

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Spesimen Uji

Bab ini menyajikan hasil analisis laju korosi galvanik antara baja karbon rendah ASTM A36 sebagai katoda dan zinc anode sebagai anoda yang dilakukan melalui pendekatan eksperimental. Pengujian dilakukan dengan merendam pasangan spesimen baja dan zinc anode dalam larutan air laut buatan selama 30 hari (720 jam) dengan variasi kondisi lingkungan yang mencakup tiga faktor utama, yaitu kondisi suhu, salinitas, dan pH.

Hasil eksperimen ini dianalisis menggunakan metode weight loss untuk menentukan nilai laju korosi (corrosion rate/CR) pada masing-masing kondisi pengujian. Selanjutnya dilakukan pembahasan mengenai pengaruh setiap variabel terhadap besarnya laju korosi galvanik yang terjadi.

4.1.1 Spesifikasi Spesimen Uji

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis material, yaitu baja karbon rendah ASTM A36 sebagai katoda dan zinc anode sebagai anoda korban. Detail spesifikasi dimensi dan berat awal masing-masing spesimen disajikan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Spesifikasi dimensi spesimen uji

Parameter	Baja karbon rendah (ASTM A36)	Zinc anode	Satuan
Panjang	6	3	Cm
Lebar	4	2	Cm
Tebal	0,8	1	Cm
Berat awal	150	30	Gram

Luas permukaan masing-masing spesimen dihitung menggunakan rumus luas permukaan total balok karena seluruh sisi tercelup dalam larutan elektrolit:

$$A = 2 \times (p \times l) + 2 \times (p \times t) + 2 \times (l \times t)$$

- a. Perhitungan luas permukaan spesimen baja ASTM A36 yang tercelup dalam larutan dihitung berdasarkan dimensi tersebut:

$$A \text{ baja} = 2 \times (p \times l) + 2 \times (p \times t) + 2 \times (l \times t)$$

$$A \text{ baja} = 2 \times (6 \times 4) + 2 \times (6 \times 0,8) + 2 \times (4 \times 0,8)$$

$$A \text{ baja} = 48 + 9,6 + 6,4 = 64 \text{ cm}^2$$

Nilai $A = 64 \text{ cm}^2$ digunakan karena seluruh permukaan spesimen tercelup dalam larutan elektrolit selama proses perendaman.

- b. Perhitungan luas permukaan zinc anode

$$A \text{ zinc} = 2 \times (3 \times 2) + 2 \times (3 \times 1) + 2 \times (2 \times 1)$$

$$A_{\text{zinc}} = 2 \times 6 + 2 \times 3 + 2 \times 2$$

$$A_{\text{zinc}} = 12 + 6 + 4 = 22 \text{ cm}^2$$

c. Rasio luas permukaan

$$\text{Rasio} = A_{\text{zinc}} : A_{\text{baja}} = 22 : 64 = 1 : 2,9 \approx 1 : 3$$

$$\text{Berat baja} = \text{volume} \times \text{densitas} = (6 \times 4 \times 0,8) \times 7,85 = 19,2 \times 7,85 =$$

$$150,72 \text{ gram} \approx 150 \text{ gram}$$

$$\text{Berat zinc} = \text{volume} \times \text{densitas} = (3 \times 2 \times 1) \times 7,13 = 6 \times 7,13 = 42,78 \text{ gram}$$

$$\text{Target berat zinc (rasio 1:3)} = 150 \div 3 = 50 \text{ gram}$$



Gambar 4. 1 Spesimen ASTM A36



Gambar 4. 2 Zinc anode

Selisih antara berat teoritis (42,78 gram) dan berat aktual (50 gram) sebesar 7,22 gram atau sekitar 16,9% dapat diartikan sebagai faktor keamanan (safety factor) dalam sistem proteksi katodik. Penambahan massa zinc anode di atas kebutuhan teoritis minimum merupakan praktik yang lazim diterapkan untuk mengantisipasi ketidakseragaman laju disolusi anoda akibat variasi kondisi lingkungan seperti suhu, salinitas, dan pH yang menjadi variabel bebas dalam penelitian.

Berat zinc anode yang digunakan dalam penelitian ini adalah 50 gram, disesuaikan agar memenuhi rasio berat 1:3 terhadap plat baja. Rasio luas permukaan $1:2,9 \approx 1:3$ dan rasio berat 1:3 menunjukkan bahwa desain spesimen sudah sesuai untuk menghasilkan sistem proteksi katodik yang proporsional, di mana zinc anode mampu memberikan perlindungan yang efektif terhadap baja ASTM A36 selama periode pengujian 30 hari.

