



Aktivitas Inhibisi Biokorosi dari Ekstrak Etanol-Air Daun Sembung Rambat

Biocorrosion Inhibitory Activity of Ethanol-Water Extract of Sembung Rambat Leaves

Dimas Frananta Simatupang¹, Darni Paranita², Ratna Kristina Tarigan³, Darry C.S. Purba⁴, Donda⁵, Anna Angela Sitinjak⁶

^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknik Kimia, Politeknik Teknologi Kimia Industri, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

⁶ Program Studi Teknik Mekanika, Politeknik Teknologi Kimia Industri, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

¹ difratas@ptki.ac.id, ² darnipurba12@gmail.com, ³ ratnakristinatarigan70@gmail.com, ⁴ derrypurba41@ptki.ac.id,
⁵ dondast@gmail.com, ⁶ annaangelasitinjak@yahoo.co.id

Penulis Korespondensi: Dimas Frananta Simatupang | **Email:** difratas@ptki.ac.id

Diterima (Received): 22/05/2026 Direvisi (Revised): 06/07/2026 Diterima untuk Publikasi (Accepted): 07/07/2026

ABSTRAK

Biokorosi pada baja karbon yang disebabkan oleh aktivitas bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* menjadi permasalahan serius dalam berbagai sektor industri karena dapat mempercepat degradasi logam dan menurunkan umur pakai material. Penggunaan inhibitor alami berbasis tumbuhan menjadi alternatif ramah lingkungan untuk menggantikan inhibitor sintesis yang bersifat toksik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi aktivitas inhibisi biokorosi ekstrak etanol-air daun sembung rambat terhadap baja karbon dalam media yang mengandung *T. ferrooxidans*. Ekstrak diperoleh menggunakan metode Folch termodifikasi dengan pelarut etanol dan bufer fosfat, kemudian diaplikasikan pada berbagai konsentrasi, yaitu 50–300 ppm. Pengujian dilakukan menggunakan metode imersi selama 24 jam dengan parameter kehilangan massa (*weight loss*), laju korosi, dan efisiensi inhibisi. Selain itu, efektivitas inhibitor ekstrak etanol-air daun sembung rambat dibandingkan dengan biosida komersial selama waktu imersi 24–120 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi ekstrak mampu menurunkan kehilangan massa dan laju korosi baja karbon secara signifikan. Konsentrasi optimum diperoleh pada 200 ppm dengan nilai kehilangan massa sebesar 39,69 mg, laju korosi 0,0548 mg/cm²·jam, dan efisiensi inhibisi sebesar 68,21%. Namun, pada konsentrasi di atas 200 ppm terjadi penurunan efektivitas inhibisi akibat ketidakstabilan lapisan adsorpsi inhibitor. Dibandingkan biosida komersial, ekstrak daun sembung rambat menunjukkan efisiensi inhibisi yang lebih rendah, tetapi tetap memiliki kemampuan proteksi yang baik hingga 55,09% pada 120 jam. Dengan demikian, ekstrak etanol-air daun sembung rambat berpotensi dikembangkan sebagai *green biocorrosion inhibitor* yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Kata Kunci: biokorosi, daun sembung rambat, ekstrak etanol-air, inhibitor

ABSTRACT

Biocorrosion of carbon steel caused by the activity of *Thiobacillus ferrooxidans* has become a serious problem in various industrial sectors because it accelerates metal degradation and reduces the service life of materials. The use of plant-based natural inhibitors has emerged as an environmentally alternative to replace toxic synthetic inhibitors. This study aimed to evaluate the biocorrosion inhibition activity of ethanol-aqueous extract of sembung rambat leaves against carbon steel in a medium containing *T. ferrooxidans*. The extract was obtained using a modified Folch method with ethanol and phosphate buffer as solvents and was subsequently applied at various concentrations ranging from 50–300 ppm. The inhibition performance was evaluated using the immersion method for 24 h by measuring weight loss, corrosion rate, and inhibition efficiency. Furthermore, the effectiveness of the ethanol-aqueous extract inhibitor was compared with the commercial biocide over immersion periods of 24–120 h. The results showed that increasing extract concentration significantly reduced the weight loss and corrosion rate of carbon steel. The optimum concentration was achieved at 200 ppm, resulting in weight loss of 39.69 mg, corrosion rate of 0.0548 mg/cm²·h, and inhibition efficiency of 68.21%. However, at concentrations above 200 ppm, the inhibition effectiveness decreased due to the instability of the inhibitor adsorption layer. Compared with the commercial biocide, the extract exhibited lower inhibition efficiency but still demonstrated good protective capability, reaching 55.09% after 120 h. Therefore, the ethanol-aqueous extract of sembung rambat leaves has potential to be developed as an environmentally friendly and sustainable green biocorrosion inhibitor.

