lampung pada umumnya atas bantuannya selama ini.
9. Bapak dr. Exsa Hadibrata, Sp.U. dan Ibu dr. Ninoy Friza Amalia. Terima kasih bapak dan ibu telah banyak memberikan bantuan sehingga penulis dapat melanjutkan studi ke jenjang magister. Semoga menjadi amal jariyah untuk Bapak dan Ibu.
10. Teman-teman seperjuangan angkatan 2021 Program Studi Magister Kimia Universitas Lampung. Terima kasih atas bantuan, semangat, serta kebersamaan selama ini. Semoga apapun yang sedang kita perjuangkan Allah berikan kemudahan dan kelancaran untuk meraihnya.
11. Adik-adik seperjuangan *Corrosion Research* terkasih, Nabila, Zira, Alya, Sahrul, Rifdah, Devi, Arya, Dito, Rekia, Uli, Risvania, dan Wika. Terima kasih untuk kerjasama, bantuan, dukungan, dan kebersamaan selama penelitian.
12. Seluruh keluarga besar Jurusan Kimia dan almamater tercinta Universitas Lampung.
13. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu atas segala bantuannya, dan semoga Allah SWT membalas segala kebaikan yang telah dilakukan.

Ucapan syukur, terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya secara khusus penulis tujukan kepada Umak Erlisna (almh) dan Ayah Nurdin, serta keluarga besar yang senantiasa memberikan doa, dukungan, semangat, kasih dan sayang kepada penulis untuk bisa sampai seperti sekarang ini.



Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penulisan tesis ini masih terdapat kekurangan, namun penulis berharap semoga tesis ini dapat menjadi bahan informasi dan bermanfaat bagi rekan-rekan khususnya mahasiswa kimia, dan pembaca pada umumnya.

Bandar Lampung, 29 September 2023

Laila Hidayah

## DAFTAR ISI

Halaman

|  |     |
|--|-----|
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....   | xvi |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....  | xix |
| <b>I. PENDAHULUAN</b> .....  | 1   |
| 1.1. Latar Belakang.....   | 1   |
| 1.2. Tujuan Penelitian.....  | 4   |
| 1.3. Manfaat Penelitian.....   | 4   |
| <b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....  | 5   |
| 2.1. Baja.....   | 5   |
| 2.2. Korosi.....   | 6   |
| 2.3. Korosi CO <sub>2</sub> .....  | 8   |
| 2.4. Penanganan Korosi.....  | 10  |
| 2.5. Inhibitor Korosi.....   | 11  |
| 2.5.1. Inhibitor anorganik.....  | 12  |
| 2.5.2. Inhibitor organik.....  | 13  |
| 2.6. Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit.....                                      | 14  |
| 2.7. Silika sekam padi.....  | 16  |
| 2.8. Zeolit-A.....   | 18  |
| 2.9. Sintesis Senyawa Nitrogen.....  | 19  |
| 2.10. Uji Aktivitas Inhibitor Korosi.....  | 21  |
| 2.10.1. Metode kehilangan berat ( <i>Wheel Test</i> ).....                           | 22  |
| 2.10.2. Metode elektrokimia.....   | 23  |
| 2.11. Karakterisasi Produk.....  | 27  |
| 2.11.1. <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....   | 27  |
| 2.11.2. <i>Fourier Transform-Infrared (FTIR)</i> .....                               | 29  |
| 2.11.3. <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)</i> .....                    | 32  |
| 2.11.4. <i>Scanning Elektron Microscope- Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)</i> ..... | 35  |
| <b>III. METODE PENELITIAN</b> .....  | 38  |
| 3.1. Waktu dan Tempat.....   | 38  |
| 3.2. Alat dan Bahan.....   | 38  |
| 3.3. Prosedur Kerja.....   | 39  |
| 3.3.1. Sintesis dan karakterisasi katalis.....                                       | 39  |
| 3.3.2. Transesterifikasi minyak kelapa sawit.....                                    | 41  |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3.3. Sintesis dan karakterisasi senyawa nitrogen .....                             | 42        |
| 3.3.4. Uji aktivitas sebagai inhibitor korosi .....                                  | 43        |
| 3.3.5. Metode <i>wheel test</i> .....  | 43        |
| 3.3.6. Analisis permukaan baja dengan SEM .....                                      | 44        |
| <b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>   | <b>45</b> |
| 4.1. Preparasi Silika Sekam Padi .....   | 45        |
| 4.2. Sintesis dan Karakterisasi Zeolit-A.....  | 46        |
| 4.3. Sintesis dan Karakterisasi Katalis Natrium Metoksida (NaOCH <sub>3</sub> )..... | 49        |
| 4.4. Reaksi Transesterifikasi dan Karakterisasi Produk.....                          | 53        |
| 4.5. Sintesis Senyawa Nitrogen dan Karakterisasi Produk .....                        | 56        |
| 4.6. Uji Aktivitas Inhibitor Korosi .....  | 69        |
| 4.7. Analisis Permukaan Baja Lunak dengan SEM .....                                  | 71        |
| <b>V. SIMPULAN DAN SARAN.....</b>  | <b>73</b> |
| 5.1. Simpulan .....  | 73        |
| 5.2. Saran .....   | 74        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>   | <b>75</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>   | <b>87</b> |
| Lampiran 1. Perhitungan komposisi zeolit-A dan rasio Si/Al .....                     | 88        |
| Lampiran 2. Perhitungan persen kristalinitas zeolit-A hasil sintesis .....           | 90        |
| Lampiran 3. Perhitungan persen konversi.....   | 92        |
| Lampiran 4. Perhitungan pembuatan larutan .....                                      | 93        |
| Lampiran 5. Perhitungan metode <i>wheel test</i> .....                               | 94        |

## DAFTAR GAMBAR

| Gambar  | Halaman |
|---|---------|
| 1. Ilustrasi serangan CO <sub>2</sub> pada permukaan baja tanpa inhibitor .....   | 9       |
| 2. Ilustrasi serangan CO <sub>2</sub> pada permukaan baja dengan adanya inhibitor .....   | 9       |
| 3. Spektrum FTIR silika sekam padi (Simanjuntak <i>et al.</i> , 2016).....  | 17      |
| 4. Difraktogram silika sekam padi (Simanjuntak <i>et al.</i> , 2016). .....   | 18      |
| 5. Reaksi Transesterifikasi .....   | 15      |
| 6. Reaksi amidasi dari: (a) asam lemak dan (b) metil ester .....  | 20      |
| 7. Skema rangkaian alat pada metode elektrokimia: (1) termometer, (2) <i>chamber glass</i> , (3) elektroda kerja (baja), (4) elektroda pembanding (Ag/AgCl), (5) <i>magnetic stirrer</i> , (6) elektroda bantu (Pt), (7) <i>water bath</i> , (8) <i>sparging</i> CO <sub>2</sub> , (9) <i>hot plate</i> ..... | 23      |
| 8. Kurva Plot Nyquist.....  | 24      |
| 9. Kurva polarisasi Tafel .....   | 26      |
| 10. Difraksi sinar-X pada jarak antar atom $d$ dan sinar datang $\theta$ .....  | 27      |
| 11. Difraktogram standar zeolit-A (Structure Commission of the International Zeolite Association (IZA-SC, 2017).....  | 28      |
| 12. Difraktogram natrium metoksida (Chandran <i>et al.</i> , 2006).....   | 28      |
| 13. Spektrum IR natrium metoksida (Chandran <i>et al.</i> , 2006).....  | 30      |
| 14. Spektrum FTIR (a) produk amidasi, dan (b) produk transesterifikasi .....  | 31      |
| 15. Kromatogram dari sampel metil ester minyak kelapa sawit .....   | 33      |
| 16. Kromatogram produk amidasi dari metil ester minyak sawit dan dietanolamina (Hidayah <i>et al.</i> , 2023).....  | 34      |



|  |    |
|--|----|
| 17. Diagram skematik dari <i>scanning electron microscope</i> (SEM) .....  | 35 |
| 18. Mikrograf sampel Zeolit-A dengan perbesaran (a) 10.000 kali, dan (b) 20.000 kali (Herliana, 2022). .....   | 36 |
| 19. Mikrograf permukaan baja lunak, (a) tanpa perlakuan, (b) setelah perlakuan terjadi korosi, dan (c) setelah ditambahkan inhibitor korosi senyawa nitrogen pada perbesaran 1000x (Khoeroni, 2021). .....                 | 37 |
| 20. Tahapan preparasi silika sekam padi a) sekam padi bebas pengotor, b) ekstraksi silika dari sekam padi, c) sol silika hasil ekstraksi, d) gel silika sebelum dicuci, e) gel silika setelah dicuci, f) bubuk silika..... | 46 |
| 21. Zeolit-A hasil sintesis dari silika sekam padi dan alumunium foil .....  | 47 |
| 22. Difraktogram a) zeolit-A hasil sintesis, dibandingkan dengan b) standar IZA.....   | 47 |
| 23. Mikrograf zeolit-A hasil sintesis degan perbesaran a) 10.000 kali, dan b) 20.000 kali.....   | 49 |
| 24. Natrium metoksida hasil sintesis dari natrium hidroksida dan metanol .....   | 50 |
| 25. Spektra FTIR natrium metoksida .....   | 50 |
| 26. Difraktogram natrium metoksida. ....   | 51 |
| 27. Mikrograf natrium metoksida hasil sintesis degan perbesaran a) 5.000 kali, dan b) 15.000 kali. ....  | 52 |
| 28. Produk transesterifikasi minyak kelapa sawit. ....   | 53 |
| 29. Spektra FTIR produk transesterifikasi minyak kelapa sawit. ....  | 54 |
| 30. Kromatogram produk transesterifikasi minyak kelapa sawit.....  | 55 |
| 31. Produk amidasi metode refluks dengan a) penambahan katalis natrium metoksida, dan b) penambahan katalis zeolit-A. ....   | 57 |
| 32. Spektra FTIR produk amidasi metode refluks dengan a) penambahan katalis natrium metoksida, dan b) penambahan katalis zeolit-A.....   | 58 |
| 33. Produk amidasi fase atas metode hidrotermal dengan a) penambahan katalis natrium metoksida, dan b) penambahan katalis zeolit-A.....  | 59 |
| 34. Produk amidasi fase bawah metode hidrotermal dengan a) penambahan katalis natrium metoksida, dan b) penambahan katalis zeolit-A. ....  | 60 |

|  |    |
|--|----|
| 35. Spektra FTIR produk amidasi metode hidrotermal fase atas dengan a) penambahan katalis natrium metoksida, dan b) penambahan katalis zeolit-A.....             | 61 |
| 36. Spektra FTIR produk amidasi metode hidrotermal fase bawah dengan a) penambahan katalis natrium metoksida, dan b) penambahan katalis zeolit-A.....            | 62 |
| 37. Kromatogram produk amidasi metode refluks dengan penambahan katalis natrium metoksida (FR1) .....  | 63 |
| 38. Kromatogram produk amidasi metode refluks dengan penambahan katalis zeolit-A (FR2).....  | 64 |
| 39. Kromatogram produk amidasi fase atas, metode hidrotermal dengan penambahan katalis natrium metoksida (FA1). .....  | 65 |
| 40. Kromatogram produk amidasi fase atas, metode hidrotermal dengan penambahan katalis zeolit-A (FA2). .....   | 67 |
| 41. Kromatogram produk amidasi fase bawah metode hidrotermal dengan penambahan katalis natrium metoksida (FB1).....  | 68 |
| 42. Kromatogram produk amidasi fase bawah metode hidrotermal dengan penambahan katalis zeolit-A (FB2). .....   | 69 |
| 43. Mikrograf permukaan baja lunak pada perbesaran 20.000x, a) tanpa perlakuan, b) blanko, c) blanko+FR1, d) blanko+ FR2, e) blanko+FA1, dan f) blanko+FA2. .... | 72 |
| 44. Puncak-puncak fraksi kristal zeolit-A sintesis .....   | 90 |
| 45. Fraksi luas kristal zeolit-A sintesis. ....  | 90 |
| 46. Fraksi luas kristal zeolit-A dan amorf.....  | 91 |

## DAFTAR TABEL

| Tabel   | Halaman |
|---|---------|
| 1. Komposisi asam lemak pada minyak sawit. ....   | 16      |
| 2. Puncak bilangan gelombang FTIR produk transesterifikasi (metil ester) menggunakan katalis zeolit-A .....       | 31      |
| 3. Puncak bilangan gelombang FTIR produk amidasi (senyawa nitrogen) menggunakan katalis zeolit-A.....             | 32      |
| 4. Komponen metil ester hasil transesterifikasi minyak kelapa sawit. ....   | 33      |
| 5. Komposisi produk amidasi dari metil ester minyak sawit dan dietanolamina. ....                                 | 34      |
| 6. Data XRD zeolit-A hasil sintesis dengan zeolit-A standar IZA. ....   | 48      |
| 7. Komposisi metil ester produk transesterifikasi minyak kelapa sawit. ....                                       | 55      |
| 8. Komposisi produk amidasi metode refluks dengan penambahan katalis natrium metoksida (FR1) .....                | 63      |
| 9. Komposisi produk amidasi metode refluks dengan penambahan katalis zeolit-A (FR2).....                          | 65      |
| 10. Komposisi produk amidasi fase atas metode hidrotermal dengan penambahan katalis natrium metoksida (FA1) ..... | 66      |
| 11. Komposisi produk amidasi fase atas metode hidrotermal dengan penambahan katalis zeolit-A (FA2) .....          | 67      |
| 12. Komposisi produk amidasi fase bawah metode hidrotermal dengan penambahan katalis natrium metoksida (FB1)..... | 68      |
| 13. Komposisi produk amidasi fase bawah metode hidrotermal dengan penambahan katalis zeolit-A (FB2) .....         | 69      |
| 14. Data hasil pengukuran uji korosi dengan metode wheel test. ....   | 70      |
| 15. Data pengukuran dimensi baja lunak dan perhitungan kehilangan berat.....                                      | 94      |

## **BAB I. PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Baja lunak banyak digunakan dalam infrastruktur untuk industri gas dan minyak bumi karena hemat biaya bila dibandingkan dengan paduan logam lainnya, namun memiliki kekurangan dalam hal ketahanan terhadap korosi. Korosi dapat terjadi ketika baja lunak bereaksi dengan lingkungan korosif yang mengandung gas CO<sub>2</sub>, salah satu produk reaksi yang ditemui yaitu besi karbonat (FeCO<sub>3</sub>) yang dapat mempengaruhi kinetika proses korosi dengan membentuk penghalang fisik berpori (Nordsveen *et al.*, 2003). Perlindungan lapisan berpori tergantung pada beberapa kondisi lingkungan, seperti konsentrasi besi, pH, suhu, tekanan parsial CO<sub>2</sub>, gaya mekanik yang ada dalam aliran dan struktur mikro dari baja lunak (Videm *and* Dungstad, 1989., Johnson *et al.*, 1991).

Kontak langsung antara pipa dengan gas cepat atau lambat akan menyebabkan korosi pada pipa. Permasalahan korosi dapat mengakibatkan bertambahnya potensi pencemaran oleh gas terhadap lingkungan akibat kegiatan eksplorasi dan eksploitasi berlangsung. Berdasarkan pengamatan visual jenis korosi yang terjadi dari pengujian *weight loss* dan polarisasi potensiodinamik siklik adalah korosi sumuran (Sugeng *et al.*, 2022). Secara umum, kerugian akibat korosi diperkirakan sekitar 2,5 triliun USD, berjumlah sekitar 3-4 persen dari produk dunia bruto (GWP) setiap tahun (Moradi, 2019., Koch, 2017), salah satunya kerugian ekonomi tahunan di China yang disebabkan oleh korosi mencapai sekitar 2,3 triliun yuan, terhitung 3,3% dari total produk nasional bruto. Pada tahun 2014, warna negara China harus membayar 1,555 yuan sebagai biaya korosi (Hou *et al.*, 2017). Korosi selalu menjadi masalah utama dalam industri gas dan minyak



bumi, sehingga para peneliti telah banyak mencoba mengatasi masalah ini. Salah satunya mengatasi korosi baja lunak dalam medium yang mengandung gas CO<sub>2</sub> (Talkhan *et al.*, 2019., Zhang *et al.*, 2021., Shang and Zhu, 2021).

Korosi pada bagian permukaan luar pipa dapat diatasi dengan pelapisan, sedangkan permukaan bagian dalam dapat dikontrol dengan penambahan inhibitor korosi. Inhibitor korosi yang terus berkembang hingga saat ini adalah inhibitor organik daripada inhibitor anorganik, karena inhibitor organik lebih ramah lingkungan (*green inhibitor*), aman, praktis, biaya relatif rendah, dan terbarukan (Rahayu *et al.*, 2018). Inhibitor organik yang umum digunakan adalah senyawa yang mengandung nitrogen (N), oksigen (O), sulfur (S), dan fosfor (P) dalam sistem terkonjugasi. Senyawa ini dapat terserap pada permukaan logam dengan menghalangi lokasi aktif membentuk lapisan film tipis, dan menghalangi permukaan baja berkontak langsung dengan lingkungan, sehingga meminimalisir laju korosi (Zaafarany and Abdallah, 2010; Keles *et al.*, 2015).