Dalam sistem korosi galvanik, zinc anode berfungsi sebagai anoda korban (*sacrificial anode*) yang sengaja dibiarkan terkorosi lebih dahulu untuk melindungi baja sebagai katoda. Agar sistem ini bekerja dengan baik, luas permukaan zinc anode harus cukup terhadap baja yang dilindungi tidak terlalu kecil dan tidak terlalu besar.

Jika rasio terlalu kecil, misalnya 1:10, maka zinc anode harus bekerja terlalu keras melindungi area baja yang jauh lebih luas, akibatnya zinc anode habis (*overworked*) sebelum 30 hari perendaman selesai dan baja tidak terlindungi di sisa waktu pengujian. Jika rasio terlalu besar, misalnya 1:1, maka laju korosi baja menjadi sangat kecil sehingga perubahan berat (*weight loss*) sulit terdeteksi secara akurat dengan timbangan digital dalam durasi 30 hari. Rasio 1:3 berada di titik tengah yang proporsional zinc anode cukup aktif memberikan proteksi, namun perubahan berat pada kedua spesimen tetap terukur secara signifikan.

4.2 Variasi Kondisi Eksperimen

Penelitian ini menggunakan 9 spesimen dengan variasi kondisi lingkungan yang mencakup tiga tingkat suhu (kondisi dalam ruangan (28–30°C), luar ruangan (31–34°C), dan paparan matahari langsung (38–42°C)), tiga tingkat salinitas (1%, 3,5%, dan 5%), serta tiga tingkat pH (5,7, dan 9). Variasi kondisi pengujian selengkapnya disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Variasi kondisi eksperimen

No.	Kondisi ruangan (suhu rata-rata)	Salinitas (%)	pH	Kode Spesimen
1	Dalam ruangan (28-30°C)	1	7	A
2	Dalam ruangan (28-30°C)	5	9	B
3	Dalam ruangan (28-30°C)	3,5	5	C
4	Luar ruangan (31-34°C)	1	7	D
5	Luar ruangan (31-34°C)	5	9	E
6	Luar ruangan (31-34°C)	3,5	5	F
7	Panas langsung (38-42)°C	1	7	G

8	Panas langsung (38-42)°C	5	9	H
9	Panas langsung (38-42)°C	3,5	5	I

Dalam menentukan rentang variasi suhu yang digunakan pada penelitian ini, acuan utama yang digunakan adalah Guidance for the Corrosion Protection (Pt. 1, Vol. G) yang diterbitkan oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI, 2022). Regulasi tersebut memuat ketentuan teknis mengenai batas operasional penggunaan anoda korban berbahan seng (zinc anode) pada sistem proteksi katodik struktur baja kapal. Berdasarkan BKI (2022), temperatur di atas 25°C dapat menurunkan kapasitas dan efektivitas anoda korban sehingga perlu diperhitungkan dalam perancangan sistem proteksi katodik. Anoda seng konvensional direkomendasikan untuk penggunaan hingga 50°C, sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi diperlukan paduan khusus yang telah terverifikasi karakteristik elektrokimia dan efektivitas perlindungannya.

4.3 Prosedur Pengujian Eksperimental

4.3.1 Persiapan Spesimen

Sebelum pengujian dilakukan, seluruh spesimen baja ASTM A36 dan zinc anode dipersiapkan melalui tahapan berikut:

1. Pengukuran dimensi spesimen menggunakan penggaris dengan ketelitian 0,05 mm.
2. Penimbangan berat awal spesimen menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 1 gram.
3. Permukaan spesimen dibersihkan dari kontaminan menggunakan gerinda amplas dan dibersihkan menggunakan tiner.
4. Penandaan/ pengkodean pada setiap spesimen sesuai variasi kondisi.

4.3.2 Proses Pembersihan Spesimen

Sebelum dilakukan penimbangan awal (W_0), spesimen baja ASTM A36 harus melalui proses pembersihan (surface preparation) untuk menghilangkan karat, minyak, debu, dan kontaminan lain yang dapat memengaruhi hasil pengukuran berat. Proses pembersihan dilakukan melalui tahapan berikut:

- Pengamplasan: Permukaan spesimen gerinda menggunakan gerinda halus secara bertahap untuk meratakan permukaan dan menghilangkan lapisan oksida awal.
- Pembersihan dengan aseton/alkohol: Setelah diampas, spesimen dibersihkan menggunakan aseton atau alkohol 96% menggunakan kapas/kain bersih untuk menghilangkan sisa minyak dan kotoran dari permukaan logam.
- Pengeringan: Spesimen dikeringkan menggunakan udara kering atau hair dryer suhu rendah agar tidak ada sisa cairan yang memengaruhi berat.
- Penimbangan awal (W_0): Spesimen yang telah bersih dan kering ditimbang menggunakan timbangan analitik dengan ketelitian 1 gram untuk mendapatkan berat awal sebelum perendaman.

