

Pengendalian Korosi pada Baja melalui Rekayasa Proteksi Katodik dengan Anoda Tumbal dan Pelapisan Inhibitor

Ivan Wahyu Hidayatulloh ^{1,*}, Ira Kusumaningrum ¹, Mualifi Usman ¹

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Darul 'Ulum Jombang

Kata kunci

Korosi; proteksi katodik; anoda tumbal; inhibitor organik; ekstrak biji pepaya

ABSTRAK

Korosi merupakan fenomena degradasi material logam yang menjadi permasalahan utama dalam bidang teknik, khususnya pada baja yang banyak digunakan di berbagai industri. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui laju korosi baja dalam media larutan HCl dengan penerapan proteksi katodik menggunakan anoda tumbal seng (Zn) dan aluminium (Al) yang dilapisi inhibitor ekstrak biji pepaya. Pengujian dilakukan dengan metode kehilangan berat (*weight loss*) selama periode perendaman 24–288 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan anoda tumbal mampu menurunkan laju korosi baja, dengan anoda aluminium memberikan perlindungan yang lebih baik dibandingkan seng. Pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya pada anoda tumbal meningkatkan efektivitas perlindungan, yang ditunjukkan oleh penurunan laju korosi yang lebih besar. Kombinasi proteksi katodik dengan anoda tumbal aluminium dan pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya memberikan perlindungan terbaik dengan laju korosi terendah (0,00040 mmpy pada 288 jam). Senyawa aktif dalam ekstrak biji pepaya, seperti tanin dan flavonoid, berperan dalam membentuk lapisan pelindung melalui proses adsorpsi pada permukaan logam. Penelitian ini memberikan alternatif metode pengendalian korosi yang efektif dan ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah biji pepaya sebagai inhibitor alami.

* **Corresponding author:**

Corresponding author: ira210371@gmail.com

Diterima: 28 Juni 2026

Disetujui: 27 Juli 2026

Dipublikasikan: 12 September 2026

1 Pendahuluan

Korosi merupakan fenomena degradasi material logam yang tidak terhindarkan dan menjadi tantangan utama dalam bidang teknik material dan manufaktur. Proses ini terjadi melalui reaksi kimia atau elektrokimia antara logam dengan lingkungan sekitarnya, yang mengakibatkan penurunan kekuatan mekanik, keandalan, dan umur pakai komponen [1]. Baja, sebagai material yang paling banyak digunakan di berbagai sektor industri karena sifat mekaniknya yang unggul dan harga yang ekonomis, sangat rentan terhadap serangan korosi, terutama ketika terpapar lingkungan asam seperti larutan asam klorida (HCl) [2].

Mengingat dampak kerugian yang signifikan, diperlukan upaya pengendalian korosi yang efektif. Dua metode yang banyak dikembangkan adalah proteksi katodik dan penggunaan inhibitor. Proteksi katodik dengan metode anoda tumbal bekerja dengan mengorbankan logam yang lebih reaktif (anoda) untuk melindungi logam utama (katoda), sehingga laju korosi pada logam utama dapat ditekan [3]. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan anoda tumbal berbahan aluminium (Al) dan seng (Zn) efektif dalam menurunkan laju korosi baja di lingkungan korosif. Aluminium menunjukkan kinerja yang lebih baik karena potensialnya yang lebih negatif (-1,67 V) dibandingkan seng (-0,76 V), sehingga memberikan gaya dorong galvanik yang lebih besar dalam melindungi baja [4]. Namun demikian, efektivitas proteksi katodik ini tetap dipengaruhi oleh kondisi elektrolit seperti konsentrasi larutan dan suhu, serta kestabilan permukaan anoda selama proses perendaman berlangsung [2], [10].

Selain proteksi katodik, inhibitor adalah senyawa kimia yang berfungsi memperlambat laju korosi dengan membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam, sehingga menghambat kontak langsung antara logam

dengan lingkungan korosif [5]. Seiring dengan meningkatnya kesadaran lingkungan, penggunaan inhibitor organik dari bahan alam menjadi alternatif yang menjanjikan. Inhibitor organik, seperti ekstrak daun jambu biji, daun pepaya, dan daun belimbing wuluh, mengandung senyawa aktif yang mampu teradsorpsi pada permukaan logam dan efektif menghambat korosi, serta ramah lingkungan, mudah didapat, dan ekonomis [6]. Khususnya, ekstrak biji pepaya yang kaya akan senyawa tanin terbukti mampu membentuk kompleks Fe-tanin pada permukaan baja, sehingga efektif menurunkan laju korosi [7].

Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode proteksi katodik dengan anoda tumbal maupun penggunaan inhibitor organik secara terpisah telah terbukti efektif dalam menurunkan laju korosi. Namun demikian, masih jarang ditemukan penelitian yang mengombinasikan kedua metode tersebut dalam satu sistem perlindungan, khususnya dengan memodifikasi anoda tumbal melalui pelapisan inhibitor. Penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) pada aspek rekayasa sistem proteksi katodik melalui modifikasi anoda tumbal seng (Zn) dan aluminium (Al) menggunakan inhibitor alami ekstrak biji pepaya. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan perlindungan ganda, yaitu perlindungan katodik dari anoda tumbal dan perlindungan dari lapisan inhibitor yang terbentuk pada permukaan anoda.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan laju korosi baja pada kondisi tanpa proteksi, proteksi anoda Zn, proteksi anoda Al, serta proteksi anoda Zn dan Al yang dilapisi ekstrak biji pepaya selama perendaman dalam larutan HCl 0,5 M. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif metode pengendalian korosi yang lebih efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk meningkatkan ketahanan baja terhadap lingkungan korosif.

2 Metode Penelitian

A. Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gerinda untuk memotong dan merapikan logam, timbangan digital dengan akurasi 0,001 g untuk menimbang massa awal dan akhir spesimen, amplas grit 600 untuk menghaluskan dan membersihkan permukaan logam, gelas ukur untuk mengukur volume larutan, gelas kaca sebagai wadah pengujian, serta kawat tembaga sebagai penghubung antara baja dan anoda tumbal.

Bahan yang digunakan terdiri dari baja karbon rendah komersial dengan keterbatasan data komposisi kimia, seng (Zn), dan aluminium (Al) dengan ukuran masing-masing 40 mm × 20 mm × 3 mm. Biji pepaya kering digunakan sebagai bahan dasar pembuatan ekstrak, etanol sebagai pelarut dalam proses pembuatan ekstrak, sedangkan larutan asam klorida (HCl) 0,5 M sebanyak 100 mL digunakan sebagai media korosif.

B. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu:

1. Pembuatan Ekstrak Biji Pepaya

Biji pepaya dibersihkan dari unsur-unsur pengotor dan dikeringkan pada suhu kamar selama ± 2 minggu. Setelah kering, biji pepaya digiling hingga berbentuk serbuk halus sebanyak 100 g. Proses ekstraksi dilakukan dengan mencampurkan serbuk biji pepaya ke dalam larutan etanol, lalu didiamkan selama 3 hari di ruang tertutup, kemudian dipanaskan pada suhu sekitar 60 °C sambil diaduk secara perlahan hingga diperoleh ekstrak biji pepaya yang bertekstur kental.

2. Persiapan Spesimen

Material logam baja karbon, seng, dan aluminium dipotong dengan ukuran masing-masing 40 mm × 20 mm × 3 mm. Permukaan material digosok dengan kertas amplas ukuran 600 untuk membersihkan dan meratakan permukaan. Baja karbon kemudian ditimbang untuk mengetahui massa awal sebelum digunakan.

3. Pelapisan Ekstrak Biji Pepaya pada Anoda Tumbal

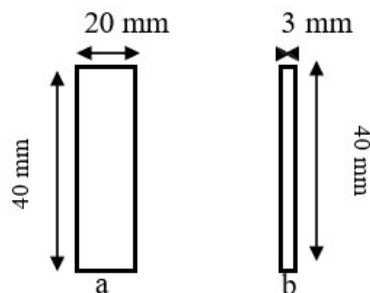
Anoda tumbal (Zn dan Al) yang akan diberi perlakuan dilapisi dengan ekstrak biji pepaya dengan cara dicelupkan hingga seluruh permukaannya tertutup secara merata. Anoda kemudian dibiarkan pada suhu ruang sampai lapisan mengering dan menempel dengan baik pada permukaannya.

4. Persiapan Larutan Elektrolit

Larutan HCl 0,5 M disiapkan sebanyak 100 mL untuk setiap pengujian sebagai media korosif.

5. Pengujian Laju Korosi dengan Metode Kehilangan Berat

Logam dirakit dengan susunan Zn–Fe atau Al–Fe, lalu dihubungkan menggunakan kawat tembaga. Spesimen baja (Fe) dan anoda tumbal (Zn atau Al) direndam secara bersamaan dalam larutan HCl dengan posisi vertikal dan jarak antarlogam sekitar 2–3 cm. Seluruh permukaan spesimen tercelup dalam larutan elektrolit, sedangkan kawat tembaga penghubung dijaga agar tidak terendam untuk menghindari reaksi galvanik tambahan. Konfigurasi perendaman ini ditunjukkan pada Gambar 2. Rangkaian tersebut direndam dalam larutan HCl dan dibiarkan selama 24–288 jam. Pengamatan dan pengambilan data dilakukan setiap 24 jam. Setelah waktu perendaman selesai, baja diangkat, dikeringkan, dan ditimbang kembali untuk mengetahui kehilangan massa yang digunakan dalam perhitungan laju korosi.



Gambar 1 Bentuk spesimen benda uji (a) tampak depan dan (b) tampak samping.



Gambar 2 perakitan dan perendaman

6. Perhitungan Laju Korosi

Perhitungan laju korosi dilakukan menggunakan metode kehilangan berat (weight loss) dengan persamaan berikut [8]:

$$CR = \frac{K.W}{\rho.A.T} \quad (1)$$

Keterangan:

K = konstanta laju korosi

W = kehilangan berat (gram); $W = W_{\text{awal}} - W_{\text{akhir}}$

ρ = densitas (g/cm^3)

A = luas permukaan spesimen (cm^2)

T = waktu perendaman (jam)

CR = laju korosi (mmpy)

K = 8,76 (untuk mmpy) dan 87.600 (untuk mpy)

C. Analisis Data

Data hasil eksperimen disusun secara sistematis dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah analisis. Analisis data dilakukan secara kualitatif dengan pendekatan deskriptif, yaitu dengan membandingkan nilai laju korosi pada setiap variasi perlakuan dan mengidentifikasi hubungan antar variabel untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap hasil yang diperoleh. Sebagai bentuk analisis tambahan, dilakukan perhitungan persentase penurunan laju korosi masing-masing variasi terhadap baja tanpa perlindungan (Fe) pada akhir perendaman 288 jam. Hasilnya menunjukkan bahwa Fe+Zn menurunkan laju korosi sebesar 9,15%, Fe+Al sebesar 12,68%, Fe+Zn+inhibitor sebesar 49,30%, dan Fe+Al+inhibitor sebesar 71,83%. Analisis ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai efektivitas setiap perlakuan dalam mengendalikan korosi.

Analisis kualitatif difokuskan pada perubahan laju korosi akibat penggunaan proteksi katodik dengan anoda tumbal serta penambahan inhibitor alami. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan teori dan penelitian

terdahulu sebagai bentuk validasi data eksperimen, sehingga dapat ditarik kesimpulan yang akurat sesuai dengan tujuan penelitian.