Senyawa nitrogen berpotensi dimanfaatkan sebagai inhibitor korosi karena terdapat pasangan elektron bebas pada atom nitrogen yang dapat terikat pada permukaan logam dan rantai hidrokarbon membentuk lapisan film hidrofobik pada permukaan. Senyawa nitrogen dapat diperoleh dengan berbagai cara antara lain, mereaksikan metil ester asam lemak dan dietanolamin dengan penambahan katalis atau reaksi langsung antara asam lemak bebas dan dietanolamin tanpa adanya katalis (Bernardini, 1983).

Sintesis senyawa nitrogen dari ester asam lemak dan dietanolamin dengan penambahan katalis dianggap paling mudah karena tidak membutuhkan suhu dan tekanan yang terlalu tinggi (Herlambang, 2018). 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%. Sedangkan Ilim *et al* (2022) menggunakan autoklaf pada suhu 100 °C dalam waktu 48 jam dengan persen konversi 58,01%. Pada penelitian ini, reaksi transesterifikasi menggunakan katalis zeolit-A yang disintesis dari silika sekam padi dan aluminium foil, seperti

yang dilaporkan oleh Herliana *et al.* (2021) karena memiliki katalitik yang baik. Hal ini juga dikonfirmasi oleh Hidayah *et al.* (2023) bahwa zeolit-A yang digunakan mampu mengkonversi minyak kelapa sawit menjadi metil ester sebesar 100%.

Zeolit-A juga dapat digunakan dalam reaksi amidasi untuk mengkonversi metil ester menjadi senyawa nitrogen (alkanolamida) seperti yang dilaporkan oleh Ilim *et al.* (2022) bahwa zeolit-A mampu mengkonversi metil ester menjadi senyawa nitrogen sebesar 58,01%. Berdasarkan hasil konversi yang diperoleh peneliti sebelumnya, maka reaksi amidasi perlu dioptimalkan, selain menggunakan katalis zeolit-A, dalam penelitian ini akan menggunakan katalis natrium metoksida dalam reaksi metil ester dan dietanolamin untuk mendapatkan senyawa nitrogen, sebagaimana yang dilaporkan oleh Wongwanichkangwarn *et al.* (2021) dalam reaksi metil ester dan dietanolamin menggunakan katalis natrium metoksida pada suhu 70-80°C selama 8 jam dalam reaktor *batch* tertutup menghasilkan senyawa amida 95,81%, dimana amida adalah senyawa turunan nitrogen, sehingga natrium metoksida memiliki potensi yang baik sebagai katalis dalam reaksi amidasi.

Salah satu sumber bahan baku ester asam lemak adalah minyak kelapa sawit yang jumlahnya berlimpah (Jimmy, 2012). Minyak kelapa sawit mempunyai komposisi asam lemak jenuh (46,6%) dan tak jenuh (53,4%). Komposisi asam lemak minyak kelapa sawit terdiri dari asam lemak utama yaitu asam palmitat (rata-rata 40,5%), asam oleat (rata-rata 43,5%), asam linoleat (rata-rata 9,3%), dan asam stearat (5,2%) (Montoya *et al.*, 2014).

Pada penelitian ini minyak kelapa sawit digunakan sebagai bahan baku untuk mendapatkan *green inhibitor* korosi dengan tahapan sebagai berikut; (1) mengkonversi minyak kelapa sawit menjadi metil ester melalui reaksi transesterifikasi menggunakan katalis zeolit-A, (2) mensintesis senyawa nitrogen (alkanolamida) dari metil ester dan dietanolamin melalui reaksi amidasi menggunakan katalis zeolit-A dan natrium metoksida, (3) menguji aktivitas senyawa nitrogen yang terbentuk sebagai *green inhibitor* korosi baja lunak dalam medium korosif yang mengandung CO<sub>2</sub>.

## 1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mensintesis dan mengkarakterisasi 2 katalis yaitu zeolit-A dan natrium metoksida menggunakan FTIR, XRD dan SEM.
2. Mengkonversi minyak kelapa sawit menjadi metil ester (reaksi transesterifikasi) menggunakan katalis zeolit-A.
3. Mensintesis senyawa nitrogen (alkanolamida) dari metil ester dan dietanolamin menggunakan katalis natrium metoksida dan zeolit-A.
4. Mengkarakterisasi produk transesterifikasi dan senyawa nitrogen yang diperoleh menggunakan FTIR, dan GC-MS.
5. Menguji aktivitas senyawa nitrogen sebagai inhibitor korosi baja lunak dengan metode *Wheel test* dalam medium korosif yang mengandung gas CO<sub>2</sub>.
6. Menganalisis morfologi permukaan baja lunak menggunakan SEM.

## 1.3. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan nilai ekonomis sekam padi sebagai bahan dasar zeolit-A, dan minyak kelapa sawit yang jumlahnya berlimpah. Senyawa nitrogen yang terbentuk dapat berfungsi sebagai inhibitor korosi yang ramah lingkungan (*green inhibitor korosi*) dan berkinerja baik, sehingga dapat berdampak pada peningkatan perekonomian, keamanan, dan keselamatan dalam industri.

## BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Baja

Baja adalah logam paduan, logam besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduannya. Kandungan unsur karbon dalam baja berkisar antara 0,2% hingga 2,1% berat sesuai grade-nya. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal atom besi. Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah titanium, krom (*chromium*), nikel, vanadium, kobalt dan tungsten (*wolfram*). Kualitas baja dapat diperoleh dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun di sisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan keuletannya (*ductility*) (De Garmo, 1969).

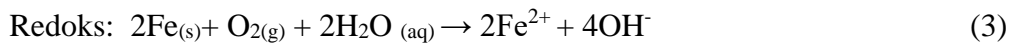
Menurut komposisi kimianya baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi tiga; Baja karbon yang pertama adalah baja karbon tinggi dengan kandungan karbon 0,60% - 1,50%, kegunaannya yaitu untuk pembuatan perkakas. Sifatnya sulit dibengkokkan, dilas dan dipotong. Baja karbon yang kedua adalah baja karbon menengah dengan kadar karbon 0,30% - 0,60%, kekuatannya lebih tinggi dari pada baja karbon rendah. Sifatnya sulit untuk dibengkokkan, dilas, dipotong, dan sering digunakan untuk material otomotif. Baja karbon yang ketiga adalah baja karbon rendah dengan kadar karbon 0,05% - 0,30% yang biasanya disebut dengan baja lunak yang sering digunakan sebagai material pada industri, sifatnya mudah ditempa dan mudah dibentuk pada proses permesinan (De Garmo, 1969).

Berdasarkan komposisi kimia pada baja, maka baja lunak sering disebut juga dengan baja karbon rendah (Setiyono, 2006) yang banyak digunakan sebagai material dalam industri minyak dan gas terutama sebagai pipa penyalur fluida minyak mentah dari pertambangan, selain memiliki keunggulan mudah ditempa, baja lunak (baja karbon rendah) juga memiliki harga yang relatif murah dibandingkan dengan baja paduan logam yang lain, namun baja lunak memiliki kelemahan yaitu sangat mudah terserang korosi.

## **2.2. Korosi**

Korosi adalah proses kerusakan logam akibat reaksi elektrokimia antara logam dengan lingkungannya. Korosi atau karat juga merupakan kerusakan suatu logam akibat reaksi kimia yang membuat logam mengalami penurunan sifat mekanik. Korosi ini terjadi ketika permukaan logam bersentuhan dengan berbagai senyawa yang ada di sekitarnya seperti oksigen atau air yang menjadi senyawa baru yang tidak diinginkan (Jones, 1996). Efek dari korosi ini dapat berupa perubahan warna logam ataupun lubang pada logam. Korosi (pengkaratan) juga dapat didefinisikan sebagai fenomena kimia bahan-bahan logam di berbagai macam kondisi lingkungan, yaitu reaksi kimia antara logam dengan zat-zat yang ada di sekitarnya atau dengan partikel-partikel lain yang ada di dalam matriks logam itu sendiri (Jones, 1996).

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 dipermukaan logam yang akan menyebabkan pengelupasan akibat pelarutan logam ke dalam larutan secara berulang-ulang (Yanuar dkk., 2016). 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, Persamaan 2, dan Persamaan 3.



Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi proses korosi antara lain:

#### 1. Suhu

Kenaikan suhu 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<sub>2</sub>)

Oksigen yang terdapat didalam 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

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

Konsentrasi bahan korosif berhubungan dengan pH suatu larutan. Larutan yang bersifat asam sangat korosif terhadap logam dimana logam yang berada didalam media larutan asam akan lebih cepat terkorosi karena merupakan reaksi anoda. Larutan yang bersifat basa dapat menyebabkan korosi pada

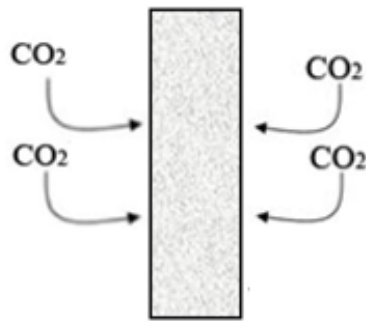
reaksi katodanya karena reaksi katoda selalu serentak dengan reaksi anoda. Gas CO<sub>2</sub> merupakan salah satu penyebab bahan korosif bersifat asam yang dapat meningkatkan laju korosi terutama pada industri gas dan minyak bumi, sehingga sering disebut dengan korosi CO<sub>2</sub> (Kahyarian *et al.*, 2016).

### 2.3. Korosi CO<sub>2</sub>

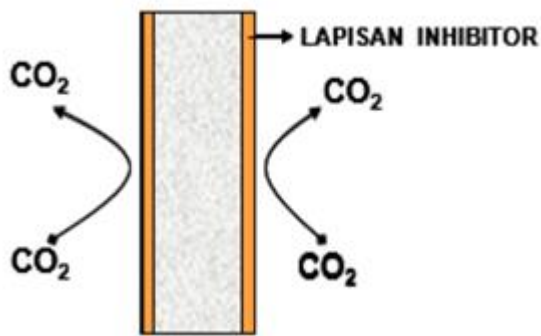
Keberadaan gas CO<sub>2</sub> di dalam air dapat mempercepat reaksi korosi logam, hal ini disebabkan karena adanya pengaruh keasaman dari gas CO<sub>2</sub> sehingga dapat membentuk ion karbonat. Ion karbonat bertindak sebagai ligan dan mengkatalisis reaksi pelarutan logam sehingga akan terjadi proses korosi. Produk korosi yang akan terbentuk adalah besi karbonat (FeCO<sub>3</sub>) yang dapat mengendap pada permukaan logam membentuk lapisan tipis. Gas CO<sub>2</sub> dalam produksi gas dan minyak bumi merupakan salah satu faktor utama penyebab korosi. Gas CO<sub>2</sub> tidak bersifat korosif jika berada dalam keadaan kering dan tidak terlarut dalam air, jika terlarut dalam air gas CO<sub>2</sub> akan membentuk suatu asam lemah H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang bersifat korosif (Koteeswaran, 2010; Kahyarian *et al.*, 2016). Mekanisme gas CO<sub>2</sub> yang terlarut dalam air akan membentuk asam karbonat dengan reaksi pada Persamaan 4 dan 5.



Keberadaan gas CO<sub>2</sub> dalam air dapat membuat permukaan logam akan lebih mudah diserang tanpa adanya pelindung pada permukaan baja sehingga meningkatkan laju korosi pada logam. Laju korosi dapat diminimalisir dengan menggunakan inhibitor sebagai pelindung yang akan melapisi permukaan logam sehingga terhindar dari serangan gas CO<sub>2</sub>. Serangan gas CO<sub>2</sub> pada permukaan baja tanpa pelindung (inhibitor) seperti yang terlihat pada Gambar 1, dan serangan gas CO<sub>2</sub> pada permukaan baja dengan adanya pelindung (inhibitor) seperti yang terlihat pada Gambar 2.

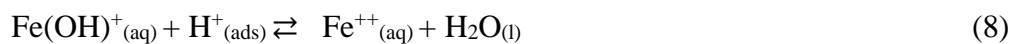


**Gambar 1.** Ilustrasi serangan CO<sub>2</sub> pada permukaan baja tanpa inhibitor



**Gambar 2.** Ilustrasi serangan CO<sub>2</sub> pada permukaan baja dengan adanya inhibitor

Permukaan baja lunak mempunyai kutub anodik dan katodik sehingga proses korosi berlangsung. Asam karboksilat mempunyai efek mengkatalis reaksi untuk mengoksidasi permukaan baja lunak di kutub anodik. Pada logam Fe reaksi di kutub anodik melibatkan ion hidroksida seperti pada reaksi berikut: (Oblonsky *et al.*, 1995; Ilim, 2017)



Gabungan reaksi-reaksi anodik dan katodik membentuk reaksi total Persamaan 11





## 2.4. Penanganan Korosi

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:

### 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. 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.

### 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 khusus 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*) (Roberge, 1999).

#### 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 (Al-Turkustani, 2013).

### 2.5. Inhibitor Korosi

Korosi dapat diminimalisir dengan berbagai cara, salah satu cara yang mudah dan murah serta ramah lingkungan, dan tepat untuk diaplikasikan pada bagian dalam pipa yaitu dengan menggunakan inhibitor. Inhibitor merupakan salah satu cara yang paling efektif untuk mencegah korosi, karena biayanya yang relatif murah dan prosesnya yang sederhana (Singh *et al.*, 2012). Inhibitor korosi adalah suatu bahan kimia yang apabila ditambahkan dalam konsentrasi yang kecil/sedikit ke dalam suatu lingkungan korosif akan sangat efektif menurunkan laju korosi. Inhibitor menghambat korosi melalui cara adsorpsi untuk membentuk suatu lapisan tipis dan melalui pengaruh lingkungan (misalnya pH) menyebabkan inhibitor dapat mengendap dan selanjutnya teradsorpsi pada permukaan logam serta melindunginya terhadap korosi (Tang, 2019).

Mekanisme kerja inhibitor dapat dibedakan sebagai berikut:

1. Inhibitor teradsorpsi pada permukaan logam, dan membentuk suatu lapisan tipis dengan ketebalan beberapa molekul inhibitor yang berikatan.
2. Melalui pengaruh lingkungan (misal pH) menyebabkan inhibitor dapat mengendap dan selanjutnya teradsorpsi pada permukaan logam serta melindunginya terhadap korosi. Endapan yang terjadi cukup banyak, sehingga lapisan yang terjadi dapat teramati.
3. Inhibitor lebih dulu mengkorosi logamnya dan menghasilkan suatu zat kimia yang kemudian melalui peristiwa adsorpsi dari produk korosi tersebut membentuk suatu lapisan pasif pada permukaan logam.

4. Inhibitor menghilangkan konstituen yang agresif dari lingkungannya (Tang, 2019).

Inhibitor bertindak sebagai surfaktan, surfaktan merupakan senyawa aktif yang dapat menurunkan tegangan permukaan (*surface active agent*) yang juga memiliki gugus hidrofilik dan hidrofobik dalam struktur molekul yang mirip. Senyawa ini dapat menurunkan tegangan antar muka antara dua fase cair yang memiliki polaritas berbeda seperti minyak/air atau air/minyak. Sifat unik tersebut membuat surfaktan berpotensi digunakan sebagai komponen adhesif, bahan koagulan, pembusuan, pengemulsi, dan penetrasi bahan serta telah banyak diaplikasikan di berbagai bidang proses industri yang menggunakan sistem multifase seperti industri makanan, farmasi, kosmetik, tekstil, polimer, cat, deterjen, dan agrokimia (Bailey, 2005). Sifat ganda ini membuat surfaktan dapat diserap pada permukaan, umumnya yang nonpolar (lipofilik) adalah rantai alkil yang panjang, sedangkan yang polar (hidrofilik) mengandung gugus hidroksil (Tang, 2019).

Saat ini, surfaktan umumnya disintesis dari turunan minyak bumi dan gas alam. Selain merupakan sumber bahan baku yang tidak dapat diperbaharui, surfaktan yang disintesis dari minyak bumi dan gas alam ini juga sulit terdegradasi oleh lingkungan. Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan kesehatan dan lingkungan yang baik, kebutuhan akan surfaktan yang mudah terdegradasi (*biodegradable*) meningkat. Oleh karena itu, diperlukan surfaktan yang berasal dari bahan baku terbarukan, dan bersifat degradatif, sehingga dapat diterima secara ekologis. Pada umumnya inhibitor korosi berasal dari senyawa senyawa anorganik dan organik yang mengandung gugus-gugus yang memiliki pasangan elektron bebas, seperti nitrit, kromat, fosfat dan senyawa-senyawa amina (Guo *et al.*, 2017; Marrugo-Hernandez *et al.*, 2019).

### **2.5.1. Inhibitor anorganik**

Inhibitor anorganik adalah inhibitor yang diperoleh dari mineral-mineral yang tidak mengandung unsur karbon dalam senyawanya. Material dasar dari inhibitor

anorganik antara lain; kromat, nitrit, silikat, dan pospat. Inhibitor anorganik bersifat sebagai inhibitor anodik karena inhibitor ini memiliki gugus aktif, yaitu anion negatif yang berguna untuk mengurangi korosi. Senyawa-senyawa ini juga sangat berguna dalam aplikasi pelapisan antikorosi, tetapi mempunyai kelemahan utama yaitu bersifat toksik dan tidak ramah lingkungan (Widharto, 1999).