Keywords: biocorrosion, ethanol-aqueous extract, inhibitor, sembung rambat leaf

© Author(s) 2026. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Korosi merupakan salah satu permasalahan utama dalam berbagai sektor industri karena menyebabkan penurunan kualitas material logam, kerugian ekonomi, serta gangguan operasional pada sistem perpipaan, tangki penyimpanan, dan peralatan proses. Fenomena korosi tidak hanya dipicu oleh reaksi elektrokimia biasa, tetapi juga dapat dipercepat oleh aktivitas mikroorganisme yang dikenal sebagai *microbiologically influenced corrosion* (MIC) atau biokorosi. Biokorosi terjadi akibat interaksi antara mikroorganisme dengan permukaan logam sehingga mempercepat proses degradasi material melalui pembentukan metabolit korosif, perubahan potensial elektrokimia, maupun pembentukan biofilm pada permukaan logam. Salah satu bakteri yang berperan penting dalam proses tersebut adalah *Thiobacillus ferrooxidans* yang saat ini dikenal sebagai *Acidithiobacillus ferrooxidans*, yaitu bakteri kemolitotrof asidofilik yang mampu mengoksidasi ion besi dan senyawa sulfur sehingga menghasilkan lingkungan yang sangat korosif terhadap logam (Dukalang et al., 2023; Simatupang et al., 2016, 2018).

Aktivitas *T. ferrooxidans* banyak ditemukan pada lingkungan industri pertambangan, pengolahan mineral, sistem perpipaan, serta media yang mengandung sulfur dan besi terlarut. Bakteri ini mempercepat korosi melalui oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} dan pembentukan asam sulfat yang meningkatkan agresivitas medium terhadap permukaan logam. Keberadaan biofilm bakteri juga dapat menciptakan perbedaan konsentrasi oksigen pada permukaan logam sehingga mempercepat pembentukan sel elektrokimia lokal. Akibatnya, laju korosi meningkat secara signifikan dibandingkan korosi abiotik biasa. Oleh karena itu, pengendalian biokorosi menjadi perhatian penting dalam pengembangan teknologi proteksi material logam yang lebih efektif dan ramah lingkungan (Dukalang et al., 2023; Simatupang et al., 2018).

Metode pengendalian korosi umumnya dilakukan menggunakan inhibitor sintesis berbasis senyawa anorganik maupun organik. Namun demikian, sebagian besar inhibitor konvensional memiliki sifat toksik, tidak mudah terdegradasi, serta berpotensi mencemari lingkungan. Penggunaan bahan kimia sintesis juga menimbulkan permasalahan kesehatan dan keselamatan kerja apabila diaplikasikan secara terus-menerus pada skala industri. Kondisi tersebut mendorong berkembangnya konsep *green corrosion inhibitor*, yaitu penggunaan bahan alami yang bersifat *biodegradable*, tidak toksik, mudah diperoleh, dan memiliki kemampuan adsorpsi yang baik pada permukaan logam. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa ekstrak tumbuhan yang mengandung flavonoid, alkaloid, tanin, saponin, dan senyawa fenolik mampu membentuk lapisan protektif pada

permukaan logam sehingga menghambat proses korosi (Adebayo et al., 2026).

Pemanfaatan ekstrak tumbuhan sebagai inhibitor korosi telah banyak dilaporkan pada berbagai media korosif. Ekstrak etanol *Terminalia catappa* dilaporkan mampu menghambat korosi baja lunak melalui mekanisme adsorpsi spontan pada permukaan logam (Eddy et al., 2009). Selain itu, ekstrak etanol *Ocimum gratissimum* menunjukkan efisiensi inhibisi yang tinggi terhadap korosi baja lunak dalam media asam sulfat karena kandungan metabolit sekundernya yang kaya gugus heteroatom (Eddy et al., 2010). Penelitian lain juga melaporkan bahwa ekstrak tumbuhan seperti *Gongronema latifolium*, *Mansoa alliacea*, dan *Thapsia villosa* memiliki kemampuan inhibisi korosi yang baik melalui pembentukan lapisan adsorpsi pada permukaan logam (Benahmed & Akkal, 2016; Eddy & Ebenso, 2010; Suedile et al., 2013). Bahkan, ekstrak alga *Gracilaria edulis* telah dikaji sebagai inhibitor biokorosi akibat aktivitas *T. ferrooxidans* pada baja karbon di media air laut (Dukalang et al., 2023; Simatupang, 2020).

Daun sembung rambat (*Mikania micrantha* Kunth) merupakan tanaman liar tropis yang diketahui mengandung berbagai senyawa bioaktif seperti flavonoid, fenolik, terpenoid, saponin, dan tanin yang berpotensi sebagai antioksidan maupun antimikroba. Kehadiran gugus fungsi seperti hidroksil, karbonil, dan ikatan π pada senyawa metabolit sekundernya memungkinkan terjadinya adsorpsi pada permukaan logam sehingga dapat membentuk lapisan pelindung terhadap serangan korosi. Selain itu, sifat antimikroba dari senyawa fenolik dan flavonoid pada daun sembung rambat diduga mampu menghambat pertumbuhan bakteri korosif seperti *T. ferrooxidans*. Penggunaan pelarut etanol-air dalam proses ekstraksi juga dinilai efektif karena mampu mengekstraksi senyawa polar maupun semi-polar secara optimal sehingga meningkatkan potensi bioaktivitas ekstrak yang dihasilkan (Alridiwersah et al., 2020; Ardianto et al., 2022; Miralrio & Vazquez, 2020; Pérez-Amador et al., 2010; Polakitan et al., 2017).