3 Hasil dan Pembahasan

A. Hasil Pengujian dan Analisis Laju Korosi Baja dengan Metode Anoda Tumbal (Zn) dan Pelapisan Inhibitor

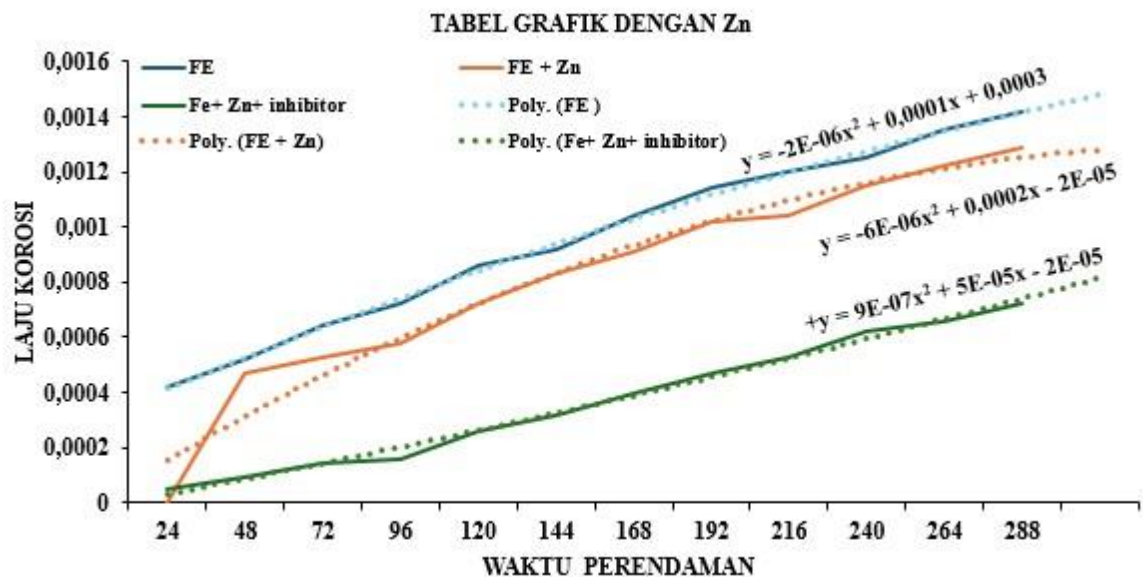
Pengujian laju korosi pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan anoda tumbal seng (Zn) yang dikombinasikan dengan pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya terhadap laju korosi baja karbon dalam media larutan HCl 0,5 M. Pengujian dilakukan menggunakan metode kehilangan berat (*weight loss*) dengan variasi waktu perendaman selama 24–288 jam.

Hasil pengujian laju korosi baja dengan proteksi katodik menggunakan anoda tumbal seng (Zn), dengan dan tanpa pelapisan inhibitor, disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data hasil pengujian laju korosi Fe + Zn

Waktu (jam)	Fe (mmpy)	Fe + Zn (mmpy)	Fe + Zn + inhibitor (mmpy)
24	0,00042	0,00036	0,00005
48	0,00052	0,00047	0,00009
72	0,00064	0,00053	0,00014
96	0,00072	0,00058	0,00016
120	0,00086	0,00072	0,00026
144	0,00092	0,00083	0,00032
168	0,00104	0,00091	0,00040
192	0,00114	0,00102	0,00047
216	0,0012	0,00104	0,00053
240	0,00125	0,00115	0,00062
264	0,00135	0,00122	0,00066
288	0,00142	0,00129	0,00072

Data hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai laju korosi baja bervariasi pada setiap interval waktu perendaman, yang mengindikasikan adanya pengaruh dari penggunaan anoda tumbal seng (Zn) dan pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya terhadap ketahanan korosi baja dalam media HCl. Untuk memudahkan pemahaman terhadap kecenderungan perubahan laju korosi selama pengujian, data tersebut disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara laju korosi dan waktu perendaman pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik hasil pengujian laju korosi Fe + Zn

Berdasarkan data pada Tabel 1, nilai laju korosi yang ditampilkan merupakan hasil perhitungan kehilangan massa baja pada setiap interval waktu perendaman. Baja tanpa perlindungan (Fe) menunjukkan peningkatan laju korosi dari 0,00042 mmpy pada 24 jam menjadi 0,00142 mmpy pada 288 jam. Peningkatan ini terjadi seiring bertambahnya waktu perendaman, yang mengindikasikan bahwa interaksi antara permukaan baja dan lingkungan korosif semakin besar sehingga reaksi oksidasi besi berlangsung lebih intensif [1]. Penelitian sebelumnya juga menyatakan bahwa semakin lama waktu kontak dengan larutan korosif, semakin banyak produk korosi yang menempel pada permukaan sehingga laju korosi meningkat [9].

a) Pengaruh Anoda Tumbal Seng terhadap Laju Korosi

Pada spesimen baja yang diproteksi menggunakan anoda tumbal seng (Fe+Zn), laju korosi menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya waktu perendaman, meskipun nilainya tetap berada di bawah laju korosi baja tanpa perlindungan selama periode pengujian. Pada awal pengamatan, laju korosi masih relatif rendah, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai sekitar 0,0013 mmpy pada akhir waktu perendaman.

Anoda tumbal seng mampu melindungi baja karena seng memiliki potensial yang lebih negatif dibandingkan besi, sehingga seng akan terkorosi lebih dahulu dan baja tetap berada dalam kondisi katodik. Mekanisme ini terjadi melalui aliran elektron dari anoda menuju baja, yang berhasil menekan proses korosi pada permukaan baja [4]. Penelitian sebelumnya juga mengonfirmasi bahwa anoda tumbal mampu menurunkan laju korosi baja secara signifikan; anoda aluminium dan seng terbukti efektif dalam melindungi katoda dari serangan lingkungan korosif [10].

b) Pengaruh Pelapisan Inhibitor pada Anoda Tumbal Seng

Sementara itu, spesimen baja yang menggunakan anoda tumbal seng dengan pelapisan inhibitor (Fe+Zn+inhibitor) menunjukkan nilai laju korosi paling rendah dibandingkan dengan spesimen lainnya, yaitu dari 0,00005 mmpy menjadi 0,00072 mmpy. Laju korosi pada spesimen ini mengalami peningkatan secara bertahap dari awal hingga akhir pengujian, tetapi peningkatannya berlangsung lebih lambat dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Pada akhir waktu perendaman 288 jam, nilai laju korosi masih berada di bawah kedua perlakuan lainnya, yaitu sekitar 0,0008 mmpy.

Rendahnya laju korosi pada spesimen ini diduga disebabkan oleh kombinasi perlindungan ganda dari anoda tumbal dan inhibitor. Interpretasi mekanisme ini didasarkan pada kecenderungan penurunan laju korosi yang konsisten pada spesimen dengan pelapisan inhibitor serta didukung oleh literatur terkait. Selain perlindungan katodik yang diberikan oleh seng, lapisan inhibitor yang terbentuk dari ekstrak biji pepaya berfungsi menghambat kontak langsung antara logam dan media korosif. Kandungan tanin dalam ekstrak biji

pepaya berperan membentuk lapisan adsorpsi pada permukaan logam melalui pembentukan kompleks Fe-tanatan yang tidak larut, sehingga melindungi permukaan baja dari serangan ion korosif [7]. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa inhibitor organik dari bahan alam efektif dalam menurunkan laju korosi melalui pembentukan lapisan pelindung pada permukaan logam, dengan efisiensi yang sangat baik dalam berbagai media asam [9], [11].

