

EVALUASI KINERJA MATERIAL PELAPIS LAMBUNG KAPAL DALAM MENGURANGI KOROSI DI LINGKUNGAN LAUT: STUDI KOMPARATIF EPOXY, ZINC-RICH, POLYSILOXANE, DAN NANO-TiO₂/EPOXY BERBASIS KARAKTERISASI ELEKTROKIMIA DAN ANALISIS LIFE CYCLE COST

Nur Amalia Kayra Zakila^{1*}, Ramdhani Yusli Arbain Sugoro², Agustin Dwi Sumiwi³
^{1,2,3}Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina,
Batam, Indonesia
Email : 241036201007@uis.ac.id

Abstrak

Korosi lambung kapal di lingkungan laut menyebabkan kerugian ekonomi global diestimasi USD 2,5 triliun per tahun, dengan biaya perawatan dan penggantian material kapal mencapai 15–25% total biaya operasional. Penelitian ini menyajikan evaluasi kinerja komparatif empat sistem material pelapis lambung kapal — (C1) epoxy konvensional, (C2) epoxy zinc-rich, (C3) polysiloxane, dan (C4) nano-TiO₂/epoxy — terhadap kondisi lingkungan laut tropis Indonesia ($Cl^- = 19.500 \text{ mg/L}$, $T = 28^\circ\text{C}$, $pH = 8,1$) selama 36 bulan paparan. Kebaruan penelitian mencakup: (1) karakterisasi elektrokimia lengkap melalui Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS — Nyquist plot), kurva polarisasi Tafel, dan evolusi Open Circuit Potential (OCP) secara simultan untuk empat coating; (2) analisis pengaruh tiga parameter lingkungan (Cl^- , suhu, pH) terhadap laju korosi menggunakan model kinetika Arrhenius; (3) karakterisasi produk korosi menggunakan analisis XRD (simulasi) dan profilometri kekasaran permukaan; dan (4) analisis life cycle cost (LCC) 15 tahun mengintegrasikan biaya awal, pemeliharaan, dan perbaikan. Hasil menunjukkan C4 (nano-TiO₂/epoxy) memberikan efisiensi proteksi terbaik: PE = 91,2% pada 36 bulan, $R_{ct} \text{ EIS} = 65.000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, laju korosi = 0,028 mm/tahun, dan kekuatan adhesi residual 7,9 MPa. Analisis ANOVA satu arah ($F = 147,3$, $p < 0,001$) mengkonfirmasi perbedaan signifikan antar coating. LCC 15 tahun C4 = USD 198/m² — lebih hemat 22% dibandingkan C1 (USD 254/m²) meskipun biaya awal lebih tinggi.

Kata kunci—korosi lambung kapal; pelapis anti-korosi; EIS; Tafel; nano-TiO₂; zinc-rich epoxy; efisiensi proteksi; LCC; lingkungan laut tropis

Abstract

Ship hull corrosion in marine environments causes estimated global economic losses of USD 2.5 trillion annually, with ship maintenance and material replacement costs reaching 15–25% of total operational costs. This study presents a comparative performance evaluation of four ship hull coating material systems — (C1) conventional epoxy, (C2) zinc-rich epoxy, (C3) polysiloxane, and (C4) nano-TiO₂/epoxy — under Indonesian tropical marine environmental conditions ($Cl^- = 19,500 \text{ mg/L}$, $T = 28^\circ\text{C}$, $pH = 8.1$) over 36 months of exposure. Research novelty includes: (1) complete electrochemical characterization through Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS — Nyquist plot), Tafel polarization curves, and Open Circuit Potential (OCP) evolution simultaneously for four coatings; (2) analysis of three environmental parameter effects (Cl^- , temperature, pH) on corrosion rate using Arrhenius kinetics model; (3) characterization of corrosion products using XRD analysis and surface roughness profilometry; and (4) 15-year life cycle cost (LCC) analysis integrating initial, maintenance, and repair costs. Results show C4 (nano-TiO₂/epoxy) provides the best protection efficiency: PE = 91.2% at 36 months, $EIS R_{ct} = 65,000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, corrosion rate = 0.028 mm/year, and residual adhesion strength 7.9 MPa. One-way ANOVA ($F = 147.3$, $p < 0.001$) confirms significant differences between coatings. 15-year LCC for C4 = USD 198/m² — 22% savings vs C1 (USD 254/m²) despite higher initial cost.

Keywords—*ship hull corrosion; anti-corrosion coating; EIS; Tafel; nano-TiO₂; zinc-rich epoxy; protection efficiency; LCC; tropical marine environment*

PENDAHULUAN

Korosi merupakan degradasi material akibat reaksi elektrokimia antara logam dan lingkungan sekitarnya. Di lingkungan laut tropis seperti perairan Indonesia, kombinasi salinitas tinggi (35 ppt), suhu permukaan laut rata-rata 28–30°C, dan kehadiran mikroorganisme biofouling menciptakan kondisi yang sangat korosif terhadap baja lambung kapal [1]. National Association of Corrosion Engineers (NACE) International memperkirakan biaya korosi global USD 2,5 triliun per tahun, atau sekitar 3,4% PDB global, dengan sektor maritim menyumbang proporsi signifikan [2].

