

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NATURAL PLANT EXTRACTS AS A GREEN CORROSION INHIBITOR IN STEEL

(INVESTIGASI EKSPERIMENTAL EKSTRAK TANAMAN ALAM SEBAGAI INHIBITOR KOROSI PADA BAJA)

Muhamad Akrom¹

¹*Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Dian Nuswantoro Semarang, Indonesia*

*Corresponding author: m.akrom@dsn.dinus.ac.id

ABSTRACT

Natural plant extracts show excellent performance in inhibiting steel corrosion. Steel has a relatively weak resistance to corrosion when in a corrosive environment. The use of natural plant extracts as green corrosion inhibitors is able to provide good performance with high inhibition efficiency. Experimental methods such as gravimetric analysis, potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy are commonly used to investigate corrosion inhibition based on corrosion activity. A comparative literature review of this work is important for the development and utilization of green inhibitors. Experimental studies still do not clearly reveal the mechanism of adsorption and inhibition of molecular inhibitors at the atomic level. For this reason, future developments are very important to study theoretically at the atomic level of the main components of natural plant extracts as corrosion inhibitors, so that it is hoped that there will be a clear and systematic understanding of the mechanism of corrosion inhibition in steel.

Keywords: experimental methode, green corrosion inhibitor, natural plant extract, steel.

ABSTRAK

Ekstrak tanaman alam menunjukkan performa yang sangat baik dalam menghambat korosi baja. Baja memiliki ketahanan yang relative lemah terhadap korosi apabila berada pada lingkungan korosif. Penggunaan ekstrak tanaan alam sebagai green inhibitor korosi mampu memberikan performa yang baik dengan efisiensi inhibisi yang tinggi. Metode eksperimental seperti analisis gravimetri, polarisasi potensiodinamik, dan spektroskopi impedansi elektrokimia umumnya digunakan untuk menginvestigasi kinerja penghambatan korosi berdasarkan aktivitas korosi. Tinjauan literatur komparatif dari karya ini penting bagi pengembangan dan pemanfaatan green inhibitor. Kajian eksperimental masih belum mengungkap dengan jelas bagaimana mekanisme adsorpsi dan inhibisi dari molekul inhibitor pada level atomik. Untuk itu, pengembangan ke depan sangat penting untuk dikaji secara teoritis pada tingkat atomik dari komponen utama ekstrak tanaman alam sebagai inhibitor korosi, sehingga diharapkan adanya pemahaman tentang mekanisme penghambatan korosi pada baja secara jelas dan sistematis.

Kata Kunci: baja, ekstrak tanaman alam, green inhibitor korosi, metode ekperi-mental.

PENDAHULUAN

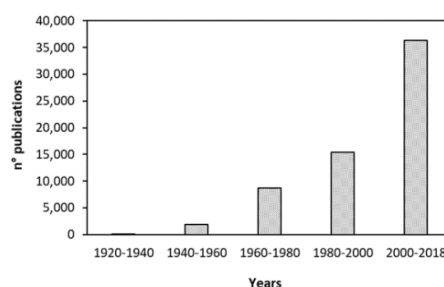
Salah satu fenomena yang menjadi perhatian penting kalangan industri dan akademik adalah korosi pada baja. Baja merupakan salah satu material logam yang memiliki karakteristik mekanik yang menarik, ketersediaannya yang tinggi, fabrikasi yang relatif mudah, serta biaya yang relatif murah menjadikan baja banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari untuk beragam penggunaan (Njoku et al., 2017; Hsissou et al., 2020). Namun, apabila berada pada lingkungan korosif, ketahanan baja terhadap korosi cenderung lemah (Gutierrez et al., 2016; Ichcou et al., 2019).

Korosi umumnya merupakan proses degradasi kualitas dan umur manfaat suatu material (logam) akibat interaksi dengan lingkungan korosif. Korosi merupakan proses yang berlangsung secara alamiah, akan tetapi dapat dikendalikan, dengan demikian proses degradasi material dapat diperlambat. Umumnya faktor lingkungan sangat mempengaruhi berlangsungnya proses korosi, seperti suhu, kecepatan aliran fluida, waktu kontak, konsentrasi bahan korosif, garam-garam (seperti ion klorida terlarut), nilai pH dan juga kandungan oksigen terlarut. Kenaikan suhu akan menyebabkan laju korosi bertambah cepat karena energi kinetik dari partikel-partikel yang bereaksi akan meningkat, sehingga melampaui besarnya harga energi aktivasi, begitu juga sebaliknya (Fogler, 2004). Aliran fluida juga cenderung mengakibatkan bertambah cepat laju korosi karena kontak antara zat pereaksi dan logam akan semakin besar, sehingga ion-ion logam akan semakin banyak

yang terlepas yang mengakibatkan kerapuhan logam (Lozan et al., 2003).

Adanya oksigen terlarut di dalam udara yang berinteraksi dengan permukaan logam akan menyebabkan korosi. Konsentrasi bahan korosif akan mempengaruhi pH suatu larutan. Laju korosi juga sangat berkaitan dengan waktu kontak. Tingkat korosi akan semakin tinggi ketika logam berkontak dengan lingkungan korosif dalam waktu yang lebih lama.

Kerugian akibat korosi meliputi banyak sektor, seperti industri, keamanan, keselamatan, kerusakan lingkungan, sosial, ekonomi, dan lain-lain (Verma, 2018; Sedik et al., 2020; Chen et al., 2021). Berdasarkan data NACE (National Association of Corrosion Engineers) tahun 2015, diberitakan bahwa biaya untuk pengendalian korosi global mencapai US\$ 2,5 triliun per tahun atau hampir 3,4% dari PDB global (Koch, et al., 2016; Groenenboom et al., 2017). Selama dekade terakhir, biaya ini terus meningkat (DorMohammadi et al., 2018).



