



Analisis Stabilisasi Bioetanol Terhadap Korosi Logam Menggunakan Inhibitor Alami Berbasis Minyak Pala

Hernita Zaida Nisrina^{1✉}, Nazwa Alya¹, Rizky Setiawan Ramadhan¹

⁽¹⁾Program Studi Teknik Industri, Universitas Al Azhar Medan

DOI: 10.31004/jutin.v9i1.54907

✉ Corresponding author:

[\[hernitazaidanisrina@gmail.com\]](mailto:hernitazaidanisrina@gmail.com)

Article Info	Abstrak
Kata kunci: minyak atsiri pala; inhibitor korosi hijau; baja karbon; bioetanol; efisiensi inhibisi; adsorpsi Langmuir; elektrokimia	Penelitian ini mengevaluasi potensi minyak atsiri pala sebagai inhibitor korosi ramah lingkungan untuk baja karbon dalam media bioetanol. Analisis GC-MS mengidentifikasi 23 senyawa dengan komponen mayor meliputi sabinene (21,3%), α-pinene (18,7%), β-pinene (12,4%), myristicin (8,9%), dan limonene (7,2%). Pengujian weight loss selama 90 hari menunjukkan sistem kontrol memiliki laju korosi 2,847 mm/tahun, yang menurun signifikan hingga 0,412 mm/tahun dengan penambahan 750 ppm minyak pala, menghasilkan efisiensi inhibisi optimal 85,5%. Peningkatan konsentrasi hingga 1000 ppm tidak memberikan peningkatan signifikan, mengindikasikan saturasi adsorpsi pada permukaan logam. Karakterisasi elektrokimia melalui kurva polarisasi potensiodinamik menunjukkan pergeseran potensial korosi dari -0,687 V menjadi -0,523 V dan penurunan densitas arus korosi dari 48,3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ menjadi 6,8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pada konsentrasi optimal, mengkonfirmasi minyak pala sebagai inhibitor tipe campuran. Spektroskopi impedansi elektrokimia memperlihatkan peningkatan resistansi polarisasi dari 245 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ menjadi 1.687 $\Omega\cdot\text{cm}^2$, sejalan dengan data weight loss
Keywords: Nutmeg Essential Oil; Green Corrosion Inhibitor; Carbon Steel; Bioethanol; Inhibition Efficiency; Langmuir Adsorption; Electrochemistry	Abstract <i>This research evaluates the potential of nutmeg essential oil as an environmentally friendly corrosion inhibitor for carbon steel in a bioethanol medium. GC-MS analysis identified 23 compounds, with the major components including sabinene (21.3%), α-pinene (18.7%), β-pinene (12.4%), myristicin (8.9%), and limonene (7.2%). Weight loss testing over 90 days showed the control system had a corrosion rate of 2.847 mm/year, which significantly decreased to 0.412 mm/year with the addition of 750 ppm nutmeg oil, resulting in an optimal inhibition efficiency of 85.5%. Increasing the concentration to 1000 ppm did not provide a significant improvement, indicating adsorption saturation on the metal surface. Electrochemical characterization thru potentiodynamic polarization curves showed a shift in corrosion potential from -0.687 V to -0.523 V and a decrease in corrosion current density from 48.3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ to 6.8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ at the optimal concentration, confirming</i>

nutmeg oil as a mixed-type inhibitor. Electrochemical impedance spectroscopy showed an increase in polarization resistance from 245 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ to 1,687 $\Omega\cdot\text{cm}^2$, consistent with the weight loss data.

1. PENDAHULUAN

Peralihan global menuju energi terbarukan mendorong peningkatan pemanfaatan bioetanol sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan. Bioetanol yang diproduksi dari biomassa terbarukan memiliki keunggulan berupa emisi gas rumah kaca yang lebih rendah, sifat biodegradable, serta potensi keberlanjutan jangka panjang dibandingkan bahan bakar fosil konvensional (Jain & Kumar, 2026). Oleh karena itu, bioetanol dipandang sebagai salah satu solusi strategis dalam mendukung transisi energi berkelanjutan.