Penggunaan anoda tumbal seng efektif menurunkan laju korosi baja dari 0,00142 mmpy menjadi 0,00129 mmpy. Kinerja ini meningkat signifikan ketika anoda dilapisi inhibitor ekstrak biji pepaya, yang menghasilkan laju korosi terendah sebesar 0,00072 mmpy. Kombinasi perlindungan katodik dari seng dan lapisan pelindung dari inhibitor memberikan efek sinergis dalam menekan laju korosi baja di lingkungan asam.

B. Hasil Pengujian dan Analisis Laju Korosi Baja dengan Metode Anoda Tumbal (Al) dan Pelapisan Inhibitor

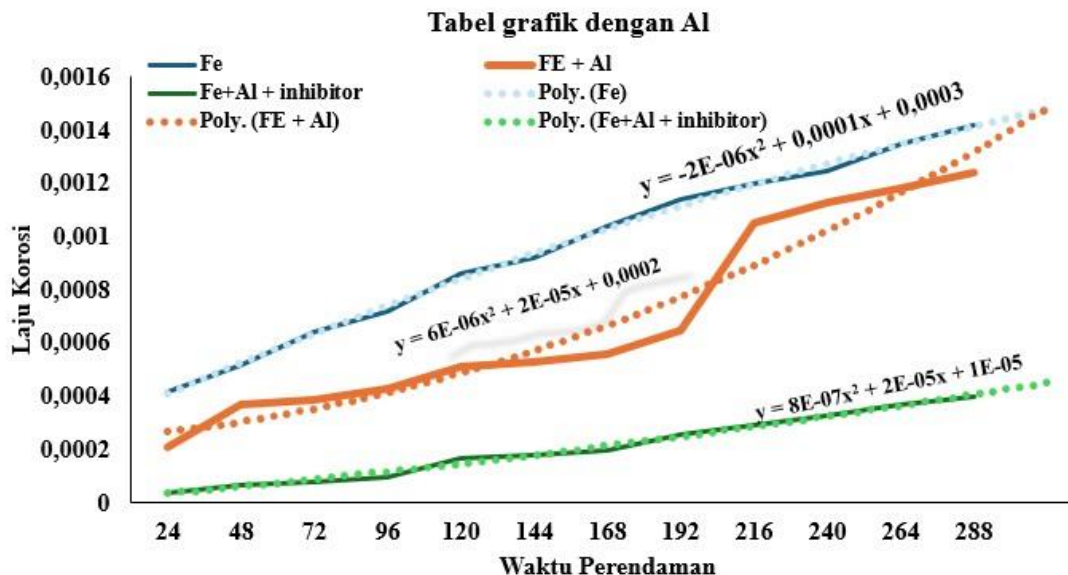
Pengujian laju korosi dilakukan untuk mengetahui pengaruh anoda tumbal aluminium (Al) dengan pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya terhadap laju korosi baja karbon dalam larutan HCl 0,5 M menggunakan metode kehilangan berat (*weight loss*) dengan variasi waktu perendaman 24–288 jam.

Hasil pengujian laju korosi baja dengan proteksi katodik menggunakan anoda tumbal aluminium (Al), dengan dan tanpa pelapisan inhibitor, disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data hasil pengujian laju korosi Fe + Al

Waktu (jam)	Fe (mmpy)	Fe + Al (mmpy)	Fe + Al + inhibitor (mmpy)
24	0,00042	0,00021	0,00004
48	0,00052	0,00037	0,00007
72	0,00064	0,00039	0,00008
96	0,00072	0,00043	0,0001
120	0,00086	0,00051	0,00017
144	0,00092	0,00053	0,00018
168	0,00104	0,00056	0,0002
192	0,00114	0,00065	0,00026
216	0,0012	0,00105	0,00029
240	0,00125	0,00113	0,00033
264	0,00135	0,00118	0,00037
288	0,00142	0,00124	0,0004

Data hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai laju korosi baja bervariasi pada setiap interval waktu perendaman, yang mengindikasikan adanya pengaruh dari penggunaan anoda tumbal aluminium (Al) dan pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya terhadap ketahanan korosi baja dalam media HCl. Untuk memudahkan pemahaman terhadap kecenderungan perubahan laju korosi selama pengujian, data tersebut disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara laju korosi dan waktu perendaman pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik hasil pengujian laju korosi Fe + Al

Spesimen Fe tanpa perlindungan menunjukkan laju korosi tertinggi, meningkat dari 0,00042 mmpy menjadi 0,00124 mmpy selama 288 jam perendaman. Semakin lama durasi perendaman, semakin intensif interaksi antara baja dan larutan korosif sehingga mempercepat reaksi oksidasi besi. Penelitian lain juga melaporkan bahwa peningkatan waktu perendaman berdampak pada akumulasi produk korosi yang mendorong kenaikan laju korosi [12].

a) Pengaruh Anoda Tumbal Aluminium terhadap Laju Korosi

Spesimen Fe+Al menunjukkan laju korosi yang lebih rendah dibandingkan Fe tanpa perlindungan, yaitu dari 0,00021 mmpy menjadi 0,00124 mmpy selama perendaman 24–288 jam. Anoda tumbal aluminium mampu melindungi baja karena aluminium memiliki potensial yang lebih negatif dibandingkan besi, sehingga aluminium akan terkorosi lebih dahulu dan baja tetap berada dalam kondisi katodik. Anoda aluminium diketahui memiliki kinerja proteksi yang lebih baik dibandingkan anoda seng karena potensial aluminium yang lebih negatif menghasilkan kemampuan proteksi yang lebih besar [4]. Hal ini juga didukung oleh penelitian lain yang mengonfirmasi bahwa anoda tumbal berbahan aluminium lebih efektif dalam melindungi katoda dibandingkan anoda seng [10].

Meskipun demikian, pada rentang waktu 192 hingga 216 jam terjadi peningkatan laju korosi yang cukup signifikan pada spesimen Fe+Al. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kemampuan proteksi anoda aluminium mulai mengalami penurunan selama proses perendaman, yang disebabkan oleh oksidasi berkelanjutan pada anoda korban sehingga sebagian kemampuan proteksinya berkurang seiring bertambahnya waktu pengujian [10]. Namun secara keseluruhan, nilai laju korosi spesimen Fe+Al tetap berada di bawah spesimen Fe tanpa perlindungan selama hampir seluruh periode pengujian.

b) Pengaruh Pelapisan Inhibitor pada Anoda Tumbal Aluminium

Spesimen Fe+Al+inhibitor menunjukkan tren peningkatan laju korosi yang paling landai dibandingkan perlakuan lainnya. Sejak awal hingga akhir pengujian, nilai laju korosi pada spesimen ini cenderung meningkat secara perlahan dan stabil, tanpa terlihat adanya lonjakan nilai yang signifikan selama proses perendaman berlangsung. Kurva Fe+Al+inhibitor selalu berada pada posisi paling bawah dibandingkan kurva lainnya, yang mengindikasikan bahwa nilai laju korosi yang diperoleh lebih rendah selama seluruh periode pengujian, yaitu dari 0,00004 mmpy menjadi 0,0004 mmpy.