### 2.5.2. Inhibitor organik

Inhibitor organik adalah inhibitor yang diperoleh dari bahan alam yang dapat diperbaharui, dan dapat membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam melalui *chemisorption* atau *physisorption*. Senyawa ekstrak bahan alam yang dijadikan sebagai inhibitor umumnya mengandung atom N, O, P, S dan atom-atom yang mengandung pasangan elektron bebas yang menyebabkan inhibitor cenderung bermuatan negatif, sehingga inhibitor akan tertarik ke permukaan logam dan membentuk lapisan (Hatch *and* Nathan, 1984; Guo *et al.*, 2017). Unsur-unsur yang mengandung pasangan elektron bebas ini nantinya dapat berfungsi sebagai ligan yang akan membentuk senyawa kompleks. Kelebihan dari inhibitor organik yaitu lebih ramah lingkungan (*green inhibitor*), aman, praktis, biaya relatif rendah, dan terbarukan (Rahayu *et al.*, 2018).

Senyawa nitrogen adalah salah satu senyawa organik yang dapat dijadikan sebagai inhibitor korosi karena mengandung unsur N yang memiliki pasangan elektron bebas, dan dapat terserap dalam permukaan logam yang membentuk film tipis yang melindungi logam dari medium korosif, sehingga dapat menghambat laju korosi. Senyawa nitrogen dapat diperoleh dengan mereaksikan metil ester asam lemak dengan alkanolamina yang sering disebut dengan reaksi amidasi. Amidasi merupakan reaksi pembentukan senyawa amida (Kumar *and* Ali, 2015). Menurut Kirk dan Othmer (1986) ketika asam lemak rantai panjang seperti asam laurat dan asam stearat digabungkan dengan alkanolamina dan dipanaskan pada suhu 140-160 °C dengan atau tanpa katalis akan menghasilkan reaksi amidasi. Sebelum melakukan reaksi amidasi dalam memperoleh senyawa nitrogen, maka perlu

dilakukan transesterifikasi untuk menghasilkan metil ester asam lemak, kemudian metil ester yang dihasilkan akan dilanjutkan dengan reaksi amidasi untuk memperoleh senyawa nitrogen.

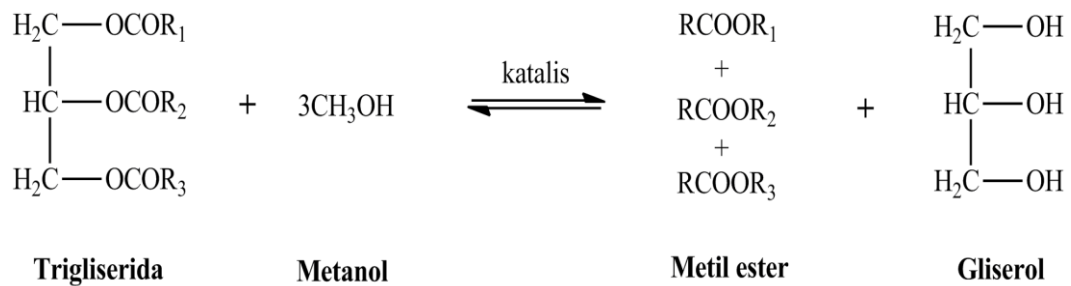
## 2.6. Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit

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 (Kumar *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2019). 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 (Saydut *et al.*, 2016).

Transesterifikasi melibatkan tiga reaksi *reversible* berturut-turut, yaitu konversi trigliserida menjadi digliserida, selanjutnya konversi digliserida menjadi monogliserida, dan terakhir konversi monogliserida menjadi ester (Calero, *et al.*, 2019). Gliserida diubah menjadi gliserol, dan menghasilkan satu ester pada setiap tahap yang mana prosesnya dapat dilihat pada Persamaan reaksi 12-14.



Reaksi transesterifikasi secara umum dapat dilihat pada Gambar 5.



**Gambar 3.** Reaksi Transesterifikasi

Alkohol yang umum digunakan dalam reaksi transesterifikasi yaitu metanol dan etanol. Metanol memiliki sifat fisik dan kimia yang menguntungkan yaitu merupakan senyawa polar dan alkohol rantai pendek. Metanol lebih dipilih karena harganya yang lebih murah dan bisa bereaksi dengan trigliserida dengan cepat. Metanol memiliki titik didih yang rendah dan karenanya harus ditangani dengan hati-hati selama produksi biodiesel karena adanya resiko terjadi ledakan (Giraldo *et al.*, 2013).

Peneliti sebelumnya Herliana *et al.*, (2021) telah melakukan reaksi transesterifikasi minyak kelapa dan metanol dengan rasio 1:4, menggunakan katalis zeolit-A 10% dari silika sekam padi dan alumunium, dan direfluks pada suhu 70 °C selama 4 jam, hasil yang diperoleh yaitu konversi 100% minyak kelapa menjadi metil ester. Peneliti selanjutnya Hidayah *et al.*, (2023) telah mengkonversi minyak kelapa sawit menjadi metil ester dengan kondisi yang berbeda yaitu rasio minyak kelapa sawit dan metanol 1: 6 dan penambahan katalis zeolit-A sebanyak 2,5 gram, selanjutnya direfluks pada suhu 70 °C selama 6 jam, hasil konversi yang diperoleh adalah 100%. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya maka zeolit-A memiliki katalitik yang sangat baik sebagai katalis dalam reaksi transesterifikasi.

Tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq.*) merupakan salah satu tanaman komoditas perkebunan yang memiliki peranan penting di Indonesia sebagai penghasil minyak nabati (Dianto dkk., 2017). 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 dan Nurbaiti, 2016). Komposisi asam lemak minyak sawit dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Komposisi asam lemak pada minyak sawit.

| <b>Asam lemak</b> | <b>Minyak sawit</b> |
|-------------------|---------------------|
| Asam laurat       | 0,2                 |
| Asam miristat     | 1,1                 |
| Asam palmitat     | 44,0                |
| Asam stearat      | 4,5                 |
| Asam oleat        | 39,2                |
| Asam linoleat     | 10,1                |
| Asam linolenat    | 0,4                 |
| Asam arakidonat   | 0,1                 |

Sumber: Mancini *et al.*, 2015

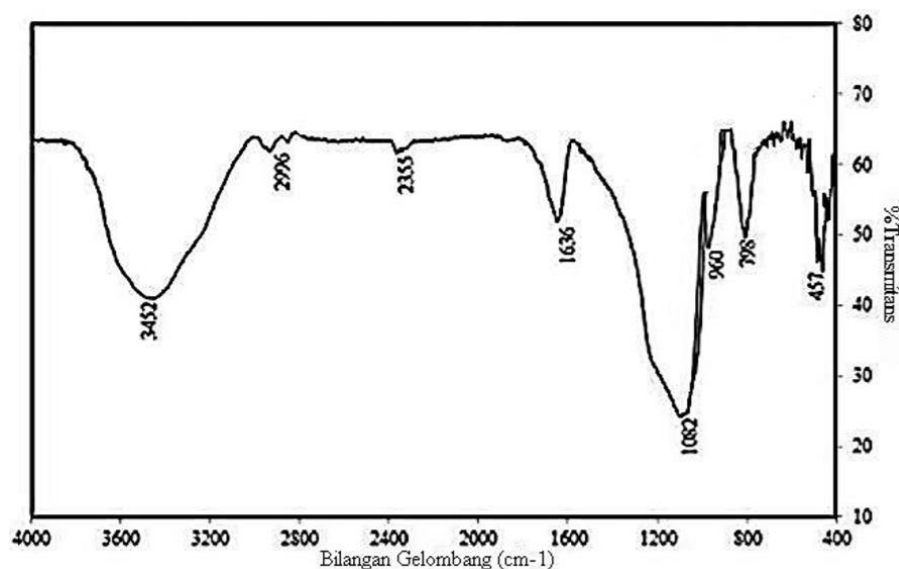
Penggunaan minyak berkualitas rendah, atau kandungan asam lemak bebas (FFA) yang tinggi, tidak cocok digunakan dalam bidang makanan. Alternatif yang mungkin adalah produksi inhibitor korosi (Calderon *et al.*, 2017). Oleh karena itu penggunaan minyak sawit sebagai sumber asam lemak untuk memperoleh metil ester dapat dimanfaatkan untuk sintesis inhibitor korosi yang ramah lingkungan.

## **2.7. Silika sekam padi**

Sekam padi banyak tersedia di negara-negara penghasil beras, seperti Indonesia. Secara tradisional, sekam padi dianggap sebagai limbah yang tidak bernilai, dan dibuang terutama dengan cara dibakar, tidak hanya menimbulkan masalah polusi udara tetapi juga abu silika yang sangat halus, yang juga beracun. Namun, sekam

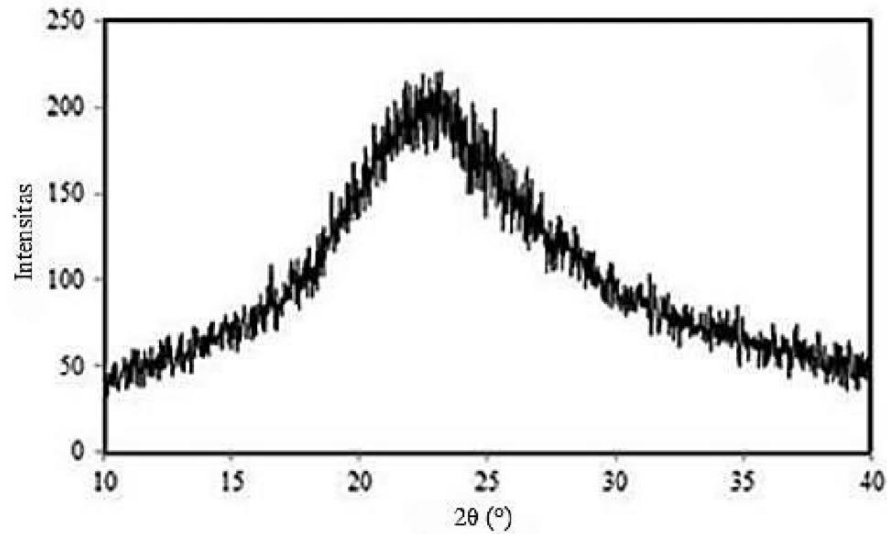
padi sekarang dianggap sebagai sumber daya yang berharga terutama karena residu pertanian ini ditemukan mengandung 15-20% komponen anorganik, dan silika sebagai konstituen utama mencapai 94-98 persen (Li *et al.*, 2011; Simanjuntak *et al.*, 2012). Beberapa komponen anorganik lainnya yang juga diperoleh ketika silika diekstraksi dengan larutan alkali yaitu Al, Fe, Ca, Mg, Mn, K, dan Na (Sembiring and Simanjuntak, 2012).

Terdapat dua metode produksi silika sekam padi telah diterapkan secara luas. Metode pertama adalah ekstraksi termal dengan membakar sekam pada suhu 500-1000°C sehingga semua komponen organik terbakar, meninggalkan abu yang mengandung silika sebagai residu. Metode kedua umumnya dikenal sebagai metode sol-gel. Metode ini melibatkan ekstraksi kimia silika menggunakan larutan alkali seperti NaOH atau KOH, berdasarkan kelarutan silika dalam larutan alkali. Filtrat (sol silika) kemudian diasamkan menggunakan asam mineral kuat, seperti HCl, HNO<sub>3</sub> atau H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> untuk membuat sol silika ke kondisi netral, dan berubah menjadi keadaan gel. Karakterisasi silika hasil ekstraksi dengan FTIR pada Gambar 3 menunjukkan adanya gugus fungsi silanol (Si-OH) yang ditandai dengan adanya pita serapan pada 3452 dan 980 cm<sup>-1</sup>, dan gugus fungsi siloksan (Si-O-Si) pada pita serapan 1082, 798, dan 457 cm<sup>-1</sup>.



**Gambar 4.** Spektrum FTIR silika sekam padi (Simanjuntak *et al.*, 2016)





**Gambar 5.** Difraktogram silika sekam padi (Simanjuntak *et al.*, 2016).

Karakterisasi silika sekam padi dengan XRD (*X-Ray Diffraction*) menunjukkan bahwa silika memiliki bentuk amorf seperti yang disajikan pada Gambar 4.

## 2.8. Zeolit-A

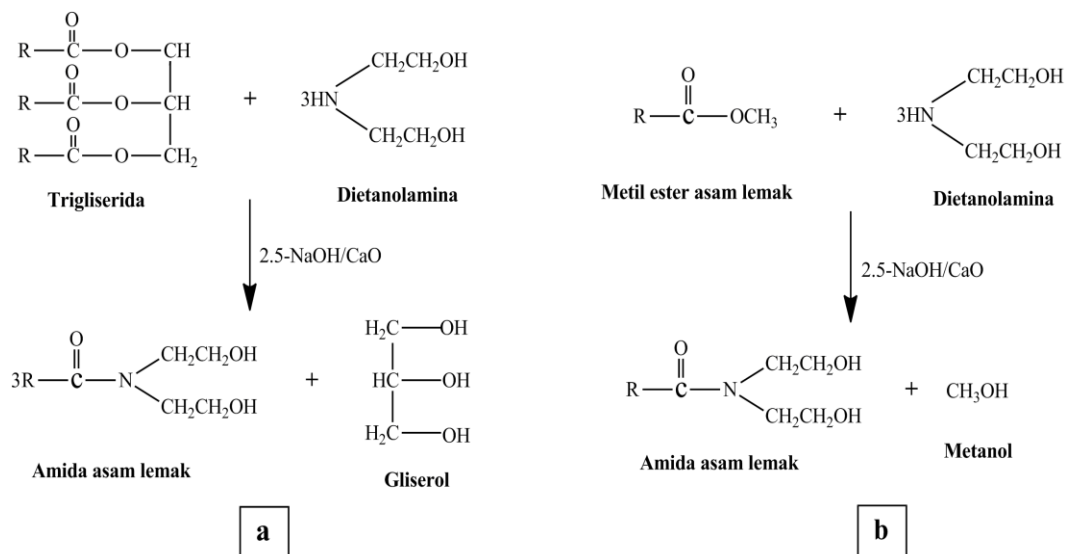
Zeolit-A dikenal dengan sebutan *Linde Type-A* (LTA), (Wang *et al.*, 2008) telah mensintesis zeolit-A, dilaporkan bahwa untuk proses pembentukan zeolit-A dilakukan pada suhu optimum 100°C. Zeolit-A memiliki harga yang relatif lebih mahal dibandingkan dengan zeolit alam karena disintesis dari bahan kimia komersial yang belum diproduksi di Indonesia. Bahan baku utama untuk mensintesis zeolit adalah silika dan alumina. Kedua bahan tersebut dapat diperoleh dari memanfaatkan limbah industri maupun yang berasal dari alam seperti bagas tebu, sekam padi, CBA (*Coal Bottom Ash*), CFA (*Coal Fly Ash*), dan zeolit alam (Rahman *et al.*, 2009).

Zeolit-A dapat diketahui ciri khasnya melalui karakterisasi dengan SEM dan XRD, Gougazeh *and* Buhl (2014) telah melakukan penelitian sintesis dan

karakterisasi zeolit-A, hasil SEM yang didapat berbentuk kubus yang merupakan karakteristik dari zeolit-A. Berdasarkan *International Zeolite Association (IZA)* zeolit-A memiliki karakteristik yang khas pada puncak  $2\theta$ , diantaranya sebagai berikut:  $7,17^\circ$ ,  $10,15^\circ$ , dan  $12,44^\circ$ . Selim *et al.* (2017), telah melakukan penelitian sintesis zeolit-A dengan metode hidrotermal pada suhu  $110^\circ\text{C}$  selama 8 jam, menghasilkan difraktogram XRD dengan puncak difraksi pada  $2\theta$ :  $7,22^\circ$ ,  $10,19^\circ$ ,  $12,48^\circ$ ,  $16,13^\circ$ ,  $21,68^\circ$ ,  $24,01^\circ$ ,  $26,15^\circ$ ,  $27,15^\circ$ ,  $29,96^\circ$  dan  $34,21^\circ$ . Zeolit-A termasuk jenis katalis heterogen yang mempunyai kestabilan termal yang tinggi, sehingga dapat digunakan untuk proses reaksi yang menggunakan suhu tinggi, selain itu mudah untuk dipisahkan dari campuran reaksi karena mempunyai fase yang berbeda dengan reaktan dan produk (Pandiangan *et al.*, 2019).

## 2.9. Sintesis Senyawa Nitrogen

Senyawa nitrogen dan turunannya dapat diperoleh dengan cara mereaksikan asam lemak atau metil ester dengan senyawa amina pada kondisi tertentu, sering disebut dengan reaksi amidasi. Senyawa amina yang digunakan pada reaksi amidasi seperti etanolamina, dietanolamina, diperoleh dengan mereaksikan amonia dengan etilen oksida. 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 (Kumar *and* Ali, 2015; Lokhande *et al.*, 2016). Reaksi amidasi dapat dilihat pada Gambar 6.



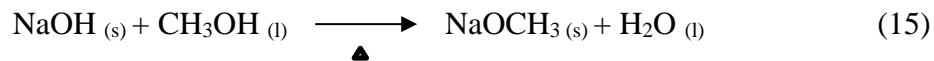
**Gambar 6.** Reaksi amidasi dari: (a) asam lemak dan (b) metil ester (Kumar *and* Ali, 2015).

Pada penelitian sebelumnya (Ilim *et al.*, 2022) telah melakukan reaksi amidasi untuk memperoleh *derivate* senyawa nitrogen melalui jalur 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 *derivate* 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%. Sehingga pada penelitian ini akan melakukan reaksi amidasi untuk memperoleh senyawa nitrogen dengan melalui jalur metil ester asam lemak dan dietanolamina.