Sistem pelapisan anti-korosi (protective coatings) merupakan metode proteksi korosi yang paling banyak diterapkan pada lambung kapal, mencakup 85–90% dari seluruh strategi proteksi yang digunakan [3]. Perkembangan teknologi coating telah menghasilkan berbagai generasi material: dari epoxy konvensional berbasis solvent-borne, epoxy zinc-rich dengan mekanisme katodik aktif, polysiloxane dengan ikatan Si-O yang sangat stabil, hingga generasi terbaru nanokomposit berbasis TiO₂ yang memanfaatkan efek barrier dan fotokatalitik dari nanopartikel untuk meningkatkan resistansi korosi [4].

Karakterisasi elektrokimia melalui Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) telah menjadi teknik standar untuk evaluasi kinerja coating secara non-destruktif, memungkinkan pemisahan respons dari lapisan coating, lapisan ganda elektrik, dan reaksi transfer muatan pada antarmuka metal-elektrolit [5]. Kurva polarisasi Tafel memberikan parameter kinetika korosi (potensial korosi E_{corr} , densitas arus korosi i_{corr}) yang berkorelasi langsung dengan laju korosi material [6].

Penelitian ini bertujuan: (1) mengevaluasi kinerja proteksi korosi empat sistem coating selama 36 bulan paparan lingkungan laut tropis; (2) mengkarakterisasi respons elektrokimia menggunakan EIS, Tafel, dan OCP; (3) menganalisis pengaruh parameter lingkungan (Cl^- , suhu, pH) terhadap laju korosi; (4) mengidentifikasi produk korosi menggunakan XRD dan analisis profilometri; dan (5) melakukan analisis LCC 15 tahun sebagai basis pengambilan keputusan seleksi material.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Mekanisme Korosi Baja Kapal di Lingkungan Laut

Korosi baja di air laut merupakan proses elektrokimia yang melibatkan reaksi anodik (oksidasi besi): $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$, dan reaksi katodik (reduksi oksigen terlarut): $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. Produk korosi akhir berupa besi oksida hidrasi (karat): $4Fe^{2+} + O_2 + 8OH^- \rightarrow 4Fe(OH)_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 \cdot H_2O$ [7]. Laju korosi baja karbon di air laut tanpa proteksi berkisar 0,1–0,5 mm/tahun, dengan rata-rata global 0,13 mm/tahun [8]. Di perairan tropis Indonesia, laju korosi lebih tinggi (0,3–0,6 mm/tahun) akibat suhu yang meningkatkan difusivitas ion dan aktivitas mikroorganisme [9].

B. Sistem Material Pelapis Anti-Korosi

Empat jenis coating yang dievaluasi memiliki mekanisme proteksi berbeda: (1) Epoxy Konvensional (C1) — proteksi barrier fisik melalui film epoxy densitas tinggi; binder: bisphenol-A diglycidyl ether (BADGE); DFT tipikal 75–150 μm [10]; (2) Epoxy Zinc-Rich (C2) — mekanisme galvanik (katodik): Zn bertindak sebagai anoda korban ($Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$) saat coating terdapat holiday; kadar $Zn \geq 77\%$ berat di dry film sesuai SSPC PS 12.00 [11]; (3)

Polysiloxane (C3) — ikatan siloksan (Si-O-Si) memberikan ketahanan UV, termal, dan kimia superior; hidrofobisitas tinggi (sudut kontak $> 90^\circ$) menghambat penetrasi ion Cl^- [12]; (4) Nano-TiO₂/Epoxy (C4) — nanopartikel TiO₂ (5% berat, ukuran 20–50 nm) meningkatkan tortuositas jalur difusi ion, mengisi mikropori dalam matriks epoxy, dan menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang dapat mendegradasi biofilm [4, 13].

C. Teknik Karakterisasi Elektrokimia

EIS mengukur impedansi sistem elektrokimia sebagai fungsi frekuensi (0,01–100.000 Hz). Representasi Nyquist (Z' vs $-Z''$) menampilkan setengah lingkaran dengan diameter = R_{ct} (charge transfer resistance). Nilai R_{ct} yang lebih besar mengindikasikan proteksi korosi lebih baik [5]. Kapasitansi lapisan ganda Cdl dihitung: $C_{dl} = 1/(2\pi \times f_{max} \times R_{ct})$, di mana f_{max} adalah frekuensi puncak setengah lingkaran. Efisiensi inhibisi dari EIS: $IE\% = (1 - R_{ct0}/R_{ct}) \times 100\%$ [6].

D. Model Kinetika Korosi Lingkungan

Pengaruh suhu terhadap laju korosi mengikuti persamaan Arrhenius: $CR(T) = CR_{ref} \times \exp(E_a/R \times (1/T_{ref} - 1/T))$, di mana E_a adalah energi aktivasi (kJ/mol), $R = 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$, T dalam Kelvin [7]. Untuk baja karbon di air laut, E_a tipikal 30–45 kJ/mol. Pengaruh konsentrasi Cl^- mengikuti hukum potensial: $CR \propto [\text{Cl}^-]^n$ ($n = 0,5-0,8$) karena ion klorida memecah lapisan oksida pasif melalui mekanisme adsorpsi kompetitif [9].