Meskipun demikian, penerapan bioetanol dalam sistem bahan bakar masih menghadapi tantangan teknis, terutama terkait stabilitas dan sifat korosifnya terhadap material logam. Bioetanol bersifat higroskopis, memiliki kandungan air dan keasaman yang relatif tinggi, serta mampu melarutkan kontaminan yang dapat memicu reaksi elektrokimia pada permukaan logam (Ihamdane et al., 2023) : (H. Zhang, Yu, et al., 2026). Kondisi ini menyebabkan peningkatan laju korosi pada logam-logam yang umum digunakan dalam tangki penyimpanan, sistem perpipaan, dan komponen mesin, seperti baja karbon, aluminium, dan tembaga.

Fenomena korosi ini tidak hanya mengakibatkan degradasi material dan penurunan integritas struktural sistem penyimpanan, tetapi juga dapat mengontaminasi bahan bakar itu sendiri, menurunkan kualitas dan efisiensi pembakaran (Chen et al., 2026). Studi terdahulu menunjukkan bahwa logam-logam seperti baja karbon, aluminium, dan tembaga mengalami laju korosi yang signifikan ketika terpapar bioetanol dalam periode penyimpanan jangka panjang, sehingga memerlukan strategi mitigasi yang efektif dan ekonomis (Zufri Hasrudy Siregar, et al., 2023).

Penggunaan inhibitor korosi merupakan salah satu metode yang paling efektif untuk mengendalikan laju korosi. Namun, inhibitor korosi sintetik yang umum digunakan memiliki keterbatasan berupa toksisitas tinggi, potensi bioakumulasi, serta dampak negatif terhadap lingkungan (Ihamdane et al., 2023). Sejalan dengan prinsip green chemistry, penelitian terkini berfokus pada pengembangan inhibitor korosi alami berbasis bahan hayati yang bersifat ramah lingkungan, biodegradable, mudah diperoleh, dan relatif ekonomis (H. Zhang, Lin, et al., 2026).

Inhibitor alami bekerja melalui mekanisme adsorpsi senyawa organik pada permukaan logam, membentuk lapisan pelindung yang menghambat reaksi oksidasi dan proses elektrokimia penyebab korosi (Km et al., 2024). Salah satu bahan alami yang berpotensi digunakan sebagai inhibitor korosi adalah minyak atsiri pala (*Myristica fragrans* Houtt) (Amin et al., 2025). Minyak pala mengandung senyawa bioaktif seperti myristicin, elemicin, safrole, dan eugenol yang memiliki gugus fungsi heteroatom dan struktur aromatik, sehingga mampu berinteraksi dengan permukaan logam melalui pembentukan kompleks koordinasi dan adsorpsi fisik maupun kimia (Xie et al., 2026). Selain itu, sifat hidrofobik senyawa terpenoid dalam minyak pala berperan sebagai penghalang terhadap penetrasi air, oksigen terlarut, dan ion agresif yang memicu korosi.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji efektivitas inhibitor alami dalam media korosif berair dan asam, kajian mengenai stabilisasi bioetanol serta pengaruh inhibitor alami berbasis minyak pala terhadap laju korosi logam masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilisasi bioetanol terhadap korosi logam menggunakan inhibitor alami berbasis minyak pala, sebagai upaya pengembangan sistem bahan bakar bioetanol yang lebih stabil, aman, dan berkelanjutan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan desain eksperimental kuantitatif dengan pendekatan studi literatur sistematis untuk membangun kerangka teoritis dan metodologis. Penelitian dilaksanakan melalui tiga tahapan utama yaitu kajian pustaka komprehensif, analisis eksperimental, dan sintesis hasil untuk formulasi rekomendasi aplikatif. Kajian literatur dilakukan secara sistematis menggunakan database ilmiah internasional termasuk ScienceDirect, Scopus, Web of Science, dan Google Scholar dengan kata kunci "bioethanol corrosion", "natural corrosion inhibitor", "essential oil inhibitor", "nutmeg oil", dan "green inhibitor". Kriteria inklusi mencakup publikasi dalam rentang waktu 2014-2024, artikel peer-reviewed, dan relevansi langsung dengan korosi bioetanol atau inhibitor berbasis minyak atsiri. Dari proses screening awal yang menghasilkan 187 artikel, dilakukan seleksi berdasarkan kriteria kualitas metodologi dan relevansi topik sehingga diperoleh 45 artikel primer untuk analisis mendalam

(Zufri Hasrudy Siregar 1*, Mawardi 2 Riana Puspita 3, Muhammad Fazri 4, Refiza 5, Muhammad Irwansyah 6 & 1, 2023).