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 akan menggunakan katalis zeolit-A dan natrium metoksida (NaOCH<sub>3</sub>).

Natrium metoksida adalah senyawa yang dihasilkan dari reaksi natrium hidroksida (NaOH) dengan metanol (CH<sub>3</sub>OH) dalam kondisi dan perbandingan tertentu, reaksi awalnya dilakukan pada suhu kamar dan kemudian suhu secara bertahap dinaikkan hingga mendekati titik didih metanol untuk melarutkan natrium sebanyak mungkin dan penambahan natrium dihentikan ketika larutan jenuh.

Pengadukan dan pemanasan dihentikan dan larutan natrium metoksida jenuh dibiarkan mendingin secara alami selama sekitar 16 jam untuk memfasilitasi pembentukan kristal natrium metoksida (Chandran *et al.*, 2006). Reaksi yang terjadi dapat dilihat pada Persamaan 15.



Natrium metoksida yang dihasilkan perlu dikarakterisasi untuk mengetahui keberhasilan suatu reaksi, diantaranya adalah analisis unsur (analisis karbon, hidrogen menggunakan CHNS *elemental analyser*, dan analisis natrium menggunakan spektrometer serapan/emisi atom), analisis gugus fungsi menggunakan Inframerah, dan analisis kemurnian menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD). Seperti yang dilaporkan (Chandran *et al.*, 2006) bahwa diperoleh hasil analisis karbon dari natrium metoksida sebesar 21,64%, hidrogen 6,17%, dan natrium 44,81%). Contoh hasil analisis kristal natrium metoksida menggunakan XRD dapat dilihat pada Gambar 12, dan analisis gugus fungsinya dapat dilihat pada Gambar 13 dalam sub-bab Karakterisasi produk.

Natrium metoksida dapat digunakan sebagai katalis dalam reaksi amidasi, seperti yang dilaporkan oleh Wongwanichkangwarn *et al.*, (2021) dalam reaksi metil ester dan dietanolamin menggunakan katalis natrium metoksida pada suhu 70-80 °C selama 8 jam dalam reaktor *batch* tertutup menghasilkan senyawa amida 95,81%, dimana amida adalah senyawa turunan nitrogen, sehingga natrium metoksida memiliki potensi yang baik sebagai katalis dalam reaksi amidasi.

## 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*), dan metode elektrokimia (Tait 1994; Jones, 1996; Ramos-Negron *et al.*, 2019).

### 2.10.1. Metode kehilangan berat (*Wheel Test*)

Metode *wheel test* atau kehilangan berat 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 (Jones 1996). Perhitungan metode *wheel test* untuk penurunan berat ( $W$ ) menggunakan Persamaan 16, perhitungan laju korosi ( $CR$ ) menggunakan Persamaan 17, dan efisiensi penghambatan ( $\%P$ ) menggunakan Persamaan 18, (Ilim *et al.*, 2017).

$$W = W_{(i)} - W_{(t)} \quad (16)$$

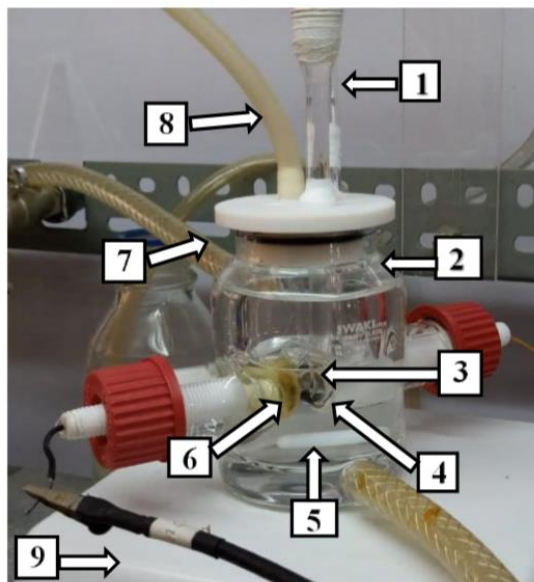
$$CR = \frac{10.W.365}{A.D.t} \quad (17)$$

$$\%P = \frac{(CR_0 - CR_i)}{CR_0} \times 100\% \quad (18)$$

$W$  = kehilangan berat (g),  $W_{(i)}$  = berat awal (g),  $W_{(t)}$  = berat akhir (g),  $CR$  = laju korosi ( $\text{mm Y}^{-1}$  = milimeter per tahun),  $A$  = luas area kupon ( $\text{cm}^2$ ),  $D$  = kepadatan logam ( $7,86 \text{ g.cm}^{-3}$ ) untuk baja karbon,  $t$  = waktu (hari),  $\%P$  = persen proteksi,  $CR_0$  = laju korosi tanpa inhibitor dan  $CR_i$  = laju korosi dengan inhibitor.

### 2.10.2. Metode elektrokimia

Mekanisme korosi pada lingkungan larutan adalah reaksi elektrokimia, oleh karena itu berbagai macam pengujian elektrokimia telah banyak dikembangkan. Keuntungan dari metode elektrokimia ini adalah kemampuannya mendeteksi laju korosi yang sangat rendah, durasi percobaan yang relatif singkat dan mudah dilakukan. Metode elektrokimia melibatkan penentuan sifat antar muka yang spesifik dapat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu: (a) Perbedaan potensial pada antarmuka. Potensial pada permukaan terkorosi diperoleh dari polarisasi anodik-katodik. Potensial merupakan parameter yang mudah diamati. Nilai potensial ini berhubungan dengan sistem termodinamika yang memberikan informasi tentang keadaan suatu sistem; (b) Laju reaksi sebagai densitas arus. Densitas arus dapat diketahui melalui polarisasi anodik-katodik logam, sehingga diperoleh densitas arus ikor; (c) Impedansi permukaan. Permukaan logam yang terkorosi dan tidak terkorosi dapat dibedakan melalui karakteristik impedansinya (Tait, 1994).

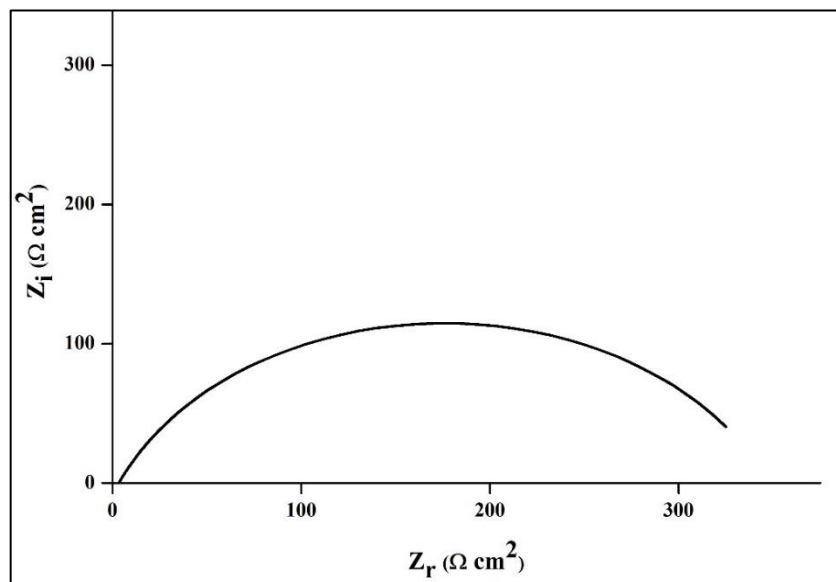


**Gambar 7.** Skema rangkaian alat pada metode elektrokimia: (1) termometer, (2) *chamber glass*, (3) elektroda kerja (baja), (4) elektroda pembanding (Ag/AgCl), (5) *magnetic stirrer*, (6) elektroda bantu (Pt), (7) *water bath*, (8) sparging CO<sub>2</sub>, (9) *hot plate*.

Metode elektrokimia yang banyak digunakan adalah Tafel dan EIS. Pengukuran elektrokimia dilakukan dengan menggunakan *set-up* eksperimental yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya (Ilim *et al.*, 2021) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

EIS merupakan suatu teknik elektrokimia yang digunakan untuk mengevaluasi perlindungan korosi (Syahra dan Munasir, 2015). Metode EIS bertujuan untuk mengkarakterisasi antarmuka antara logam pipa baja dan larutan uji, di mana eksperimen ini menggunakan sebuah potensiostat. Data yang dihasilkan adalah tahanan polarisasi dari sistem yang terkorosi (Nuraini dkk., 2016).

EIS menggunakan arus AC di mana memiliki voltase kecil berkisar dari 5 sampai 10 mV dan diterapkan dalam sistem melalui berbagai frekuensi mulai dari 100 kHz sampai 10 mHz. Berdasarkan bentuk plot Nyquist dari hasil eksperimen seperti pada Gambar 8, sel elektrokimia yang mengandung sampel logam, inhibitor teradsorpsi, dan medium elektrolit diwakili oleh sirkuit setara yang mencakup informasi tentang ketahanan larutan ( $R_s$ ), ketahanan transfer muatan ( $R_{ct}$ ), dan kapasitansi layer ganda ( $C_{dl}$ ) (Goni *and* Mazumder, 2019).



**Gambar 8.** Kurva Plot Nyquist

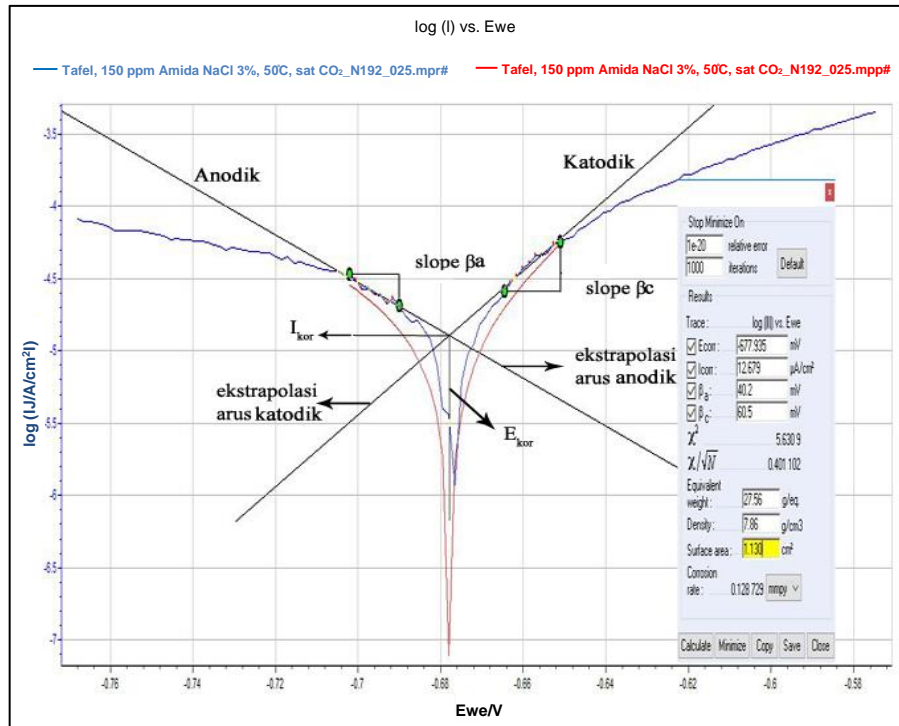
Berdasarkan plot Nyquist diperoleh nilai  $(R_s + R_{ct})$ ,  $R_s$ , dan  $R_{ct}$ . Nilai  $R_s$  merupakan titik awal dari setengah lingkaran dan  $(R_s + R_{ct})$  merupakan titik akhir dari setengah lingkaran yang terbentuk dari kurva plot Nyquist. Nilai  $R_{ct}$  diperoleh dari selisih antara nilai  $(R_s + R_{ct})$  dengan  $R_s$ . Jika nilai  $R_{ct}$  besar dan nilai  $C_{dl}$  menurun dengan meningkatnya konsentrasi inhibitor, maka akan menunjukkan perlindungan korosi yang lebih baik (Goni *and* Mazumder, 2019). Efisiensi penghambatan (% P) dengan metode EIS dapat dihitung menggunakan Persamaan (19), (Ilim *et al.*, 2017).

$$\%P = \frac{(R_{ct(i)} - R_{ct(o)})}{R_{ct(i)}} \times 100\% \quad (19)$$

%P adalah efisiensi penghambatan,  $R_{ct(i)}$  adalah ketahanan transfer muatan dengan inhibitor dan  $R_{ct(o)}$  adalah ketahanan transfer muatan tanpa inhibitor.

Ekstrapolasi kurva dengan metode Tafel diperlukan untuk menentukan besaran-besaran listrik yang terkait dengan proses korosi pada baja karbon (Suryaningsih *dkk.*, 2015). Kurva Tafel adalah plot potensial yang menunjukkan reaksi anodik dan katodik dalam sel elektrokimia. Kurva polarisasi menjelaskan hubungan antara potensial (E) pada sumbu X, apabila nilainya semakin ke kanan (positif) laju korosinya semakin lambat dan kuat arus (i) pada sumbu Y, apabila nilainya semakin ke atas (tinggi) laju korosinya semakin cepat. Kurva polarisasi merupakan kurva *non*-linier sehingga dilakukan ekstrapolating Tafel pada bagian arus anodik dan katodik dengan membuat garis tangensial pada kedua bagian hingga kedua garis tersebut bertemu pada suatu titik (berpotongan). Bagian linier anodik dan katodik dengan bantuan empat buah titik, di mana dua titik pada bagian anodik diperoleh nilai  $\beta_a$  dan bagian katodik diperoleh nilai  $\beta_c$ . Titik potong pada bagian linier anodik dan katodik akan diperoleh nilai densitas arus korosi ( $i_{kor}$ ) dan potensial korosi ( $E_{kor}$ ). Contoh kurva polarisasi dapat dilihat pada Gambar 9.





**Gambar 9.** Kurva polarisasi Tafel

Nilai arus korosi dengan metode plot Tafel bisa langsung dibaca atau bisa menggunakan Persamaan 20 yang disebut Persamaan Stern-Geary, selanjutnya untuk menentukan laju korosi menggunakan Persamaan 21, dan untuk menghitung persen proteksi dari inhibitor menggunakan Persamaan 22.

$$I_{kor} = \left( \frac{1}{2,3 \cdot R_p} \right) \left( \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \right) \quad (20)$$

$$CR = I_{kor} \cdot \Lambda \cdot \varepsilon \left( \frac{1}{\rho \cdot A} \right) \quad (21)$$

$$\%P = \frac{I_{kor(o)} - I_{kor}}{I_{kor(o)}} \times 100\% \quad (22)$$

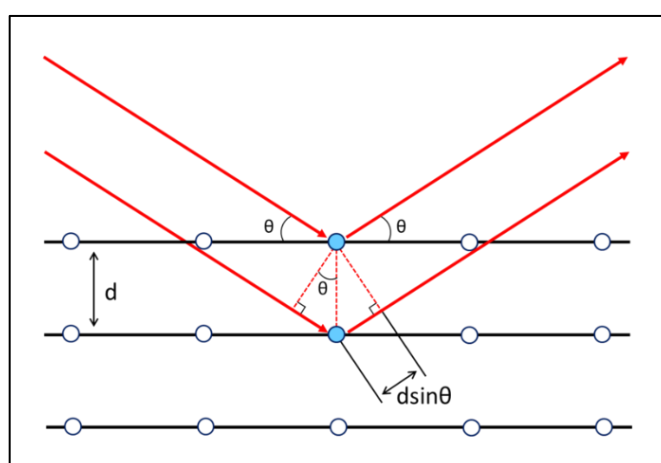
$I_{kor}$  = arus korosi (A),  $\beta_a$  = kemiringan Tafel anodik (V. dekade<sup>-1</sup>) atau (mV. dekade<sup>-1</sup>),  $\beta_c$  = kemiringan Tafel katodik (V. dekade<sup>-1</sup>) atau (mV. dekade<sup>-1</sup>), CR = laju korosi (mm. tahun<sup>-1</sup>),  $I_{kor}$  = rapat arus korosi (A.cm<sup>-2</sup>) dalam Persamaan 21,  $\Lambda$  = suatu kombinasi dari beberapa konversi,  $\varepsilon$  = berat ekuivalen logam,  $\rho$  = rapat massa logam (g.cm<sup>-3</sup>), A = luas area logam (cm<sup>2</sup>),  $I_{kor(o)}$  = arus korosi blanko dan  $I_{kor}$  = arus korosi dengan inhibitor dalam satuan ampere.