Kinerja terbaik ini diperoleh dari kombinasi perlindungan ganda antara anoda tumbal aluminium dan inhibitor ekstrak biji pepaya. Selain perlindungan katodik dari aluminium yang memiliki potensial lebih negatif, lapisan inhibitor berfungsi menghambat kontak langsung antara logam dan media korosif. Kandungan tanin dalam ekstrak biji pepaya berperan membentuk lapisan adsorpsi pada permukaan logam melalui pembentukan kompleks Fe-tanin yang tidak larut, sehingga melindungi permukaan baja dari serangan ion korosif [7]. Penelitian sebelumnya juga membuktikan bahwa inhibitor organik berbahan alam efektif dalam melindungi logam dalam lingkungan asam melalui mekanisme adsorpsi fisik pada permukaan logam, yang menghasilkan efisiensi inhibisi yang sangat baik [13]. Pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya pada anoda tumbal terbukti efektif

menurunkan laju korosi baja. Pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya pada anoda tumbal diduga memperlambat konsumsi anoda secara berlebihan, namun anoda tetap perlu aktif secara elektrokimia untuk mempertahankan proteksi katodik [5]. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan laju korosi yang lebih landai pada spesimen dengan pelapisan inhibitor dibandingkan tanpa pelapisan, meskipun laju korosi tetap meningkat seiring bertambahnya waktu perendaman karena anoda terus mengalami oksidasi selama proses proteksi berlangsung.

Anoda tumbal aluminium efektif menurunkan laju korosi baja dari 0,00142 mmpy menjadi 0,00124 mmpy karena potensialnya yang lebih negatif daripada besi, sehingga memberikan perlindungan katodik yang baik. Kinerjanya semakin meningkat ketika dilapisi inhibitor ekstrak biji pepaya, yang menghasilkan laju korosi terendah sebesar 0,0004 mmpy. Kombinasi perlindungan katodik dan lapisan inhibitor memberikan efek sinergis dalam menekan laju korosi baja di lingkungan asam.

C. Hasil Pengujian dan Analisis Laju Korosi Baja dengan Metode Anoda Tumbal (Zn) dan (Al)

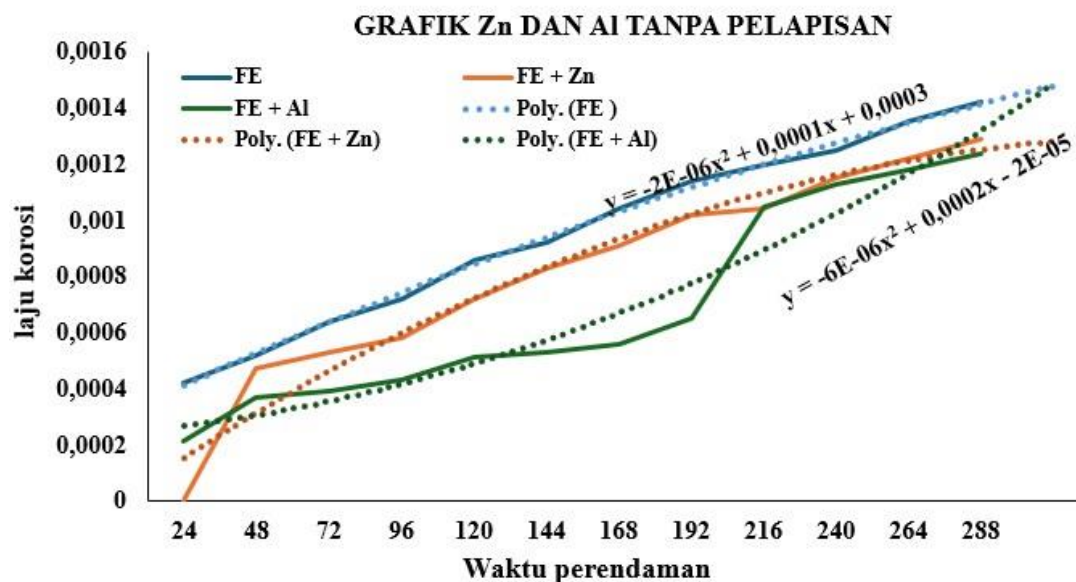
Pengujian laju korosi dilakukan untuk membandingkan pengaruh anoda tumbal seng (Zn) dan aluminium (Al) terhadap laju korosi baja karbon dalam larutan HCl 0,5 M menggunakan metode kehilangan berat (*weight loss*) dengan variasi waktu perendaman 24–288 jam.

Hasil pengujian laju korosi baja dengan proteksi katodik menggunakan anoda tumbal seng (Zn) dan aluminium (Al) disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 5.

Tabel 3. Data hasil pengujian anoda Zn dan Al tanpa perlakuan

Waktu (jam)	Fe (mmpy)	Fe + Zn (mmpy)	Fe + Al (mmpy)
24	0,00042	0,00036	0,00021
48	0,00052	0,00047	0,00037
72	0,00064	0,00053	0,00039
96	0,00072	0,00058	0,00043
120	0,00086	0,00072	0,00051
144	0,00092	0,00083	0,00053
168	0,00104	0,00091	0,00056
192	0,00114	0,00102	0,00065
216	0,0012	0,00104	0,00105
240	0,00125	0,00115	0,00113
264	0,00135	0,00122	0,00118
288	0,00142	0,00129	0,00124

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai laju korosi baja bervariasi pada setiap interval waktu perendaman, yang mengindikasikan adanya pengaruh dari penggunaan anoda tumbal seng (Zn) dan aluminium (Al) terhadap ketahanan korosi baja dalam media HCl. Untuk memudahkan pemahaman terhadap kecenderungan perubahan laju korosi selama pengujian, data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara laju korosi dan waktu perendaman pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hasil pengujian anoda Zn dan Al tanpa perlakuan