Gambar 1. Tren publikasi inhibitor korosi (Marzorati et al., 2019)

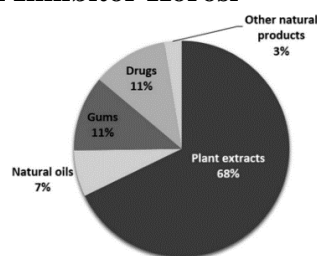
Penggunaan bahan anti korosi (inhibitor) menjadi salah satu cara yang efektif untuk menghambat laju korosi pada baja. Inhibitor korosi banyak dikembangkan karena mudah

diaplikasikan, memiliki efektivitas biaya yang tinggi, serta mampu memberikan perlindungan dari lingkungan yang tingkat korosifitasnya sangat tinggi. Penghematan biaya karena penerapan teknologi inhibitor korosi mencapai sekitar 35% atau 875 miliar dolar per tahun (Haryono et al., 2010; Zhao et al., 2019). Inhibitor korosi didefinisikan sebagai suatu senyawa kimia yang dalam jumlah kecil saja apabila ditambahkan pada lingkungan korosif akan dapat menghambat laju korosi, sehingga mampu memberikan perlindungan yang luas. Penerapan teknologi inhibitor korosi untuk menghambat degradasi material terus berkembang. Topik kajian seputar inhibitor korosi ini sangat aktif, sebagaimana terlihat pada Gambar 1.

Tinjauan ini memberikan ikhtisar karya terbaru tentang penggunaan ekstrak tanaman alam sebagai inhibitor organik pada korosi baja dalam medium asam dengan menggunakan metode eksperimental. Karya ini dapat memberikan literatur komparatif penting bagi pengembangan dan pemanfaatan ekstrak tanaman alam sebagai green inhibitor korosi pada baja dan paduannya serta logam lainnya.

METODE PENELITIAN

Ekstrak Tanaman Alam sebagai Green Inhibitor Korosi



Gambar 2. Distribusi bahan alam sebagai inhibitor korosi (Fayomi et al., 2019)

Penelitian di bidang inhibitor korosi terus berkembang, utamanya pada eksplorasi inhibitor organik. Hal tersebut dikarenakan inhibitor anorganik bersifat beracun, tidak ramah lingkungan, dan mahal (Vorobyova & Skiba, 2019). Salah satu inhibitor organik adalah inhibitor korosi berbasis ekstrak tanaman alam (green inhibitor). Karena bersifat ramah lingkungan, biodegradable, renewable, tidak menimbulkan racun dan polutan, mudah diproduksi, berbiaya murah, dan memiliki efisiensi anti korosi yang tinggi, maka ekstrak tanaman alam banyak digunakan sebagai inhibitor korosi (Popoola, 2018; Kumar & Yadav, 2021). Ekstrak bahan alam yang dalam struktur senyawanya mengandung gugus heteroatom (seperti O, N, S, P) dan cincin aromatik dianggap paling efisien sebagai inhibitor korosi.

Beragam studi terbaru tentang penggunaan ekstrak tanaman alam sebagai green inhibitor korosi menunjukkan performa positif dari molekul inhibitor ekstrak tanaman alam. Dilaporkan bahwa Flavanone ekstrak tanaman kemuning (*Murraya koenigii linn*) dikaji sebagai inhibitor korosi pada baja dengan menghasilkan efisiensi inhibisi maksimum 98.13% (Kumar & Yadav, 2021). Protocatechuic ekstrak tanaman primrose (*Primula vulgaris*) menghasilkan efisiensi inhibisi maksimum 94.4% pada baja (Majd et al., 2019). Eugenol ekstrak tanaman cengkeh (*Syzygium aromaticum*) menunjukkan performa sebagai inhibitor korosi pada baja dengan efisiensi inhibisi maksimum 92.4% (Hnini et al., 2004).

Tabel 1. Ekstrak tanaman sebagai inhibitor korosi pada baja dengan konsentrasi inhibitor 1000 ppm dalam medium 1 M HCl

Green Inhibitor	Efisiensi Inhibisi (%)
Ananas comosus	97.6
Pineapple stem	96.7
Poinciana pulcherrima	96
Primula vulgaris flower	95.5
Plantago	94.4
Juglans regia	94.2
Plantago ovata	93.54
Cassia occidentalis	93
Mangifera indica leaves	92
Papaia	92
Chinese gooseberry fruit	91.9
Datura stramonium	91
Cryptocarya nigra	91
Calotropis procera	89
Luffa cylindrica	88
Xantan gum	82.31
Tinospora crispa	80

Berdasarkan Tabel 1, dapat diamati bahwa, green inhibitor ekstrak tanaman alam memiliki performa yang sangat baik dengan efisiensi penghambatan atau efisiensi inhibisi (EI) yang tinggi pada korosi baja dalam lingkungan asam. Efisiensi inhibisi merupakan parameter untuk mengukur kemampuan inhibitor dalam melindungi permukaan logam berdasarkan tingkat penurunan aktivitas korosi (Pramudita et al., 2018).

Metode Eksperimental

Mekanisme korosi dan inhibisi korosi telah dipelajari secara luas melalui metode eksperimental, seperti analisa gravimetri, polarisasi potensi-dinamik (*potentiodynamic*

polarization), dan spektroskop impedansi elektrokimia (*electrochemical impedance spectroscopy*).