## 2.11. Karakterisasi Produk

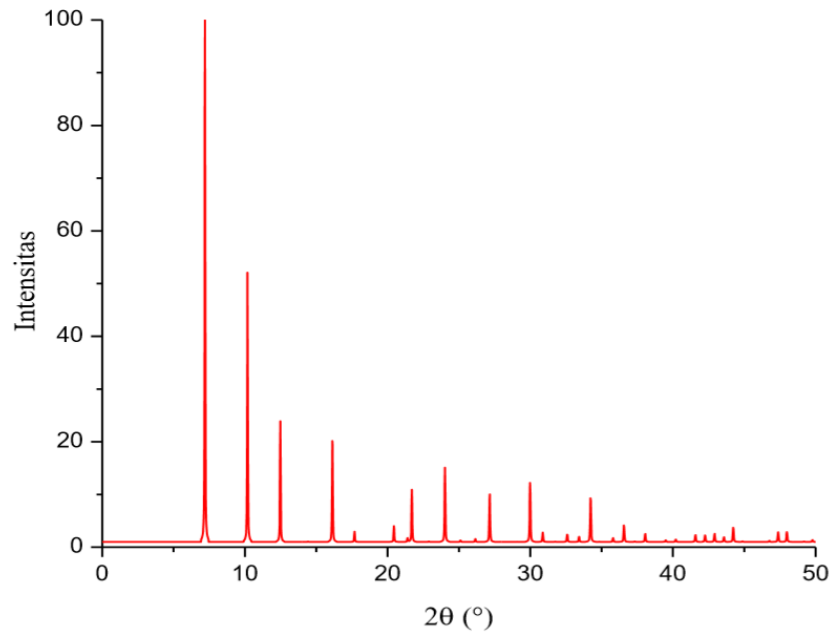
### 2.11.1. X-Ray Diffraction (XRD)

XRD adalah teknik yang tidak merusak dan 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 (Bunaciu *et al.*, 2015). Prinsip XRD yaitu didasarkan pada difraksi sinar-X, hamburan cahaya dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) saat melewati kisi kristal dengan sudut datang ( $\theta$ ) dan jarak antar bidang kristal sebesar ( $d$ ) (Alfarisa dkk., 2018) seperti yang disajikan dalam Gambar 10. Grafik pola XRD terdiri dari posisi puncak  $2\theta$  pada sumbu x dan intensitas pada sumbu y. Posisi puncak diperoleh menggunakan hukum *Bragg* yang menggunakan metode *Laue* untuk kisi kristal 3 dimensi (Azhara dkk., 2016).

Pada penelitian ini XRD akan digunakan untuk karakterisasi zeolit-A, kemudian dibandingkan dengan standar zeolit-A IZA. Berdasarkan *International Zeolite Association* (IZA) bila diamati dari hasil karakterisasi dengan XRD zeolit-A memiliki puncak-puncak karakteristik yang khas yaitu pada  $2\theta = 7,194^\circ$ ,  $10,181^\circ$ ,  $12,477^\circ$ ,  $16,129^\circ$ , dan  $24,020^\circ$  seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



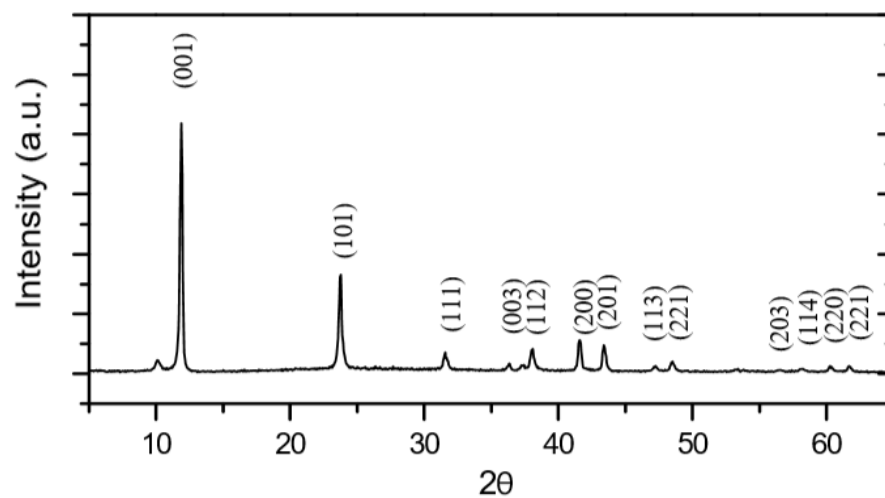
**Gambar 10.** Difraksi sinar-X pada jarak antar atom  $d$  dan sinar datang  $\theta$



**Gambar 11.** Difraktogram standar zeolit-A (*Structure Commission of the International Zeolite Association (IZA-SC, 2017).*

Data hasil karakterisasi XRD dapat dihitung persen kristalinitas zeolit dengan menggunakan Persamaan 23 (Purnama dkk., 2006).

$$\% \text{Kristalinitas} = \frac{\text{Fraksi luas kristal}}{\text{Fraksi luas kristal} + \text{Fraksi luas amorf}} \times 100 \quad (23)$$



**Gambar 12.** Difraktogram natrium metoksida (Chandran *et al.*, 2006)

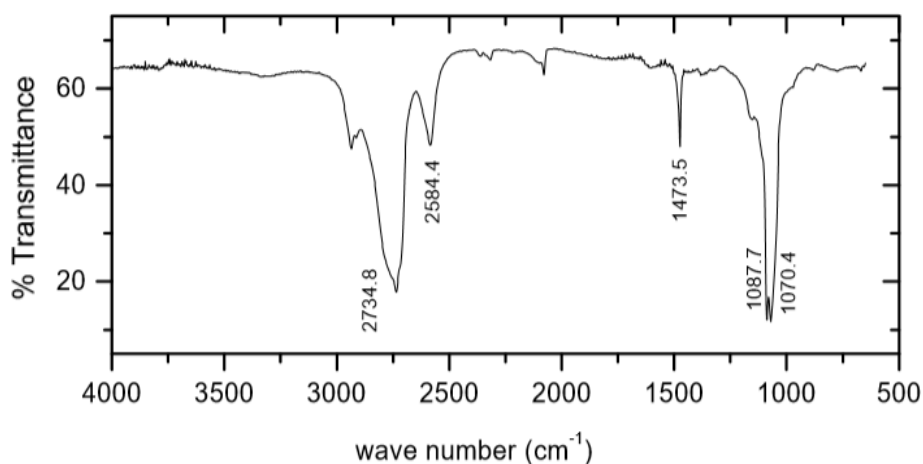
Analisis XRD juga akan digunakan untuk karakterisasi katalis natrium metoksida dan akan dibandingkan dengan dengan hasil karakterisasi XRD seperti yang dilaporkan (Chandran *et al.*, 2006) dapat dilihat pada Gambar 12.

Pola difraksi sinar-X natrium metoksida seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12, semua puncak cocok dengan yang dilaporkan (JCPDS 19-1876) untuk natrium metoksida anhidrat dapat diindeks ke sistem tetragonal.

### **2.11.2. *Fourier Transform-Infrared (FTIR)***

Spektrofotometer (FTIR) adalah salah satu instrumen yang dapat digunakan untuk identifikasi mineral secara kualitatif dan mulai dikembangkan untuk identifikasi secara kuantitatif. Karakterisasi pada FTIR bergantung pada getaran molekul sehingga dapat digunakan untuk identifikasi mineral. Spektrum yang diamati adalah absorbansi sampel pada kisaran bilangan gelombang  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  (Munajad *et al.*, 2018). Spektrofotometer FTIR memiliki kemampuan yang cepat dalam menganalisis, bersifat tidak merusak dan hanya membutuhkan preparasi sampel yang sederhana (Rasyida dkk., 2014). FTIR adalah teknik yang ideal untuk menganalisis sifat struktur kimia dari bahan alami, karena frekuensi beberapa mode getaran molekul organik dan anorganik aktif dalam inframerah (Lopes *et al.*, 2018). Prinsip kerja FTIR adalah mengenali gugus fungsi suatu senyawa dari absorbansi inframerah yang dilakukan terhadap senyawa tersebut. Pola absorbansi yang diserap oleh tiap-tiap senyawa berbeda-beda, sehingga senyawa-senyawa dapat dibedakan dan dikuantifikasikan (Sjahfirdi dkk., 2015).

Pada penelitian ini produk yang akan dikarakterisasi menggunakan FTIR adalah yang pertama katalis natrium metoksida seperti yang dijelaskan pada Gambar 13.



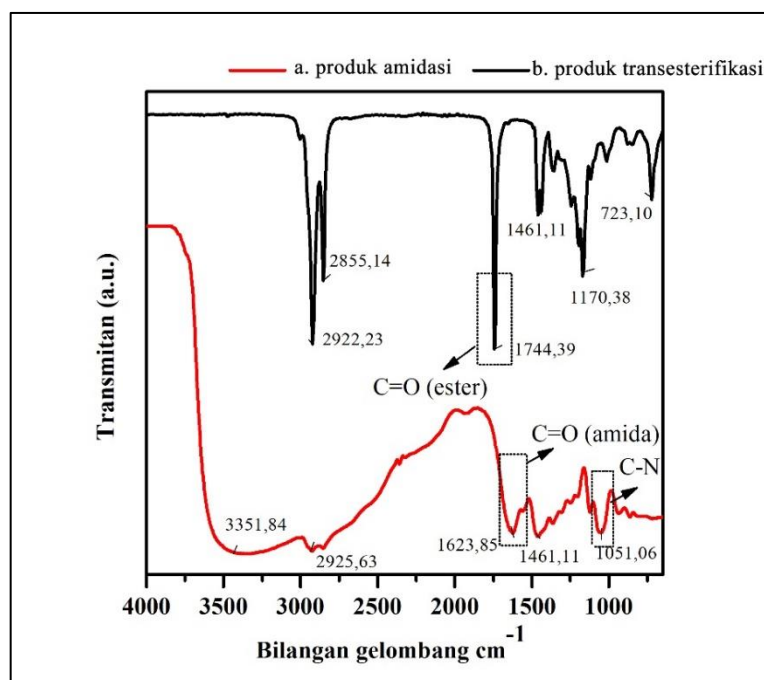
**Gambar 13.** Spektrum IR natrium metoksida (Chandran *et al.*, 2006)

Berdasarkan spektrum IR natrium metoksida pada Gambar 13, keberhasilan produk natrium metoksida yaitu diperoleh bilangan gelombang  $1450\text{ cm}^{-1}$  yang merupakan vibrasi tekuk C–H dari metoksida. Tidak ada serapan yang muncul pada bilangan gelombang  $3500$  dan  $1600\text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan tidak adanya gugus –OH dalam senyawa, artinya produk tersebut benar-benar bebas dari alkohol dan metoksida terlarut. Getaran C–O untuk natrium metoksida muncul sebagai doublet pada  $1070$  dan  $1088\text{ cm}^{-1}$ , hal ini mengindikasikan bahwa atom hidrogen dari gugus –OH dalam alkohol diganti dengan logam natrium dalam alkoksida membuat elektron mengalir menuju ikatan O–Na sehingga membuat ikatan C–O kuat (Chandran *et al.*, 2006).

Kemudian produk yang kedua adalah metil ester yang diindikasikan dengan kemunculan puncak serapan pada bilangan gelombang  $1744\text{ cm}^{-1}$  (Taufiq-Yap *et al.*, 2011), diperkuat dengan munculnya serapan bilangan gelombang  $1170\text{ cm}^{-1}$  yang merupakan vibrasi tekuk C–O (Istadi *et al.*, 2015), dan bilangan gelombang  $723$  muncul serapan yang menunjukkan gugus C–H yang merupakan rantai dari metil ester (Khasanah *et al.*, 2019).

Produk yang ketiga adalah senyawa nitrogen, ciri khas dari turunan senyawa nitrogen yang disintesis memiliki puncak getaran pada bilangan gelombang  $1617\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan regangan C = O dari karbonil amida (Sari *et al.*, 2018), dan ciri

khas yang muncul merupakan vibrasi ulur C-N pada bilangan gelombang 1195  $\text{cm}^{-1}$ , dan gugus N-H amida pada kisaran bilangan gelombang 3350-3500  $\text{cm}^{-1}$  (sharma *et al.*, 2018).



**Gambar 14.** Spektrum FTIR (a) produk amidasi, dan (b) produk transesterifikasi menggunakan katalis zeolit-A (Hidayah *et al.*, 2023).

**Tabel 2.** Puncak bilangan gelombang FTIR produk transesterifikasi (metil ester) menggunakan katalis zeolit-A

| Bilangan gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Jenis vibrasi                | Referensi                         |
|---|------------------------------|-----------------------------------|
| 723,10                                  | Tekuk $(\text{CH}_2)_n$      | (Khasanah <i>et al.</i> , 2019)   |
| 1170,38                                 | Ulur C-O                     | (Taufiq-Yap <i>et al.</i> , 2011) |
| 1461,11                                 | Tekuk $\text{CH}_2$          | (Wembabazi <i>et al.</i> , 2015)  |
| 1744,39                                 | Ulur C=O (ester)             | (Istadi <i>et al.</i> , 2015)     |
| 2855,14                                 | Ulur simetrik $\text{CH}_2$  | (Qiu <i>et al.</i> , 2011)        |
| 2922,23                                 | Ulur asimetrik $\text{CH}_2$ |                                   |

Sumber: Hidayah *et al.*, 2023.

Pada penelitian sebelumnya Hidayah *et al.*, (2023) menggunakan FTIR untuk mengkarakterisasi produk transesterifikasi dan amidasi untuk mengetahui

perbedaan gugus fungsi yang diperoleh. Spektrum yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 14, dan gugus fungsi serta bilangan gelombang yang muncul untuk produk transesterifikasi (metil ester) dapat dilihat pada Tabel 2, dan produk amidasi (senyawa nitrogen) dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Puncak bilangan gelombang FTIR produk amidasi (senyawa nitrogen) menggunakan katalis zeolit-A.

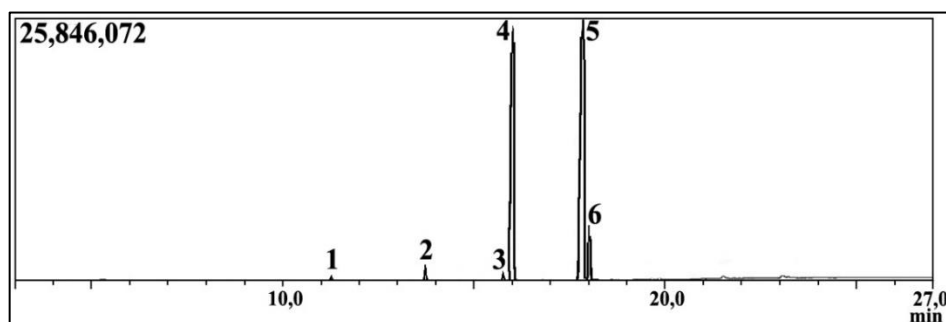
| Bilangan gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Jenis vibrasi               | Referensi                        |
|---|-----------------------------|----------------------------------|
| 1051,06                                 | Ulur CN                     | (Pavia <i>et al.</i> , 2009)     |
| 1461,11                                 | Tekuk $\text{CH}_2$         | (Wembabazi <i>et al.</i> , 2015) |
| 1623,85                                 | Ulur C=O (amida)            | (Utami <i>et al.</i> , 2020)     |
| 2922,23                                 | Ulur simetrik $\text{CH}_2$ | (Qiu <i>et al.</i> , 2011)       |
| 3351,84                                 | Ulur OH                     | (Lubis dkk., 2018)               |

Sumber: Hidayah *et al.*, 2023.

### 2.11.3. Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

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 perubahan 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 ( $m/e$ ) (McLafferty, 1989).

Analisis dengan GC-MS pada penelitian ini akan digunakan untuk mengkarakterisasi senyawa metil ester dari hasil transesterifikasi, dan senyawa nitrogen dari hasil reaksi amidasi. Analisis GC-MS menghasilkan kromatogram yang menunjukkan banyaknya komponen senyawa yang terkandung dalam sampel dan persen kelimpahannya, contoh kromatogram dari metil ester seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15.



**Gambar 15.** Kromatogram dari sampel metil ester minyak kelapa sawit (Hidayah *et al.*, 2023).

Gambar 15 menunjukkan adanya enam puncak yang terpisah satu sama lain yang mengindikasikan bahwa sampel mengandung enam komponen penyusun. Identifikasi enam puncak diamati dari data MS yang dihasilkan dengan mencocokkan senyawa yang sesuai dengan data acuan seperti *NIST17Library System* dan *Wiley 229 Library System* seperti yang disajikan dalam Tabel 4.

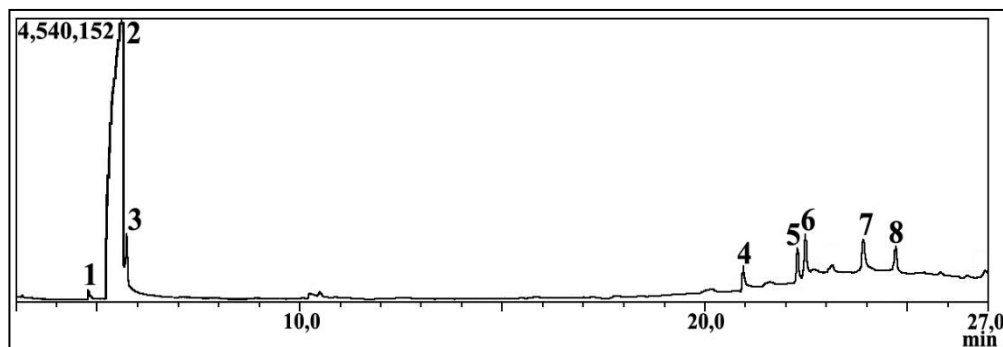
**Tabel 4.** Komponen metil ester hasil transesterifikasi minyak kelapa sawit.

| No | Waktu retensi (menit) | Nama senyawa      | Rumus molekul     | Jumlah relatif (%) |
|----|-----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1. | 11,27                 | Metil laurat      | $C_{13}H_{26}O_2$ | 0,19               |
| 2. | 13,72                 | Metil miristat    | $C_{15}H_{30}O_2$ | 1,06               |
| 3. | 15,77                 | Metil palmitoleat | $C_{17}H_{32}O_2$ | 0,22               |
| 4. | 16,01                 | Metil palmitat    | $C_{17}H_{34}O_2$ | 34,91              |
| 5. | 17,85                 | Metil oleat       | $C_{19}H_{36}O_2$ | 57,13              |
| 6. | 18,01                 | Metil stearat     | $C_{19}H_{38}O_2$ | 4,43               |

Sumber: Hidayah *et al.*, 2023.