Setelah perendaman 720 jam, spesimen diangkat dan dilakukan:

- Pembersihan produk korosi: Spesimen dibersihkan dari lapisan karat/produk korosi (corrosion products) menggunakan sikat kawat halus dan kain kasa.
- Pengeringan kembali sebelum penimbangan akhir (W_i)

4.3.3 Persiapan Larutan Elektrolit

Larutan elektrolit dibuat dengan melarutkan NaCl dalam air laut untuk mendapatkan salinitas yang ditargetkan, yaitu 1%, 3,5%, dan 5% yang diukur menggunakan alat TDS Meter (*Total Dissolved Solids*). Nilai pH yang diperhatikan yaitu, 5,7, dan 9 dengan pengecekan menggunakan kertas lakmus biru sebelum perendaman. Volume larutan elektrolit setiap wadah disesuaikan agar seluruh permukaan spesimen tercelup sepenuhnya disajikan dalam Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Variasi salinitas dan pH

Salinitas (%)	pH	Kondisi salinitas	Kondisi pH	Alat ukur salinitas	Alat ukur pH
1	5	Di bawah normal	Asam	Gravimetri, TDS	Kertas lakmus biru
1	7	Di bawah normal	Netral	Gravimetri, TDS	Kertas lakmus biru
1	9	Di bawah normal	Basa	Gravimetri, TDS	Kertas lakmus biru
3,5	5	Normal (air laut)	Asam	Gravimetri, TDS	Kertas lakmus biru
3,5	7	Normal (air laut)	Netral	Gravimetri, TDS	Kertas lakmus biru
3,5	9	Normal (air laut)	Basa	Gravimetri, TDS	Kertas lakmus biru
5	5	Di atas normal	Asam	Gravimetri, TDS	Kertas lakmus biru
5	7	Di atas normal	Netral	Gravimetri, TDS	Kertas lakmus biru
5	9	Di atas normal	Basa	Gravimetri, TDS	Kertas lakmus biru

Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi salinitas air laut awal memiliki salinitas 35 ppt (3,5%) yang dikendalikan melalui metode gravimetri yaitu dengan menimbang massa NaCl dan menambah volume air tawar menggunakan timbangan digital dan gelas ukur.

- a. Perhitungan salinitas 1% (10 ppt)

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

$$35 \times V_1 = 10 \times 1.000$$

$$V_1 = \frac{10 \times 1.000}{35}$$

$$V_1 = 285,7 \text{ mL} \approx 286 \text{ mL}$$

Volume air tawar yang ditambahkan:

$$V \text{ air tawar} = V_2 \times V_1$$

$$= 1.000 - 286$$

$$= 714 \text{ mL}$$

Keterangan :

- C_1 = salinitas air laut (35 ppt)
- V_1 = volume air laut yang dibutuhkan
- C_2 = salinitas target (10 ppt)
- V_2 = volume akhir larutan (1.000 mL)

b. Perhitungan salinitas 5% (50 ppt)

- $mNaCl_{tambahan} = \text{salinitas } 50 \text{ ppt} - \text{salinitas } 35 \text{ ppt} \times V_{larutan}$

$$mNaCl_{tambahan} = (50-35) \frac{g}{L} \times 1L$$

$$mNaCl_{tambahan} = 15 \frac{g}{L} \times 1L$$

$$mNaCl_{tambahan} = 15 \text{ g}$$

- Verifikasi gravimetri

$$S_{aktual} = S_{aktual} + \frac{mNaCl_{tambahan}}{V \text{ larutan}}$$

$$S_{aktual} = 35 + \frac{15}{1}$$

$$S_{aktual} = 35 + 15$$

$$S_{aktual} = 50 \text{ ppt}$$

4.3.4 Proses Perendaman

Spesimen baja ASTM A36 dan zinc anode dihubungkan secara langsung menggunakan kawat tembaga untuk membentuk pasangan galvanik. Pasangan spesimen kemudian direndam dalam larutan elektrolit sesuai variasi yang telah ditentukan. Wadah perendaman diletakkan sesuai kondisi suhu masing-masing:

- a. Kondisi indoor: di dalam ruangan dengan suhu terukur rata-rata 28–30°C.
- b. Kondisi outdoor: di luar ruangan dengan suhu terukur rata-rata 31– 34°C, terpapar angin dan fluktuasi suhu lingkungan.
- c. Kondisi matahari langsung: di bawah paparan sinar matahari langsung dengan suhu terukur rata-rata 38–42°C

Durasi perendaman selama 30 hari (720 jam) tanpa pengadukan.