Analisa Gravimetri

Analisa gravimetri juga disebut sebagai metode kehilangan berat, sebab didasarkan pada perhitungan perbedaan berat logam selama perendaman dalam medium korosif dengan dan tanpa inhibitor. Pada metode gravimetri ini, laju korosi (CR) dan efisiensi inhibisi (EI) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$CR = \frac{KW}{AT\rho} \quad (1)$$

dimana CR, K, W, A dan T masing-masing adalah laju korosi (mmpy), konstanta laju korosi, selisih massa (mg), luas permukaan (mm²), lama perendaman (year), dan massa jenis (mg/mm³).

$$EI(\%) = \left(1 - \frac{CR_p}{CR_a}\right) \times 100\% \quad (2)$$

atau

$$EI(\%) = \left(1 - \frac{W_p}{W_a}\right) \times 100\% \quad (3)$$

dimana CR_p dan CR_a masing-masing adalah laju korosi dengan dan tanpa adanya inhibitor, W_p, dan W_a masing-masing adalah kehilangan massa dengan dan tanpa adanya inhibitor.

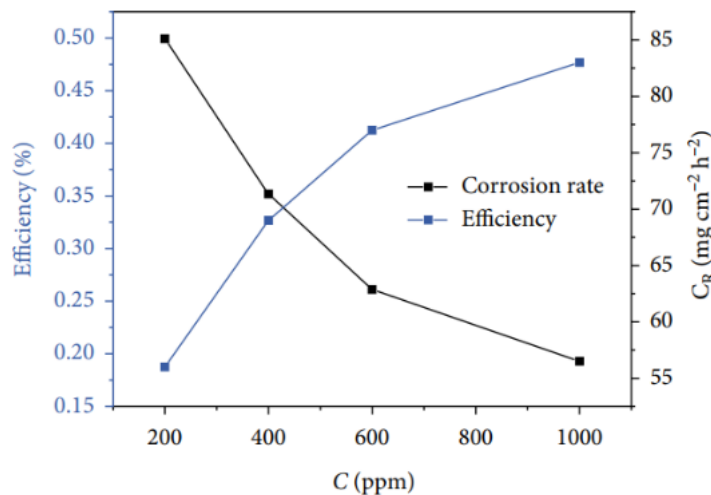
Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 3, terlihat bahwa inhibitor ekstrak tanaman *Amni visnaga* mampu menghambat korosi pada baja di semua konsentrasi yang diuji. Seiring dengan penambahan konsentrasi inhibitor, laju korosi menurun secara konstan, sedangkan efisiensi inhibisi

meningkat. Perilaku ini dapat dikaitkan dengan peningkatan area yang dicakup oleh molekul inhibitor yang teradsorpsi pada permukaan baja, sehingga mengurangi kontak langsung

(situs reaksi) antara baja dengan lingkungan korosif (Popoola, 2019; Kumar & Yadav, 2021; Majd et al., 2019).

Tabel 2. Analisa gravimetri untuk baja dalam medium 1 M HCl dengan dan tanpa inhibitor ekstrak metanolik *Amni visnaga* (EMG) (Zaher et al., 2020)

Inhibitor	Concentration (g/L)	Corrosion rate (mg/cm ² h)	Inhibition efficiency (%)
Blank	-	1.135	-
EMG	0.2	0.4995	56
	0.4	0.3519	69
	0.6	0.2611	77
	1	0.1929	83



Gambar 3. Variasi laju korosi dan efisiensi inhibisi korosi baja dengan dan tanpa adanya inhibitor ekstrak metanolik *Amni visnaga* (Zaher et al., 2020)

Polarisasi Potensiodinamik

Efisiensi inhibisi dapat juga ditentukan berdasarkan parameter arus korosi yang muncul pada permukaan logam dengan menggunakan metode polarisasi potensiodinamik. Pada material logam yang berinteraksi dengan medium korosif akan terjadi reaksi oksidasi pada anoda dan reaksi reduksi pada katoda secara bersamaan, sehingga terdapat arus anodik yang besarnya sama dengan arus katodik akibat adanya perbedaan potensial antara logam dengan larutan elektrolit/medium korosif. Beda

potensial yang dihasilkan merupakan potensial korosi (E_{corr}) dan arus listrik yang dihasilkan merupakan arus korosi (I_{corr}). Efisiensi inhibisi dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$EI(\%) = \left(1 - \frac{i'_{\text{corr}}}{i_{\text{corr}}}\right) \times 100 \quad (4)$$

dimana i'_{corr} dan i_{corr} masing-masing adalah rapat arus korosi dengan dan tanpa adanya inhibitor. Rapat arus korosi dihitung dengan

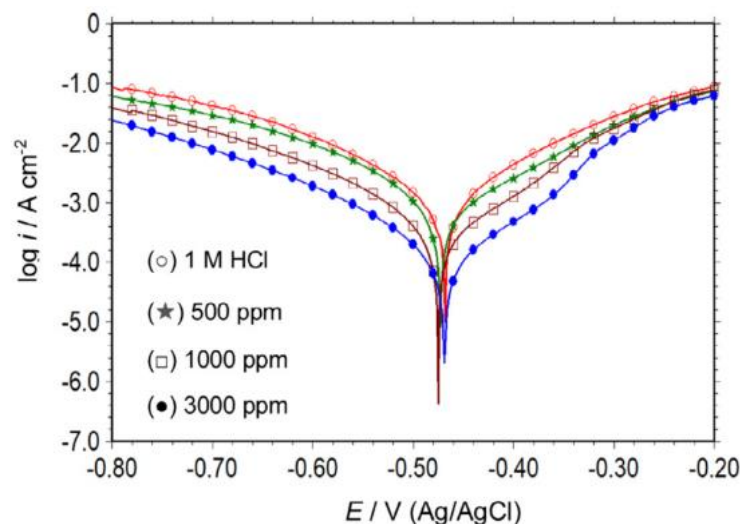
mengekstrapolasi bagian linier dari kurva polarisasi terhadap potensial korosi.