Literature review difokuskan pada empat aspek kritis yaitu mekanisme korosi bioetanol pada berbagai jenis logam, karakteristik fisikokimia minyak atsiri sebagai inhibitor, metode evaluasi efisiensi inhibisi, dan studi kasus aplikasi inhibitor alami dalam sistem bahan bakar. Analisis komparatif dilakukan untuk mengidentifikasi gap penelitian, terutama terkait aplikasi spesifik minyak pala dan stabilitas jangka panjangnya dalam bioetanol. Bioetanol fuel grade dengan kemurnian 99,5% digunakan sebagai media korosif. Spesimen logam berupa plat baja karbon AISI 1020 dengan dimensi $50 \times 25 \times 3$ mm dipilih sebagai material uji karena penggunaannya yang luas dalam infrastruktur penyimpanan bahan bakar. Minyak atsiri pala diperoleh melalui destilasi uap dari biji pala kering, kemudian dikarakterisasi menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry untuk identifikasi komponen bioaktif utama (Ihamdane et al., 2023).

Preparasi spesimen logam meliputi pengampelasan bertahap menggunakan kertas ampelas grit 400, 800, 1000, dan 1200, pencucian dengan aquades, degreasing menggunakan aseton, dan pengeringan dalam desikator. Spesimen kemudian ditimbang menggunakan neraca analitik dengan presisi 0,0001 gram untuk menentukan massa awal sebelum pengujian korosi. Metode weight loss digunakan sebagai teknik primer evaluasi laju korosi dengan merendam spesimen logam dalam larutan bioetanol yang telah ditambahkan minyak atsiri pala pada konsentrasi bervariasi yaitu 0 ppm (kontrol), 100 ppm, 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm, dan 1000 ppm. Pengujian dilakukan pada suhu 30°C selama periode 30, 60, dan 90 hari untuk mensimulasikan kondisi penyimpanan jangka panjang. Setiap variasi konsentrasi direplikasi tiga kali untuk validitas statistik (Argyropoulos et al., n.d.).

Teknik elektrokimia meliputi polarisasi potensiodinamik dan spektroskopi impedansi elektrokimia dilakukan menggunakan sistem tiga elektroda dengan spesimen logam sebagai elektroda kerja, platinum sebagai elektroda counter, dan Ag/AgCl sebagai elektroda referensi. Pengukuran dilakukan dalam rentang potensial -0,8 V hingga +0,8 V dengan laju scanning 1 mV/s untuk kurva Tafel, sementara EIS diukur pada frekuensi 100 kHz hingga 0,01 Hz dengan amplitudo 10 mV. Analisis morfologi permukaan logam sebelum dan sesudah perendaman dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy dengan perbesaran 500x, 1000x, dan 2000x untuk mengamati pola korosi, produk korosi, dan lapisan inhibitor yang teradsorpsi. Analisis komposisi kimia permukaan menggunakan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy untuk mengidentifikasi elemen-elemen yang terlibat dalam proses korosi dan inhibisi (Sipil, 2023).

Karakterisasi lapisan protektif menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dari senyawa minyak pala yang teradsorpsi pada permukaan logam. Spektra FTIR direkam dalam rentang bilangan gelombang $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ dengan resolusi 4 cm^{-1} . Laju korosi dihitung menggunakan persamaan standar ASTM G1-03 berdasarkan kehilangan massa, luas permukaan, densitas logam, dan waktu perendaman. Efisiensi inhibisi dievaluasi dengan membandingkan laju korosi sistem dengan dan tanpa inhibitor. Parameter elektrokimia seperti potensial korosi, densitas arus korosi, dan resistansi polarisasi diekstraksi dari kurva Tafel dan spektra impedansi menggunakan metode ekstrapolasi dan equivalent circuit fitting (Loto & Ororo, 2021). Analisis statistik dilakukan menggunakan ANOVA satu arah untuk mengevaluasi signifikansi perbedaan antar kelompok perlakuan, dilanjutkan dengan uji post-hoc Tukey untuk perbandingan berganda. Tingkat signifikansi ditetapkan pada $\alpha = 0,05$. Pemodelan isoterm adsorpsi Langmuir, Freundlich, dan Temkin digunakan untuk menjelaskan mekanisme interaksi inhibitor dengan permukaan logam, dengan evaluasi berdasarkan nilai koefisien korelasi dan parameter termodinamika (Hedayati et al., 2020).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

