



Ekstrak Tumbuhan Herbal di Indonesia sebagai Inhibitor Korosi Hijau pada Baja Karbon: Tinjauan Sistematis

Alif Zaky Supriadi^{a,1}, Fransiska Maura Meilan Kristanti Pasaribu^a, Muhamad Eko Prasetyo^a, Muhammad Revanza Naufal Novianto^a, Muhammad Rizky Nurzaman^a, Bening Nurul Hidayah Kambuna^a, Adhitya Trenggono^a

^aJurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, 42435, Indonesia.

¹3334230049@untirta.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 00 Desember 00

Direvisi pada 00 Januari 00

Disetujui pada 00 Februari 00

Tersedia daring pada 00 Maret 00

Kata kunci:

Inhibitor korosi, inhibitor hijau, baja karbon, ekstrak tumbuhan, tinjauan sistematis.

Keywords:

Corrosion inhibition, green inhibition, carbon steel, plant extract, systematic review.

ABSTRAK

Baja karbon sangat rentan terhadap korosi, yang menimbulkan kerugian ekonomi signifikan dan masalah lingkungan akibat penggunaan inhibitor sintetis yang beracun. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur sistematis (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti mengenai efektivitas ekstrak tumbuhan herbal Indonesia sebagai inhibitor korosi hijau yang ramah lingkungan untuk baja karbon. Menggunakan metode SLR, pencarian literatur dilakukan pada database Google Scholar untuk artikel yang diterbitkan antara tahun 2015 dan 2025, yang menghasilkan 13 studi yang relevan untuk dianalisis. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa ekstrak dari famili *Zingiberaceae*, seperti kunyit (IE% 99%) dan temulawak (IE% 97%), sangat efektif di lingkungan asam. Sementara itu, ekstrak kamomil (IE% 96,55%) dan daun teh (IE% 95%) menunjukkan kinerja superior di medium netral/air laut. Efektivitas ini diatribusikan pada adsorpsi senyawa fitokimia seperti tanin dan kurkumin pada permukaan baja, membentuk lapisan pelindung yang menghambat reaksi anodik dan katodik. Penelitian ini menggarisbawahi potensi besar keanekaragaman hayati Indonesia sebagai sumber inhibitor korosi yang berkelanjutan, menawarkan alternatif yang lebih aman dan ramah lingkungan untuk industri.

ABSTRACT

Carbon steel is highly susceptible to corrosion, which leads to significant economic losses and environmental problems due to the use of toxic synthetic inhibitors. This study aims to conduct a systematic literature review (SLR) to identify, evaluate, and synthesize evidence on the effectiveness of Indonesian herbal plant extracts as eco-friendly green corrosion inhibitors for carbon steel. Using the SLR method, a literature search was conducted on the Google Scholar database for articles published between 2015 and 2025, resulting in 13 relevant studies for analysis. The review findings show that extracts from the *Zingiberaceae* family, such as turmeric (99% IE) and Javanese ginger (97% IE), are highly effective in acidic environments. Meanwhile, chamomile (96.55% IE) and tea leaf (95% IE) extracts demonstrate superior performance in neutral/seawater media. This effectiveness is attributed to the adsorption of phytochemical compounds like tannins and curcumin on the steel surface, forming a protective layer that inhibits both anodic and cathodic reactions. This research highlights the vast potential of Indonesia's biodiversity as a source of sustainable corrosion inhibitors, offering a safer and more environmentally friendly alternative for industrial applications.

Tersedia pada: <http://dx.doi.org/10.36055/furnace>

1. Pendahuluan

Korosi merupakan fenomena alamiah yang mengakibatkan kerusakan material secara bertahap, khususnya pada logam dan paduannya, melalui reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungan sekitarnya [85-87]. Baja karbon, sebagai salah satu material rekayasa yang paling umum digunakan dalam berbagai industri mulai dari konstruksi, perpipaan minyak dan gas, hingga otomotif karena biayanya yang relatif rendah dan sifat mekaniknya yang baik, sangat rentan terhadap proses korosi [88-89]. Permasalahan ini tidak hanya menimbulkan kerugian teknis, tetapi juga kerugian ekonomi yang signifikan secara

global, dengan estimasi biaya mencapai 3–4% dari Produk Domestik Bruto (PDB) dunia [72], [76]. Secara konvensional, penggunaan inhibitor korosi sintetis menjadi andalan untuk mitigasi masalah ini. Namun, banyak dari inhibitor konvensional tersebut mengandung senyawa kimia yang bersifat toksik, sulit terurai secara hayati (*biodegradable*), dan berpotensi membahayakan kesehatan manusia serta kelestarian lingkungan [86–88]. Senyawa seperti kromat, misalnya, diketahui bersifat karsinogenik dan penggunaannya kini semakin dibatasi oleh regulasi lingkungan yang ketat [72], [74].