Berdasarkan data pada Tabel 3, terlihat bahwa penambahan konsentrasi inhibitor ekstrak *Dardagan fruit* mampu mengurangi laju reaksi disolusi anodik (b_a) dan laju reaksi reduksi katodik (b_c). Selain itu juga terlihat bahwa arus korosi (i_{corr}) berkurang dan efisiensi inhibisi (η) semakin meningkat. Pada Gambar 4, terlihat adanya pergeseran kurva polarisasi ke arah arus korosi yang lebih rendah seiring dengan penambahan konsentrasi inhibitor.

Hal tersebut dikarenakan mekanisme adsorpsi dari molekul inhibitor dan cakupan permukaan yang lebih besar, sehingga mampu pemblokiran situs aktif permukaan baja dengan lingkungan korosif. Peningkatan konsentrasi inhibitor mampu mengurangi rapat arus korosi, sehingga laju korosi semakin berkurang. Laju korosi menunjukkan efisiensi inhibisi. Jadi semakin rendah arus korosi, maka semakin rendah juga laju korosi. Semakin rendah laju korosi, maka semakin tinggi efisiensi inhibisi.

Tabel 3. Analisa polarisasi potensiodinamik untuk baja dalam medium 1 M HCl dengan dan tanpa inhibitor ekstrak *Dardagan fruit* (Sedik et al., 2020)

C_{inh} (ppm)	E_{corr} (V)(Ag/AgCl)	b_c (mV dec ⁻¹)	b_a (mV dec ⁻¹)	i_{corr} (μ A cm ⁻²)	η (%)
Blank	-0.468	-120	118	1140.1	-
100	-0.464	-128	115	507.3	55.5
500	-0.473	-123	106	563.9	50.5
1000	-0.475	-123	86	203.2	82.2
2000	-0.475	-117	88	168.7	85.2
3000	-0.469	-121	85	89.9	92.1



Gambar 4. Variasi kurva polarisasi pada korosi baja dengan dan tanpa adanya inhibitor ekstrak *Dardagan fruit* (Sedik et al., 2020)

Spektroskopi Impedansi Elektrokimia

Metode spektroskopi impedansi elektrokimia juga biasa digunakan untuk menyelidiki efisiensi inhibisi

korosi dari suatu inhibitor. Efisiensi inhibisi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$EI(\%) = \left(1 - \frac{R_p'}{R_p}\right) \times 100\% \quad (5)$$

dimana R_p' dan R_p adalah resistansi transfer muatan dengan dan tanpa adanya inhibitor.

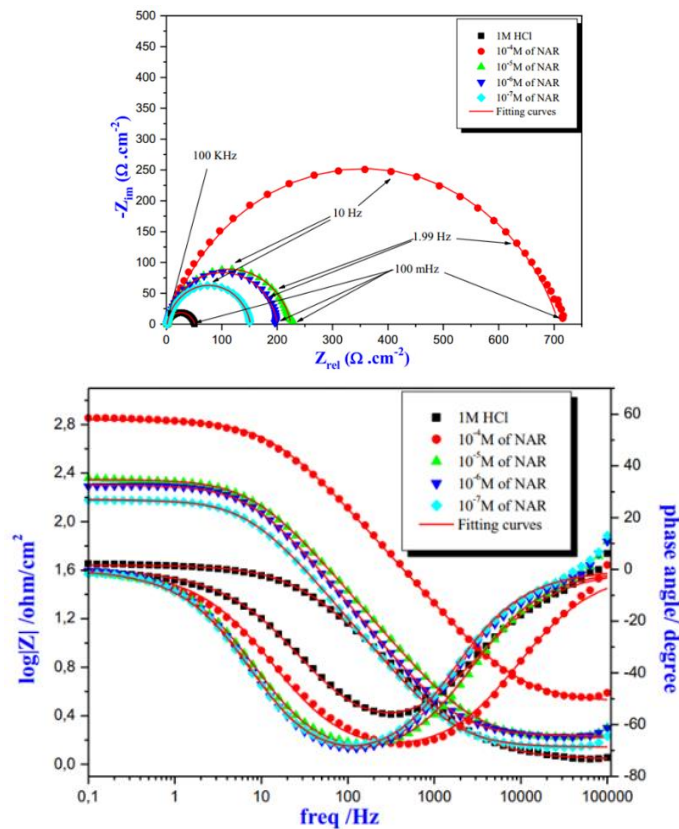
Salah satu parameter korosi yang juga sangat penting adalah resistansi transfer muatan (R_{ct}). Resistansi transfer muatan merupakan kemampuan suatu inhibitor dalam menghambat terjadinya transfer muatan antara logam dengan lingkungan korosif. Dapat dilihat pada Tabel 4, seiring dengan penambahan konsentrasi inhibitor, resistansi transfer muatan juga meningkat. Peningkatan nilai resistansi transfer muatan juga mengindikasikan peningkatan efisiensi inhibisi korosi.

Dari Gambar 5, diagram Nyquist membentuk loop setengah lingkaran. Dengan adanya inhibitor, terjadi pelebaran loop. Deformasi tersebut menunjukkan bahwa adanya pengaruh terhadap proses transfer muatan antara logam dengan lingkungan korosif akibat terbentuknya lapisan pelindung dari molekul inhibitor yang teradsorpsi pada permukaan logam. Dari diagram Bode, terlihat bahwa sudut fase menyimpang dari bentuk 90° , dimana sudut fase meningkat seiring dengan penambahan inhibitor.

Peningkatan konsentrasi inhibitor meningkatkan kemampuan adsorpsi pada permukaan baja, karena cakupan dan lapisan perlindungan yang lebih baik, yang juga berarti pembentukan film pelindung di atas permukaan baja mengarah ke penghambatan korosi (inhibisi) yang baik.