Gambar 4. 3 Pengukuran Salinitas menggunakan TDS Meter



Gambar 4. 4 Pengukuran Suhu Elektrolit

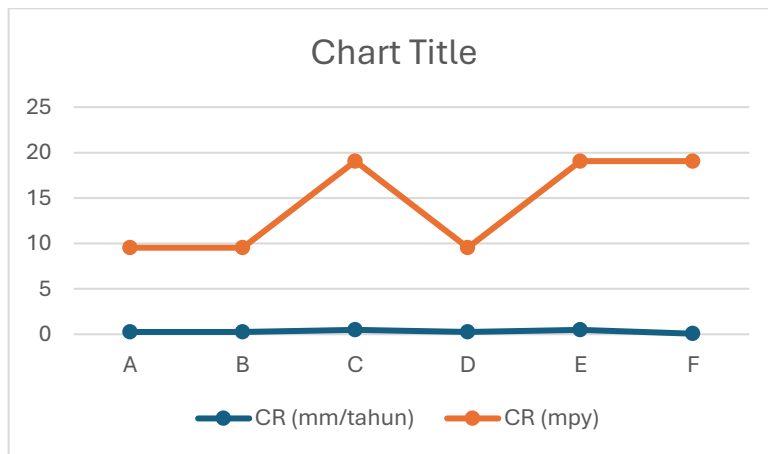
4.4 Hasil Pengukuran Berat dan Kehilangan Berat

4.4.1 Pengukuran Kehilangan Berat Spesimen A-F

Pengukuran berat spesimen baja ASTM A36 dilakukan sebelum dan sesudah perendaman menggunakan timbangan analitik. Kehilangan berat (ΔW) dihitung berdasarkan selisih berat awal (W_0) dan berat akhir (W_1) setelah proses korosi berlangsung selama 30 hari. Hasil pengukuran selengkapnya disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil pengukuran berat dan kehilangan berat A-F

Kode spesimen	Berat awal W0 (g)	Berat akhir W1 (g)	Kehilangan Berat ΔW (g)	Luas Permukaan A (cm ²)	CR (mm/tahun)	CR (mpy)
A	150	149	1	64	0,242	9,53
B	150	149	1	64	0,242	9,53
C	150	148	2	64	0,484	19,06
D	150	149	1	64	0,242	9,53
E	150	148	2	64	0,484	19,06
F	150	148	2	64	0,064	19,06



Gambar 4. 5 Grafik hasil pengukuran weight loss A-F

Berdasarkan Tabel 4.4 laju korosi dihitung menggunakan metode weight loss berdasarkan rumus

$$CR = \frac{K.W}{D.A.T}$$

Dimana:

- CR = laju korosi
- K = konstanta laju korosi
- W = kehilangan berat (gr)
- D = densitas $\approx 7,85$ gr
- A = luas permukaan yang terendam (cm²)
- T = waktu (jam)

- Perhitungan laju korosi spesimen

- a. Spesimen dengan weight loss 1 g ($\Delta W = 1$ gram)

Spesimen yang mengalami weight loss sebesar 1 gram, yaitu spesimen A, B, dan D, dihitung berdasarkan rumus:

$$CR = \frac{K.W}{D.A.T}$$

$$CR = \frac{87,600.1}{7,85.64.720}$$

$$CR = \frac{87,600}{361.728}$$

$$CR = 0,242 \text{ mm/tahun}$$

- Konversi satuan:

$$1 \text{ mm/tahun} = \frac{1}{0,0245} \text{ mpy}$$

$$= 39,37 \text{ mpy}$$

$$CR = 0,242 \times 39,37$$

$$CR = 9,53 \text{ mpy}$$

- b. Spesimen dengan weight loss 2 g ($\Delta W = 2$ gram)

Spesimen yang mengalami weight loss sebesar 1 gram, yaitu spesimen C, E, dan F, dihitung berdasarkan rumus:

$$CR = \frac{K.W}{D.A.T}$$

$$CR = \frac{87,600.2}{7,85.64.720}$$

$$CR = \frac{87,600}{361.728}$$

$$CR = 0,484 \text{ mm/tahun}$$

- Konversi satuan:

$$1 \text{ mm/tahun} = \frac{1}{0,0245} \text{ mpy}$$

$$= 39,37 \text{ mpy}$$

$$CR = 0,484 \times 39,37$$

$$CR = 19,05 \text{ mpy}$$

4.4.2 Pengukuran *Weight Gain Zinc Anode* Spesimen G-H-I

Pengukuran berat spesimen baja ASTM A36 dilakukan sebelum dan sesudah perendaman menggunakan timbangan analitik. Penambahan berat dihitung berdasarkan selisih berat awal (W_0) dan berat akhir (W_1) setelah proses korosi berlangsung selama 30 hari. Hasil pengukuran selengkapnya disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Pengukuran berat spesimen G-I