Spesimen baja tanpa perlindungan (Fe) mencatatkan laju korosi tertinggi selama pengujian, yaitu dari 0,00042 mmpy pada 24 jam menjadi 0,00142 mmpy pada 288 jam.

a) Perbandingan Pengaruh Anoda Tumbal Seng dan Aluminium

Spesimen Fe+Zn menunjukkan peningkatan laju korosi dari 0,00036 mmpy menjadi 0,0013 mmpy selama perendaman 24–288 jam, sedangkan spesimen Fe+Al menunjukkan peningkatan dari 0,0002 mmpy menjadi 0,00125 mmpy. Kedua jenis anoda tumbal terbukti mampu menurunkan laju korosi dibandingkan baja tanpa perlindungan yang mencapai 0,00142 mmpy pada akhir pengujian. Namun demikian, anoda aluminium menunjukkan kinerja proteksi yang lebih baik dibandingkan anoda seng pada sebagian besar waktu perendaman.

Pada spesimen Fe+Zn, pola peningkatan laju korosi terlihat hampir menyerupai baja tanpa perlindungan. Pada awal pengujian, terjadi kenaikan yang cukup tajam dari 24 jam ke 48 jam, kemudian laju korosi terus meningkat secara bertahap hingga akhir pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa anoda seng memiliki kemampuan proteksi yang terbatas dalam mempertahankan arus perlindungan terhadap baja selama perendaman berlangsung.

Sementara itu, spesimen Fe+Al menunjukkan pola peningkatan yang sedikit berbeda. Pada awal hingga pertengahan waktu perendaman, peningkatan laju korosi berlangsung lebih lambat dibandingkan spesimen Fe dan Fe+Zn. Namun pada rentang waktu sekitar 192 hingga 216 jam, terjadi kenaikan yang cukup tinggi sehingga nilai laju korosinya mendekati spesimen Fe+Zn. Setelah itu, laju korosi kembali meningkat secara bertahap hingga akhir pengujian.

Lonjakan laju korosi pada spesimen Fe+Al di rentang 192 hingga 216 jam mengindikasikan bahwa kemampuan proteksi anoda aluminium mulai mengalami penurunan selama proses perendaman. Kondisi ini terjadi karena aluminium terus mengalami oksidasi sebagai anoda korban, sehingga sebagian kemampuan proteksinya berkurang seiring bertambahnya waktu pengujian [10]. Penelitian sebelumnya juga menjelaskan bahwa semakin lama waktu perendaman, anoda tumbal akan semakin terkonsumsi dan kemampuannya dalam melindungi logam utama akan semakin berkurang [3]. Meskipun demikian, nilai laju korosi yang dihasilkan tetap lebih rendah dibandingkan spesimen Fe tanpa perlindungan.

Keunggulan anoda aluminium dibandingkan anoda seng disebabkan oleh potensial elektrokimianya yang lebih negatif, sehingga menghasilkan arus galvanik yang lebih besar dan kemampuan proteksi yang lebih tinggi [2], [4]. Selain itu, aluminium anoda memiliki bobot yang lebih ringan dan kapasitas elektron yang jauh lebih tinggi dibandingkan seng, sehingga lebih efektif dalam memberikan perlindungan katodik [14]. Penelitian sebelumnya juga mengonfirmasi bahwa anoda aluminium memiliki rata-rata efisiensi penurunan laju korosi sebesar 99,99597%, sedangkan anoda seng sebesar 99,96611% [15]. Dengan demikian, anoda aluminium terbukti lebih efektif dibandingkan anoda seng dalam sistem proteksi katodik pada baja di lingkungan asam [2], [3].

D. Hasil Pengujian dan Analisis Laju Korosi Baja dengan Anoda Tumbal (Zn) dan (Al) yang Dilapisi Inhibitor

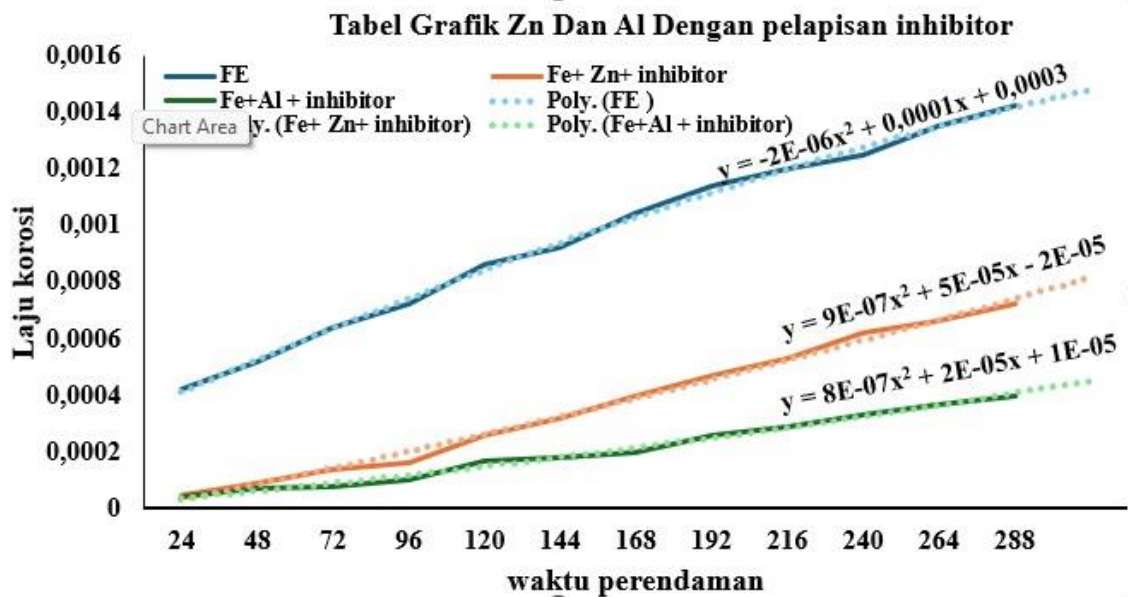
Pengujian laju korosi dilakukan untuk mengetahui pengaruh pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya pada anoda tumbal seng (Zn) dan aluminium (Al) terhadap laju korosi baja karbon dalam larutan HCl 0,5 M menggunakan metode kehilangan berat (*weight loss*) dengan variasi waktu perendaman 24–288 jam.