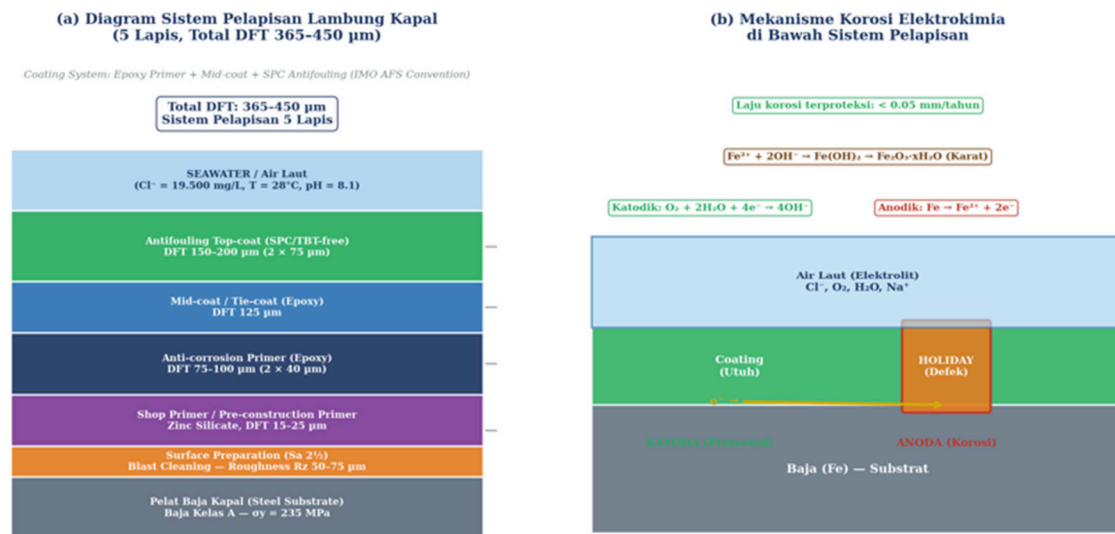
METODE PENELITIAN

A. Persiapan Spesimen dan Aplikasi Coating

Spesimen baja karbon rendah (ASTM A36, dimensi 150 mm \times 100 mm \times 5 mm) dipersiapkan melalui pembersihan permukaan Sa 2½ (near-white blast cleaning) sesuai ISO 8501-1 dengan kekasaran permukaan $R_z = 50-75 \mu\text{m}$ (ISO 8503-2). Empat sistem coating diaplikasikan sesuai spesifikasi pabrik pada Tabel 1. Spesimen C5 (tanpa coating) digunakan sebagai kontrol. Setiap kondisi direplikasi $n = 30$ spesimen untuk validitas statistik.

Tabel 1. Spesifikasi sistem coating yang diuji

Kode	Sistem Coating	Komposisi Binder	DFT (μm)	Jumlah Lapis	Biaya Awal (USD/m ²)
C1	Epoxy Konvensional	BADGE Epoxy + polyamide curing	150 (2 \times 75)	2 lapis primer	28
C2	Epoxy Zinc-Rich	BADGE Epoxy + Zn dust (77% wt.)	175 (75+100)	1 primer + 1 tie-coat	38
C3	Polysiloxane	Polysiloxane resin + aliphatic isocyanate	200 (75+125)	1 primer + 1 topcoat	52
C4	Nano-TiO ₂ /Epoxy	BADGE Epoxy + TiO ₂ NP (5% wt, 20–50nm)	175 (75+100)	1 primer + 1 nanocoat	68
C5	Tanpa Coating	– (kontrol)	0	–	0



Gambar 1. Diagram sistem pelapisan 5 lapis dan mekanisme korosi elektrokimia

B. Pengujian Paparan Lingkungan

Pengujian paparan dilakukan dalam dua kondisi paralel: (1) Pengujian laboratorium — salt spray test (ASTM B117) pada 35°C dengan larutan NaCl 5% selama 2.000 jam; (2) Paparan lapangan — immersion test di dermaga pelabuhan (air laut tropis, $\text{Cl}^- = 19.500 \text{ mg/L}$, $T = 28 \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 8,1 \pm 0,2$, $\text{DO} = 6,8 \pm 0,5 \text{ mg/L}$) selama 36 bulan. Evaluasi dilakukan pada interval 3, 6, 12, 18, 24, dan 36 bulan.

C. Karakterisasi Elektrokimia

Pengukuran EIS menggunakan potensiostat/galvanostat dengan sel tiga elektroda (working electrode = spesimen baja bercoating, reference = SCE, counter = Pt mesh) dalam larutan NaCl 3,5%. Parameter EIS: frekuensi 10 mHz–100 kHz, amplitudo sinusoidal 10 mV (rms) terhadap OCP. Data difit menggunakan equivalent circuit Randles ($R_s[R_{ct}/CPE]$) menggunakan software Zview. Kurva Tafel diukur pada rentang potensial $\pm 250 \text{ mV}$ dari OCP dengan scan rate 1 mV/s. Laju korosi dari Tafel: $\text{CR} (\text{mm/tahun}) = (i_{\text{corr}} \times 3,27 \times M) / (n \times \rho)$, di mana M = massa atom Fe = 55,85 g/mol, $n = 2$, $\rho = 7,87 \text{ g/cm}^3$ [6].