Kode spesimen	Berat awal W0 (g)	Berat akhir W1 (g)	Weight gain (zinc deposit)	Luas Permukaan A (cm ²)	CR (mm/tahun)	CR (mpy)
G	150	152	2	64	0,3508	13,810
H	150	152	2	64	0,3508	13,810
I	150	152	2	64	0,3508	13,810

Berdasarkan Tabel 4.5 laju korosi dihitung menggunakan massa zinc terlarut sebagai $W = 1,316$ gram, densitas zinc = $7,133 \text{ g/cm}^3$.

$$\begin{aligned} \bullet \text{ CR mm/tahun} &= \frac{8,76 \times 10^4 \times 1,316}{64 \times 720 \times 7,133} \\ &= \frac{115,285,6}{328,657,9} \\ &= 0,3508 \text{ mm/tahun} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CR mpy} &= \frac{3,45 \times 10^6 \times 1,316}{64 \times 720 \times 7,133} \\ &= \frac{4,540,200}{328,657,9} \\ &= 13,810 \text{ mpy} \end{aligned}$$

Berdasarkan Tabel 4.5 spesimen G,H,I dihitung sebagai laju korosi plat zinc anode bukan plat ASTM A36, karena plat mengalami weight gain akibat endapan Zn(OH)_2 .

4.4.3 Analisis Pengaruh Variabel terhadap Laju Korosi

a. Rata-rata laju korosi per kelompok suhu

Suhu merupakan salah satu faktor lingkungan yang berpengaruh signifikan terhadap laju korosi galvanik. Dalam penelitian ini, variasi suhu terbagi menjadi tiga kondisi, yaitu kondisi dalam ruangan ($28\text{--}30^\circ\text{C}$), luar ruangan ($31\text{--}34^\circ\text{C}$), dan paparan matahari langsung ($38\text{--}42^\circ\text{C}$). Pengaruh suhu terhadap laju korosi dapat dilihat berdasarkan perbandingan nilai CR antar kelompok spesimen.

Tabel 4. 6 Rata-rata laju korosi kelompok suhu

Kondisi suhu	Spesimen	ΔW (g)	CR (mm.tahun)	CR (mpy)
28-30 °C	A,B	1	0,242	9,53
28-30 °C	C	2	0,484	19,06
31-34 °C	D	1	0,024	7,53
31-34 °C	E,F	2	0,484	19,06
38-42 °C	G,H,I	+2 (gain)	0,3508*	13,810*

*CR dihitung berdasarkan laju korosi zinc anode, bukan plat baja ASTM A36

Berdasarkan Tabel 4.6, terdapat kecenderungan peningkatan aktivitas korosi seiring dengan meningkatnya suhu lingkungan. Pada spesimen kelompok suhu tinggi (38–42°C), yaitu spesimen G, H, dan I, terjadi fenomena weight gain sebesar +2 gram, yang menunjukkan bahwa sistem proteksi katodik bekerja secara lebih aktif pada suhu tinggi. Pada suhu 38–42°C, konduktivitas larutan elektrolit meningkat dan viskositas menurun, sehingga ion-ion lebih mudah berdifusi menuju permukaan logam. Hal ini menyebabkan arus galvanik antara zinc anode dan baja ASTM A36 meningkat, yang ditandai dengan percepatan laju oksidasi zinc anode. Akibatnya, endapan produk korosi zinc (Zn(OH)₂ dan ZnO) lebih banyak terbentuk dan mengendap di permukaan plat baja, sehingga terjadi weight gain.

Sebaliknya, pada kondisi suhu rendah (28–30°C), aktivitas elektrokimia lebih lambat dan laju difusi ion lebih rendah, namun korosi pada baja ASTM A36 tetap terjadi secara terukur dengan weight loss sebesar 1–2 gram. Hal ini mengindikasikan bahwa pada suhu rendah, proteksi katodik zinc anode belum bekerja secara optimal, sehingga sebagian permukaan baja masih mengalami oksidasi langsung.