Tabel 4. Parameter elektrokimia untuk baja pada medium 1 M HCl dengan dan tanpa adanya inhibitor *Xanthene (NAR)* (Arrousse et al., 2020)

Medium	Conc (M)	R_s (Ω cm ²)	R_{ct} (Ω cm ²)	Q (μ F S ⁿ⁻¹)	n_{dl}	C_{dl} (μ F cm ⁻²)	$\eta_{R_{ct}}\%$
1 M HCl	–	1.037±0.021	49.9 ± 0.15	456.6 ± 0.064	0.8456±0.010	228.9	–
NAR	10 ⁻⁴	3.291±0.015	705.6 ± 2.011	35.91±0.031	0.7901±0.005	13.53	93
	10 ⁻⁵	1.666±0.014	223.3 ± 3.006	145.1 ± 0.037	0.8586±0.035	82.49	78
	10 ⁻⁶	1.718±0.013	198.6 ± 1.012	158.2 ± 0.035	0.8931±0.005	104.6	72
	10 ⁻⁷	1.314±0.015	150.2 ± 1.019	299.8 ± 0.054	0.8878±0.009	202.6	67



Gambar 5. Plot Nyquist dan Bode pada variasi konsentrasi inhibitor NAR (Arrousse et al., 2020)

PEMBAHASAN

Mekanisme Korosi

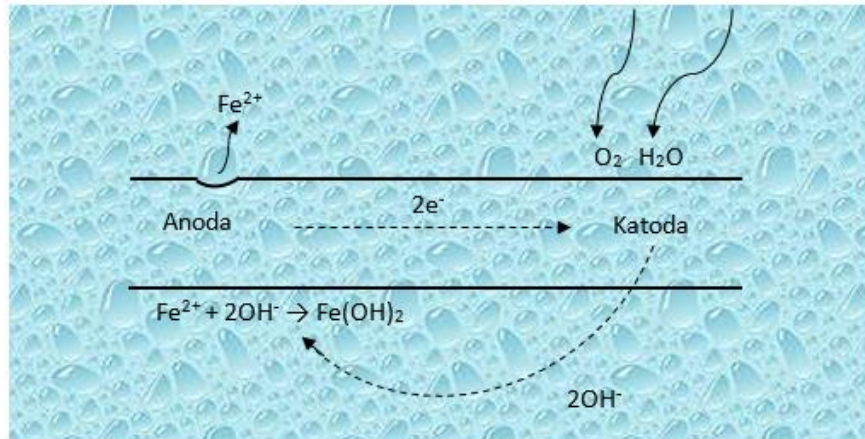
Proses korosi berlangsung secara alamiah, akan tetapi dapat dikendalikan, dengan demikian proses degradasi material dapat diperlambat. Secara umum, mekanisme terjadinya proses korosi mirip dengan proses yang berlangsung pada fuelcell. Permukaan besi yang terkorosi berlaku seperti elektroda campuran (anoda dan katoda) yang terhubung secara elektrik melalui badan besi itu sendiri, dimana pada permukaannya terjadi reaksi anodik dan katodik. Reaksi korosi merupakan reaksi elektrokimia yang terdiri dari reaksi oksidasi pada anoda dan reaksi reduksi pada katoda.

Pada reaksi oksidasi, logam teroksidasi dengan melepaskan elektron untuk membentuk ion logam positif (kation). Atom-atom logam positif melepaskan dirinya dari permukaan logam sebagai ion-ion dan menuju larutan elektrolit pada lingkungan korosif. Ion logam positif ini juga dapat bermigrasi dari anoda ke katoda melalui elektrolit. Elektron yang dilepaskan oleh reaksi oksidasi ini bergerak dari anoda ke katoda melalui sambungan listrik (badan besi itu sendiri). Aliran elektron mengalir menuju katoda, bertindak sebagai arus listrik).

Pada reaksi reduksi, terjadi penangkapan elektron oleh oksigen terlarut dan/atau molekul air. Oksigen

yang terlarut dalam air akan tereduksi menjadi ion negatif (anion). Ion

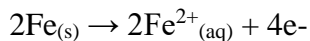
negatif mengalir (berdifusi) dari anoda ke katoda melalui elektrolit.



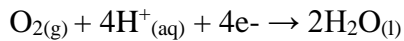
Gambar 6. Mekanisme korosi besi pada lingkungan netral

Reaksi korosi dalam media asam:

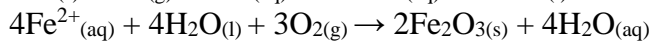
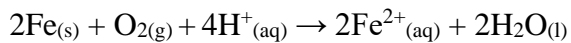
Reaksi oksidasi:



Reaksi reduksi:

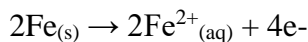


Reaksi total:

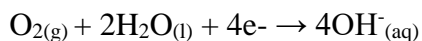


Reaksi korosi dalam media basa/alkalin/netral:

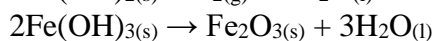
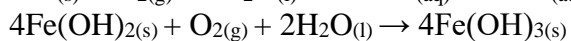
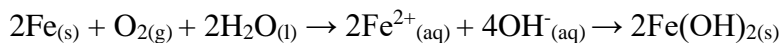
Reaksi oksidasi:



Reaksi reduksi:



Reaksi total:



Pada lingkungan netral, logam besi mengalami reaksi oksidasi dengan melepaskan elektron untuk membentuk ion logam Fe^{2+} . Ion-ion logam tersebut melepaskan dirinya

dari permukaan besi menuju media elektrolit dan kemudian juga dapat bermigrasi dari anoda ke katoda. Elektron yang dilepaskan pada reaksi oksidasi ini bergerak dari anoda ke