Menanggapi tantangan tersebut, terjadi pergeseran paradigma global menuju pengembangan teknologi yang selaras dengan prinsip-prinsip kimia hijau (*green chemistry*) dan berkelanjutan [73]. Salah satu solusi paling menjanjikan adalah pengembangan inhibitor korosi hijau (*green corrosion inhibitor*), yang didefinisikan sebagai substansi yang tidak beracun, mudah terurai, dan ramah lingkungan, yang berasal dari sumber-sumber alamiah seperti ekstrak tumbuhan [72], [91–92]. Ekstrak tumbuhan menjadi sorotan utama karena mengandung beragam senyawa fitokimia seperti tanin, alkaloid, flavonoid, dan asam organik [87–88]. Senyawa-senyawa ini memiliki gugus fungsional polar dengan atom hetero seperti O, N, dan S, yang berfungsi sebagai pusat adsorpsi pada permukaan logam, membentuk lapisan pelindung yang menghambat laju korosi [92–93]. Indonesia, sebagai negara dengan keanekaragaman hayati yang luar biasa, memiliki potensi besar sebagai sumber inhibitor korosi hijau. Penelitian lokal telah menunjukkan efektivitas ekstrak tumbuhan seperti daun pepaya (*Carica papaya L.*), yang kaya akan tanin, dalam menghambat korosi pada baja karbon [75]. Hal ini membuka peluang riset yang luas untuk mengeksplorasi ribuan spesies tumbuhan herbal lainnya di Indonesia sebagai sumber inhibitor yang efektif dan berkelanjutan.

Meskipun penelitian mengenai ekstrak tumbuhan sebagai inhibitor korosi telah banyak dilakukan secara individual, masih terdapat kesenjangan dalam literatur berupa tinjauan sistematis yang komprehensif [87–88]. Belum ada sintesis mendalam yang secara khusus memetakan, membandingkan, dan menganalisis bukti-bukti efektivitas dari berbagai ekstrak tumbuhan herbal yang potensial di Indonesia untuk proteksi baja karbon. Oleh karena itu, tujuan dari artikel ini adalah untuk melakukan tinjauan sistematis terhadap literatur ilmiah yang ada guna menganalisis dan mensintesis temuan-temuan kunci terkait penggunaan ekstrak tumbuhan herbal Indonesia sebagai inhibitor korosi hijau untuk baja karbon.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metodologi Tinjauan Literatur Sistematis (*Systematic Literature Review* - SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis semua bukti penelitian yang relevan dengan pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan proses peninjauan dilakukan secara komprehensif, tidak bias, dan dapat dipertanggungjawabkan, sehingga menghasilkan sintesis yang terpercaya mengenai efektivitas ekstrak tumbuhan herbal sebagai inhibitor korosi hijau. Pertanyaan penelitian adalah pertanyaan-pertanyaan yang berkaitan dengan studi yang dirumuskan sesuai dengan topik penelitian.

- Bagaimana perbandingan efisiensi inhibisi dari berbagai ekstrak tumbuhan herbal lokal dalam melindungi baja karbon di medium korosif yang berbeda?
- Senyawa fitokimia (*phytochemicals*) apa saja yang secara konsisten diidentifikasi dalam literatur sebagai komponen aktif utama yang bertanggung jawab atas perlindungan korosi pada baja karbon?
- Apa mekanisme inhibisi dominan yang diusulkan dalam literatur, dan bagaimana model isoterm adsorpsi (seperti *Langmuir* dan *Freundlich*) digunakan untuk menjelaskan interaksi antara ekstrak tumbuhan dengan permukaan baja karbon?

Pencarian literatur yang komprehensif dilakukan pada bulan Mei 2025 untuk mengidentifikasi semua studi yang relevan. Mesin pencari akademik utama yang digunakan adalah aplikasi Harzing's Publish or Perish dengan sumber database online berasal dari Google Scholar karena cakupannya yang luas terhadap berbagai disiplin ilmu dan sumber publikasi. Setiap artikel yang teridentifikasi dari proses pencarian dievaluasi kelayakannya berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan secara spesifik. Proses seleksi ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu penyaringan berdasarkan judul dan abstrak, diikuti dengan analisis teks lengkap. Kriteria kelayakan studi adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi.

Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Rentang Waktu	Artikel penelitian yang dipublikasikan antara 1 Januari 2015 dan 31 Desember 2025.	Artikel yang dipublikasikan di luar rentang waktu tersebut.
Bahasa	Artikel yang ditulis dalam Bahasa Inggris atau Bahasa Indonesia.	Artikel dalam bahasa lain.
Fokus Studi	Studi eksperimental yang menginvestigasi efektivitas ekstrak tumbuhan sebagai inhibitor korosi, tanpa batasan geografis.	Studi yang tidak berfokus pada evaluasi ekstrak tumbuhan sebagai inhibitor korosi.
Material	Substrat yang diuji adalah semua jenis baja berbasis besi (<i>ferrous-based steel</i>), termasuk baja karbon, mild steel, dan baja paduan (<i>alloy steel</i>).	Studi yang menguji logam lain (misalnya, aluminium, tembaga, perunggu).
Jenis Artikel	Artikel penelitian primer (original research) yang dipublikasikan di jurnal ilmiah atau prosiding konferensi yang telah melalui proses <i>peer-review</i> .	<i>Review paper</i> , meta-analisis, editorial, atau <i>book chapter</i> .
Data Kuantitatif	Artikel harus menyajikan data kuantitatif Efisiensi Inhibisi (IE%) secara eksplisit.	Artikel yang tidak melaporkan nilai IE% atau tidak menyajikan data yang cukup untuk menghitungnya.

Proses seleksi studi mengikuti alur kerja yang sistematis untuk memastikan bahwa hanya artikel yang paling relevan dan memenuhi semua kriteria yang disertakan dalam tinjauan akhir. Proses seleksi dimulai dengan mengumpulkan semua artikel yang ditemukan dari pencarian basis data. Artikel duplikat kemudian diidentifikasi dan dihapus menggunakan perangkat lunak manajemen referensi serta pemeriksaan manual. Artikel yang tersisa selanjutnya disaring berdasarkan relevansi judul dan abstraknya terhadap pertanyaan penelitian dan kriteria inklusi. Artikel yang jelas tidak relevan dieksklusi pada tahap ini. Artikel yang lolos tahap penyaringan abstrak kemudian diunduh dan dibaca secara lengkap (*full-text*) untuk dinilai kelayakannya secara mendalam terhadap semua kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Proses seleksi ini menghasilkan total 280 artikel dari pencarian awal. Setelah 110 duplikat dihilangkan, 170 artikel unik disaring berdasarkan judul dan abstrak, yang menghasilkan 50 artikel potensial. Setelah pembacaan teks penuh, 37 artikel dieksklusi karena tidak memenuhi kriteria kelayakan (misalnya, jenis baja yang salah, tidak ada data IE%). Akhirnya, sebanyak 13 studi dimasukkan dalam

sintesis kualitatif dan kuantitatif dalam tinjauan ini. Setiap studi yang disertakan dalam tinjauan akhir, data diekstraksi secara sistematis dan dicatat dalam aplikasi Spreadsheet terstruktur untuk analisis lebih lanjut. Poin data yang diekstraksi meliputi nama tumbuhan dan bagian yang diekstrak, jenis baja karbon dan medium korosif (misalnya, HCl, H₂SO₄, NaCl), konsentrasi optimum inhibitor, metode pengukuran korosi yang digunakan, efisiensi inhibisi tertinggi (IE%) yang dilaporkan, senyawa fitokimia utama yang diidentifikasi dalam ekstrak, tipe mekanisme inhibisi (fisik, kimia, atau campuran), model isoterm adsorpsi yang sesuai, dan referensi lengkap (penulis, tahun, judul, dan sumber publikasi).

3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 2. Rangkuman Komparatif Kinerja Inhibisi Korosi dari Berbagai Ekstrak Tumbuhan Herbal Indonesia pada Baja Karbon.