Kondisi luar ruangan (31–34°C) menunjukkan perilaku peralihan antara keduanya, dengan weight loss yang serupa dengan kondisi dalam ruangan namun dengan kecenderungan laju reaksi yang lebih tinggi. Fluktuasi suhu akibat paparan angin dan perubahan siklus siang-malam pada kondisi luar ruangan juga turut mempengaruhi kinerja sistem proteksi katodik.

b. Pengaruh Salinitas terhadap Laju Korosi

Salinitas mempengaruhi laju korosi melalui peningkatan konduktivitas larutan elektrolit. Semakin tinggi salinitas, semakin besar arus galvanik yang mengalir antara zinc anode dan baja ASTM A36, sehingga laju korosi meningkat. Rata-rata laju korosi per kelompok salinitas dihitung sebagai berikut:

- $CR (S=1\%) = (0,242 + 0,242 + 0,351) / 3 = 0,278 \text{ mm/tahun} = 10,96 \text{ mpy}$
- $CR (S=3,5\%) = (0,484 + 0,484 + 0,351) / 3 = 0,440 \text{ mm/tahun} = 17,31 \text{ mpy}$
- $CR (S=5\%) = (0,242 + 0,484 + 0,351) / 3 = 0,359 \text{ mm/tahun} = 14,14 \text{ mpy}$

Tabel 4. 7 Rata-rata Pengaruh Salinitas

Salinitas (%)	Spesimen	CR (mm/tahun)	CR (mpy)
1%	A, D, G	0,278	10,96
3,5%	C, F, I	0,440	17,31
5%	B, E, H	0,359	14,14

Berdasarkan Tabel 4.7 Salinitas 3,5% menghasilkan laju korosi rata-rata tertinggi (0,440 mm/tahun), meningkat +58,27% dibandingkan salinitas 1%. Salinitas 5% menghasilkan CR lebih rendah dari 3,5% karena adanya interaksi dengan pH basa pada spesimen B yang membentuk lapisan pasif dan menekan laju korosi baja.

c. Pengaruh Ph terhadap Laju Korosi

pH mempengaruhi laju korosi melalui mekanisme elektrokimia. Pada kondisi asam (pH 5), ion H⁺ mempercepat reaksi katodik sehingga arus korosi meningkat. Pada kondisi basa (pH 9), meskipun lapisan pasif terbentuk pada baja, laju disolusi zinc anode meningkat sehingga rata-rata CR sistem tetap lebih tinggi dari kondisi netral. Rata-rata laju korosi per kelompok pH:

- $CR (pH=5) = (0,484 + 0,484 + 0,351) / 3 = 0,440 \text{ mm/tahun} = 17,31 \text{ mpy}$
- $CR (pH=7) = (0,242 + 0,242 + 0,351) / 3 = 0,278 \text{ mm/tahun} = 10,96 \text{ mpy}$
- $CR (pH=9) = (0,242 + 0,484 + 0,351) / 3 = 0,359 \text{ mm/tahun} = 14,14 \text{ mpy}$

Tabel 4. 8 Rata-rata Pengaruh pH

pH	Kondisi	Spesimen	CR̄ (mm/tahun)	CR̄ (mpy)
5	Asam	C, F, I	0,440	17,31
7	Netral	A, D, G	0,278	10,96
9	Basa	B, E, H	0,359	14,14

Berdasarkan Tabel 4.8 pH asam (5) menghasilkan laju korosi tertinggi (0,440 mm/tahun, naik +58,27% dari pH netral), sedangkan pH netral (7) menghasilkan laju korosi terendah (0,278 mm/tahun). pH basa (9) menghasilkan CR menengah sebesar 0,359 mm/tahun (+29,14% dari pH netral).

d. Rekapitulasi dan Perbandingan

Secara keseluruhan, pengaruh salinitas dan pH terhadap laju korosi menunjukkan magnitude yang setara pada rentang pengujian ini:

Tabel 4. 9 Perbandingan Pengaruh Salinitas dan pH

Variabel	Level Rendah → CR̄	Level Tinggi → CR̄	ΔCR (mm/thn)	ΔCR (%)
Salinitas	1% → 0,278 mm/thn	3,5% → 0,440 mm/thn	+0,162	+58,27%

pH	pH 7 → 0,278 mm/thn	pH 5 → 0,440 mm/thn	+0,162	+58,27%
Salinitas	1% → 0,278 mm/thn	5% → 0,359 mm/thn	+0,081	+29,14%
pH	pH 7 → 0,278 mm/thn	pH 9 → 0,359 mm/thn	+0,081	+29,14%

Berdasarkan Tabel 4.9 Perubahan pH dari netral ke asam (7→5) dan kenaikan salinitas dari 1% ke 3,5% menghasilkan peningkatan laju korosi yang identik, yaitu $\Delta CR = +0,162$ mm/tahun (+58,27%). Hal ini menunjukkan bahwa pada rentang eksperimen ini, salinitas dan pH memiliki besar pengaruh yang ekuivalen terhadap laju korosi galvanik sistem Zn–ASTM A36. Kondisi paling korosif terjadi pada pH asam dengan salinitas menengah (3,5%), sementara kondisi paling aman adalah pH netral dengan salinitas rendah (1%).