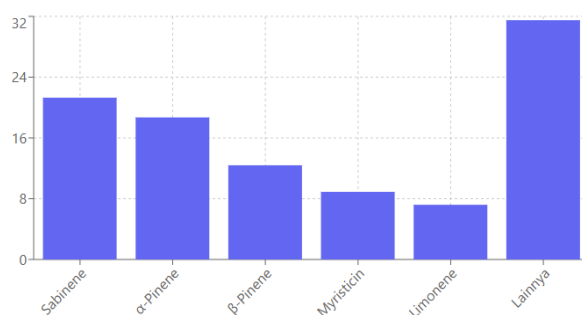
Analisis GC-MS terhadap minyak atsiri pala mengidentifikasi 23 senyawa dengan komponen mayor meliputi sabinene (21,3%), α -pinene (18,7%), β -pinene (12,4%), myristicin (8,9%), dan limonene (7,2%). Keberadaan senyawa-senyawa aromatik dengan gugus fungsi oksigen seperti myristicin dan elemicin mengindikasikan potensi aktivitas inhibisi yang tinggi melalui mekanisme donasi elektron dan pembentukan kompleks koordinasi dengan atom besi pada permukaan logam (Sharma et al., 2026). Hasil pengujian weight loss menunjukkan penurunan signifikan laju korosi seiring peningkatan konsentrasi inhibitor. Pada sistem kontrol tanpa inhibitor, laju korosi baja karbon dalam bioetanol mencapai 2,847 mm/tahun setelah 90 hari perendaman. Penambahan minyak pala 100 ppm menurunkan laju korosi menjadi 1,923 mm/tahun dengan efisiensi inhibisi 32,5%. (Paredes et al., 2026)

Konsentrasi optimal diperoleh pada 750 ppm dengan laju korosi 0,412 mm/tahun dan efisiensi inhibisi mencapai 85,5%. Peningkatan konsentrasi hingga 1000 ppm tidak memberikan peningkatan efisiensi signifikan, mengindikasikan saturasi adsorpsi pada permukaan logam (Katuwal et al., 2020).

Tabel 1: Komposisi Kimia Minyak Atsiri Pala (GC-MS)

No	Senyawa	Persentase (%)
1	Sabinene	21.3%
2	α -Pinene	18.7%
3	β -Pinene	12.4%
4	Myristicin	8.9%
5	Limonene	7.2%
6	Lainnya	31.5%

Analisis temporal menunjukkan bahwa efisiensi inhibisi relatif stabil selama periode pengujian 90 hari, dengan penurunan efisiensi kurang dari 5% yang mengindikasikan stabilitas jangka panjang yang baik. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa minyak pala dapat mempertahankan sifat protektifnya dalam kondisi penyimpanan extended tanpa degradasi signifikan. Kurva polarisasi potensiodinamik menunjukkan pergeseran potensial korosi ke arah lebih positif dengan peningkatan konsentrasi inhibitor, dari -0,687 V untuk sistem kontrol menjadi -0,523 V pada konsentrasi 750 ppm. Densitas arus korosi menurun drastis dari 48,3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ menjadi 6,8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, mengkonfirmasi efek protektif inhibitor. Perubahan gradien pada kurva anodik dan katodik mengindikasikan bahwa minyak pala berfungsi sebagai inhibitor tipe campuran yang menghambat baik reaksi oksidasi logam maupun reduksi oksigen(Nwigwe & Nwoye, 2023).