Selanjutnya contoh kromatogram dari senyawa nitrogen yang diperoleh dari reaksi amidasi dapat dilihat pada Gambar 16, dan data senyawa nitrogen yang muncul dapat dilihat pada Tabel 5 khususnya pada nomor 3, 4, 5, 6, dan 8.



**Gambar 16.** Kromatogram produk amidasi dari metil ester minyak sawit dan dietanolamina (Hidayah *et al.*, 2023).

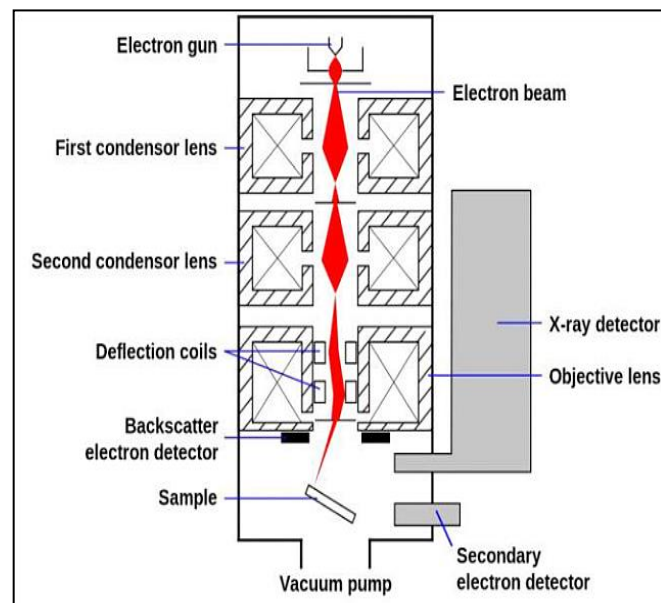
**Tabel 5.** Komposisi produk amidasi dari metil ester minyak sawit dan dietanolamina.

| No | Waktu retensi (menit) | Nama senyawa   | Rumus molekul      | Jumlah relatif (%) |
|----|-----------------------|--|--------------------|--------------------|
| 1. | 4,80                  | Gliserol   | $C_3H_8O_3$        | 0,23               |
| 2. | 5,60                  | <i>Diethanolamine</i>                                    | $C_4H_{11}NO_2$    | 84,12              |
| 3. | 5,73                  | <i>N-Isopropyl-N-nitrosopropylamine</i>                  | $C_6H_{14}N_2O$    | 3,46               |
| 4. | 20,95                 | <i>Tripopylamine</i>                                     | $C_9H_{21}N$       | 1,27               |
| 5. | 22,29                 | <i>2-Methyldecanoic acid</i>                             | $C_{11}H_{22}NO_2$ | 1,73               |
| 6. | 22,48                 | <i>2-Ethyl-N-(2-ethylbutyl)-1-butanamine-(2R,3S,4S)-</i> | $C_{12}H_{27}N$    | 2,61               |
| 7. | 23,92                 | <i>Pentadecane-1,2,3,4-tetrol</i>                        | $C_{15}H_{32}O_4$  | 2,00               |
| 8. | 24,72                 | <i>N,N-bis(2-hydroxyethyl)dodecanamide</i>               | $C_{16}H_{33}NO_3$ | 1,73               |

Sumber: Hidayah *et al.*, 2023.

#### 2.11.4. *Scanning Elektron Miroscope- Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)*

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. Sinyal elektron sekunder yang dihasilkan ditangkap oleh detektor dan diteruskan ke monitor. Pada monitor akan diperoleh gambar yang khas yang menggambarkan struktur permukaan spesimen. Selanjutnya gambar di monitor dapat dipotret dengan menggunakan film hitam putih (Kardiman dkk, 2018). Lebih jelasnya dapat dilihat diagram skematik dari SEM pada Gambar 17.

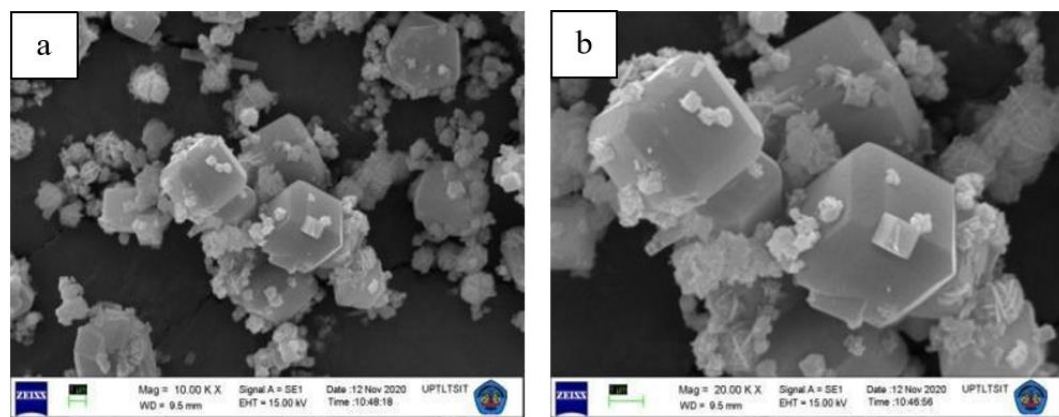


**Gambar 17.** Diagram skematik dari *scanning electron microscope (SEM)*

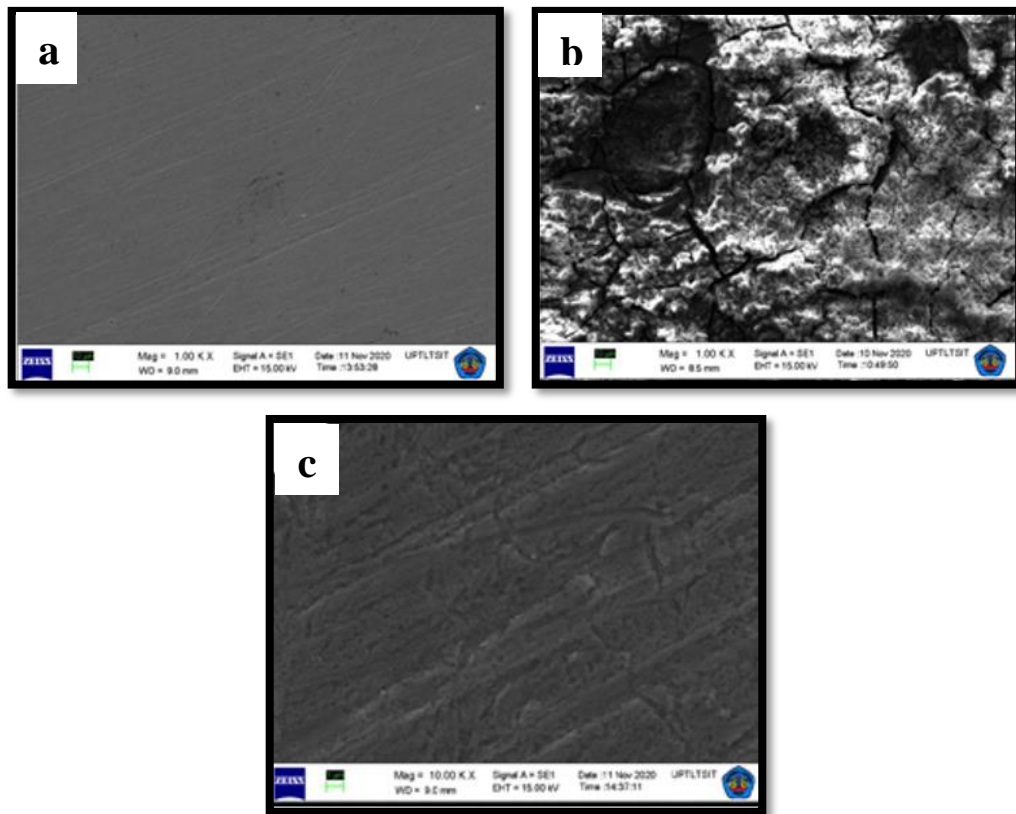
SEM memiliki perbesaran 10 – 3.000.000 kali, kedalaman bidang 4 – 0.4 mm dan resolusi sebesar 1 – 10  $\mu\text{m}$ . Mikroskop elektron menggunakan prinsip-prinsip dasar yang sama dengan mikroskop cahaya, tetapi memfokuskan berkas elektron yang energetik dari pada foton, untuk memperbesar objek. Komponen dari SEM

sendiri antara lain; sumber elektron, senapan termionik, senapan emisi, lensa elektromagnetik dan elektrostatik, ruang vakum, ruang sampel, komputer, detektor (satu atau lebih), detektor elektron sekunder (SED), pendeteksi *backscatter*, *detector backscatter* difraksi (EBSD), dan *X-ray detector* (EDX) (Choudhary and Priyanka, 2017).

Pada penelitian ini SEM akan digunakan untuk karakterisasi zeolit-A, dan analisis morfologi permukaan baja sebelum perlakuan, setelah perlakuan, dan setelah ditambahkan inhibitor korosi. Contoh mikrograf SEM sampel zeolit-A dapat dilihat pada Gambar 18. Zeolit-A jika dianalisis dengan SEM memiliki karakteristik struktur kristal berbentuk kubus (Gougazeh and Buhl, 2014). Contoh mikrograf SEM sampel baja lunak dapat dilihat pada Gambar 19.



**Gambar 18.** Mikrograf sampel Zeolit-A dengan perbesaran (a) 10.000 kali, dan (b) 20.000 kali (Herliana, 2022).



**Gambar 19.** Mikrograf permukaan baja lunak, (a) tanpa perlakuan, (b) setelah perlakuan terjadi korosi, dan (c) setelah ditambahkan inhibitor korosi senyawa nitrogen pada perbesaran 1000x (Khoeroni, 2021).

Pada Gambar 19 (a) terlihat permukaan baja lunak tanpa perlakuan cenderung halus, namun terlihat adanya sedikit goresan akibat hasil pengamplasan, sedangkan pada Gambar 19 (b) permukaan baja yang direndam dalam medium korosif yang mengandung karbon dioksida pada suhu 50°C tanpa inhibitor memperlihatkan lubang korosi yang jelas pada permukaan dikarenakan keagresifan larutan, pada Gambar 19 (c) permukaan baja setelah perlakuan direndam dalam medium korosif dan ditambahkan inhibitor korosi produk amidasi pada suhu 50°C memperlihatkan dengan jelas bahwa penambahan 150 mg L<sup>-1</sup> inhibitor dapat mengurangi kerusakan pada permukaan baja dibandingkan dengan tanpa penambahan inhibitor. Hal ini menjelaskan bahwa penambahan inhibitor dapat membentuk lapisan protektif pada permukaan baja yang bertindak sebagai penghalang serangan korosi dari larutan korosif.

## **BAB III. METODE PENELITIAN**

### **3.1. Waktu dan Tempat**

Penelitian ini dilaksanakan selama 5 bulan (Februari - Juni 2023), bertempat di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Analisis FTIR dan SEM dilakukan di Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT) Universitas Lampung, analisis XRD dilakukan di Institut Teknologi Sepuluh November, analisis GC-MS dilakukan di Universitas Islam Indonesia dan di Universitas Gadjah Mada. Pengujian aktivitas inhibitor korosi menggunakan metode *wheel test* dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Universitas Lampung.

### **3.2. Alat dan Bahan**

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah; *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) Nicolet Avatar 360, Gas *ChromatographyMassSpectrometry* (GC-MS) model QP2010S Shimadzu yang dilengkapi dengan kolom Agilent HP-1 dengan Panjang 30 meter dan diameter dalam 0,25 mm, *X-Ray Diffraction* (XRD) PPANalytical tipe Empyrean, *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDX) Zeiss Evo® MA 10, termometer, autoklaf, neraca analitik, teflon, oven, *furnance*, *hotplate*, *strirrer*, *refluks*, mikro pipet, alat-alat gelas laboratorium.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah; minyak kelapa sawit, sekam padi, aluminium foil, kertas saring, indikator universal, metanol, akuades, dietanolamina, NaOH, HNO<sub>3</sub>, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnCl<sub>2</sub>, HCl pekat, NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, gas CO<sub>2</sub>, kertas amplas dengan ukuran grit 60, 80, 200, 400, 600, 800, 1000, dan 1200, serta baja lunak.

### **3.3. Prosedur Kerja**

#### **3.3.1. Sintesis dan karakterisasi katalis**

Preparasi silika pada penelitian ini mengacu pada metode penelitian sebelumnya oleh Simanjuntak *et al.*, 2016., dan Herliana *et al.*, 2021. Sekam padi dicuci dengan air secara berulang untuk membersihkan dari pengotornya, sekam padi yang mengapung serta pengotornya dipisahkan dan sekam padi yang terendam disisihkan, lalu dikumpulkan, kemudian dijemur dibawah sinar matahari sampai kering, sekam padi yang sudah kering selanjutnya diekstrak. Sekam padi sebanyak 70 g diekstrak dalam 700 mL larutan NaOH 1,5% dalam wadah Teflon, kemudian dipanaskan sambil diaduk hingga mendidih dan ditunggu selama 30 menit.

Hasil ekstraksi sekam padi didiamkan pada suhu ruang selama 24 jam untuk memaksimalkan proses pengestrakan, selanjutnya untuk memisahkan filtrat dan ampas sekam padi dilakukan proses penyaringan. Filtrat yang diperoleh ditambahkan dengan larutan HNO<sub>3</sub> 10% secara bertahap hingga pH larutan mencapai sekitar 7-8 dan terbentuk gel silika. Gel silika didiamkan pada suhu ruang selama 24 jam untuk memaksimalkan proses penuaan. Gel silika kemudian dicuci dengan air hingga bersih dan berwarna putih. Gel silika yang telah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C, kemudian digerus. Silika yang dihasilkan selanjutnya digunakan dalam sintesis zeolit-A.

Katalis zeolit-A disintesis dengan komposisi molar  $\text{SiO}_2$ :  $0,132\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $\text{NaOH}$ :  $27,77\text{H}_2\text{O}$  (Lampiran 1) menggunakan metode hidrotermal. Silika sebanyak 30 g dilarutkan dengan larutan  $\text{NaOH}$  (20 gram/200 mL akuades) dalam wadah polipropilen. Larutan *distirrer* dan dipanaskan pada suhu  $70^\circ\text{C}$  selama 3 jam, setelah 3 jam larutan didinginkan dan disaring. Filtrat natrium silikat yang diperoleh dilakukan penuaan (*aging*) selama 24 jam. Filtrat yang telah dilakukan penuaan (*aging*) ditambahkan potongan alumunium foil sebanyak 13,5 g dan *distirrer* selama 3 jam. Campuran yang dihasilkan dimasukkan ke dalam autoklaf dan dilakukan penuaan (*aging*) selama 24 jam, setelah proses penuaan, campuran dikristalisasi dalam oven pada suhu  $100^\circ\text{C}$  selama 96 jam. Padatan hasil sintesis kemudian disaring, dicuci dengan akuades sampai mencapai pH 7-8 dan dikeringkan dalam oven pada suhu  $100^\circ\text{C}$ , selanjutnya padatan dikalsinasi pada suhu  $550^\circ\text{C}$  selama 6 jam. Zeolit yang dihasilkan didinginkan dan dihaluskan. Katalis zeolit-A yang diperoleh selanjutnya dikarakterisasi dan dilakukan uji aktivitas katalitik dalam reaksi transesterifikasi dan amidasi.

Zeolit-A yang telah disintesis dilakukan karakterisasi dengan XRD untuk mengetahui kristalografi sampel zeolit, dan dibandingkan pola difraksinya dengan zeolit-A standar (IZA). Morfologi permukaan dan komposisi zeolit-A dikarakterisasi menggunakan SEM-EDX.

Katalis natrium metoksida ( $\text{NaOCH}_3$ ) dibuat dengan mereaksikan natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) dan metanol pro analisis dengan perbandingan 1:1 (Wongwanichkangwarn *et al.*, 2021). Natrium hidroksida sebanyak 2 g dimasukkan ke dalam wadah polipropilen dan ditambahkan metanol sebanyak 2,525 mL, selanjutnya *distirrer* selama 30 menit dengan kondisi wadah tertutup rapat, kemudian didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang hingga terbentuk kristal putih. Katalis yang diperoleh selanjutnya dikarakterisasi dan diuji aktivitas katalitiknya dalam reaksi amidasi antara metil ester dan dietanolamin untuk memperoleh senyawa nitrogen.

Natrium metoksida dikarakterisasi untuk mengetahui keberhasilan reaksi yang telah dilakukan dalam memperoleh katalis natrium metoksida, katalis

dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengidentifikasi bentuk kristal yang dihasilkan, karakterisasi dengan SEM untuk mengetahui morfologinya, serta untuk mengetahui gugus fungsi yang berikatan maka dilakukan karakterisasi dengan FTIR.