4.5 Analisis Produk Korosi

Analisis produk korosi dilakukan berdasarkan identifikasi visual dan mekanisme reaksi kimia yang terjadi selama proses perendaman 30 hari. Dalam sistem korosi galvanik antara baja ASTM A36 (katoda) dan zinc anode (anoda), produk korosi yang terbentuk berasal dari dua sumber utama, yaitu oksidasi zinc anode dan oksidasi parsial permukaan baja.

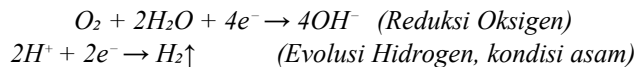
4.5.1 Mekanisme Pembentukan Produk Korosi

Reaksi elektrokimia yang terjadi dalam sistem galvanik ini adalah sebagai berikut:

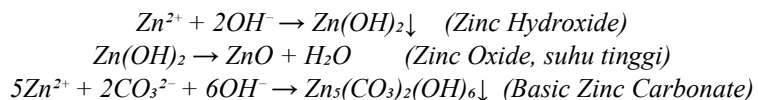
- Reaksi pada anoda (Zinc)



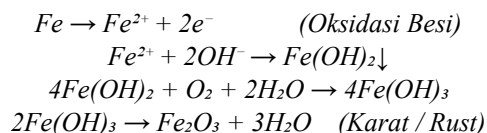
- Reaksi pada katode (Baja ASTM A36)



- Reaksi pembentukan produksi korosi zinc di permukaan plat:



- Reaksi korosi pada permukaan baja (spesimen A-F)



Tabel 4. 10 Identifikasi Produk Korosi

Kode	Produk Korosi Baja	Produk Korosi Zinc	Keterangan
A	Fe ₂ O ₃ (karat ringan)	Zn(OH) ₂ , ZnO	Weight loss 1g
B	Fe(OH) ₂ , Fe ₂ O ₃	Zn(OH) ₂ , ZnCO ₃	Weight loss 1g
C	Fe ₂ O ₃ , FeOOH (asam)	Zn(OH) ₂ , ZnO	Weight loss 2g
D	Fe ₂ O ₃ (sedang)	Zn(OH) ₂ , ZnO	Weight loss 1g
E	Fe(OH) ₂ , Fe(OH) ₃	Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆	Weight loss 2g
F	Fe ₂ O ₃ , asam akut	Zn(OH) ₂ , ZnCl ₂	Weight loss 2g
G	Tidak terdeteksi (katoda terlindungi)	Zn(OH) ₂ , ZnO lebat	Weight gain +2g
H	Tidak terdeteksi (katoda terlindungi)	Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆ lebat	Weight gain +2g
I	Tidak terdeteksi (katoda terlindungi)	Zn(OH) ₂ , ZnCl ₂ lebat	Weight gain +2g

4.5.2 Analisis Produk Korosi berdasarkan pH

Kondisi pH larutan berpengaruh signifikan terhadap jenis produk korosi yang terbentuk:

- pH 5 (Asam) Spesimen C dan F
 Pada kondisi asam, ion H⁺ yang berlimpah mempercepat reaksi reduksi di permukaan katoda (baja) dan melarutkan lapisan oksida pelindung. Produk korosi yang dominan adalah FeOOH (goethite) dan Fe₂O₃. Zinc anode juga lebih agresif terkorosi karena pH rendah meningkatkan aktivitas ion Zn²⁺. Hal ini menjelaskan mengapa spesimen C dan F mengalami weight loss tertinggi (2 gram) dibandingkan spesimen dengan pH 7 dan 9.
- pH 7 (Netral) Spesimen A dan D
 Pada kondisi netral, reaksi oksidasi berjalan pada laju sedang. Produk korosi yang terbentuk pada baja adalah Fe(OH)₂ yang kemudian teroksidasi menjadi Fe(OH)₃ dan Fe₂O₃. Zinc anode menghasilkan Zn(OH)₂ sebagai produk utama, yang bersifat lebih stabil pada pH netral.
- pH 9 (Basa) Spesimen B dan E

Pada kondisi basa, ion OH^- yang tinggi mendorong terbentuknya lapisan pasif di permukaan baja berupa $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Namun untuk zinc, suasana basa justru dapat sedikit memperlambat disolusi zinc karena terbentuknya lapisan pelindung $\text{Zn}(\text{OH})_2$ yang lebih stabil. Produk zinc carbonate ($\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$) dominan terbentuk pada kondisi ini.