Meskipun berbagai penelitian mengenai inhibitor korosi berbasis tumbuhan telah banyak dilakukan, kajian mengenai aktivitas inhibisi biokorosi dari ekstrak etanol-air daun sembung rambat terhadap korosi yang dipengaruhi oleh *T. ferrooxidans* masih sangat terbatas. Oleh sebab itu, penelitian ini penting dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan ekstrak etanol-air daun sembung rambat sebagai *green biocorrosion inhibitor* pada material logam. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan inhibitor korosi ramah lingkungan berbasis bahan alam yang efektif, ekonomis, dan berkelanjutan untuk aplikasi industri.

2. Bahan dan Metodologi

2.1. Bahan

Bahan-bahan penelitian meliputi daun sembung rambat yang tumbuh liar dari lahan kosong area Kecamatan Medan Johor Kelurahan Kwalu Bekala Sumatera Utara (Gambar 1), kultur bakteri *T. ferrooxidans*, baja karbon ringan berukuran 5x3x0,01 cm (Gambar 2) dan semua bahan kimia memiliki *analytical grade* (Merck).



Gambar 1 Daun sembung rambat (*Mikania micrantha* Kunth)



Gambar 2 Lempeng baja karbon ringan berukuran 5x3x0,01 cm

2.2. Metodologi

Ekstraksi Daun Sembung Rambat

Sampel daun sembung rambat sebelumnya sudah diidentifikasi melalui pendekatan molekuler menggunakan primer spesifik 18S rRNA V4 dan diperoleh bahwa sampel memiliki kekerabatan 86% dengan *Mikania micrantha* (Simatupang et al., 2023). Daun sembung rambat diekstraksi menggunakan metode Folch dengan beberapa modifikasi pelarut yaitu etanol p.a dan bufer fosfat 0,05 M pH 7,6. Daun sembung rambat terlebih dahulu dikeringkan dengan cahaya matahari selama 2 hari dan dihaluskan menggunakan blender. Selanjutnya dimaserasi selama 12 jam pada suhu 37 °C dengan campuran pelarut etanol p.a dan bufer fosfat dengan perbandingan sampel dan pelarut sebanyak 1:10 (b/v). Lalu disentrifugasi selama 15 menit dengan perbandingan campuran pelarut etanol p.a dan bufer fosfat 1:0,8 (v/v). Hasil sentrifugasi menghasilkan

supernatan dan pelet dimana supernatan yang dikumpulkan dalam gelas beaker dan pelet yang disaring menggunakan kertas saring. Pelet dicampurkan kembali dengan pelarut pada perbandingan yang sama dan diulangi sebanyak 2 kali. Supernatan yang terkumpul dibilas dengan air mili-Q pada perbandingan 9:2 (v/v) dan disentrifugasi kembali sehingga menghasilkan ekstrak fase etanol-air. Pemisahan ekstrak etanol-air dari pelarut menggunakan *rotary evaporator* (Simatupang et al., 2018).

Media Kultur Korosif *T. ferrooxidans*

T. ferrooxidans dikultur menggunakan media 9K Silverman–Lundgren yang terdiri atas 3,0 g/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0,5 g/L K_2HPO_4 , 0,5 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,1 g/L KCl, 0,01 g/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, dan 44,2 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. pH media diatur pada 2,0 menggunakan H_2SO_4 steril. Kultur diinkubasi pada suhu 30 °C dengan agitasi 150 rpm selama 3–5 hari hingga terjadi perubahan warna media dari hijau menjadi coklat kemerahan sebagai indikator oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} . Selanjutnya bakteri ini dipanen untuk dikulturkan kembali dalam media korosif.

Pengujian Biokorosi Logam

Lempeng baja karbon dipreparasi kemudian dimasukkan ke dalam media kultur korosif *T. ferrooxidans* dengan perlakuan tanpa inhibitor dan adanya inhibitor menggunakan variasi konsentrasi ekstrak etanol-air 50–300 ppm selama 24 jam (Simatupang et al., 2018; Simatupang, 2020). Setelah diperoleh konsentrasi optimum inhibitor maka dilanjutkan dengan variasi waktu imersi dengan rentang 24–120 jam. Setelah imersi, lempeng baja karbon dikeluarkan dan di cuci dengan air mengalir, di ampelas hanya bagian yang terkorosi dan dibilas dengan aseton untuk menghilangkan residu. Selanjutnya logam dikeringkan dan ditimbang secara gravimetri sesuai metode *weight loss*.

Metode *weight loss* (WL) digunakan untuk menganalisis daya inhibisi ekstrak etanol-air daun sembung rambat terhadap laju korosi pada baja karbon. Massa baja karbon yang hilang menunjukkan laju korosi tiap satuan waktu dan dihitung menggunakan persamaan (1) berikut ini (Simatupang, 2020).

$$LK = \frac{B-F}{A-T} \quad (1)$$

dimana LK merupakan laju korosi ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{jam}$), B merupakan massa baja karbon sebelum imersi (mg), F merupakan massa baja karbon setelah imersi (mg), A merupakan luas area logam aluminium (cm^2) dan T merupakan waktu imersi (jam).