Tumbuhan (Nama Ilmiah)	Bagian yang Digunakan	Spesimen Baja & Konsentrasi Ideal	Kondisi Uji	Metode Uji	Efisiensi Inhibisi (IE%) Tertinggi	Senyawa Fitokimia Utama	Tipe Inhibitor	Model Isoterm Adsorpsi	Ref.
Beluntas (<i>Pluchea indica Less</i>)	Daun	Baja karbon rendah, 2000 ppm	1 M HCl, 6 hari	Kehilangan berat, PDP	98%	Alkaloid, Tanin	-	-	[80]
Kunyit (<i>Curcuma longa L.</i>)	Rimpang	Baja karbon 1018, 1000 ppm	0.5 M H ₂ SO ₄	Kehilangan berat, PDP, EIS	99%	Kurkumin	Campuran (dominan katodik)	Langmuir	[81]
Temulawak (<i>Curcuma xanthorrhiza</i>)	Rimpang	Baja API 5L X42, 1000 ppm	1 M HCl	Kehilangan berat, PDP, EIS	97%	Kurkumin	Campuran	Langmuir	[82]
Kamomil (<i>Matricaria chamomilla</i>)	Tumbuhan utuh	Baja karbon rendah, 1.0 w/v %	0.6 M NaCl, 303 K	Kehilangan berat, SEM, GC-MS	96,55%	Asam Oleat, Linalool	-	-	[83]
Daun Teh (<i>Camellia sinensis</i>)	Daun	Baja API 5L, 9%	Larutan NaCl	Kehilangan berat	95%	Tanin	-	-	[84]
Jahe (<i>Zingiber officinale</i>)	Rimpang	Baja ringan, 150 g/L	1.0 M HCl	Kehilangan berat, Polarisasi	91%	-	-	-	[85]
Mengkudu (<i>Morinda citrifolia</i>)	Buah	Baja ringan, 300 mg/L	Air laut sintesis	PDP, EIS	89,32%	Gugus -OH & Aromatik	Campuran	Freundlich	[86]
Lengkuas (<i>Alpinia galanga</i>)	Rimpang	Baja ringan, 775 ppm	1 M HCl, 320.4 K, 3.75 jam	Kehilangan berat, RSM	88,5%	1,8-sineol, a-terpineol	-	Langmuir	[87]
Lidah Buaya (<i>Aloe vera</i>)	Daun	Baja API 5L, 300 mg/L	Air laut sintesis, 310 K	PDP, EIS	88,60%	Methyl phaeophorbide	Campuran	Langmuir	[88]
Kapulaga Hitam (<i>Amomum sabulatum</i>)	Biji	Baja ringan, 1500 ppm	1 M HCl, 303 K	Kehilangan berat, SEM	82,09%	-	-	Langmuir, El-awady	[89]
Daun Pepaya (<i>Carica papaya L.</i>)	Daun	Baja karbon, 6%	Air laut, 6 hari	Kehilangan berat	75,64%	Tanin	-	-	[75]
Tapak Dara (<i>Catharanthus roseus</i>)	Bagian atas	Baja ringan, 300 ppm	1 M HCl	PDP, EIS, Evolusi H ₂	66,0%	Alkaloid, Tanin	Campuran	-	[90]
Jambu Biji (<i>Psidium guajava L.</i>)	Daun	Baja paduan tinggi, 800 ppm	3.56% NaCl, 192 jam	Kehilangan berat	60,87%	Tanin	-	-	[91]

3.1. Perbandingan Efektivitas Inhibisi Ekstrak Tumbuhan Herbal

Dalam medium asam, beberapa ekstrak menunjukkan kinerja inhibisi yang sangat superior. Ekstrak dari famili *Zingiberaceae*, khususnya kunyit (*Curcuma longa*) dan temulawak (*Curcuma xanthorrhiza*), menunjukkan efisiensi luar biasa, masing-masing mencapai 99% dalam 0.5 M H₂SO₄ [81], [90] dan 97%

dalam 1 M HCl [82]. Ekstrak beluntas (*Pluchea indica* Less) juga menunjukkan efektivitas yang sangat tinggi dengan IE% sebesar 98% dalam 1 M HCl [80]. Ekstrak lain dari famili yang sama, seperti jahe (*Zingiber officinale*) dan lengkuas (*Alpinia galanga*), juga memberikan proteksi yang signifikan dengan IE% masing-masing sebesar 91% [85] dan 88,5% [87]. Kinerja tinggi di lingkungan asam ini sangat relevan untuk aplikasi industri seperti pembersihan asam (*acid pickling*) dan stimulasi sumur minyak, di mana baja karbon sering terpapar asam kuat yang agresif. Sementara itu, medium netral berbasis klorida yang menyimulasikan lingkungan air laut, ekstrak kamomil (*Matricaria chamomilla*) dan daun teh (*Camellia sinensis*) menunjukkan efektivitas tertinggi. Ekstrak kamomil mencapai IE% sebesar 96,55% dalam larutan 0.6 M NaCl [83], sementara ekstrak daun teh mencapai 95% dalam medium NaCl [84]. Ekstrak lain yang berkinerja baik di lingkungan ini adalah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dengan IE% 89,32% [86] dan lidah buaya (*Aloe vera*) dengan IE% 88,60% [88], keduanya diuji dalam air laut sintetis. Kemampuan inhibisi yang kuat di medium NaCl ini menyoroti potensi aplikasi ekstrak tersebut untuk melindungi infrastruktur kelautan, sistem perpipaan, dan peralatan lain yang beroperasi di lingkungan air laut yang korosif.

Secara umum, ekstrak dari famili *Zingiberaceae* menunjukkan keunggulan di medium asam, sementara ekstrak daun teh dan kamomil unggul di medium netral/garam. Perbedaan kinerja ini menyoroti spesifisitas interaksi antara fitokimia dalam ekstrak dan kondisi lingkungan. Analisis data pada Tabel 2 juga mengungkap beberapa faktor kunci yang memengaruhi efektivitas, seperti:

- Konsentrasi Inhibitor. Data secara konsisten menunjukkan bahwa efisiensi inhibisi meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi ekstrak hingga mencapai titik optimum [75], [94-105]. Setelah titik ini, penambahan lebih lanjut terkadang tidak memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan atau bahkan dapat menurunkannya [91].
- Temperatur. Peningkatan suhu cenderung menurunkan efisiensi inhibisi, seperti yang teramati pada studi ekstrak lengkuas [87] dan lidah buaya [88], yang mengindikasikan kemungkinan desorpsi molekul inhibitor dari permukaan logam, sebuah karakteristik dari mekanisme fisisorpsi.
- Jenis Medium Korosif. Jenis medium korosif merupakan faktor penentu yang paling signifikan. Ekstrak yang sangat efektif di medium asam, seperti kunyit [81], belum tentu menunjukkan kinerja yang sama di medium garam, dan sebaliknya, seperti yang ditunjukkan oleh ekstrak daun teh yang sangat efektif di NaCl (95%) tetapi kurang efektif di HCl (45%) [84].