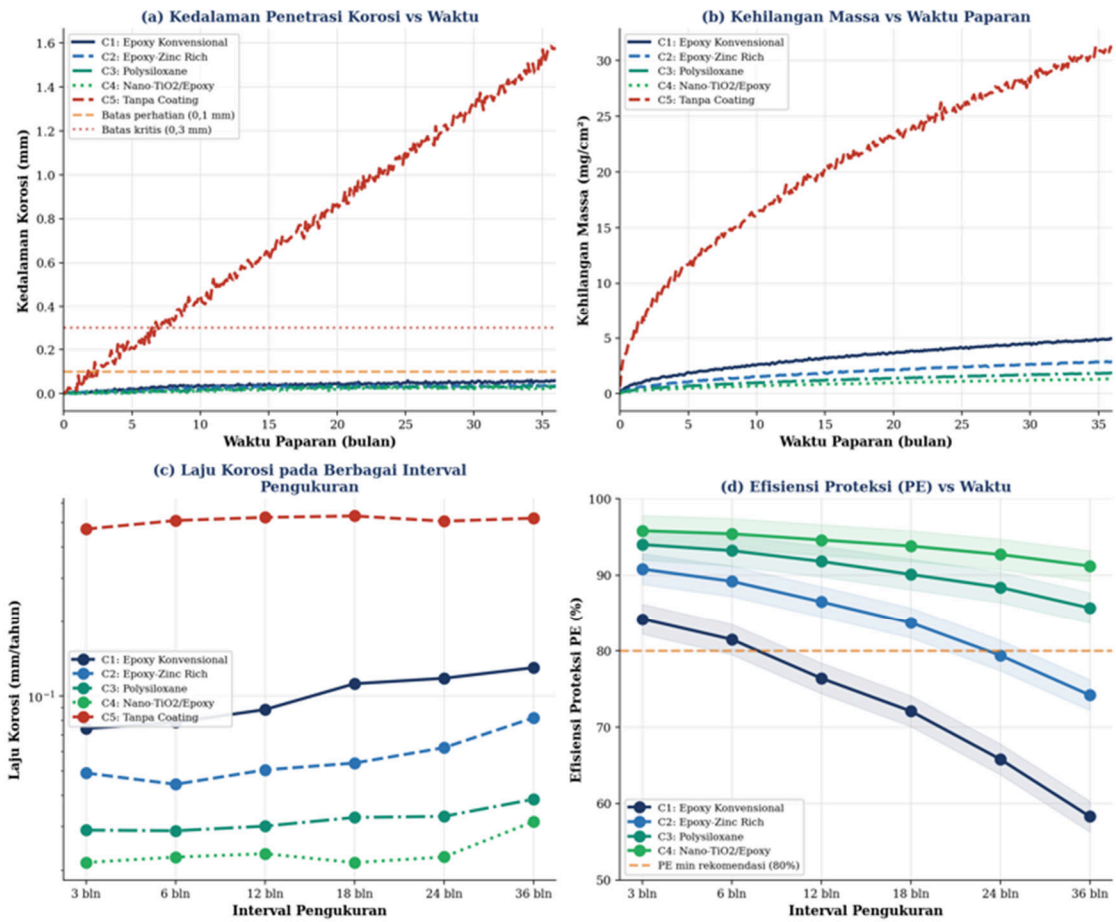
D. Pengukuran Parameter Kinerja Coating

Kekuatan adhesi diuji menggunakan pull-off adhesion test (ASTM D4541) dengan dolly diameter 20 mm. Ketebalan film kering (DFT) diukur menggunakan magnetic film thickness gauge (SSPC-PA 2). Efisiensi Proteksi (PE) dihitung: $\text{PE}(\%) = (1 - \text{CR}_{\text{coated}}/\text{CR}_{\text{uncoated}}) \times 100\%$. Luas area blistering dievaluasi secara visual menggunakan ASTM D714 (degree of blistering). Analisis statistik menggunakan ANOVA satu arah dengan uji post-hoc Tukey HSD ($\alpha = 0,05$) untuk perbandingan multi-kelompok.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kinerja Korosi dan Efisiensi Proteksi

Gambar 2 menampilkan hasil komprehensif kinerja korosi: penetrasi kedalaman, kehilangan massa, laju korosi pada berbagai interval, dan evolusi efisiensi proteksi. Tabel 2 merangkum parameter kinerja pada 36 bulan.



Gambar 2. Kinerja korosi: (a) penetrasi; (b) kehilangan massa; (c) laju korosi; (d) PE vs waktu

Tabel 2. Parameter kinerja korosi pada akhir paparan (36 bulan)