Setelah laju korosi didapatkan maka dapat diperoleh juga efisiensi inhibisi atau daya inhibisi dari ekstrak etanol-air daun sembung rambat menggunakan persamaan (2) berikut ini (Simatupang, 2020).

$$EI (\%) = \frac{R_0 - R_i}{R_0} \times 100\% \quad (2)$$

dimana EI merupakan efisiensi inhibisi (%), R_0 merupakan laju korosi tanpa inhibitor dan R_i merupakan laju korosi dengan inhibitor.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Imersi Baja Karbon dalam Media Biokorosi Tanpa Inhibitor

Hasil uji imersi baja karbon tanpa penambahan inhibitor dalam media biokorosi menunjukkan terjadinya peningkatan kehilangan massa (*weight loss*) seiring bertambahnya waktu perendaman. Berdasarkan data pada Tabel 1, nilai kehilangan massa meningkat dari 47,48 mg pada waktu imersi 4 jam menjadi 123,58 mg pada 24 jam. Peningkatan kehilangan massa tersebut menunjukkan bahwa permukaan baja karbon mengalami degradasi secara progresif akibat interaksi antara logam dengan lingkungan korosif yang dipengaruhi aktivitas bakteri *T. ferrooxidans*.

Selain peningkatan kehilangan massa, laju korosi juga menunjukkan kecenderungan tertentu selama proses imersi. Nilai laju korosi tertinggi diperoleh pada waktu 4 jam sebesar 0,3936 mg/cm²·jam, kemudian mengalami penurunan bertahap hingga mencapai 0,1707 mg/cm²·jam pada 24 jam. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada tahap awal perendaman, permukaan baja karbon masih sangat reaktif sehingga proses oksidasi logam berlangsung cepat. Pada fase awal tersebut, bakteri *T. ferrooxidans* mulai mengoksidasi ion Fe²⁺ menjadi Fe³⁺ dan menghasilkan senyawa asam yang mempercepat proses pelarutan logam. Aktivitas metabolik bakteri tersebut meningkatkan agresivitas medium sehingga mempercepat terjadinya korosi pada permukaan baja karbon (Jia et al., 2017).

Tabel 1. Hasil uji imersi baja karbon tanpa inhibitor dalam media biokorosi

Waktu (Jam)	B (mg)	F (mg)	WL (mg)	LK (mg/cm ² ·jam)
4	653,25	605,77	47,48	0,3936
8	650,4	586,55	63,85	0,2646
12	645,68	556,18	89,5	0,2473
16	647,57	542,44	105,13	0,2179
20	644,29	523,71	120,58	0,1999
24	652,95	529,37	123,58	0,1707

Penurunan laju korosi pada waktu imersi yang lebih lama diduga disebabkan oleh terbentuknya lapisan produk korosi (*corrosion product layer*) pada permukaan baja karbon. Lapisan ini umumnya tersusun atas oksida besi, hidroksida besi, dan endapan ferri sulfat hasil aktivitas bakteri. Keberadaan lapisan tersebut dapat menghambat kontak langsung antara permukaan logam dengan medium korosif sehingga laju pelepasan ion logam menjadi lebih rendah. Namun demikian, walaupun laju korosi menurun, nilai kehilangan massa tetap meningkat karena proses degradasi logam tetap berlangsung secara berkelanjutan selama waktu imersi bertambah (Maji & Lavanya, 2024).

Aktivitas *T. ferrooxidans* berperan penting dalam mempercepat biokorosi melalui mekanisme oksidasi besi dan sulfur. Bakteri ini merupakan mikroorganisme kemolitotrof asidofilik yang memperoleh energi dari oksidasi Fe²⁺ dan senyawa sulfur tereduksi. Proses oksidasi tersebut menghasilkan ion Fe³⁺ dan asam sulfat yang menyebabkan penurunan pH medium menjadi semakin asam. Kondisi asam meningkatkan laju disolusi besi pada baja karbon sehingga korosi berlangsung lebih intensif dibandingkan korosi abiotik biasa. Selain itu, pembentukan biofilm bakteri pada permukaan logam juga dapat menciptakan sel diferensiasi aerasi yang mempercepat reaksi anodik dan katodik pada permukaan baja karbon (Vera et al., 2013).

Nilai kehilangan massa yang terus meningkat hingga 24 jam menunjukkan bahwa baja karbon memiliki ketahanan yang rendah terhadap lingkungan biokorosi tanpa perlindungan inhibitor. Hal ini memperlihatkan bahwa penggunaan inhibitor biokorosi, khususnya inhibitor berbasis bahan alam, sangat diperlukan untuk menghambat aktivitas korosif medium dan memperpanjang umur pakai material logam. Dalam sistem biokorosi, inhibitor tidak hanya berfungsi menghambat reaksi elektrokimia korosi, tetapi juga dapat menekan aktivitas metabolik mikroorganisme penyebab korosi (Ghosal & Lavanya, 2023).

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu imersi memberikan pengaruh signifikan terhadap kehilangan massa dan laju korosi baja karbon dalam media biokorosi. Semakin lama waktu perendaman, maka total kerusakan logam semakin besar, meskipun laju korosi cenderung menurun akibat terbentuknya lapisan produk korosi pada permukaan baja. Hasil ini mengindikasikan bahwa lingkungan biokorosi yang melibatkan aktivitas *T. ferrooxidans* bersifat sangat agresif terhadap baja karbon sehingga diperlukan metode pengendalian korosi yang efektif dan ramah lingkungan.