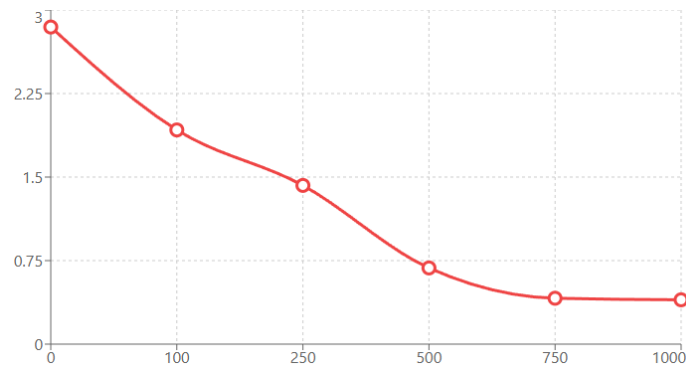


Gambar1. Grafik komposisi Kimia Minyak Atsiri Pala

Spektra impedansi elektrokimia memperlihatkan peningkatan diameter semicircle Nyquist seiring penambahan inhibitor, mengindikasikan peningkatan resistansi transfer muatan pada interface logam-elektrolit. Resistansi polarisasi meningkat dari 245 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ pada sistem kontrol menjadi 1.687 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ pada konsentrasi 750 ppm, sejalan dengan data weight loss dan polarisasi. Karakterisasi SEM pada spesimen kontrol setelah 90 hari perendaman memperlihatkan kerusakan permukaan ekstensif berupa pitting corrosion dengan diameter pit mencapai 45-120 μm dan korosi uniform yang merata di seluruh permukaan. Struktur mikroskopis menunjukkan akumulasi produk korosi berupa oksida dan hidroksida besi yang membentuk lapisan berpori dengan morfologi tidak beraturan. Sebaliknya, spesimen yang diproteksi dengan minyak pala 750 ppm menunjukkan permukaan yang relatif halus dengan kerusakan minimal(Zufri Hasrudy Siregar 1*, Mawardi 2 Riana Puspita 3, Muhammad Fazri 4, Refiza 5, Muhammad Irwansyah 6 & 1, 2023).

Lapisan protektif yang terbentuk memiliki morfologi kompak dan homogen yang menutupi sebagian besar permukaan logam, mengindikasikan adsorpsi molekul inhibitor yang efektif. Analisis EDS mengkonfirmasi keberadaan elemen karbon dan oksigen dalam proporsi signifikan pada permukaan spesimen terinhibisi, yang berasal dari molekul organik minyak pala yang teradsorpsi. Rasio Fe/O pada permukaan terinhibisi lebih tinggi dibandingkan kontrol, mengindikasikan berkurangnya pembentukan oksida besi sebagai produk korosi. Mapping

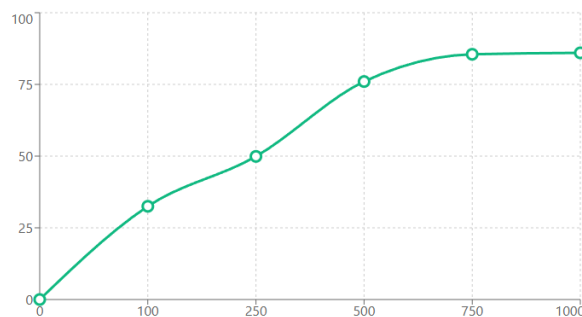
elemental memperlihatkan distribusi unsur karbon yang merata, mengkonfirmasi pembentukan monolayer atau multilayer inhibitor yang uniform (Ramesh & Rajeshkumar, 2021).



Gambar 2. Grafik laju Korosi vs Konsentrasi Inhibitor

Spektra FTIR dari permukaan logam terinhibisi menunjukkan puncak karakteristik pada 2925 cm^{-1} dan 2854 cm^{-1} yang berkorespondensi dengan vibrasi stretching C-H alifatik, puncak pada 1635 cm^{-1} yang mengindikasikan vibrasi C=C aromatik, dan puncak pada 1245 cm^{-1} yang merepresentasikan vibrasi C-O. Pergeseran bilangan gelombang dibandingkan spektra minyak pala murni mengkonfirmasi interaksi kimia antara molekul inhibitor dengan permukaan besi melalui pembentukan kompleks koordinasi. Mekanisme inhibisi melibatkan adsorpsi fisik dan kimia secara simultan. Molekul-molekul aktif dalam minyak pala seperti myristicin dan sabinene mengandung pasangan elektron bebas pada atom oksigen dan elektron π pada cincin aromatik yang dapat berinteraksi dengan orbital d kosong dari atom besi pada permukaan logam. Proses adsorpsi membentuk lapisan protektif yang menghalangi kontak langsung antara permukaan logam dengan spesies korosif dalam bioetanol seperti ion hidrogen, air, dan oksigen terlarut (Sipil, 2023).