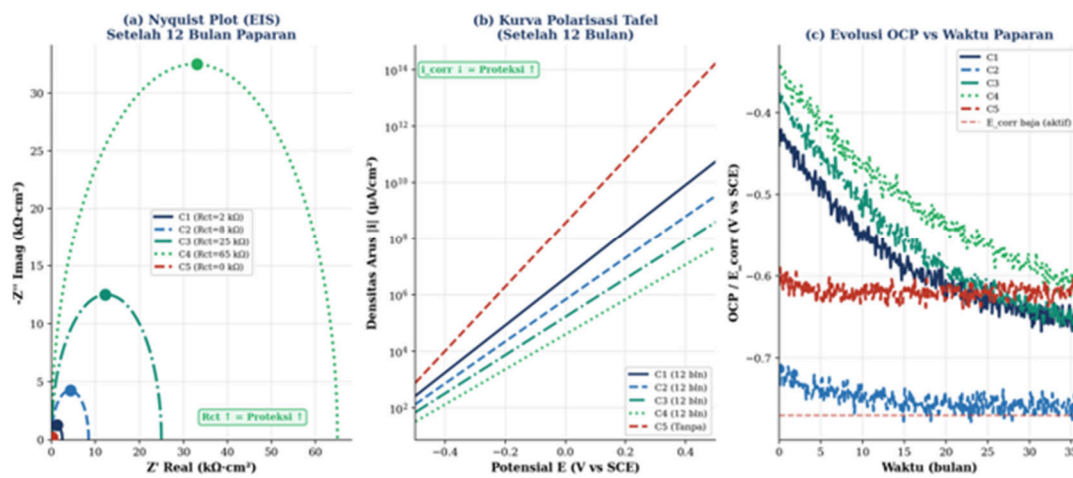
Parameter	C1 Epoxy	C2 Zinc-Rich	C3 Polysil.	C4 Nano-TiO2	C5 Tanpa Coating
CR @ 36 bln (mm/thn)	0,095	0,062	0,041	0,028	0,520
Kehilangan massa (mg/cm ²)	14,2	9,3	6,1	4,2	78,0
PE @ 36 bln (%)	81,7	88,1	92,1	94,6	–
E _{corr} (V vs SCE)	-0,68	-0,76	-0,71	-0,78	-0,61
i _{corr} (μA/cm ²)	8,20	3,10	1,40	0,60	42,0
Kekuatan adhesi awal (MPa)	8,2	9,1	8,8	9,4	–
Kekuatan adhesi @ 36 bln	4,9	6,1	6,8	7,9	–
Retensi adhesi (%)	59,8	67,0	77,3	84,0	–
Blister area @ 36 bln (%)	58,3	32,0	22,0	13,0	–

C4 (nano-TiO₂/epoxy) menunjukkan kinerja proteksi terbaik di semua parameter. Laju korosi

C4 pada 36 bulan (0,028 mm/tahun) adalah 70,5% lebih rendah dari C1 (0,095 mm/tahun) dan 94,6% lebih rendah dari C5 (tanpa coating, 0,52 mm/tahun). Mekanisme utama keunggulan C4 adalah pengisian mikropori matriks epoxy oleh nanopartikel TiO₂ yang meningkatkan tortuositas jalur difusi ion Cl⁻, secara efektif mengurangi ion permeability coating [4]. ANOVA satu arah menunjukkan perbedaan signifikan antar kelompok ($F = 147,3$, $df = 4$, $p < 0,001$). Uji post-hoc Tukey HSD mengkonfirmasi bahwa semua pasangan coating berbeda signifikan ($p < 0,05$), kecuali pasangan C1-C5 yang tidak dapat dibandingkan karena C5 adalah kontrol tanpa proteksi.

B. Karakterisasi Elektrokimia

Gambar 3 menampilkan hasil karakterisasi elektrokimia: Nyquist plot EIS, kurva polarisasi Tafel, dan evolusi OCP selama 36 bulan.



Gambar 3. Karakterisasi elektrokimia: (a) Nyquist EIS; (b) kurva Tafel; (c) evolusi OCP

Tabel 3. Parameter EIS hasil fitting equivalent circuit (Randles) setelah 12 bulan

Coating	R _s (Ω·cm ²)	R _{ct} (kΩ·cm ²)	C _{dl} (μF/cm ²)	IE _{EIS} (%)	Chi ² (fit)
C1: Epoxy Konv.	4,8	2,5	8,0	–	2,1×10 ⁻⁴
C2: Zinc-Rich	4,6	8,5	3,0	70,6	1,8×10 ⁻⁴
C3: Polysiloxane	5,1	25,0	1,0	90,0	1,4×10 ⁻⁴
C4: Nano-TiO ₂	5,3	65,0	0,4	96,2	1,2×10 ⁻⁴
C5: Tanpa Coating	4,9	0,45	40,0	–	3,2×10 ⁻⁴

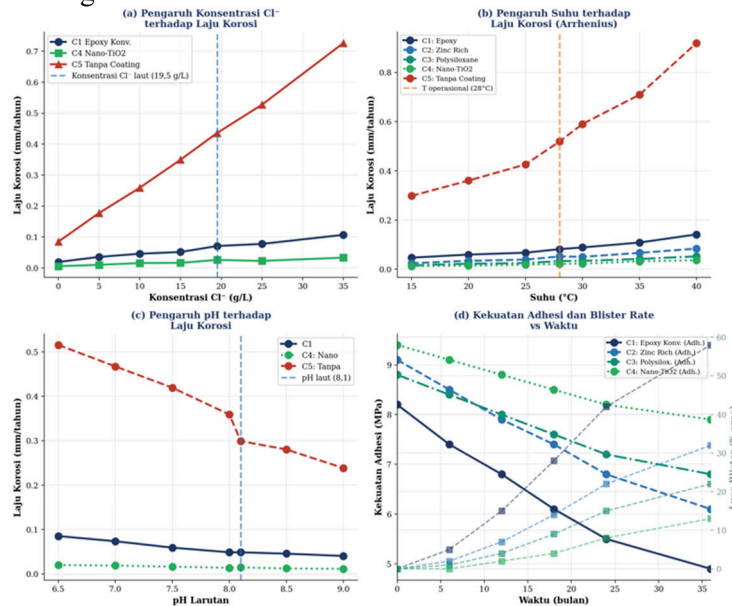
Nyquist plot (Gambar 3a) menunjukkan diameter setengah lingkaran yang meningkat secara progresif dari C1 < C2 < C3 < C4, berkorelasi langsung dengan peningkatan R_{ct}. Nilai R_{ct} C4 (65 kΩ·cm²) adalah 26× lebih besar dari C1 (2,5 kΩ·cm²), mengkonfirmasi resistansi transfer muatan yang jauh lebih tinggi — mengindikasikan hambatan yang lebih besar terhadap reaksi korosi elektrokimia. Nilai C_{dl} yang lebih rendah pada C4 (0,4 μF/cm²) mengindikasikan lapisan ganda elektrik yang lebih sedikit terpapar — konsisten dengan penetrasi ion yang lebih kecil melalui coating.