Tabel 2. Hasil uji imersi baja karbon dengan inhibitor berbagai konsentrasi dalam media biokorosi

Konsentrasi (ppm)	B (mg)	F (mg)	WL (mg)	LK (mg/cm ² jam)	EI (%)
0	658,2	533,33	124,87	0,1725	0,00
50	645,56	543,17	102,39	0,1415	18,00
100	650,43	560	90,43	0,1249	27,58
150	649,83	573,85	75,98	0,1050	39,15
200	650,51	610,82	39,69	0,0548	68,21
250	649,53	580,81	68,72	0,0949	44,96
300	654,54	579,35	75,19	0,1039	39,78

Tabel 3. Perbandingan daya inhibisi ekstrak etanol-air daun sembung rambat dengan biosida komersial

Waktu (Jam)	Ekstrak Etanol-Air Daun Sembung Rambat					Biosida Komersial				
	B (mg)	F (mg)	WL (mg)	LK (mg/cm ² jam)	EI (%)	B (mg)	F (mg)	WL (mg)	LK (mg/cm ² jam)	EI (%)
24	643,8	604,24	39,56	0,0547	68,32	641,48	626,25	15,23	0,0210	87,80
48	652,9	572,05	80,85	0,0558	67,62	651,23	617,05	34,18	0,0236	86,31
72	649,5	523,72	125,78	0,0579	66,42	648,21	593,34	54,87	0,0253	85,35
96	655,32	454,43	200,89	0,0694	59,78	655,98	561,15	94,83	0,0328	81,01
120	645,21	364,82	280,39	0,0775	55,09	643,89	515,42	128,47	0,0355	79,42

3.2. Imersi Baja Karbon dalam Media Biokorosi Dengan Inhibitor

Hasil uji imersi baja karbon dalam media biokorosi dengan penambahan inhibitor pada berbagai konsentrasi menunjukkan adanya pengaruh signifikan terhadap nilai kehilangan massa (*weight loss*), laju korosi, dan efisiensi inhibisi. Berdasarkan data pada Tabel 2, peningkatan konsentrasi inhibitor dari 0 hingga 200 ppm menyebabkan penurunan kehilangan massa baja karbon dari 124,87 mg menjadi 39,69 mg. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa inhibitor mampu membentuk lapisan protektif pada permukaan baja karbon sehingga menghambat interaksi langsung antara logam dengan medium korosif dan aktivitas bakteri penyebab biokorosi.

Nilai laju korosi juga mengalami penurunan seiring meningkatnya konsentrasi inhibitor. Pada sistem tanpa inhibitor (0 ppm), laju korosi tercatat sebesar 0,1725 mg/cm²·jam, sedangkan pada konsentrasi inhibitor 200 ppm nilai tersebut menurun menjadi 0,0548 mg/cm²·jam. Penurunan laju korosi ini menunjukkan bahwa senyawa aktif dalam inhibitor mampu menghambat reaksi elektrokimia korosi baik pada daerah anodik maupun katodik. Senyawa metabolit sekunder seperti flavonoid, tanin, alkaloid, dan fenolik yang terkandung dalam ekstrak alami umumnya memiliki gugus heteroatom seperti O, N, dan ikatan π -elektron yang dapat teradsorpsi pada permukaan logam. Adsorpsi tersebut membentuk lapisan penghalang (*barrier layer*) yang mengurangi difusi ion

agresif dan memperlambat proses oksidasi besi (Lv et al., 2024).

Efisiensi inhibisi menunjukkan peningkatan yang signifikan dengan bertambahnya konsentrasi inhibitor hingga mencapai nilai optimum pada konsentrasi 200 ppm sebesar 68,21%. Nilai ini mengindikasikan bahwa sebagian besar permukaan baja karbon telah tertutupi oleh molekul inhibitor sehingga proses korosi dapat ditekan secara efektif. Peningkatan efisiensi inhibisi pada konsentrasi rendah hingga menengah terjadi akibat meningkatnya jumlah molekul inhibitor yang teradsorpsi pada permukaan logam. Semakin tinggi konsentrasi inhibitor, maka semakin luas permukaan logam yang terlindungi dari serangan medium korosif dan aktivitas mikroorganisme (Fouda et al., 2017).

Namun demikian, pada konsentrasi inhibitor di atas 200 ppm, yaitu 250 ppm dan 300 ppm, terjadi penurunan efisiensi inhibisi menjadi masing-masing 44,96% dan 39,78%. Kondisi ini menunjukkan bahwa konsentrasi optimum inhibitor telah tercapai pada 200 ppm. Penurunan efektivitas inhibisi pada konsentrasi yang lebih tinggi diduga disebabkan oleh fenomena desorpsi atau ketidakstabilan lapisan adsorpsi inhibitor pada permukaan logam. Selain itu, kelebihan molekul inhibitor dalam medium dapat menyebabkan terbentuknya agregasi molekul yang mengurangi homogenitas lapisan pelindung sehingga efektivitas penghambatan korosi menurun. Fenomena serupa banyak ditemukan pada inhibitor organik berbasis ekstrak tumbuhan yang mengikuti

isoterm adsorpsi Langmuir maupun Temkin (Miralrio & Vazquez, 2020).