### 3.3.2. Transesterifikasi minyak kelapa sawit

Reaksi transesterifikasi dilakukan untuk mengubah minyak kelapa sawit menjadi senyawa metil ester. Transesterifikasi dilakukan dengan nisbah reaktan 1:6 (25 mL minyak kelapa sawit: 150 mL metanol). Minyak kelapa sawit sebanyak 25 mL dicampurkan dengan 150 mL metanol dan ditambahkan 2,5 g zeolit-A dimasukkan ke dalam labu bundar 250 mL. Campuran direfluks secara kontinyu menggunakan *hotplate stirrer* pada suhu 70°C selama 6 jam. Hasil refluks didinginkan hingga mencapai suhu ruang, lalu disaring dengan kertas saring ke dalam corong pisah untuk memisahkan katalis dari produk yang dihasilkan, kemudian didiamkan selama 24 jam, selanjutnya produk transesterifikasi dimurnikan dengan cara *stir washing*.

Metode *stir washing* dilakukan dengan mencampurkan akuades suhu 50°C sebanyak 50% dari volume filtrat yang akan dicuci, campuran akuades dan filtrat diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 5 menit (Khoeroni, 2021). Campuran akuades dan filtrat dimasukkan ke dalam corong pisah dan dibiarkan sampai terbentuk 2 fasa, fasa yang diambil adalah bagian atas (metil ester).

Senyawa metil ester yang dihasilkan dari reaksi transesterifikasi selanjutnya dikarakterisasi untuk membuktikan bahwa senyawa metil ester telah berhasil terbentuk. Karakterisasi dilakukan dengan GC-MS bertujuan untuk mengidentifikasi komponen penyusun senyawa metil ester dan untuk melihat apakah semua trigliserida yang terdapat pada minyak kelapa sawit telah berhasil diubah menjadi metil ester. Karakterisasi dengan FTIR digunakan sebagai



pendukung selanjutnya untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada senyawa metil ester.

### 3.3.3. Sintesis dan karakterisasi senyawa nitrogen

Senyawa nitrogen diperoleh dengan mereaksikan metil ester dan dietanolamin dengan perbandingan (1:1) menggunakan reaktor refluks dan autoklaf, serta masing-masing ditambahkan katalis zeolit-A dan natrium metoksida. Metil ester sebanyak 10 mL dan dietanolamin 10 mL dimasukkan kedalam labu bundar 50 mL, lalu ditambahkan katalis zeolit-A sebanyak 5% dari jumlah total reaktan. Campuran kemudian direfluks secara kontinyu menggunakan *hotplate stirrer* pada suhu 160 °C selama 3 jam, metode yang sama dilakukan dengan penambahan katalis natrium metoksida 1% v/v pada suhu 80 °C selama 8 jam, selanjutnya metode autoklaf dilakukan dengan perbandingan dan kondisi yang sama untuk masing-masing katalis. Hasil refluks dan autoklaf didinginkan hingga suhu ruang, kemudian disaring dengan kertas saring ke dalam corong pisah untuk memisahkan katalis dari produk yang dihasilkan, dan didiamkan selama 24 jam agar terjadi pemisahan antara senyawa nitrogen yang dihasilkan dengan metil ester yang tersisa. Produk senyawa nitrogen yang diperoleh dikarakterisasi dan kemudian akan diuji aktivitasnya sebagai inhibitor korosi.

Karakterisasi dilakukan untuk membuktikan bahwa senyawa nitrogen telah berhasil terbentuk. Karakterisasi dilakukan dengan GC-MS bertujuan untuk mengidentifikasi komponen penyusun senyawa nitrogen dan untuk melihat apakah semua senyawa metil ester telah berhasil diubah menjadi senyawa nitrogen. Karakterisasi dengan FTIR digunakan sebagai pendukung selanjutnya untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada senyawa nitrogen.

### 3.3.4. Uji aktivitas sebagai inhibitor korosi

#### 3.3.4.1. Persiapan larutan dan bahan

##### 1. Larutan medium korosif

Larutan medium korosif dibuat dengan melarutkan 30 g NaCl dan 0,1 g NaHCO<sub>3</sub> ke dalam labu ukur 1000 mL kemudian ditambahkan akuades sampai tanda terra dan dihomogenkan.

##### 2. *Clarke's Solution*

*Clarke's Solution* dibuat dengan memasukkan 5 g SnCl<sub>2</sub> dan 2 g Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ke dalam labu takar 100 mL kemudian dilarutkan dengan HCl pekat sampai tanda terra.

##### 3. Larutan Induk Inhibitor (Senyawa Nitrogen)

Larutan inhibitor dibuat dengan konsentrasi 15.000 ppm, disiapkan 0,15 g sampel senyawa nitrogen yang telah disintesis, kemudian dimasukkan ke dalam labu takar 10 mL, dan ditambahkan pelarut metanol hingga tanda terra.

##### 4. Persiapan kupon baja lunak

Kupon baja yang digunakan untuk metode *wheel test* dengan ukuran (2 × 1 × 0,1) cm diampelas menggunakan kertas ampelas dengan ukuran grit 60, 80, 200, 400, 600, 800, 1000, dan 1200 secara berurutan, selanjutnya dibilas dengan etanol.

### 3.3.5. Metode *wheel test*

Kupon baja yang telah diampelas ditimbang menggunakan neraca analitik untuk mengetahui berat awalnya, kemudian diukur menggunakan jangka sorong, dan dihitung luas permukaannya. Botol gelas sebanyak 7 buah diisi larutan medium korosif masing-masing sebanyak 175 mL, kemudian dialiri gas CO<sub>2</sub> selama 45 menit. Botol 1 berisi larutan medium korosif sebagai blanko, dan botol 2-7 masing-masing ditambahkan larutan inhibitor dengan konsentrasi 150 ppm

menggunakan mikropipet, selanjutnya kupon baja yang telah diketahui luas dan beratnya dimasukkan ke dalam masing-masing botol, kemudian aliran gas CO<sub>2</sub> dihentikan dan botol segera ditutup. Botol-botol didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang, cara yang sama dilakukan hingga 3 kali pengulangan.

Kupon baja yang telah didiamkan selanjutnya dikeluarkan dari botol, dan dicuci dengan *clarke's solution* untuk menghilangkan produk korosi yang terbentuk, selanjutnya kupon baja dicuci dengan akuades dan terakhir dibilas dengan etanol.

Kupon baja kemudian dikeringkan dan ditimbang berat akhirnya. Laju korosi dihitung menggunakan Persamaan (17), dan persen proteksi dihitung menggunakan Persamaan (18).

### **3.3.6. Analisis permukaan baja dengan SEM**

Analisis permukaan sampel baja lunak menggunakan SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi permukaan baja, sehingga dapat diamati korosi yang terjadi, dan pengaruh inhibitor korosi pada permukaan baja. Adapun sampel yang diamati yaitu sampel baja lunak tanpa perendaman dengan larutan korosif, sampel baja lunak dengan perendaman dalam medium korosif (blanko), dan sampel baja dengan penambahan inhibitor.

## V. SIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Zeolit-A hasil sintesis memiliki karakteristik yang sesuai dengan standar IZA, berdasarkan karakterisasi dengan XRD menunjukkan pola difraksi pada daerah  $2\theta$  yang sesuai antara  $7^\circ$ - $34^\circ$ , dan mikrograf hasil SEM menunjukkan morfologi zeolit-A berbentuk kubus.
2. Natrium metoksida hasil sintesis memiliki karakteristik yang mirip dengan hasil yang dilaporkan oleh (Chandran *et al.*, 2006), berdasarkan karakterisasi dengan FTIR bahwa terbentuk vibrasi C-H dan adanya getaran C-O, karakterisasi dengan XRD terdapat puncak difraksi pada daerah  $2\theta$  yang sesuai antara  $11^\circ$  -  $49^\circ$ , dan mikrograf hasil SEM menunjukkan morfologi natrium metoksida belum berbentuk tetragonal secara sempurna.
3. Zeolit-A memiliki aktivitas katalitik yang baik dalam reaksi transesterifikasi menghasilkan metil ester dengan bau khas, dan diperoleh konversi 100%.
4. Katalis natrium metoksida memiliki aktivitas yang baik dalam reaksi amidasi untuk metode refluks, dan katalis zeolit-A untuk metode hidrotermal.
5. Hasil analisis FTIR menunjukkan telah terjadi reaksi transesterifikasi membentuk metil ester ditandai adanya vibrasi gugus C=O ester pada bilangan gelombang  $1744\text{ cm}^{-1}$ , dan pada bilangan gelombang  $723\text{ cm}^{-1}$  muncul serapan yang menunjukkan gugus  $(\text{CH}_2)_n$  yang merupakan rantai dari metil ester. Hasil analisis FTIR juga menunjukkan terdapat senyawa nitrogen, ditandai adanya pergeseran bilangan gelombang C=O ester pada  $1744\text{ cm}^{-1}$  menjadi

1617  $\text{cm}^{-1}$  yang merupakan ciri khas untuk vibrasi C=O amida, dan pada bilangan gelombang 1051  $\text{cm}^{-1}$  merupakan tarikan ulur dari C-N.

6. Hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa produk target berhasil diperoleh yaitu metil ester dengan kandungan tertinggi metil linoleat 45,21% dan metil palmitat 35,64% pada produk transesterifikasi, dan kandungan senyawa nitrogen tertinggi dengan metode refluks adalah FR1 (63,7%) yaitu dengan penambahan katalis natrium metoksida, sedangkan produk amidasi metode hidrotermal kandungan senyawa nitrogen tertinggi adalah FA2 (17,96%) yaitu dengan penambahan katalis zeolit-A.
7. Aktivitas inhibitor korosi terbaik ditunjukkan oleh FR1 dengan persen proteksi sebesar 96,85% dan secara visual analisis SEM menunjukkan morfologi permukaan baja yang terlindungi dengan baik.

## 5.2. Saran

Beberapa hal yang disarankan pada penelitian selanjutnya antara lain:

1. Melakukan sintesis natrium metoksida dengan metode lain, baik menggunakan bahan yang berbeda atau kondisi yang berbeda, sehingga diharapkan menghasilkan katalis dengan persen kristalinitas yang tinggi.
2. Mencari kondisi reaksi amidasi terbaik untuk metode hidrotermal dengan memvariasikan beberapa parameter seperti perbandingan reaktan, suhu, waktu reaksi, serta pengadukan, sehingga diharapkan memperoleh hasil senyawa nitrogen yang lebih tinggi.
3. Uji aktivitas inhibitor korosi pada penelitian selanjutnya diharapkan dilakukan dengan metode lain yaitu elektrokimia; EIS dan Tafel, serta mengkaji termodinamika, dan adsorpsi yang terjadi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adewayuni, A. 2014. Synthesis and Surface-Active Property of Diethanolamide and Epoxidised Diethanolamide Surfactant from the Seed Oil of *Baphia Nitida*. *Arab. J. Chem.* 12(7): 1545-1551.
- Alaba, O., Johnson, O., and Leke, E. 2020. Thermodynamics and Adsorption Study of the Corrosion Inhibition of Mild Steel by *Euphorbia Heterophylla* L. Extract in 1,5 M HCl. *Result in Materials.* 5: 74-100.
- Alfarisa, S., Rifai, D.A., dan Toruan, P.L. 2018. Studi Difraksi Sinar-X Struktur Nano Seng Oksida (ZnO) X-ray Diffraction Study on ZnO Nanostructures. *Risalah Fisika.* 2(2): 53-57.
- Al-Shihry, S. S., Sayed, A. R., and El-lateef, H. M. A. 2020. Design and Assessment of a Novel Poly (urethane-semicarbazones) Containing Thiadiazoles on the Backbone of the Polymers as Inhibitors for Steel Pipelines Corrosion in CO<sub>2</sub> Saturated Oil Field Water. *Journal of Molecular Structure.* 1201: 127-223.
- Al-Turkustani, A. M. 2013. Thermodynamic, Chemical and Electrochemical Investigation of *Pandanus tectorius* Extract as Corrosion Inhibitor for Steel in Sulfuric Acid Solutions. *EurJChem.* 4(3): 303-310
- Arenas-Piedrahita, J. C., Montes-Garcia, P., Mendoza-Rangel, J. M., and Calvo, H. Z. L. 2016. Mechanical and Durability Properties of Mortars Prepared with Untreated Sugarcane Bagasse Ash and Untreated Fly Ash. *Construction and Building Materials.* 105: 69-81.
- Arslan, T., Kandemirli, F., Ebenso, E. E., Love, I., and Alemu, H. 2009. Quantum Chemical Studies on the Corrosion Inhibition of Some Sulphonamides on Mild Steel in Acidic Medium. *Corrosion Science.* 51 (1): 35-47.

- Azhara, S.U., Setianto, dan Hidayat, D. 2016. Simulasi XRD Zinc Oxide Terdoping Menggunakan Metode Laue. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*. 06(02): 7-13.
- Bailey. 2005. Handbook of Industrial Oil and Fat Products, John Wiley & Sons. *Inc. Publication*. Edition VI, Vol 6A.
- Bernardini, E. 1983. Vegetables Oils and Fats Processing. *Interstampa*. 2.
- Bunaciu, A.A., Udriștioiu, E.G., and Aboul-enein, H.Y. 2015. X-Ray Diffraction : Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 290-299.
- Calderon, J.P., Muñoz, E.M.R., Ledesma, C.P., Diaz, M.C., Escalera, L., M., M., D., La, Canto, J., and Gomez, L.M. 2017. Sustainable Development of Palm Oil: Synthesis and Electrochemical Performance of Corrosion Inhibitors. *Journal of Electrochemical Science and Technology*. 8(2): 133-145.
- Calero, J., Luna, D., Luna, C., Bautista, F. M., Romero, A. A., Posadillo, A., and Estevez, R. 2020. Optimization by Response Surface Methodology of the Reaction Conditions in 1,3-Selective Transesterification of Sunflower Oil, by Using CaO as Heterogeneous Catalyst. *J. Mol.Catal.* 484: 1-6
- Chandran, K., Nithya, R., Sankaran, K., Gopalan, A., and Ganesan, V. 2006. Synthesis and Characterization of Sodium Alkoxides. *Indian Academy of Sciences*. 29 (2): 173-179.
- Chen, S., Singh, A., Wang, Y., Liu, W., Deng, K., and Lin, Y. 2017. Inhibition effect of Ilex Kudingcha C. J. Tseng (Kudingcha) Extract on J55 Steel in 3,5wt% NaCl Solution Saturated with CO<sub>2</sub>. *Electrochemical Science*. 12: 782-796.
- Choudhary, O.P. and Priyanka. 2017. Scanning Electron Microscope: Advantages and Disadvantages in Imaging Components. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 6(5): 1877-1882.
- Dachriyanus. 2004. *Analisis Struktur Senyawa Organik Secara Spektroskopi*. LPTIK Universitas Andalas. Padang.

- De Garmo, P. 1969. *Materials and Processes in Manufacturing*. Mac Millian Company. New York.
- Dianto, F., Efendi, D., dan Wachjar, A. 2017. Pengelolaan Panen Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis Jacq.*) Pelantaran Agro Estate, Kotawaringin Timur, Kalimantan Tengah. *Bul. Agrohorti*. 5(3): 410-417.
- Driouch, M. B. M., Hammouti, M. S. B., and Touhami, M. E. 2018. Kinetic-Thermodynamic Properties of a Polyacrylamide on Corrosion Inhibition for C-Steel in 1,0 M HCl Medium: Part 2. *Journal of Bio and Tribo-Corrosion*. 4 (34): 1-13.
- El-Lateef, H. M. A., Abbasov, V. M., Aliyeva, L. I., and Khalaf, M. 2015. Novel Naphthenate Surfactants Based on Petroleum Acids and Nitrogenous Bases as Corrosion Inhibitors for C1018-type Mild Steel in CO<sub>2</sub> Saturated Brine. *Egyptian Journal of Petroleum*. 24(2): 175-182.
- Estiaty, L. M. 2013. Kesetimbangan dan Kinetika Adsorpsi Io Cu<sup>2+</sup> pada Zeolit-H. *Geotechnology Research*. 2(2). 127-141.
- Giraldo, S. Y., Rios, L. A., and Suárez, N. 2013. Comparison of Glycerol Ketals, Glycerol Acetates and Branched Alcohol-Derived Fatty Esters as Cold-Flow Improvers for Palm Biodiesel. *Fuel*. 108: 709-714.
- Gougazeh, M. and Buhl, J.C. 2014. Synthesis and Characterization of Zeolite A by Hydrothermal Transformation of Natural Jordanian Kaolin. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*. 15(1): 35–42.
- Goni, L.K.M.O. and Mazumder, M.A.J. 2019. Green Corrosion Inhibitors. *in Corrosion Inhibitors*. 1–18.
- Guo, L., Obot, I. B., Zheng, X., Shen, X., Qiang, Y., Kaya, S., and Kaya, C. 2017. Theoretical Insight Into An Empirical Rule About Organic Corrosion Inhibitors Containing Nitrogen, Oxygen, and Sulfur Atoms. *Appl. Surf. Sci.* 406: 301-306.
- Hassannejad, H., and Nouri, A. 2018. Sunflower Seed Hull Extract as a Novel Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in HCl Solution. *Journal of*



*Molecular Liquids*. 254: 377-382.

Hatch, G.B., and Nathan, C.C., 1984. Corrosion Inhibitor. *National Association for Corrosion Engineers*. 126-147.