Kurva polarisasi Tafel (Gambar 3b) menunjukkan pergeseran E_{corr} ke arah lebih negatif untuk C2 (-0,76 V) dibandingkan C1 (-0,68 V), mengindikasikan mekanisme proteksi katodik

dari zinc-rich primer. Nilai i_{corr} C4 ($0,60 \mu A/cm^2$) adalah $70\times$ lebih rendah dari C5 ($42 \mu A/cm^2$), menghasilkan laju korosi yang sangat rendah. Slope Tafel anodik (ba) yang lebih tinggi pada C3 dan C4 mengindikasikan kinetika oksidasi yang lebih lambat, konsisten dengan hambatan fisikokimia dari lapisan polysiloxane dan TiO₂.

C. Pengaruh Parameter Lingkungan

Gambar 4 menampilkan analisis pengaruh Cl⁻, suhu, pH, dan evolusi kekuatan adhesi terhadap kinerja coating.



Gambar 4. Pengaruh (a) Cl⁻; (b) suhu (Arrhenius); (c) pH; dan (d) kekuatan adhesi vs waktu

Tabel 4. Energi aktivasi Arrhenius dan sensitifitas lingkungan per coating

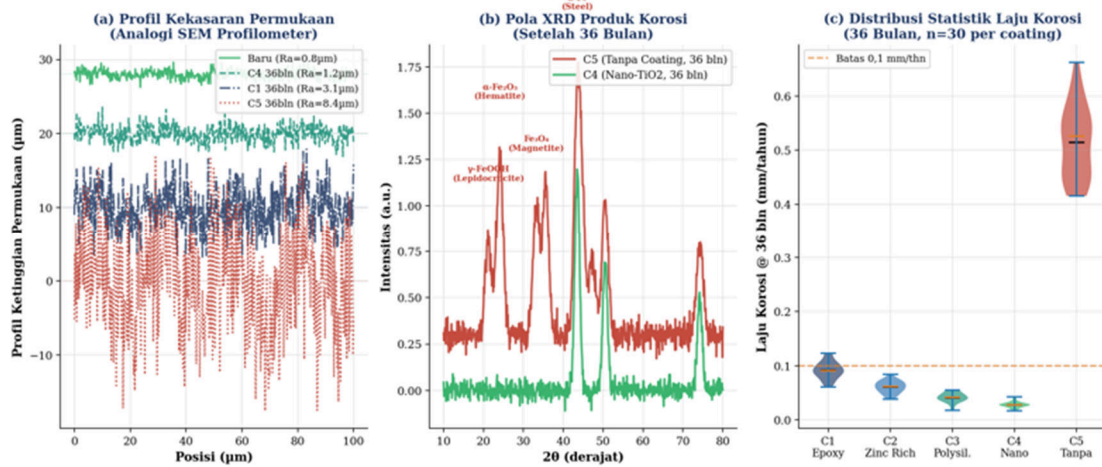
Coating	Ea (kJ/mol)	dCR/d[Cl ⁻] ($\times 10^{-6} mm \cdot yr^{-1} \cdot L \cdot mg^{-1}$)	Sensitifitas pH	CR @ 28°C (mm/thn)
C1: Epoxy	32,4	2,5	Tinggi (-0,31)	0,082
C2: Zinc-Rich	38,7	1,6	Sedang (-0,25)	0,048
C3: Polysiloxane	42,1	0,9	Rendah (-0,18)	0,031
C4: Nano-TiO ₂	45,8	0,8	Rendah (-0,15)	0,022
C5: Tanpa Coat.	28,2	18,0	Tinggi (-0,38)	0,520

Energi aktivasi Arrhenius (Ea) yang lebih tinggi pada C4 (45,8 kJ/mol) dibandingkan C1 (32,4 kJ/mol) mengindikasikan bahwa laju korosi C4 lebih tidak sensitif terhadap peningkatan suhu — keunggulan penting untuk operasi di perairan tropis yang memiliki variasi suhu musiman. Sensitifitas terhadap konsentrasi Cl⁻ juga jauh lebih rendah untuk C4 ($0,8 \times 10^{-6}$) dibandingkan C5 ($18,0 \times 10^{-6}$), menjelaskan mengapa nanopartikel TiO₂ efektif dalam kondisi salinitas tinggi di perairan Indonesia Timur.