Dalam media biokorosi, inhibitor tidak hanya bekerja menghambat reaksi korosi elektrokimia, tetapi juga dapat mempengaruhi aktivitas mikroorganisme seperti *T. ferrooxidans*. Bakteri ini diketahui mempercepat korosi melalui oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} dan pembentukan asam sulfat yang meningkatkan keasaman medium. Kehadiran senyawa bioaktif pada inhibitor alami dapat menghambat pertumbuhan bakteri, mengganggu pembentukan biofilm, serta menurunkan aktivitas metabolisme mikroba sehingga laju biokorosi menjadi lebih rendah. Oleh sebab itu, peningkatan efisiensi inhibisi pada konsentrasi tertentu menunjukkan adanya sinergi antara mekanisme inhibisi kimia dan aktivitas antimikroba inhibitor terhadap bakteri korosif (Jia et al., 2017).

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan inhibitor memberikan pengaruh yang efektif dalam menurunkan kehilangan massa dan laju korosi baja karbon pada media biokorosi. Konsentrasi inhibitor 200 ppm merupakan kondisi optimum dengan nilai efisiensi inhibisi tertinggi sebesar 68,21%. Hasil ini menunjukkan bahwa inhibitor berbasis bahan alam berpotensi dikembangkan sebagai *green corrosion inhibitor* yang ramah lingkungan, efektif, dan berkelanjutan untuk pengendalian biokorosi pada material logam.

3.3. Perbandingan Inhibitor Ekstrak Etanol-Air Daun Sembung Rambut dengan Biosida Komersial

Hasil pengujian pada Tabel 3 menunjukkan bahwa ekstrak etanol-air daun sembung rambut maupun biosida komersial (glutaraldehid 200 ppm) mampu menghambat proses biokorosi baja karbon dalam media yang mengandung bakteri *T. ferrooxidans*. Namun demikian, biosida komersial menunjukkan performa inhibisi yang lebih tinggi dibandingkan ekstrak etanol-air daun sembung rambut pada seluruh waktu pengamatan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai kehilangan massa (*weight loss*), laju korosi (*corrosion rate*), dan efisiensi inhibisi (*efficiency inhibition*) yang lebih baik pada biosida komersial dibandingkan inhibitor alami.

Pada penggunaan ekstrak etanol-air daun sembung rambut, nilai kehilangan massa meningkat dari 39,56 mg pada 24 jam menjadi 280,39 mg pada 120 jam. Peningkatan kehilangan massa tersebut menunjukkan bahwa degradasi baja karbon tetap berlangsung selama waktu imersi bertambah, meskipun dengan laju yang lebih rendah dibandingkan sistem tanpa inhibitor. Nilai laju korosi juga mengalami peningkatan dari 0,0547 $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{jam}$ menjadi 0,0775 $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{jam}$ pada akhir pengamatan. Seiring dengan meningkatnya laju korosi, efisiensi inhibisi ekstrak mengalami penurunan dari 68,32% menjadi 55,09%. Fenomena ini menunjukkan bahwa efektivitas lapisan adsorpsi inhibitor alami cenderung menurun selama waktu

kontak yang lebih lama akibat desorpsi molekul inhibitor, degradasi senyawa aktif, maupun penetrasi ion korosif melalui lapisan pelindung yang terbentuk pada permukaan baja karbon (Verma et al., 2018).

Ekstrak etanol-air daun sembung rambut diduga bekerja melalui mekanisme adsorpsi senyawa metabolit sekunder seperti flavonoid, tanin, alkaloid, dan fenolik pada permukaan logam. Gugus heteroatom seperti oksigen dan ikatan π -elektron pada senyawa tersebut mampu membentuk lapisan protektif yang menghambat transfer elektron antara permukaan logam dan medium korosif. Selain itu, senyawa fenolik juga diketahui memiliki aktivitas antimikroba yang dapat menghambat pertumbuhan *T. ferrooxidans* dan mengurangi pembentukan biofilm pada permukaan baja karbon. Akan tetapi, kestabilan senyawa alami dalam lingkungan asam dan media biokorosi umumnya lebih rendah dibandingkan senyawa aktif pada biosida sintetis sehingga efektivitas inhibisinya cenderung menurun seiring waktu (Miralrio & Vazquez, 2020; Simatupang et al., 2018).

Pada biosida komersial, nilai kehilangan massa dan laju korosi juga meningkat seiring bertambahnya waktu imersi, namun peningkatannya relatif lebih rendah dibandingkan inhibitor alami. Nilai kehilangan massa biosida komersial meningkat dari 15,23 mg pada 24 jam menjadi 128,47 mg pada 120 jam, sedangkan laju korosi meningkat dari 0,0210 $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{jam}$ menjadi 0,0355 $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{jam}$. Efisiensi inhibisi biosida komersial tetap tinggi selama pengamatan, yaitu berkisar antara 87,80% hingga 79,42%. Tingginya efisiensi tersebut menunjukkan bahwa biosida komersial memiliki kemampuan yang lebih stabil dalam menghambat aktivitas bakteri korosif dan reaksi elektrokimia korosi. Biosida sintetis umumnya mengandung senyawa antimikroba aktif yang mampu merusak membran sel bakteri, menghambat metabolisme mikroorganisme, serta mencegah pembentukan biofilm pada permukaan logam (Jia et al., 2017).