Hasil pengujian laju korosi baja dengan proteksi katodik menggunakan anoda tumbal seng (Zn) dan aluminium (Al) dengan pelapisan inhibitor disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 6.

Tabel 4. Data hasil pengujian laju korosi Fe + Zn dan Fe + Al dengan pelapisan inhibitor

Waktu (jam)	Fe (mmpy)	Fe + Zn + inhibitor (mmpy)	Fe + Al + inhibitor (mmpy)
24	0,00042	0,00005	0,00004
48	0,00052	0,00009	0,00007
72	0,00064	0,00014	0,00008
96	0,00072	0,00016	0,0001
120	0,00086	0,00026	0,00017
144	0,00092	0,00032	0,00018
168	0,00104	0,0004	0,0002
192	0,00114	0,00047	0,00026
216	0,0012	0,00053	0,00029
240	0,00125	0,00062	0,00033
264	0,00135	0,00066	0,00037
288	0,00142	0,00072	0,0004

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai laju korosi baja bervariasi pada setiap interval waktu perendaman, yang mengindikasikan adanya pengaruh dari penggunaan anoda tumbal seng (Zn) dan aluminium (Al) dengan pelapisan inhibitor terhadap ketahanan korosi baja dalam media HCl. Untuk memudahkan pemahaman terhadap kecenderungan perubahan laju korosi selama pengujian, data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara laju korosi dan waktu perendaman pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik data hasil pengujian laju korosi Fe + Zn dan Fe + Al dengan pelapisan inhibitor

Spesimen baja tanpa perlindungan (Fe) mencatatkan laju korosi tertinggi selama pengujian, yaitu dari 0,00042 mmpy pada 24 jam menjadi 0,00142 mmpy pada 288 jam.

a) Efektivitas Pelapisan Inhibitor pada Anoda Tumbal

Spesimen Fe+Zn+inhibitor menunjukkan peningkatan laju korosi dari 0,00005 mmpy menjadi 0,00072 mmpy selama perendaman, sedangkan spesimen Fe+Al+inhibitor menunjukkan peningkatan dari 0,00004 mmpy menjadi 0,0004 mmpy. Kedua spesimen dengan pelapisan inhibitor menunjukkan laju korosi yang jauh lebih rendah dibandingkan spesimen tanpa pelapisan dan baja tanpa perlindungan (0,00142 mmpy). Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa pelapisan inhibitor pada anoda tumbal cenderung efektif dalam memperlambat laju korosi seiring bertambahnya waktu perendaman. Pada akhir perendaman 288 jam, spesimen Fe+Zn+inhibitor menunjukkan penurunan laju korosi sebesar 49,30% dibandingkan baja tanpa perlindungan (dari 0,00142 mmpy menjadi 0,00072 mmpy), sedangkan spesimen Fe+Al+inhibitor menunjukkan penurunan sebesar 71,83% (dari 0,00142 mmpy menjadi 0,0004 mmpy). Kedua spesimen dengan pelapisan inhibitor menunjukkan laju korosi yang jauh lebih rendah dibandingkan spesimen tanpa pelapisan dan baja tanpa perlindungan, yang mengindikasikan efektivitas metode ini dalam mengendalikan korosi.

Pada spesimen Fe+Zn+inhibitor, kurva yang terbentuk menunjukkan kenaikan yang relatif rendah dan bertahap dari 24 jam hingga 288 jam, dengan perubahan nilai yang cukup konsisten pada setiap periode pengamatan. Sementara itu, spesimen Fe+Al+inhibitor menunjukkan pola kenaikan yang paling rendah dibandingkan perlakuan lainnya. Sejak awal hingga akhir pengujian, nilai laju korosi pada spesimen ini selalu berada di bawah perlakuan lainnya, dengan peningkatan yang sangat landai dan stabil tanpa lonjakan signifikan.

Rendahnya laju korosi pada spesimen dengan pelapisan inhibitor disebabkan oleh kandungan senyawa aktif dalam ekstrak biji pepaya. Ekstrak biji pepaya mengandung senyawa metabolit sekunder seperti triterpenoid, flavonoid, kuinon, tanin, dan alkaloid yang berperan dalam proses penghambatan korosi melalui mekanisme adsorpsi pada permukaan logam [7]. Senyawa tanin dalam ekstrak biji pepaya membentuk kompleks Fe-tanin yang tidak larut dan teradsorpsi pada permukaan logam, sehingga melindungi permukaan baja dari serangan ion korosif.

Mekanisme penghambatan korosi oleh inhibitor organik terjadi melalui proses adsorpsi molekul inhibitor pada permukaan logam, yang membentuk lapisan pelindung dan menghambat reaksi oksidasi [6]. Senyawa inhibitor organik memiliki struktur heteroatom seperti N, O, P, dan S yang memiliki pasangan elektron bebas sebagai ligan yang membentuk senyawa kompleks dengan logam [13]. Lapisan adsorpsi ini tidak hanya memisahkan logam dari media korosif, tetapi juga meningkatkan hambatan energi reaksi korosi. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa metode pelapisan inhibitor mampu menurunkan laju korosi secara signifikan dengan efisiensi yang sangat baik [6], [11].

Perlindungan terbaik diberikan oleh kombinasi anoda tumbal aluminium dengan pelapisan inhibitor (Fe+Al+Inhibitor), diikuti anoda tumbal seng dengan pelapisan inhibitor (Fe+Zn+Inhibitor). Sistem dengan pelapisan inhibitor bekerja melalui dua mekanisme sekaligus, yaitu perlindungan katodik dari anoda tumbal dan

lapisan inhibitor yang menghambat kontak langsung antara logam dan media korosif [6], [2], [13]. Dengan demikian, kombinasi proteksi katodik dan pelapisan inhibitor alami ekstrak biji pepaya terbukti efektif dalam menekan laju korosi baja di lingkungan asam.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengendalian korosi pada baja melalui rekayasa proteksi katodik dengan anoda tumbal dan pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya dalam media larutan HCl, dapat disimpulkan bahwa penggunaan anoda tumbal dan pelapisan inhibitor memberikan pengaruh terhadap laju korosi baja. Penggunaan proteksi katodik dengan anoda tumbal seng dan aluminium mampu menurunkan laju korosi baja dibandingkan dengan baja tanpa perlindungan. Pada akhir perendaman 288 jam, baja tanpa perlindungan (Fe) menunjukkan laju korosi sebesar 0,00142 mmpy, sedangkan dengan anoda Zn turun menjadi 0,00129 mmpy (penurunan 9,15%) dan dengan anoda Al turun menjadi 0,00124 mmpy (penurunan 12,68%). Di antara kedua jenis anoda tersebut, aluminium memberikan perlindungan yang lebih baik karena menghasilkan laju korosi yang lebih rendah selama proses perendaman.

Pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya pada anoda tumbal dapat meningkatkan efektivitas perlindungan terhadap korosi. Hal ini ditunjukkan oleh spesimen yang menggunakan anoda tumbal berlapis inhibitor yang memiliki laju korosi lebih rendah dibandingkan spesimen tanpa pelapisan inhibitor. Kandungan senyawa tanin dalam ekstrak biji pepaya berperan dalam membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam sehingga menghambat kontak langsung antara logam dengan media korosif.

Kombinasi proteksi katodik menggunakan anoda tumbal aluminium dengan pelapisan inhibitor ekstrak biji pepaya merupakan perlakuan yang memberikan perlindungan paling baik terhadap korosi baja dalam media larutan HCl. Spesimen dengan perlakuan tersebut menunjukkan nilai laju korosi terendah dan peningkatan laju korosi yang lebih landai selama waktu perendaman dibandingkan perlakuan lainnya. Dengan demikian, kombinasi metode proteksi katodik dengan anoda tumbal dan pelapisan inhibitor alami ekstrak biji pepaya berpotensi menjadi alternatif pengendalian korosi dalam media HCl berdasarkan hasil uji weight loss, dengan kebutuhan kajian lanjutan terhadap stabilitas lapisan inhibitor, efisiensi proteksi jangka panjang, dan aspek lingkungan sebelum dapat diaplikasikan secara luas.

5 Referensi

- [1] S. T. A. Lekatompessy, "Analisis Laju Pengausan Perlindungan Zink Anoda Pada Kapal Terhadap Laju Korosi," *ALE Proceeding*, vol. 5, pp. 74–78, 2022, doi: 10.30598/ale.5.2022.74-78.
- [2] M. T. R. Syah, K. Kosjoko, N. A. Mufarida, and N. Nurhalim, "Efektivitas Inhibitor Organik terhadap Laju Korosi pada Plat Baja ST 40," *J. Penelit. Inov.*, vol. 5, no. 3, pp. 2585–2594, 2025, doi: 10.54082/jupin.1801.
- [3] T. N. Rohmannudin, S. Sulistijono, W. D. Kusuma, and G. A. Sitorus, "Uji Efisiensi Anoda Korban Paduan Aluminium Dan Zinc Menggunakan Standar Uji Dnv Rp-B401 Terhadap Variasi Temperatur Elektrolit," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 2, pp. 719–728, 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i2.1503.
- [4] K. Utami, Isnı Asrori, Nur Moh Faiz Natania, "KINERJA ANODA TUMBAL Al DAN Zn DALAM MENGENDALIKAN LAJU KOROSI BAJA ASTM A36 DI LINGKUNGAN NaCl 3,5%," *J. Tek. Kim.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–6, 2023, doi: 10.33005/jurnal_tekkim.v18i1.4117.
- [5] A. A. Mukhlis, I. P. Wardani, F. Vietanti, I. Teknologi, and A. Tama, "Media Nacl Terhadap Laju Korosi Dan Ketangguhan Hardened- Aisi 4140," pp. 1–5, 2023.
- [6] N. W. Purwanto, "Journal of Mechanical Engineering: Editorial," *UNJUK KERJA EKSTRAK CAMPURAN CABE DAN TOMAT BUSUK PADA Prot. LOGAM DI Lingkung. AGRESIF*, vol. 55, no. 1, p. 3, 2025.
- [7] L. Margrita, C. Oktaviananda, and L. H. Rahayu, "KARBON DALAM MEDIA NaCl DAN ANALISIS MODEL MENGGUNAKAN DESAIN EXPERT 11," vol. 6, pp. 28–38, 2025.
- [8] U. J. . Sugeng M, Ismail F.M, "jurnal Tera," *Anal. Perbedaan Laju Korosi Has. Penguji. Weight Loss Dan Polarisation Pada Pipa Dengan Penguji. Korosi Standar Astm G59 Dan Astm G31*, vol. 2, no. 1, pp. 48–56, 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.undira.ac.id/index.php/jurnaltera>
- [9] H. So, "Pengaruh Penambahan Konsentrasi Inhibitor Ekstrak Daun Talas Terhadap Laju Korosi Pada Baja API 5L X-52 Dengan Media Korosif," vol. 04, no. 01, pp. 1–7, 2021.
- [10] F. S. Afriani, "Proteksi Katodik Metoda Anoda Tumbal Untuk Mengendalikan Laju Korosi," *Jom FTEKNIK*, vol. 1, no. 2, p. 1, 2014.

- [11] I. Kusumaningrum, R. Soenoko, E. Siswanto, and F. Gapsari, "Investigation of Artocarpus Heteropyllus peel extract as non-toxic corrosion inhibitor for pure copper protection in nitric acid," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 6, no. June, p. 100223, 2022, doi: 10.1016/j.cscee.2022.100223.
- [12] S. T. Kismanti, M. B. Waluyo, T. Mesin, and U. B. Tarakan, "Laju Korosi pada Plat Baja Hitam dengan Penambahan Inhibitor Allium Sativum Solo Garlic di Lingkungan Air Laut," vol. 14, no. 1, pp. 13–18, 2023.
- [13] I. Kusumaningrum, R. Soenoko, E. Siswanto, and F. Gapsari, "Jackfruit peel extract as environmentally safe inhibitor for carbon steel protection in acidic solution," *J. New Mater. Electrochem. Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 46–54, 2022, doi: 10.14447/JNMES.V25I1.A07.
- [14] N. Rizka Aprilia and I. G. M. Sanjaya, "Testing the Aluminium Anode Metal Composition on the Warship of the Republic of Indonesia (KRI) Using the ICP-OES Instrument," *Pros. Semin. Nas. Kim.*, no. September, pp. 89–96, 2023.
- [15] M. R. Salsabillah, M. D. Busyra, and I. Utami, "Pengaruh Temperatur Terhadap Kinerja Anoda Tumbal Dalam Mengendalikan Laju Korosi Baja Aisi 4340," *J. Inov. Tek. Kim.*, vol. 7, no. 2, p. 23, 2022, doi: 10.31942/inteka.v7i2.6653.