4.6 Karakteristik Spesimen setelah Pengujian

Setelah proses perendaman selama 30 hari (720 jam), seluruh spesimen menunjukkan perubahan karakteristik fisik yang dapat diidentifikasi secara visual maupun berdasarkan data berat. Karakteristik ini mencerminkan tingkat korosi dan efektivitas sistem proteksi katodik pada masing-masing kondisi pengujian.

a. Karakteristik Visual Spesimen

Tabel 4. 11 Karakteristik Visual Spesimen

Kode	Kondisi	Karakteristik Permukaan Baja	Kondisi Zinc Anode
A	28–30°C, S=1%, pH=7	Karat ringan merata, warna kecokelatan	Terkikis sebagian, permukaan kasar
B	28–30°C, S=5%, pH=9	Karat ringan, sedikit endapan putih	Terkikis, lapisan putih $\text{Zn}(\text{OH})_2$
C	28–30°C, S=3,5%, pH=5	Karat sedang, korosi lebih dalam	Terkikis lebih dalam, asam
D	31–34°C, S=1%, pH=7	Karat ringan-sedang, pitting kecil	Terkikis merata
E	31–34°C, S=5%, pH=9	Karat sedang, lapisan endapan basa	Erosi permukaan jelas
F	31–34°C, S=3,5%, pH=5	Karat sedang-berat, asam mempercepat	Erosi lebih cepat akibat pH asam
G	38–42°C, S=1%, pH=7	Lapisan endapan putih tipis, tidak ada karat aktif	Erosi signifikan, putih/abu
H	38–42°C, S=5%, pH=9	Endapan putih tebal, baja terlindungi	Erosi besar, lapisan tebal Zn
I	38–42°C, S=3,5%, pH=5	Endapan putih agak kuning, terlindungi	Erosi agresif, pH asam

- Kondisi Visual Spesimen Baja ASTM Setelah Perendaman 30 Hari

Dalam Ruangan 28-30 °C



Spesimen A



Spesimen B



Spesimen C

Luar Ruangan 31-34°C



Spesimen D



Spesimen E



Spesimen F

Panas Langsung 38-42 °C



Spesimen G



Spesimen H



Spesimen I

- b. Ketebalan Lapisan Endapan Spesimen G,H,I

Untuk spesimen G, H, dan I yang mengalami weight gain sebesar +2 gram, estimasi ketebalan lapisan endapan $Zn(OH)_2$ dapat dihitung sebagai berikut:

Diketahui:

- Massa endapan (Δm) = 2 gram
- Luas permukaan (A) = 64 cm²

- Densitas $Zn(OH)_2$ (ρ) = 3,05 g/cm³

$$\begin{aligned} \text{Tebal lapisan} &= \Delta m / (A \times \rho) \\ &= 2 / (64 \times 3,05) \\ &= 2 / 195,2 \\ &= 0,01024 \text{ cm} = 0,1024 \text{ mm} = 102,4 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Lapisan endapan setebal $\pm 102,4 \mu\text{m}$ ini berfungsi sebagai lapisan pelindung tambahan (barrier layer) yang secara fisik menghambat kontak langsung antara permukaan baja dan larutan elektrolit agresif, sehingga memperkuat efek proteksi katodik yang diberikan oleh zinc anode.

c. Interpretasi Karakteristik Spesimen

Berdasarkan seluruh data yang telah dianalisis, karakteristik utama sistem galvanik dalam penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut:

- Pada kondisi suhu rendah (28–30°C) dengan salinitas 1% dan pH netral (spesimen A dan D), proteksi katodik berjalan parsial. Baja masih mengalami weight loss 1 gram, mengindikasikan bahwa zinc anode belum mampu memberikan proteksi penuh pada kondisi aktivitas elektrokimia rendah.
- Pada kondisi pH asam (pH 5) untuk spesimen C, F, dan I, laju korosi cenderung lebih tinggi. Pada spesimen C dan F (tanpa proteksi penuh suhu tinggi), weight loss mencapai 2 gram. Kondisi asam mempercepat disolusi zinc anode dan mempercepat reaksi korosi pada baja melalui mekanisme evolusi hidrogen.
- Pada kondisi suhu tinggi (38–42°C) untuk spesimen G, H, dan I, sistem proteksi katodik bekerja optimal. Tidak terjadi weight loss pada baja, melainkan weight gain sebesar +2 gram akibat endapan produk korosi zinc. Ini merupakan bukti paling kuat bahwa zinc anode berhasil mengalihkan seluruh reaksi oksidasi dari baja ke zinc.
- Nilai CR seluruh spesimen (0,242–0,484 mm/tahun untuk baja dan 0,351 mm/tahun untuk zinc) masuk dalam kategori Good berdasarkan standar NACE, yang menunjukkan bahwa sistem proteksi galvanik zinc anode layak diaplikasikan pada konstruksi lambung kapal dalam kondisi lingkungan laut yang bervariasi.