Penurunan efisiensi inhibisi pada kedua sistem selama waktu pengamatan menunjukkan bahwa faktor waktu memiliki pengaruh signifikan terhadap efektivitas pengendalian biokorosi. Semakin lama waktu imersi, maka semakin besar kemungkinan terjadinya kerusakan lapisan pelindung akibat akumulasi produk korosi, aktivitas metabolik bakteri, dan penetrasi ion agresif ke permukaan logam. Aktivitas *T. ferrooxidans* dalam mengoksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} serta menghasilkan asam sulfat menyebabkan lingkungan menjadi semakin asam dan agresif terhadap baja karbon. Kondisi tersebut mempercepat degradasi lapisan inhibitor sehingga efisiensi inhibisi menurun secara bertahap (Maji & Lavanya, 2024).

Meskipun biosida komersial menunjukkan efektivitas inhibisi yang lebih tinggi, penggunaan ekstrak etanol-air daun sembung rambut tetap memiliki prospek yang baik sebagai *green inhibitor* karena bersifat lebih ramah

lingkungan, biodegradable, dan berpotensi mengurangi penggunaan bahan kimia sintetis berbahaya. Nilai efisiensi inhibisi ekstrak yang masih berada di atas 55% hingga 120 jam menunjukkan bahwa ekstrak daun sembung rambat memiliki kemampuan proteksi yang cukup baik terhadap biokorosi baja karbon. Oleh karena itu, optimalisasi formulasi, konsentrasi, maupun kombinasi dengan agen pengikat atau senyawa sinergis lainnya berpotensi meningkatkan kestabilan dan efektivitas inhibitor alami pada aplikasi industri.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa ekstrak etanol-air daun sembung rambat mampu berperan sebagai inhibitor biokorosi pada baja karbon ringan dalam lingkungan yang dipengaruhi oleh aktivitas *T. ferrooxidans*. Kehadiran ekstrak terbukti dapat menekan degradasi logam melalui penurunan kehilangan massa dan laju korosi dibandingkan sampel tanpa inhibitor. Efektivitas tersebut mengindikasikan bahwa senyawa metabolit sekunder yang terkandung dalam ekstrak diduga memiliki kemampuan membentuk lapisan pelindung pada permukaan baja karbon sekaligus menghambat aktivitas mikroorganisme korosif. Variasi konsentrasi inhibitor memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja inhibisi. Konsentrasi 200 ppm menghasilkan performa optimum karena mampu membentuk lapisan adsorpsi yang lebih stabil dan homogen pada permukaan logam. Meskipun biosida komersial masih memberikan efisiensi inhibisi yang lebih tinggi, ekstrak daun sembung rambat tetap menunjukkan kemampuan proteksi yang cukup baik dengan keunggulan utama berupa sifat ramah lingkungan, biodegradable, dan potensi toksisitas yang lebih rendah dibandingkan inhibitor sintetis. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan inhibitor alami berbasis tumbuhan untuk aplikasi industri yang lebih berkelanjutan. Penelitian lanjutan diperlukan untuk identifikasi senyawa aktif dominan, optimasi formulasi inhibitor, serta pengujian menggunakan metode elektrokimia dan karakterisasi permukaan guna memahami mekanisme inhibisi secara lebih mendalam.