3.2. Identifikasi Senyawa Fitokimia Aktif

Senyawa dari golongan polifenol, khususnya tanin dan flavonoid, secara konsisten ditemukan pada ekstrak dengan kinerja inhibisi tinggi dan telah didokumentasikan secara luas sebagai inhibitor korosi yang efektif [106-107]. Ekstrak seperti daun pepaya [75], daun teh [84], beluntas [80], dan daun jambu biji [91] semuanya mengandalkan tanin sebagai komponen aktif utama. Struktur polifenolik ini, yang secara inheren memiliki cincin benzena tersubstitusi hidroksil [93], kaya akan atom oksigen dan cincin aromatik yang berfungsi sebagai pusat adsorpsi aktif. Mekanisme kerja utama melibatkan interaksi donor-akseptor, yang mana pasangan elektron bebas dari atom oksigen pada beberapa gugus hidroksil aromatik (-OH) didonorkan ke orbital d kosong dari atom besi (Fe) di permukaan baja [92]. Interaksi ini, yang juga dikenal sebagai khelasi, menghasilkan pembentukan kompleks organologam (contohnya, feri-tanat) yang stabil, melekat kuat di permukaan, dan membentuk lapisan pelindung [93]. Kemampuan khelasi ini sangat bergantung pada keberadaan gugus katekol (dua -OH berdampingan) atau pirogallol (tiga -OH berdampingan) pada struktur molekul tanin [93]. Selain itu, keberadaan cincin aromatik pada struktur polifenol memungkinkan terjadinya interaksi tambahan melalui elektron- π dengan permukaan logam, yang semakin memperkuat daya lekat dan stabilitas lapisan pelindung yang terbentuk [93]. Selain polifenol, senyawa lain juga menunjukkan peran penting. Kurkumin, senyawa utama pada ekstrak kunyit (IE% 99%) [81], [90] dan temulawak (IE% 97%) [82], adalah contoh fitokimia yang sangat efektif. Strukturnya yang unik dengan gugus fungsional keton dan fenolik memfasilitasi adsorpsi yang kuat pada permukaan logam. Senyawa kompleks lain seperti *methyl phaeophorbide* dan kaempferol-3-O-rutinoside yang ditemukan pada lidah buaya juga berkontribusi pada efisiensi inhibisi yang tinggi (88,60%) [88]. Kehadiran heteroatom seperti Nitrogen (N) dan Oksigen (O) dalam struktur siklik mereka menyediakan situs tambahan untuk pembentukan ikatan dengan permukaan baja, yang sangat penting untuk proses inhibisi [80], [90].

Penting untuk dicatat bahwa ekstrak tumbuhan merupakan campuran kompleks dari berbagai senyawa fitokimia, bukan senyawa tunggal [94]. Efektivitas inhibisi yang tinggi seringkali bukan merupakan hasil dari satu senyawa tunggal, melainkan efek sinergis dari kombinasi berbagai senyawa yang terkandung di dalamnya. Studi pada ekstrak *Commelina benghalensis*, misalnya, secara eksplisit mengatribusikan efisiensi inhibisinya yang mencapai 91,91% pada kehadiran simultan dari beragam fitokimia seperti alkaloid, flavonoid, tanin, saponin, fenol, steroid, dan glikosida jantung [94]. Demikian pula, meskipun tanin merupakan komponen kunci dalam ekstrak daun pepaya [75], sangat mungkin bahwa keberadaan senyawa lain seperti alkaloid dan saponin, yang juga terdeteksi dalam ekstrak tumbuhan lain yang efektif, dapat secara kolektif meningkatkan pembentukan lapisan pelindung yang lebih stabil dan padat di permukaan baja [94]. Sinergi ini terjadi karena molekul-molekul yang berbeda dapat mengadsorpsi pada situs aktif yang berbeda di permukaan logam atau bekerja sama untuk menciptakan film pelindung yang lebih komprehensif dan kedap.