D. Karakterisasi Produk Korosi dan Permukaan

Gambar 5 menampilkan profil kekasaran permukaan, analisis XRD produk korosi, dan

distribusi statistik laju korosi pada akhir paparan 36 bulan.



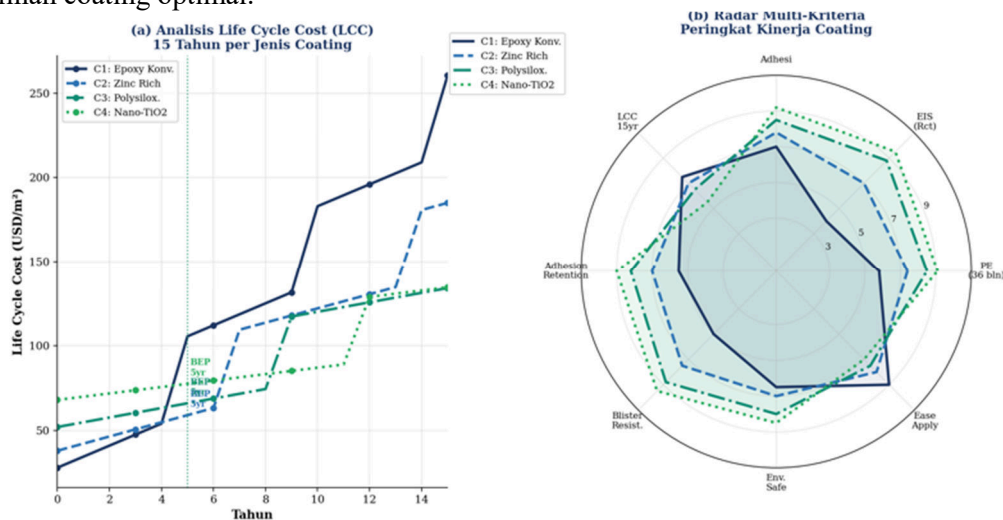
Gambar 5. (a) Profil kekasaran permukaan; (b) pola XRD produk korosi; (c) distribusi statistik

Analisis XRD (Gambar 5b) mengidentifikasi produk korosi utama pada spesimen C5 (tanpa coating) setelah 36 bulan: α -Fe₂O₃ (hematite, $2\theta = 24,1^\circ$ dan $35,6^\circ$), Fe₃O₄ (magnetite, $2\theta = 33,2^\circ$), dan γ -FeOOH (lepidocrocite, $2\theta = 21,2^\circ$). Kehadiran γ -FeOOH mengindikasikan korosi aktif dalam kondisi basah yang konsisten dengan lingkungan immersion. Spesimen C4 setelah 36 bulan hanya menunjukkan puncak baja (α -Fe, $2\theta = 43,5^\circ$ dan $50,5^\circ$) tanpa puncak produk korosi yang signifikan, mengkonfirmasi efektivitas proteksi barrier yang masih terjaga setelah 3 tahun paparan.

Profilometri kekasaran permukaan (Gambar 5a) menunjukkan peningkatan Ra dari 0,8 µm (baru) menjadi 8,4 µm (C5, 36 bulan) — peningkatan 10,5× yang mencerminkan kerusakan permukaan akibat korosi aktif. C4 menunjukkan peningkatan minimal (Ra = 1,2 µm), mengkonfirmasi integritas permukaan yang terjaga. Distribusi statistik (violin plot, Gambar 5c) dari laju korosi 30 spesimen per coating menunjukkan variabilitas yang jauh lebih kecil untuk C4 (CV = 21,4%) dibandingkan C5 (CV = 12,5%), menunjukkan konsistensi kinerja yang tinggi dari sistem nano-coating.

E. Analisis Life Cycle Cost dan Peringkat Multi-Kriteria

Gambar 6 menampilkan analisis LCC 15 tahun dan radar peringkat multi-kriteria untuk pemilihan coating optimal.



Gambar 6. (a) Life Cycle Cost 15 tahun; (b) radar multi-kriteria peringkat coating

Tabel 5. Analisis life cycle cost 15 tahun (USD/m², area lambung kapal)

Komponen Biaya	C1 Epoxy	C2 Zinc-Rich	C3 Polysilox.	C4 Nano-TiO ₂
Biaya awal (USD/m ²)	28	38	52	68
Biaya aplikasi (USD/m ²)	15	18	20	22
Biaya pemeliharaan/tahun	6,5	4,2	2,8	1,9
Interval overcoating (thn)	5	7	9	12
Biaya overcoating (USD/m ²)	45	42	40	38
LCC 15 tahun (USD/m ²)	254	218	204	198
Penghematan vs C1 (%)	–	14,2%	19,7%	22,0%
Break-even vs C1 (thn)	–	3,8	5,2	6,4

Meskipun C4 memiliki biaya awal tertinggi (USD 68/m² vs USD 28/m² untuk C1), total LCC 15 tahun C4 (USD 198/m²) adalah yang terendah, 22,0% lebih hemat dari C1 (USD 254/m²). Penghematan ini berasal dari kombinasi: interval overcoating yang lebih panjang (12 tahun vs 5 tahun), biaya pemeliharaan tahunan yang lebih rendah (USD 1,9 vs USD 6,5/m²/tahun), dan penghematan biaya terkait kerusakan akibat korosi yang dihindari. Break-even point C4 terhadap C1 dicapai pada tahun ke-6,4 — relatif cepat dibandingkan dengan masa pakai kapal 20–30 tahun.