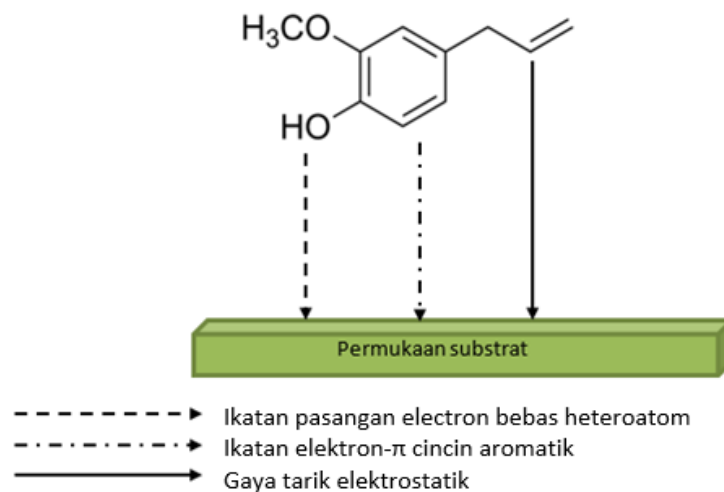
katoda melalui badan besi itu sendiri. Selanjutnya pada reaksi reduksi, terjadi penangkapan elektron oleh oksigen terlarut dan/atau molekul air. Oksigen tereduksi menjadi ion negatif (anion) OH^- . Ion-ion negatif mengalir (berdifusi) dari katoda ke anoda melalui elektrolit. Ion Fe^{2+} dan ion OH^- akan membentuk endapan $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

Akibat oksidasi selanjutnya, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ akan membentuk produk karat seperti Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , dan juga FeOOH . Pada lingkungan asam, ion H^+ yang relatif banyak memungkinkan terjadinya reaksi reduksi lain seperti evolusi hidrogen. Adanya dua reaksi yang berlangsung di katoda menyebabkan logam besi akan lebih banyak teroksidasi. Ini menjelaskan mengapa korosi pada lingkungan

asam lebih besar daripada lingkungan netral (Verma, 2018; Hnini et al., 2004). Telah dilaporkan secara luas bahwa keberadaan kelembaman dan oksigen mendukung pembentukan lebih banyak OH^- sebagai komponen pembentukan karat (Ahmad, 2003).

Mekanisme Inhibisi

Mekanisme inhibisi korosi dapat melibatkan proses adsorpsi kimia dan/atau adsorpsi fisika untuk membentuk orbital atom (lapisan teradsorpsi, lapisan pelindung, senyawa kompleks) antara molekul inhibitor dan permukaan logam. Adsorpsi molekul inhibitor pada antarmuka dengan logam memungkinkan terjadinya 4 mekanisme adsorpsi, yaitu: (a) interaksi elektrostatik antara molekul



Gambar 7. Mekanisme adsorpsi molekul inhibitor pada permukaan logam

dan logam, (b) interaksi antara pasangan elektron dengan logam, (c) interaksi antara elektron- π dengan logam, dan (d) kombinasi antar ketiga mekanisme tersebut. Adsorpsi molekul inhibitor pada permukaan logam sebagian besar juga ditentukan oleh planaritas molekul dan pasangan

elektron bebas yang terdapat dalam gugus heteroatom (Kumar, 2020).

Keefektifan senyawa ekstrak tanaman alam sebagai inhibitor korosi bergantung pada kemampuannya membentuk senyawa kompleks (lapisan pelindung) pada permukaan logam yang dapat menghalangi terjadinya transfer muatan dan massa,

sehingga melindungi dan memisahkan logam dari lingkungan korosif (Fayomi et al., 2019; Dehghani et al., 2020). Pembentukan lapisan teradsorpsi bergantung pada kemampuan donor-akseptor pasangan elektron bebas dari gugus heteroatom molekul inhibitor dengan orbital-d kosong atom permukaan besi dan/atau interaksi antara elektron- π cincin aromatik molekul inhibitor dengan orbital-d kosong atom permukaan besi, dua hal tersebut memfasilitasi terbentuknya lapisan teradsorpsi secara ikatan kovalen koordinasi.

Gugus aktif atau gugus fungsional (seperti heteroatom) pada molekul inhibitor akan mendonorkan

elektron bebas pada d-orbital kosong permukaan logam, sementara orbital- π pada cincin aromatik molekul inhibitor akan menerima elektron- π dari orbital-d kosong logam (Arrousse et al., 2020; Zaher et al., 2020). Secara umum, gugus heteroatom bertindak sebagai pusat adsorpsi yang berinteraksi dengan permukaan logam, sebab inhibitor tidak mungkin teradsorpsi secara keseluruhan menutupi permukaan logam, tetapi dapat menempati pusat aktif (pusat adsorpsi) untuk menghambat reaksi oksidasi atau reduksi, sehingga proses korosi akan menurun karena situs aktif tertutupi oleh inhibitor yang teradsorpsi (Arthur & Abechi, 2019).

Tabel 5. Energi adsorpsi ekstrak *Artichoke*, *Chamomile flower*, dan *Thymus vulgaris* pada permukaan baja (Salmasifar et al., 2021; Shahini et al., 2021; Lashgari et al., 2021))

Green Inhibitor	E_{ads} (kcal/mol)	Efisiensi Inhibisi (%)
<i>Artichoke</i>	-115.90	98.7
<i>Chamomile flower</i>	-111.17	97
<i>Thynus vulgaris</i>	-90.67	95

Kestabilan molekul untuk membentuk senyawa kompleks dengan permukaan logam juga dapat dikonfirmasi berdasarkan energi adsorpsi. Semakin tinggi energi adsorpsi maka semakin stabil kompleks yang terbentuk. Energi adsorpsi dapat dihitung sesuai dengan persamaan berikut:

$$E_{ads} = E_{inh/surf} - (E_{inhibitor} + E_{surface}) \quad (6)$$

dimana E_{ads} adalah energi adsorpsi atau energi interaksi. $E_{inh/surf}$ adalah energi total antara permukaan logam

dan molekul inhibitor yang teradsorpsi. $E_{surface}$ adalah energi total dari permukaan logam. $E_{inhibitor}$ adalah energi total dari molekul inhibitor.