Pemodelan isoterm adsorpsi menunjukkan bahwa data eksperimental paling sesuai dengan model Langmuir dengan nilai koefisien korelasi $R^2 = 0,989$, mengindikasikan adsorpsi monolayer pada situs aktif permukaan yang homogen. Parameter energi bebas adsorpsi Gibbs yang dihitung bernilai $-38,4\text{ kJ/mol}$ mengkonfirmasi bahwa proses adsorpsi melibatkan kombinasi physisorption dan chemisorption, dengan dominasi chemisorption yang menghasilkan ikatan yang lebih kuat dan stabil. Evaluasi stabilitas jangka panjang selama 90 hari menunjukkan bahwa efisiensi inhibisi minyak pala relatif konstan dengan fluktuasi kurang dari 6%, mengindikasikan resistensi terhadap degradasi dalam lingkungan bioetanol. Sifat antioksidan intrinsik dari komponen fenolik dalam minyak pala berkontribusi terhadap stabilitas ini dengan mencegah oksidasi molekul inhibitor itu sendiri. Hasil ini sangat menguntungkan untuk aplikasi praktis dalam sistem penyimpanan bioetanol jangka panjang yang memerlukan proteksi korosi berkelanjutan tanpa penambahan inhibitor berulang (M. Zhang, Ma, et al., 2026).

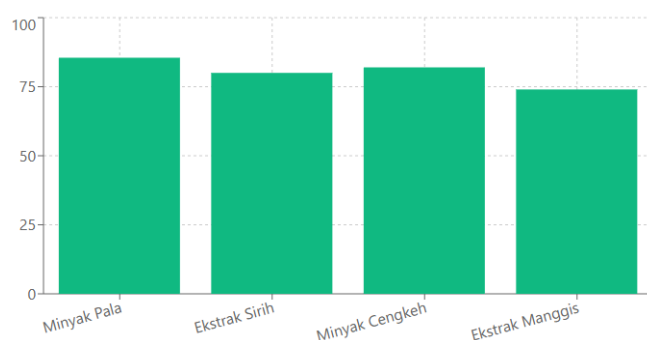


Gambar 3. Grafik efisiensi Inhibisi vs Konsentrasi

Kompatibilitas minyak pala dengan bioetanol sangat baik ditunjukkan oleh kelarutannya yang sempurna tanpa pembentukan presipitat atau separasi fase selama periode pengujian. Sifat ini krusial untuk memastikan distribusi inhibitor yang homogen dalam sistem penyimpanan skala besar (Kusmayadi et al., 2026). Analisis properti fisikokimia bioetanol terinhibisi menunjukkan bahwa penambahan minyak pala hingga 1000 ppm tidak mengubah secara signifikan parameter kritis seperti densitas, viskositas, dan nilai kalor, memastikan bahwa performa

pembakaran tetap optimal (M. Zhang, Ma, et al., 2026). Dari perspektif ekonomi, biaya produksi minyak atsiri pala di Indonesia berkisar Rp 450.000-650.000 per kilogram, jauh lebih ekonomis dibandingkan inhibitor sintetik komersial yang dapat mencapai Rp 2.500.000-4.000.000 per kilogram (Ying et al., 2026). Dengan konsentrasi optimal 750 ppm, biaya inhibisi per liter bioetanol hanya sekitar Rp 487,5, menjadikannya solusi yang sangat cost-effective untuk implementasi skala industri. Ketersediaan pala sebagai komoditas lokal Indonesia juga menawarkan keunggulan strategis dalam ketahanan supply chain dan pengurangan ketergantungan pada bahan kimia impor.

Studi literatur menunjukkan bahwa efisiensi inhibisi minyak pala (85,5%) sebanding atau bahkan superior dibandingkan beberapa inhibitor alami lain yang telah diteliti. Ekstrak daun sirih dilaporkan memberikan efisiensi 78-82%, minyak cengkeh mencapai 80-84%, sementara ekstrak kulit manggis berkisar 72-76% pada konsentrasi serupa. Keunggulan komparatif minyak pala terletak pada kombinasi efisiensi tinggi (Znini, 2019), stabilitas jangka panjang, dan ketersediaan komersial yang sudah mapan. Mekanisme inhibisi minyak pala yang melibatkan multiple active compounds memberikan efek sinergis yang lebih robust dibandingkan inhibitor dengan single active component. Keberadaan senyawa-senyawa dengan polaritas berbeda memungkinkan proteksi yang lebih komprehensif terhadap berbagai mode korosi, mulai dari korosi uniform hingga lokalisasi seperti pitting dan crevice corrosion (Jafari-Gohargan et al., 2026).