Herlambang, D.M. 2018. *Evaluasi Kinerja n -Stearoiletanolamida sebagai Inhibitor Korosi dengan Teknik Polarisasi Potensiodinamik*. (Skripsi). . Institut Pertanian Bogor.

Herliana, Ilim, Simanjuntak, W., and Pandiangan, K. D. 2021. Transesterification of Coconut Oil (*Cocos nucifera* L.) Into Biodiesel Using Zeolite-A Catalyst Based On Rice Husk Silica and Aluminum Foil. *J. Phys. Conf. Ser.* 1751: 16.

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., Khoeroni, A. M., Sinaga, A. D., Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., and Ilim, I. 2023. Conversion of Palm Oil (*Elaeis guineensis* J.) into Nitrogen Compounds using Zeolite-A as Catalyst. *AIP. Proceeding*, INPRESS.

Hou, B., Li, X., Ma, X., Du, C., Zhang, D., and Zheng, M. 2017. The Cost of Corrosion in China. *Npj Mater Degrad*, 1:4.

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 CO<sub>2</sub> Saturated Brine Solution. *Indonesian Journal of Chemistry*. 16(2): 198-207.

Ilim, I., Bahri, S., Simanjuntak, W., Syah, Y. M., Bundjali, B., and Buchari, B. 2017. Performance of Oligomer 4-Vinyl Pyridine as a Carbon Dioxide Corrosion Inhibitor of Mild Steel. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 8(7): 2381-2390.

Ilim. 2017. Oligomer 4-Vinilpiridin Sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak Dalam Larutan NaCl 3% jenuh dengan karbon Dioksida. (Disertasi). Institut Teknologi Bandung. Bandung. 55-94.

- Ilim, I., Fitriani, R., Prabowo, T., Bahri, S., Marjunus, R., and Simanjuntak, W. 2021. *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 10 (1): 284-301.
- 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. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 11, no. 4, 1639–1651
- Istadi, I., Anggoro, D. D., Buchori, L., Rahmawati, D. A., and Intaningrum, D. 2015. Active Acid Catalyst of Sulphated Zinc Oxide for Transesterification of Soybean Oil with Methanol to Biodiesel. *Procedia Environmental Sciences.* 23: 385–393.
- Ituen, E., Akaranta, O., and James, A. O. 2017. Evaluation of Performance of Corrosion Inhibitors using Adsorption Isotherm Models: An Overview. *Chemical Science International Journal.* 18 (1): 1-43.
- IZA (*International Zeolite Association*). 2007. Framework Type LTA. <http://asia.iza-structure.org/IZA-SC/framework.php?STC=MFI>.
- Javadian, S., Darbasizadeh, B., Yousefi, A., Ektefa, F., and Dalir, N. 2016. Dye-surfactant Aggregates as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in NaCl Medium: Experimental and Theoretical Studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.* 1-11.
- Jimmy. 2012. Kinetika Reaksi Transesterifikasi Minyak sawit. *Jurnal Teknik Kimia.* 7(1): 12-17.
- Johnson, M.L., and Tomson, M.B. 1991. Ferrous Carbonate Precipitation Kinetics and Its Impact CO<sub>2</sub> Corrosion. Corrosion/91. NACE, Houston, TX, 286.
- Jones, D.A., 1996: Principles and Prevention of Corrosion. New Jersey. Prentice-Hall.
- Kahyarian, A., Singer, M., and Nestic, S. 2016. Modeling of Uniform CO<sub>2</sub> Corrosion of Mild Steel in Gas Transportation Systems: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering.* 29: 530-549.

- Kardiman, Marno, 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.
- Keles, H., Emir, D.M., and Keles, M. 2015. A Comparative Study of the Corrosion Inhibition of Low Carbon Steel in HCl Solution by an Imine Compound and Its Cobalt Complex Hülya. *Corrosion Science*. 101: 19-31.
- Khasanah, N., Daniel, dan Marliana, E. 2019. Sintesis Surfaktan Dietanolamida dari Metil Ester Minyak Biji Bunga Matahari (*Helianthus annuus*. L) Melalui Reaksi Amidasi. *Jurnal Kimia Mulawarman*. 16(2): 83–89.
- Khoeroni, A. M. 2021. Alkanolamida Berbasis Minyak Sawit sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak dalam Medium Korosif yang Mengandung Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>). (Skripsi). Universitas Lampung.
- Kirk, R. and Othmer, D.F. 1986. *Encyclopedia of Chemical Technology* Interscience Publisher a Division of John Wiley & Son. 1 (4).
- Koch, G. 2017. 1-cost of Corrosion in: El-sherik AMBT-T in O and GGR and T. Boston. *Woodhead Publ. Ser. Energy*.
- Koteeswaran, M. 2010. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Corrosion in Oil Pipelines. (Thesis). University of Stavanger. Stavanger. 16-69.
- Kumar, D. and Ali, A. 2015. Direct Synthesis of Fatty Acid Alkanolamides and Fatty Acid Alkyl Esters from High Free Fatty Acid Containing Triglycerides as Lubricity Improvers Using Heterogeneous Catalyst. *Fuel*. 159: 845-853.
- Kumar, S. A. A., Sakthinathan, G., Vignesh, R., Rajesh Banu, J., and AlMuhtaseb, A. H. 2019. Optimized Transesterification Reaction for Efficient Biodiesel Production Using Indian Oil Sardine Fish as Feedstock. *Fuel*. 253: 921-929.
- Larabi, L., Harek, Y., Traisnel, M., and Mansri, A. 2004. Synergistic Influence of Poly (4-vinylpyridine) and Potassium Iodide on Inhibition of Corrosion of Mild Steel in 1 M HCl. *Journal of Applied Electrochemistry*. 34: 833-839.

- Li, D., Chen, D., and Zhu, X. 2011. Reduction in Time Required for Synthesis of High Specific Surface Area Silica from Pyrolyzed Rice Husk by Precipitation at Low pH. *Bioresource Technology*. 102: 7001-7003.
- Lokhande, A. R., Patil, V. S., and Wani, K. S. 2016. Kinetic Study on Synthesis of Alkanolamides of Fatty Acids of Mangokernel Oil (*Mangifera Indica* Linn). *IJEDR*. 4(4): 444-450.
- Lopes, C. de C.A., Limirio, P.H.J.O., Novais, V.R., and Dechichi, P. 2018. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Application Chemical Characterization of Enamel, Dentin and Bone. *In Applied Spectroscopy Reviews*. 53(9): 747–769.
- Mancini, A., Imperlini, E., Nigro, E., Montagnese, C., Daniele, A., Orru, S., and Buono, P. 2015. Biological and Nutritional Properties of Palm Oil and Palmitic Acid: Effects on Health. *Molecules*. 20(9): 17339-17361.
- Marrugo-Hernandez, J. J., Prinsloo, R., Fischer, J., and Marriott, R. A. 2019. Downhole Chemical Degradation of Corrosion Inhibitors Commonly Used in Shale Gas Fracturing and Stimulation. *J. Nat. Gas. Sci. Eng.* 72:1-5.
- Maulinda, L., Nasrul, Z.A., dan Nurbaiti. 2016. Hidrolisis Asam Lemak dari Buah Sawit Sisa Sortiran. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*. 5(1): 1-16.
- McLafferty. 1989. Registry of Mass Spectral Data. John Wiley and Sons Inc. New York.
- 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* (H.B.K) Cortés. *Plos One*. 9(5): 1-13.
- Moradi, F. 2019. Smart Self-Powered Patch to put an end to €2.3 Trillion Bill caused by Rust Worldwide.
- 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*. 1–12.

- Nordsveen, M. S., Nesi, R. N., and Stangelend, A. 2003. A mechanistic model for carbon dioxide corrosion of mild steel in the presence of protective iron carbonate films- Part 1: Theory and verification, *corrosion*, 59(5).
- Nuraini, L., Priyotomo, G., Nasoetion, R., dan Harsisto. 2016. Studi Inhibitor Korosi Berbasis Imidazoline Salt Pada Brine Water di Pipa Penyalur Minyak Mentah. *Metalurgi*. 31(2): 87-94.
- Oblonsky, L. J., hesnut, G. R. and Devine, T. M. 1995. Absorption of Octadecyldimethylbenzylammonium Chloride to Two Carbon Steel Microstructures as Observed with Surface-Enhanced Raman Spectroscopy, *Corrosion*. 51 (21), 891-900.
- 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. *J. Phys. Conf. Ser.* 1338: 1-9.
- Purnama, E. F., Nikmatin, S., dan Langenati, R. 2006. Pengaruh Suhu Reaksi Terhadap Derajat Kristalinitas dan Komposisi Hidroksiapatit Dibuat Dengan Media Air dan Cairan Tubuh Buatan (Synthetic Body Fluid). *JUSAMI*. 154162.
- Rahayu, P.P., Sundari, C.D. D., and Farida, I. 2018. Corrosion Inhibition Using Lignin of Sugarcane Bagasse. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 434(1): 1-5.
- Rahman, M. M., Hasnida, N., and Nik, W. B. W. 2009. Preparation of Zeolite Y Using Local Raw Material Rice Husk as a Silica Source. *Journal of Scientific Research*. 1(2): 285-291.
- Rasyida, K., Kuswandi, B., dan Kristiningrum, N. 2014. Deteksi Kemurnian Air Zamzam Menggunakan Metode Spektrofotometri Fourier Transform Infrared (FTIR) dan Kemometrik. *E-Jurnal Pustaka Kesehatan*. 2(2): 320-326.
- Ramos-Negron, O. J., Escobar-Jimenez, R. F., Arellano-Perez, J. H., UruchurtuChavarín, J., Gomez-Aguilar, J. F., and Lucio-García, M. A. 2019. Electrochemical Noise Analysis to Identify the Corrosion Type Using the Stockwell Transform and the Shannon Energy Part II. *J. Electroanal. Chem.* 855: 1-14.

- Roberge, P.R. 1999. Handbook of Corrosion Engineering Library of Congress. In *Corrosion*.
- Sari, F., Susanto, B.H., and Bismo, S. 2018. The Potential Utilization of Coconut Oil and Palm Oil as Raw Material of Alkanolamide Under Alkaline Conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1-6.
- Saydut, A., Erdogan, S., Kafadar, A. B., Kaya, C., and Hamamci, C. 2016. Process Optimization for Production of Biodiesel from Hazelnut Oil, Sunflower Oil and Their Hybrid Feedstock. *Fuel*. 183: 512-517.
- Selim, M.M., EL-Mekawi, D.M., Aboelenin, R.M.M., Sayed Ahmed, S.A., and Mohamed, G.M. 2017. Preparation and Characterization of Na-A Zeolite from Aluminum Scrub and Commercial Sodium Silicate for the Removal of Cd<sup>2+</sup> from Water. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*. 24: 19-25.
- Sembiring, S. and Simanjuntak, W. 2012. X-ray Diffraction Phase Analyses of Mullite Derived from Rice Husk Silica. *Makara J. Sci*. 16/2: 77-82.
- Setiyono, H. 2006. Investigasi Analitis dan Eksperimental Kekuatan Profil Baja Ringan Terhadap Interaksi Local dan Global Buckling. *JUSAMI*. 23-28.
- Shang, Z., and Zhu, J. 2021. Overview on Plant Extrats as Green Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Fields. *Journal of Materials Research and Technology*. 15: 5078-5094.
- Sharma, A. K., Saxena, M., and Sharma, R. 2018. Synthesis, Spectroscopic and Biocidal Activities of Environmentally Safe Agrochemicals. *Journal Biochem Tech*. 9(1): 8-16.
- Simanjuntak, W., Sembiring, S., Pandiangan, K.D., Syani, F., and Situmeang, 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. *Orient. J. Chem*. 32(4): 2079-2085.
- Simanjuntak, W., Sembiring, S., and Sebayang, K. 2012. Effect of Pyrolysis Temperatures on Composition and Electrical Conductivity of Carbosil Prepared from Rice Husk. *IJC*. 12(2): 119-125.

- Singh, A., Ebenso, E. E., and Quraishi, M. A. 2012. Corrosion Inhibition of Carbon Steel in HCl Solution by Some Plant Extracts. *Int. J. Corros.* 1-20.
- Sjahfirdi, L., Aldi, N., Maheshwari, H., dan Astuti, P. 2015. Aplikasi Fourier Transform Infrared (FTIR) dan Pengamatan Pembengkakan Genital pada Spesies Primata, Lutung Jawa (*Trachypithecus auratus*) untuk Mendeteksi Masa Subur. *Jurnal Kedokteran Hewan - Indonesian Journal of Veterinary Sciences.* 9(2): 156-160.
- Sugeng, M., Ismail, F. M., dan Utomo, J. P. 2022. Analisis Perbedaan Laju Korosi Hasil Pengujian *Weight Loss* dan Polaritasi Pada Pipa dengan Pengujian Korosi Standar Astm G59 dan Astm G31. *Jurnal Tera.* 2: 48-56.
- Suryaningsih, S., Alamsyah, W., Nurhilal, O., dan Permana, D.A. 2015. Analisis Pengaruh Waktu Injeksi Gas CO<sub>2</sub> Terhadap Laju Korosi Baja Karbon Api 5L Grade B dalam Larutan NaCl 3,5% dan H<sub>2</sub>S. *Jurnal Material dan Energi Indonesia.* 05(01): 12-16.
- Surya, I., Ismail, H., and Azura, A. R. 2013. Alkanolamide as an Accelerator, Filler-Dispersant and a Plasticizer in Silica-Filled Natural Rubber Compounds. *Polymer Testing.* 32: 1313-1321.
- Syahra, D. M. T., dan Munasir. 2015. Analisis Sifat Korosi Material Pelapis PANi-SiO<sub>2</sub>/cat Pada Medium NaCl 1M dengan Metode EIS. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia.* 04: 101-105.
- Tait, W.S. 1994. *An Introduction to Electrochemical Corrosion Testing for Practicing Engineers and Scientists.* Pair O Docs Publications. Wisconsin.
- Talkhan, A. G., Benamor, A., Nasser, M. S., Qiblawey, H., El-Tayeb, A. S., and El-Marsafy. 2019. Corrosion Study of Carbon Steel in CO<sub>2</sub> Loaded Solution of N-methyldiethanolamine and L-arginine Mixtures. *Journal of Electroanalytical Chemistry.* 837:10-21.
- Tang, L., Mu, G., and Liu, G. 2003. The Effect of Neutral Red on the Corrosion Inhibition of Cold Rolled Steel in 1,0 M Hydrochloric Acid. *Corrosion Science.* 45: 2251-2262.
- Tang, Z. 2019. A Review of Corrosion Inhibitors for Rust Preventative Fluids.

*Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 23: 1-13.

- Taufiq-Yap, Y.H., Abdullah, N. F., and Basri, M. 2011. Biodiesel Production via Transesterification of Palm Oil Using NaOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts. *Sains Malaysiana*. 40(6): 587-594.
- Vidal, C. B., Raulino, G. S. C., Barros, A. L., Lima, A. C. A., Ribeiro, J. P., Pires, M. J. R., and Nascimento, R. F. 2012. BTEX Removal from Aqueous Solution by HDTMA Modified Zeolite. *Journal of Environmental Management*. 112: 178-185.
- Videm, K. and Dungstad, A. 1989. Corrosion of Carbon Steel in an Aqueous Carbon Dioxide Environment - Part 1. *Solution Effects*. 28 (3), 63.
- Wang, C. L. J., Wang, L., and Sun, X. 2008. Influence of NaOH Concentrations on Synthesis of Pure-Form Zeolite A From Fly Ash Using Two-Stage Method. *Journal of Hazardous Materials*. 155: 58-64.
- Wang, J., Meng, L., Fan, Z., Liu, Q., and Tong, Z. 2019. Mechanism and Modelling of CO<sub>2</sub> Corrosion on Downhole Tools. *Royal Society Open Science*. 6(4): 1-12.
- Widharto, S. 1999. *Karat dan Pencegahannya*. Pradnya Paramitha. Jakarta.
- 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.
- Yanuar, A. P., Pratikno, H., dan Titah, H. S. 2016. Pengaruh Penambahan Inhibitor Alami terhadap Laju Korosi pada Material Pipa dalam Larutan Air Laut Buatan. *Jurnal Teknik ITS*. 5(2): 297- 302.
- Zaafarany, I., and Abdallah, M. 2010. Ethoxylated Fatty Amide as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution. *International Journal of Electrochemical Science*. 5(1): 18-28.
- Zhang, Q. H., Hou, B.S., Li, Y. Y., Wang, X., Liu, H. F., and Zang, G. A. 2021. Two Amino Acid Derivatives as High Efficient Green Inhibitors for the Corrosion of Carbon Steel in CO<sub>2</sub>-Saturated Formation Water. *Corrosion*



*Science*. 189.

Zhao, S., Niu, S., Yu, H., Ning, Y., Zhang, X., Li, X., Zhang, Y., Lu, C., and Han, K. 2019. Experimental Investigation on Biodiesel Production Through Transesterification Promoted by the La-dolomite Catalyst. *Fuel*. 257: 1-9.

Zhou, X., and Zhou, X. I. N. 2014. The Unit Problem in the Thermodynamic Calculation of Adsorption using the Langmuir Equation. *Chemistry Engineering Community*. 22: 1459-1467.

Zuwanna, I., Riza, M., and Aprilia, S. 2021. The Impact of Solvent Concentration on the Characteristic of Silica from Rice Husk Ash Using Sol Gel Method. *Materials and Science and Engineering*. 1087: 1-7.