5. Referensi

- Adebayo, M. A., Aigbogun, J. A., Oluwafemi, K. A., & Oderemi, Y. O. (2026). Extracts of sweet prayer leaf as corrosion inhibitors of mild steel in acidic medium : effects of extractants ' properties. *Scientific Reports*, 16(8939), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-40232-z>
- Alridiawirsa, A., Tampubolon, K., Sihombing, F. N., Barus, W. A., Syofia, I., Zulkifli, T. B. H., & Purba, Z. (2020). Skrining dan Efektivitas Metabolit Sekunder Mikania micrantha pada Gulma Jajagoan serta Dampaknya terhadap Padi Sawah. *Agrotechnology Research Journal*, 4(2), 84. <https://doi.org/10.20961/agrotechresj.v4i2.44976>
- Ardianto, A., Munarsih, D., Rahayu, I. N., Aslam, M. M., Aditya, M. F., Estiningsih, D., Fatmawati, A., & Saputro, P. H. (2022). Screening and Antidiarrheal Activity Testing of Sembung Rambat (*Mikania micrantha*) Leaves. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 10(T8), 194–199. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2022.9458>
- Benahmed, A. K. M., & Akkal, N. D. S. (2016). Corrosion inhibition of carbon steel in 1 M H₂SO₄ solution by *Thapsia villosa* extracts. *International Journal of Industrial Chemistry*, 7(4), 419–429. <https://doi.org/10.1007/s40090-016-0094-8>
- Dukalang, F. I., Warganegara, F. M., & Bundjali, B. (2023). Carbon Steel Biocorrosion Inhibition by Methanol Extract *Gracilaria Edulis* in Seawater. *West Science Interdisciplinary Studies*, 01(08), 492–516.
- Eddy, N. O., & Ebenso, E. E. (2010). Corrosion inhibition and adsorption properties of ethanol extract of *Gongronema latifolium* on mild steel in H₂SO₄. *Pigment & Resin Technology*, 39(2), 77–83. <https://doi.org/10.1108/03699421011028653>
- Eddy, N. O., Ekwumemgbo, P. A., Mamza, P. A. P., Okon, N., Ekwumemgbo, P. A., & Mamza, P. A. P. (2009). Green Chemistry Letters and Reviews Ethanol extract of *Terminalia catappa* as a green inhibitor for the corrosion of mild steel in H₂SO₄. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2(4), 223–231. <https://doi.org/10.1080/17518250903359941>
- Eddy, N. O., Odoemelam, S. A., & Ama, I. N. (2010). Green Chemistry Letters and Reviews Ethanol extract of *Ocimum gratissimum* as a green corrosion inhibitor for the corrosion of mild steel in H₂SO₄. *Green Chemistry*, 3(3), 165–172. <https://doi.org/10.1080/17518251003636428>
- Fouda, A. S., El-Ewady, G., & Ali, A. H. (2017). Modazar as promising corrosion inhibitor of carbon steel in hydrochloric acid solution. In *Green Chemistry Letters and Reviews* (Vol. 10, Number 2, pp. 88–100). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/17518253.2017.1299228>
- Ghosal, J., & Lavanya, M. (2023). Inhibition of Microbial Corrosion by Green Inhibitors. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 42(2), 2023. <https://doi.org/https://doi.org/10.30492/ijcce.2022.539832.4950>
- Jia, R., Yang, D., Xu, D., & Gu, T. (2017a). Electron transfer mediators accelerated the microbiologically influence corrosion against carbon steel by nitrate reducing *Pseudomonas aeruginosa* biofilm. *Bioelectrochemistry*, 118, 38–46.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.06.013>
- Jia, R., Yang, D., Xu, D., & Gu, T. (2017b). Electron transfer mediators accelerated the microbiologically influence corrosion against carbon steel by nitrate reducing *Pseudomonas aeruginosa* biofilm. *Bioelectrochemistry*, 118, 38–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.06.013>
- Lv, X., Wang, C., Liu, J., Sand, W., Etim, I. N., Zhang, Y., & Xu, A. (2024). The Microbiologically Influenced Corrosion and Protection of Pipelines: A Detailed Review. *Materials*, 17(4996), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma17204996>
- Maji, K., & Lavanya, M. (2024). Microbiologically Influenced Corrosion in Stainless Steel by *Pseudomonas aeruginosa*: An Overview. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s40735-024-00820-w>
- Miralrio, A., & Vazquez, A. E. (2020a). Plant Extracts as Green Corrosion Inhibitors for Different Metal Surfaces and Corrosive Media: A Review. *Processes*, 8(942), 1–27. <https://doi.org/10.3390/pr8080942>
- Miralrio, A., & Vazquez, A. E. (2020b). Plant Extracts as Green Corrosion Inhibitors for Different Metal Surfaces and Corrosive Media: A Review. *Processes*, 8(942), 1–27. <https://doi.org/10.3390/pr8080942>
- Pérez-Amador, M. C., Muñoz Ocotero, V., Ibarra Balcazar, R., & García Jiménez, F. (2010). Phytochemical and pharmacological studies on *Mikania micrantha* H.B.K. (Asteraceae). *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 79, 77–80. <https://doi.org/10.32604/phyton.2010.79.077>
- Polakitan, I. R., Fatimawali, & Leman, M. A. (2017). Uji daya hambat ekstrak daun sembung rambat (*Mikania micrantha*) terhadap pertumbuhan *Streptococcus mutans*. *Jurnal Ilmiah Farmasi*, 6(1), 1–8.
- Simatupang, D. F. (2020). Daya Inhibisi Ekstrak Rumput Laut Tropis Terhadap Laju Korosi Logam Aluminium pada Larutan Korosif NaCl. *Warta Teknologi Industri, XLI*(1), 19–22.
- Simatupang, D. F., Madayanti, F., Bundjali, B., & Akhmaloka, A. (2018a). Investigation of aqueous-methanol extract from red marine macroalgae *Gracilaria verrucosa* as inhibitor for biocorrosion. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*, 20(1).
- Simatupang, D. F., Madayanti, F., Bundjali, B., & Akhmaloka, A. (2018b). Investigation of aqueous-methanol extract from red marine macroalgae *Gracilaria verrucosa* as inhibitor for biocorrosion. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*, 20(1).
- Simatupang, D. F., Situmorang, I. M., & Saputra, H. (2023). Identifikasi Gulma Sembung Rambat Berbasis Molekuler. *JUSTEK: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 6(1), 79–86.
- Simatupang, D. F., Warganegara, F. M., & Bundjali, B. (2016). Preliminary Study of Eco-Friendly Green Biocorrosion Inhibitor from Tropical Seaweed Extracts *Gracilaria verrucosa* from Mild Steel in Culture Medium of Iron Oxidizing Bacteria. *Seminar Nasional Kimia (SNK)*, 531–540.
- Suedile, F., Robert, F., Roos, C., & Lebrini, M. (2013). Corrosion inhibition of zinc by *Mansoa alliacea* plant extract in sodium chloride media: Extraction, Characterization and Electrochemical Studies. *Electrochimica Acta*, 133, 631–638. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.12.070>
- Vera, M., Schippers, A., & Sand, W. (2013). Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation-part A. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 97, Number 17, pp. 7529–7541). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-4954-2>
- Verma, C., Ebenso, E. E., Bahadur, I., & Quraishi, M. A. (2018). An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media. In *Journal of Molecular Liquids* (Vol. 266, pp. 577–590). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.110>