Gambar 4. Perbandingan Efisiensi Inhibitor Alami

Penelitian ini membuka peluang untuk eksplorasi lebih lanjut dalam beberapa arah. Pertama, investigasi pada jenis logam lain seperti aluminium, tembaga, dan stainless steel yang juga umum digunakan dalam infrastruktur bahan bakar perlu dilakukan untuk validasi aplikabilitas yang lebih luas (Sanchez et al., 2025). Kedua, pengujian pada kondisi operasional yang lebih variatif termasuk variasi temperatur, kelembaban relatif, dan kontaminan tambahan seperti ion klorida akan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang limitasi dan robustness sistem inhibisi (Thajuddin et al., 2026). Ketiga, studi formulasi inhibitor hibrida yang mengombinasikan minyak pala dengan inhibitor alami lain berpotensi menghasilkan efisiensi inhibisi yang lebih superior melalui efek sinergis (Moura et al., n.d.).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa minyak atsiri pala merupakan inhibitor korosi hijau yang sangat efektif untuk proteksi baja karbon dalam bioetanol. Konsentrasi optimal 750 ppm menghasilkan efisiensi inhibisi 85,5% dengan menurunkan laju korosi dari 2,847 mm/tahun menjadi 0,412 mm/tahun. Karakterisasi elektrokimia melalui polarisasi potensiodinamik dan spektroskopi impedansi mengkonfirmasi minyak pala berfungsi sebagai inhibitor tipe campuran yang menghambat reaksi anodik dan katodik secara simultan, dengan peningkatan resistansi polarisasi hingga $1.687 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Mekanisme inhibisi melibatkan adsorpsi molekul aktif seperti myristicin dan sabinene yang membentuk lapisan protektif kompak pada permukaan logam, mengikuti model isoterm Langmuir dengan energi bebas Gibbs -38,4 kJ/mol. Stabilitas jangka panjang selama 90 hari dengan fluktuasi efisiensi kurang dari 6% menunjukkan daya tahan yang sangat baik dalam kondisi penyimpanan extended. Dari perspektif ekonomi dan keberlanjutan, minyak pala menawarkan keunggulan signifikan dengan biaya hanya Rp 487,5 per liter bioetanol, jauh lebih ekonomis dibanding inhibitor sintetik komersial, serta ketersediaan lokal yang mendukung ketahanan supply chain. Kompatibilitas sempurna dengan bioetanol tanpa mengubah properti fisikokimia kritis menjadikan minyak pala solusi ideal untuk implementasi skala industri dalam infrastruktur bahan bakar terbarukan.