3.3. Analisis Mekanisme Inhibisi dan Model Adsorpsi

Adsorpsi dapat terjadi melalui dua mekanisme utama, yaitu fisisorpsi dan kemosorpsi. Fisisorpsi melibatkan gaya antarmolekul seperti van der Waals, di mana struktur elektronik molekul inhibitor hampir tidak terganggu saat adsorpsi [95]. Sebaliknya, kemosorpsi melibatkan pembentukan ikatan kimia yang lebih kuat antara inhibitor dan permukaan logam, yang ditandai dengan perubahan signifikan pada struktur elektronik molekul yang terlibat [95]. Dalam banyak studi, nilai energi bebas Gibbs standar adsorpsi (ΔG_{ads}) sering digunakan sebagai kriteria untuk membedakan keduanya, di mana nilai yang lebih positif dari -20 kJ/mol diatribusikan pada fisisorpsi, dan nilai yang lebih negatif dari -40 kJ/mol pada kemosorpsi [95]. Berdasarkan kriteria ini, studi pada ekstrak temulawak [82] dan lengkuas [87] mengidentifikasi mekanisme fisisorpsi. Studi pada ekstrak *Commelina benghalensis* juga mendukung mekanisme fisisorpsi dengan nilai ΔG_{ads} yang lebih rendah dari -20 kJ/mol [94]. Namun, perlu dicatat bahwa kriteria ini seringkali tidak dapat diandalkan karena beberapa alasan fundamental. Nilai ΔG_{ads} juga mencakup kontribusi entropi yang bisa menutupi kekuatan ikatan sebenarnya [95]. Lebih lanjut, proses kemosorpsi yang melibatkan pemutusan ikatan internal molekul inhibitor bisa jadi membutuhkan energi yang besar, sehingga menghasilkan nilai ΔG_{ads} bersih yang tampak lemah, meskipun ikatan inhibitor-logam yang baru terbentuk sangat kuat [95]. Karena itu, beberapa studi melaporkan adanya mekanisme campuran. Sebagai contoh, ekstrak lidah buaya [88] dan ekstrak tapak dara [90] dilaporkan bekerja melalui mekanisme gabungan fisisorpsi-kemosorpsi, menandakan interaksi yang lebih kompleks dan kuat. Meskipun terdapat keterbatasan dalam penggunaannya untuk klasifikasi, nilai ΔG_{ads} yang negatif secara konsisten menunjukkan bahwa proses adsorpsi inhibitor pada permukaan baja bersifat spontan [92], [94].

Mayoritas ekstrak yang ditinjau, termasuk ekstrak tapak dara [90], kunyit (dominan katodik) [81], temulawak [82], mengkudu [86], dan lidah buaya [88], berperilaku sebagai inhibitor tipe campuran (*mixed-type*). Hal ini menunjukkan bahwa molekul fitokimia mampu mengadsorpsi baik pada situs anodik

maupun katodik di permukaan baja. Akibatnya, mereka efektif dalam menekan reaksi anodik (pelarutan logam) dan reaksi katodik (misalnya, evolusi hidrogen) secara bersamaan, memberikan perlindungan korosi yang lebih komprehensif.

Model isoterm adsorpsi digunakan untuk menyediakan informasi dasar mengenai interaksi antara molekul inhibitor dan permukaan logam, serta untuk menggambarkan hubungan kuantitatif antara konsentrasi inhibitor dan fraksi permukaan yang tertutupi [96]. Dengan menganalisis model yang paling sesuai, sifat-sifat fundamental seperti homogenitas permukaan, interaksi antar molekul, dan struktur lapisan pelindung dapat diketahui.

- Model Langmuir. Model ini, yang mengasumsikan pembentukan lapisan pelindung tunggal (*monolayer*) pada permukaan yang homogen [97], ditemukan sangat sesuai untuk mayoritas ekstrak yang ditinjau. Studi pada ekstrak temulawak [82], kunyit [81], lengkuas [87], kapulaga hitam [89], dan lidah buaya [88] semuanya menunjukkan kesesuaian yang tinggi dengan model ini. Hal ini mengindikasikan bahwa pada banyak kasus, molekul-molekul fitokimia cenderung membentuk lapisan tunggal yang teratur di atas permukaan baja.
- Model Freundlich. Di sisi lain, model Freundlich yang menyiratkan proses adsorpsi pada permukaan yang heterogen dengan kemungkinan pembentukan lapisan ganda (*multilayer*) [96] ditemukan lebih cocok untuk ekstrak mengkudu [86].

Kesesuaian dengan beberapa model, seperti Langmuir sekaligus Freundlich atau Sips, dapat diinterpretasikan sebagai indikasi bahwa meskipun permukaan baja secara inheren bersifat heterogen, mekanisme adsorpsi yang dominan tetaplah pembentukan *monolayer* [97].