Secara umum, inhibisi korosi berkaitan dengan interaksi (adsorpsi) antara molekul inhibitor dengan permukaan logam. Lapisan teradsorpsi dapat menghambat transfer muatan antar elektrolit dan permukaan logam, sehingga dapat menghambat arus korosi. Arus korosi yang rendah menunjukkan laju korosi yang rendah. Laju korosi yang rendah menunjukkan efisiensi inhibisi yang tinggi

(Hnini et al., 2004; Pramudita et al., 2018).

Energi adsorpsi dari beberapa senyawa inhibitor ekstrak tanaman dapat dilihat pada Tabel 5. Terlihat bahwa adsorpsi ekstrak *Artichoke*, *Chamomile flower*, dan *Thymus vulgaris* secara energetik kuat dan sesuai dengan efisiensi inhibisi yang diperoleh secara eksperimental.

KESIMPULAN

Ekstrak tanaman alam menunjukkan performa yang sangat baik dalam menghambat korosi baja, dimana efisiensi inhibisi korosi yang dimiliki sangat tinggi. Inhibitor ekstrak tanaman alam mampu membentuk lapisan teradsorpsi untuk melindungi baja pada lingkungan korosif.

Metode eksperimental seperti analisis gravimetri, polarisasi potensi-dinamik, dan spektroskopi impedansi elektrokimia umumnya digunakan untuk menginvestigasi kinerja penghambatan korosi berdasarkan aktivitas korosi. Pada kajian eksperimental, masih belum terungkap dengan jelas bagaimana mekanisme adsorpsi dan inhibisi dari molekul inhibitor pada level atomik.

Untuk itu, pengembangan ke depan sangat penting untuk dikaji secara teoritis pada tingkat atomik dari komponen utama ekstrak tanaman alam sebagai inhibitor korosi, sehingga diharapkan adanya pemahaman tentang mekanisme penghambatan korosi pada baja secara jelas dan sistematis.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, S. (2003). Reinforcement Corrosion in Concrete Structures, Its Monitoring and

Service Life Prediction - a Review. *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 4-5 SPEC, pp. 459–471. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00086-0.

Arthur, D.E. dan Abechi, S.E. (2019). Corrosion Inhibition Studies of Mild Steel Using *Acalypha Chamaedrifolia* Leaves Extract in Hydrochloric Acid Medium. *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 9, pp. 1–11. DOI: 10.1007/s42452-019-1138-4.

Chen, X., Chen, Y., Cui, J., Li, Y., Liang, Y. dan Cao, G. (2021) Molecular Dynamics Simulation and DFT Calculation of ‘Green’ Scale and Corrosion Inhibitor. *Comput. Mater. Sci.* Vol. 188. DOI:10.1016/j.com-matsci.2020.110229.

Dehghani, A., Mostafatabar, A.H., Bahlakeh, B. dan Ramezanzadeh, B. (2020). A Detailed Study on the Synergistic Corrosion Inhibition Impact of the Quercetin Molecules and Trivalent Europium Salt on Mild Steel; Electrochemical/Surface Studies, Dft Modeling, and Mc/Md Computer Simulation. *J. Mol. Liq.*, vol. 316, p. 113914. DOI: 10.1016/j.mol-liq.2020.11391.

DorMohammadi, H., Pang, Q., Árnadóttir, L. dan Burkan O. (2018). Atomistic simulation of initial stages of iron corrosion in pure water using reactive molecular dynamics. *Comput. Mater. Sci.*, vol. 145, pp. 126–133. DOI: 10.1016/j.com-matsci.2017.12.044.

- Elmi, S., Foroughi, M. M., Dehdab, M. and Zandi, M.S. (2019). Computational Evaluation of Corrosion Inhibition of Four Quinoline Derivatives on Carbon Steel in Aqueous Phase. *Iran. J. Chem. Eng.*, vol. 38, no. 1, pp. 185–200.
- Fayomi, O. S. I., Akande, I. G. dan Nsikak, U. (2019). An Overview of Corrosion Inhibition Using Green and Drug Inhibitors. *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1378, no. 2, pp. 0–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022022.
- Fogler, H.S. (2004). *Elements of Chemical Reaction Engineering 3rd ed* – Hall International. Inc, USA. PP. 175–185, 2004.
- Groenenboom et al. (2017). Doped Amorphous Ti Oxides to Deoptimize Oxygen Reduction Reaction Catalysis. *J. Phys. Chem. C*, vol. 121, no. 31, pp. 16825–16830. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b04210.
- Gutiérrez, E., Rodríguez, J.A., Cruz-Borbolla, J., Alvarado-Rodríguez, J.G. dan Thangarasu, P. (2016). Development of a Predictive Model for Corrosion Inhibition of Carbon Steel by Imidazole and Benzimidazole Derivatives. *Corros. Sci.*, vol. 108, pp. 23–35. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.02.036.
- Haryono, G. Sugiarto, B. dan Farid, H. (2010). Ekstrak Bahan Alam sebagai Inhibitor Korosi. *Pros. Semin. Nas. Tek. Kim. “Kejuangan” Pengemb. Teknol. Kim. untuk Pengolah. Sumber Daya Alam Indones.*, pp. 1–6.
- Hnini, K., Chtaini, A. dan Elbouadili, A. (2004). Inhibition of Metallic Corrosion with Eugenol. *Bull. Electrochem.*, vol. 20, no. 11, pp. 481–485.
- Hsissou et al. (2020) Evaluation of Corrosion Inhibition Performance of Phosphorus Polymer For Carbon Steel in HCL: Computational Studies (DFT, MC and MD simulations). 2020. *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 2691–2703. DOI:10.1016/j.jmrt.2020.01.002.
- Ichchou, Larabi, I. L., Rouabhi, H. Harek, H. dan Fellah, A. (2019). Electrochemical evaluation and DFT calculations of aromatic sulfonohydrazides as corrosion inhibitors for XC38 carbon steel in acidic media. *J. Mol. Struct.*, vol. 1198. DOI: 10.1016/j.mstruc.2019.126898.
- Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M. dan Payer, J. (2016). *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*. NACE Int.
- Kumar et al. (2020). Protection of Mild Steel Corrosion by Three New Quinazoline Derivatives: Experimental and DFT Studies. *Surfaces and Interfaces*, vol. 18, p. 100446. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100446.
- Kumar, H. dan Yadav, V. (2021). Highly efficient and eco-friendly acid corrosion inhibitor for mild steel: Experimental