5. REFERENSI

- Argyropoulos, V., Boyatzis, S. C., & Giannoulaki, M. (n.d.). *Organic Green Corrosion Inhibitors Derived from Natural and / or Biological Sources for Conservation of Metals Cultural Heritage*. 341–367.
- Chen, M., Meng, X., Yang, J., Leng, L., Zhan, H., & Li, H. (2026). Hydrothermal valorization of alcohol industry residues: Current advances and future directions. *Separation and Purification Technology*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135340>
- Hedayati, S., Shahidi, F., Majzoubi, M., Koocheki, A., & Farahnaky, A. (2020). Structural, rheological, pasting and textural properties of granular cold water swelling maize starch: Effect of NaCl and CaCl₂. *Carbohydrate Polymers*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116406>
- Ihamdane, R., Tiskar, M., Outemsaa, B., Zelmat, L., Dagdag, O., Berdimurodov, E., Ebenso, E. E., & Chaouch, A. (2023). Essential Oil of *Origanum vulgare* as a Green Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Acidic Medium. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(6), 7685–7701. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07693-0>
- Jafari-Gohargan, M., Mohammadi, M., Mehrabani-Zeinabad, A., & Karimi, K. (2026). Techno-economic analysis of sustainable biofuel production from whole olive waste. *Fuel*, 407. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.137530>
- Jain, S., & Kumar, S. (2026). Valorization of lignin-rich byproduct from commercial bioethanol process: Production of phenolic-rich bio-oil and high-purity silica. *Biomass and Bioenergy*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108805>
- Katuwal, P., Regmi, R., Joshi, S., & Bhattarai, J. (2020). *Assessment on the Effective Green—Based Nepal Origin Plants Extract as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Bioethanol and its Blend*. 1(5), 1–12.
- Km, S., Praveen, B. M., & Devendra, B. K. (2024). A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment. *Results in Surfaces and Interfaces*, 16, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100258>
- Kusmayadi, A., Leong, Y. K., Chyuan, H. C., Hidayatullah, I. M., Budiastuti, H., & Ridwan, I. (2026). Advancements in low-carbon biofuel production from agricultural waste valorization. *Biomass and Bioenergy*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108726>
- Loto, R. T., & Ororo, S. K. (2021). *Electrochemical studies of the synergistic combination effect of thymus mastichina and illicium verum essential oil extracts on the corrosion inhibition of low carbon steel in dilute acid solution*. 1–13.
- Moura, P., Santana, B. De, & Meira, M. (n.d.). *Influence of natural additives on corrosion caused by biodiesel in the carbon steel* 18.
- Nwigwe, U. S., & Nwoye, C. I. (2023). *The Efficacy of Plant Inhibitors as Used against Structural Mild Steel Corrosion: A Review*. 40, 381–395.
- Paredes, G., Gonzales, S., Lazaro, A., & Benegas, R. (2026). Valorization of contaminated *Eichhornia crassipes* in phytoremediation of tannery waters: Bioethanol production. *Waste Management Bulletin*, 4(1). <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100268>
- Ramesh, M., & Rajeshkumar, L. (2021). *Chapter 9 Case-Studies on Green Corrosion Inhibitors*. 107, 204–221.
- Saeful Amin, Muhammad Ilham Sulaeman, & Meti Megawati. (2025). Literature Review: Potensi Minyak Atsiri Biji Pala (*Myristica Fragrans*) Untuk Kesehatan. *Indonesian Journal of Science*, 1(6).
- Sanchez, A., Martinez-Victoria, S., Rodriguez, C., & Sacramento Rivero, J. C. (2025). Bioethanol as a profitable transition fuel produced in sustainable sugarcane biorefineries. A case study in Mexico. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104730>
- Sharma, A., Salhotra, S., Rathour, R. K., Solanki, P., Putatunda, C., Hans, M., Walia, A., & Bhatia, R. K. (2026). Recent developments in separation and storage of lignocellulosic biomass-derived liquid and gaseous biofuels: A comprehensive review. *Biomass and Bioenergy*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108417>
- Sipil, E. D. A. N. (2023). *Desain dan pembuatan alat uji pompa sentrifugal skala laboratorium*. 04(01). <https://doi.org/10.54123/vorteks.v4i1.267>
- Thajuddin, F., Rasheed, A. S., Elumalai, A., Palanivel, P., Nooruddin, T., & Dhanasekaran, D. (2026). Harnessing microalgae and cyanobacteria for sustainable bioenergy Production: Integration of molecular engineering and AI-driven approaches. *Renewable Energy*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123961>

- Ying, W., Du, Y., Wang, S., & Zhang, J. (2026). Autothermal p-TsOH-H₂O₂ pretreatment drives efficient bamboo delignification and enhanced ethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108781>
- Zhang, H., Lin, Q., Zhu, R., Wang, X., Ren, J., Lyu, B., Peng, F., Wu, A., & Li, L. (2026). Unraveling the preferential cleavage of glycosidic bonds in xylan chains during acidic hydrolysis by MD and DFT analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.149379>
- Zhang, H., Yu, Y., Wu, Y., Li, Y., Feng, L., Li, Y., Du, Q., Zhao, R., Wang, X., Song, X., & Xu, S. (2026). Characterization of Early Nodulin 93 (ENOD93) on the mucilage secretion of aerial roots in sorghum. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 73(1). <https://doi.org/10.1007/s10722-025-02635-1>
- Zhang, M., Ma, Z., Yuan, L., Li, H., Fan, G., & Li, F. (2026). Defect-mediated MgO-TiO_x hybrid composite anchored single-atom Cu catalysts for enhanced bioethanol upgrading. *Applied Catalysis B: Environmental*, 383. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2025.126134>
- Znini, M. (2019). *Application of Essential Oils as green corrosion inhibitors for metals and alloys in different aggressive mediums—A review-*.
- Zufri Hasrudy Siregar 1*, Mawardi 2 Riana Puspita 3, Muhammad Fazri 4, Refiza 5, Muhammad Irwansyah 6, S. P. S. 7, & 1. (2023). *PEMANFAATAN AIR HUJAN DAN MINYAK JELANTAH SEBAGAI KEPEDULIAN LINGKUNGAN DI IKATAN KELUARGA BESAR ISTRI (IKBI) PTPN-III DESA SEI MANGKEI*. 3(2), 219–225. <https://doi.org/10.54123/deputi.v3i2.276>