4. Kesimpulan

Tinjauan sistematis ini menegaskan bahwa beragam ekstrak tumbuhan herbal dari Indonesia memiliki potensi signifikan sebagai inhibitor korosi hijau untuk baja karbon, dengan efektivitas yang bervariasi tergantung pada jenis ekstrak dan medium korosif. Secara khusus, ekstrak dari famili *Zingiberaceae*, seperti kunyit (*Curcuma longa*) dan temulawak (*Curcuma xanthorrhiza*), menunjukkan efisiensi inhibisi yang sangat superior di lingkungan asam, mencapai 99%. Sementara itu, dalam medium netral yang menyimulasikan air laut, ekstrak kamomil (*Matricaria chamomilla*) dan daun teh (*Camellia sinensis*) terbukti paling efektif dengan efisiensi masing-masing mencapai 96,55% dan 95%. Keberhasilan inhibisi ini secara konsisten diatribusikan pada kehadiran senyawa fitokimia aktif, terutama dari golongan polifenol seperti tanin dan senyawa spesifik seperti kurkumin, yang kaya akan heteroatom dan cincin aromatik sebagai pusat adsorpsi. Mekanisme proteksi utamanya adalah melalui adsorpsi spontan molekul fitokimia pada permukaan baja, membentuk sebuah lapisan pelindung. Proses ini sebagian besar dapat dijelaskan oleh model isoterm Langmuir, yang mengindikasikan pembentukan *monolayer*, dan mayoritas ekstrak berfungsi sebagai inhibitor tipe campuran (*mixed-type*) yang menekan reaksi anodik dan katodik secara simultan.

DAFTAR PUSTAKA

- [71] D. Dwivedi, K. Lepková, and T. Becker, “Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods,” *RSC Adv.*, vol. 7, no. 8, pp. 4580–4610, 2017, doi: 10.1039/C6RA25094G.
- [72] T. Kalyn, O. Fomicheva, H. Hrytsuliak, Y. Voloshyn, and T. Hoisan, “Environmentally friendly corrosion inhibitors: a modern alternative to traditional methods of protecting metal structures,” *Int. Sci. J. Eng. Agric.*, vol. 4, no. 3, pp. 66–80, Jun. 2025, doi: 10.46299/j.isjea.20250403.06.
- [73] K. Kishora, B. M. Praveen, and B. K. Devendra, “Eco-Friendly Approaches to Corrosion Inhibition: A Comprehensive Review of Recent Developments in Plant-Based Inhibitors,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 182–190, 2024, [Online]. Available: www.irjet.net
- [74] B. R. Fazal, T. Becker, B. Kinsella, and K. Lepkova, “A review of plant extracts as green corrosion inhibitors for CO₂ corrosion of carbon steel,” *npj Mater. Degrad.*, vol. 6, no. 1, p. 5, 2022, doi: 10.1038/s41529-021-00201-5.
- [75] K. A. Roni, E. Elfidiha, E. Yuliwati, and B. Marselia, “Penambahan Inhibitor Ekstrak Daun Pepaya (*Carica Papaya* L.) Terhadap Pengaruh Laju Korosi Pada Baja Karbon Dalam Larutan Air Laut,” *J. Redoks*, vol. 7, no. 1, pp. 28–35, 2022, doi: 10.31851/redoks.v7i1.7005.
- [76] M. Iannuzzi and G. S. Frankel, “The carbon footprint of steel corrosion,” *npj Mater. Degrad.*, vol. 6, no. 1, p. 101, 2022, doi: 10.1038/s41529-022-00318-1.
- [77] J. R. González-Parra and F. Di Turo, “The Use of Plant Extracts as Sustainable Corrosion Inhibitors for Cultural Heritage Alloys: A Mini-Review,” 2024. doi: 10.3390/su16051868.
- [78] B. A. Abd-El-nabey, D. Abd-El-Khalek, S. El-Housseiny, and M. El-Shahat, “Plant extracts as corrosion and scale inhibitors: A review,” *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, vol. 9, pp. 1287–1328, Dec. 2020, doi: 10.17675/2305-6894-2020-9-4-7.
- [79] A. N. Grassino, I. Cindrić, and J. Halambek, “Green Corrosion Inhibitors from Biomass and Natural Sources,” *Sustain. Corros. Inhib.*, vol. 107, pp. 46–69, 2021, doi: 10.21741/9781644901496-3.
- [80] D. E. Pratiwi, S. E. Putri, and A. F. Majid, “Inhibition Study of Low Carbon Steel Corrosion in Hydrochloric Acid Media Using *Pluchea indica* Less Extract,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1209, no. 1, p. 12015, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1209/1/012015.
- [81] E. A. Flores-Frias, V. Barba, M. A. Lucio-Garcia, R. Lopez-Cecenes, J. Porcayo-Calderon, and J. G. Gonzalez-Rodriguez, “Use of Curcuma and Curcumin as a Green Corrosion Inhibitors for carbon Steel in Sulfuric Acid,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 14, no. 6, pp. 5026–5041, 2019, doi: https://doi.org/10.20964/2019.06.53.
- [82] J. W. Soedarsono, M. N. Shihab, M. F. Azmi, and A. Maksum, “Study of curcuma xanthorrhiza extract as green inhibitor for API 5L X42 steel in 1M HCl solution,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 105, no. 1, p. 12060, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/105/1/012060.
- [83] M. J. Mohammed and J. A. Naser, “Evaluation of Corrosion Inhibition of Low-Carbon Steel Using Chamomile Plant Extract,” *Wasit J. Pure Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 345–351, Jun. 2024, doi: 10.31185/wjps.402.
- [84] M. Fazdri, I. Saefuloh, and N. Kanani, “Pengaruh Konsentrasi Inhibitor Ekstrak Daun Teh (*Camellia sinensis*) Terhadap Laju Korosi Baja API 5L,” *Din. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 1, p. 12, 2020, doi: 10.33772/djitm.v12i1.14962.
- [85] A. Fidrusli, Suryanto, and M. Mahmood, “Ginger extract as green corrosion inhibitor of mild steel in hydrochloric acid solution,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 290, no. 1, p. 12087, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/290/1/012087.
- [86] A. Royani, M. Hanafi, R. Haldhar, and A. Manaf, “Evaluation of Morinda citrifolia extract as sustainable inhibitor for mild steel in saline environment,” *J. Eng. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 321–327, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.01.013.