- and theoretical study. *J. Mol. Liq.* Vol. 335. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.11622.
- Lashgari, S. M., Bahlakeh, G. dan Ramezanzadeh, B. (2021). Detailed theoretical DFT computation/molecular simulation and electrochemical explorations of *Thymus vulgaris* leave extract for effective mild-steel corrosion retardation in HCl solution,” *J. Mol. Liq.*, vol. 335, p. 115897. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.11589.
- Lozan et al. (2003). Dinuclear Nickel(II) and Palladium(II) Complexes in Combination with Different Co-Catalysts as Highly Active Catalysts for the Vinyl/Addition Polymerization of Norbornene. *Zeitschrift fur Naturforsch. - Sect. B J. Chem. Sci.*, vol. 58, no. 12, pp. 1152–1164. DOI: 10.1515/znb-2003-1202.
- Majd, M.T., Asaldoust, S., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B. dan Ramezanzadeh, M. (2019). Green Method of Carbon Steel Effective Corrosion Mitigation in 1 M Hcl Medium Protected by *Primula Vulgaris* Flower Aqueous Extract Via Experimental, Atomic-Level MC/MD Simulation and Electronic-Level DFT Theoretical Elucidation. *J. Mol. Liq.*, vol. 284, pp. 658–674.
- Marzorati, S., Verotta, L. dan Trassatti, S.P. (2019). Green corrosion inhibitors from natural sources and biomass wastes. *Molecules*, vol. 24, no. 1. DOI: 10.3390/molecules24010048.
- N. Arrousse et al. (2020). The Inhibition Behavior of Two Pyrimidine-Pyrazole derivatives Against Corrosion in Hydrochloric Solution: Experimental, Surface Analysis and in Silico Approach Studies. *Arab. J. Chem.*, vol. 13, no. 7, pp. 5949–5965. DOI: 10.1016/j.arabj.2020.04.030.
- Njoku, D.I., Li, Y., Lgaz, H. dan Oguzie, E.E. (2018). Dispersive Adsorption of *Xylopiya Aethiopia* Constituents on Carbon Steel in Acid-Chloride Medium: A Combined Experimental and Theoretical Approach. *J. Mol. Liq.*, vol. 249, pp. 371–388. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.11.051.
- Popoola, L.T. (2019). Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): A critical review. *Corros. Rev.*, vol. 37, no. 2, pp. 71–102. DOI: 10.1515/correv-2018-0058.
- Pramudita, M., Sukirno, S. dan Nasikin, M. (2018). Rice Husk Extracts Ability to Reduce the Corrosion Rate of Mild Steel. *Int. J. Chem. Eng. Appl.* vol. 9, no. 4, pp. 143–146. DOI: 10.18178/ijcea.2018.9.4.715.
- Salmasifar, A., Edraki, M., Alibakhshi, E., Ramezanzadeh, B. and Bahlakeh, G. (2021). Combined electrochemical/Surface Investigations and Computer Modeling of the Aquatic Artichoke Extract Molecules Corrosion Inhibition Properties on the Mild Steel Surface Immersed in the Acidic Medium. *J. Mol. Liq.*, vol. 327, p. 114856. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.11485.

- Sedik et al. (2019). Dardagan Fruit Extract as Eco-Friendly Corrosion Inhibitor For Mild Steel in 1 M Hcl: Electrochemical and Surface Morphological Studies. 2020. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 107, pp. 189–200. DOI:10.1016/j.jtice.2019.12.006.
- Shahini, M. H., Keramatnia, M., Ramezanzadeh, M., Ramezanzadeh, B. and Bahlakeh, G. (2021). Combined Atomic-Scale/DFT-Theoretical Simulations & Electrochemical Assessments of the Chamomile Flower Extract as a Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Hcl Solution. *J. Mol. Liq.*, vol. 342, p. 117570. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.11757.
- Verma, D.K. (2018). Density Functional Theory (DFT) as a Powerful Tool for Designing Corrosion Inhibitors in Aqueous Phase. *Adv. Eng. Test.* DOI: 10.5772/intechopen.78333.
- Vorobyova, V. dan Skiba, M. (2020). Apricot Pomace Extract as a Natural Corrosion Inhibitor of Mild Steel Corrosion in 0.5 M Nacl Solution: a Combined Experimental and Theoretical Approach. *J. Chem. Technol. Metall.* Vol. 55, no. 1, pp. 210–222.
- Zaher, A., Chaouiki, A. R., Salghi, Boukhraz, A., Bourkhiss, B. and Ouhssine, M. (2020). Inhibition of Mild Steel Corrosion in 1M Hydrochloric Medium by the Methanolic Extract of Ammi visnaga L. Lam Seeds. *Int. J. Corros.* DOI: 10.1155/2020/9764206.
- Zhao, J. Wang, Z., Guo, P. dan Luo, Q. (2019). Molecular Level Investigation of Methane and Carbon Dioxide Adsorption on SiO₂ Surface. *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 168, pp. 213–220.