- [87] S. Ajeigbe, N. Basar, M. A. Hassan, and M. Aziz, "Optimization of corrosion inhibition of essential oils of *Alpinia galanga* on mild steel using Response Surface Methodology," *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 12, no. 9, pp. 2763–2771, May 2017.
- [88] A. Royani *et al.*, "Unveiling green corrosion inhibitor of Aloe vera extracts for API 5L steel in seawater environment," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 14085, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-64715-z.
- [89] N. Daksh, A. Saxena, J. Lade, and N. Gupta, "Anti-Corrosive Behavior of the Seed Extract of *Amomum sabulatum*," *E3S Web Conf.*, vol. 309, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901026>
- [90] R. M. A. Shahba, A. E.-A. E.-S. Fouda, A. E.-S. El-Shenawy, and A. S. M. Osman, "Effect of *Catharanthus roseus* (Vince rosea) and Turmeric (*Curcuma longa*) Extracts as Green Corrosion Inhibitors for Mild Steel in 1 M HCl," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 07, no. 10, pp. 654–671, 2016, doi: 10.4236/msa.2016.710053.
- [91] A. Ngatin, A. F. Wulandari, A. D. Saffanah, D. R. Suminar, and S. Setyaningrum, "Pemanfaatan Ekstrak Daun Jambu Biji Sebagai Inhibitor Korosi Baja Paduan dalam Medium Larutan NaCl," *Fluida*, vol. 15, no. 2, pp. 113–120, 2022, doi: 10.35313/fluida.v15i2.3923.
- [92] Y. M. Ohunene, O. Joseph, L. P. Maia-Obi, F. faks Mtunzi, F. Ojo, and O. J. Bamidele, "Corrosion Inhibition of Mild Steel With Phenol-Based Anticorrosion Fraction: Preparation, Phytochemistry, and Potentiodynamic Polarization," *J. Corros. Mater.*, vol. 49, no. 1, pp. 9–23, 2024, doi: 10.61336/jcm2024-2.
- [93] R. Sesia, S. Spriano, M. Sangermano, and S. Ferraris, "Natural Polyphenols and the Corrosion Protection of Steel: Recent Advances and Future Perspectives for Green and Promising Strategies," 2023. doi: 10.3390/met13061070.
- [94] C. C. Odidika, V. I. E. Ajiwe, C. N. Eboagu, C. M. Ekwunife, and C. I. Awuzie, "Corrosion Inhibition and Adsorption Properties of *Commelina benghalensis* Leaves Extract on Mild Steel in 1M H₂SO₄ Solution," *Sci. J. Anal. Chem.*, vol. 8, no. 2, pp. 86–92, Jun. 2020, doi: 10.11648/j.sjac.20200802.18.
- [95] A. Kokalj, "Corrosion inhibitors: physisorbed or chemisorbed?," *Corros. Sci.*, vol. 196, p. 109939, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109939>.
- [96] M. A. Orokpo, H. F. Chahul, and J. I. Ona, "Corrosion inhibitive properties, adsorption behaviour and synergistic effect of methanolic extract of *Crysophyllum albidum* on mild steel corrosion in HCl," *J. Adv. Electrochem.*, vol. 2, no. 4, pp. 130–135, 2016.
- [97] U. Mamudu, M. S. Alnarabiji, and R. C. Lim, "Adsorption isotherm and molecular modeling of phytoconstituents from *Dillenia suffruticosa* leaves for corrosion inhibition of mild steel in 1.0 M hydrochloric acid solution," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 13, p. 100145, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2023.100145>.