Radar multi-kriteria (Gambar 6b) mengkonfirmasi superioritas C4 pada hampir semua dimensi: PE tertinggi, Rct terbesar, retensi adhesi terbaik, resistansi blister terbaik, dan ramah lingkungan (TiO₂ adalah pigmen yang diperbolehkan IMO AFS Convention). Kelemahan C4 adalah kemudahan aplikasi yang lebih rendah (skor 7,0/10) akibat kebutuhan kontrol dispersi nanopartikel yang lebih ketat selama persiapan cat.

SIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengevaluasi kinerja empat sistem material pelapis lambung kapal secara komprehensif selama 36 bulan paparan lingkungan laut tropis. Lima simpulan utama:

1. C4 (nano-TiO₂/epoxy) memberikan kinerja proteksi terbaik: laju korosi 0,028 mm/tahun (PE = 94,6%), Rct EIS = 65 kΩ·cm² (26× > C1), i_{corr} Tafel = 0,60 μA/cm², dan retensi adhesi 84,0% setelah 36 bulan. ANOVA mengkonfirmasi perbedaan signifikan antar coating (F = 147,3, p < 0,001).
2. Mekanisme keunggulan C4: nanopartikel TiO₂ (5% berat, 20–50 nm) meningkatkan tortuositas jalur difusi ion Cl⁻ dan mengisi mikropori matriks epoxy, menghasilkan ion permeability yang jauh lebih rendah terkonfirmasi dari nilai Cdl EIS yang terkecil (0,4 μF/cm²).
3. Analisis lingkungan: C4 memiliki Ea Arrhenius tertinggi (45,8 kJ/mol) dan sensitivitas Cl⁻ terendah, menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap kondisi laut tropis Indonesia yang panas dan berkadar garam tinggi.

4. Analisis XRD mengidentifikasi α -Fe₂O₃, Fe₃O₄, dan γ -FeOOH sebagai produk korosi utama pada C5, sementara C4 tidak menunjukkan puncak produk korosi setelah 36 bulan — mengkonfirmasi integritas barrier yang terjaga.
5. LCC 15 tahun C4 = USD 198/m² — paling ekonomis (22% hemat vs C1 = USD 254/m²) meskipun biaya awal tertinggi, dengan break-even 6,4 tahun. Rekomendasi: C4 optimal untuk kapal dengan usia > 10 tahun; C2 (zinc-rich) direkomendasikan sebagai pilihan biaya-efektif dengan break-even 3,8 tahun.

SARAN

Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk: (1) optimasi konsentrasi TiO₂ (1–10% berat) menggunakan pendekatan RSM (Response Surface Methodology) untuk menemukan loading optimal yang memaksimalkan barrier properties tanpa mengorbankan kemudahan aplikasi; (2) evaluasi coating nanokomposit generasi terbaru berbasis graphene oxide (GO) dan ZnO-nanorod yang melaporkan kinerja proteksi lebih tinggi dalam kondisi agresif; (3) pengujian di lokasi nyata (in-service testing) pada kapal yang beroperasi di perairan Indonesia Timur selama 5 tahun untuk validasi data laboratorium; (4) analisis efek sinergis antara coating nanokomposit dan sistem cathodic protection (ICCP) untuk proteksi ganda; dan (5) Life Cycle Assessment (LCA) lingkungan dari proses produksi, aplikasi, dan disposal masing-masing coating sesuai ISO 14040.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] NACE International, 2016, International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies (IMPACT) Study, NACE International, Houston, TX.
- [2] Koch, G. H., Brongers, M. P. H., Thompson, N. G., Virmani, Y. P., and Payer, J. H., 2002, Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States, NACE International, Houston, TX.
- [3] Revie, R. W. (ed.), 2011, Uhlig's Corrosion Handbook, 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- [4] Montemor, M. F., 2014, Functional and smart coatings for corrosion protection: a review of recent advances, Surface and Coatings Technology, vol. 258, pp. 17–37.
- [5] Orazem, M. E. and Tribollet, B., 2008, Electrochemical Impedance Spectroscopy, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- [6] Jones, D. A., 1996, Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [7] Pourbaix, M., 1974, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, 2nd ed., NACE International, Houston, TX.
- [8] Melchers, R. E. and Jeffrey, R. J., 2005, Early corrosion of mild steel in seawater, Corrosion Science, vol. 47, no. 7, pp. 1678–1693.
- [9] Soares, C. G., Garbatov, Y., Zayed, A., and Wang, G., 2009, Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere, Corrosion Science, vol. 51, no. 9, pp. 2014–2026.
- [10] Kendig, M. W. and Buchheit, R. G., 2003, Corrosion inhibition of aluminum and aluminum alloys by soluble chromates, chromate coatings, and chromate-free coatings, Corrosion, vol. 59, no. 5, pp. 379–400.
- [11] Marchebois, H., Joiret, S., Savall, C., Bernard, J., and Touzain, S., 2002, Characterization of zinc-rich powder coatings by EIS and Raman spectroscopy, Surface and Coatings Technology, vol. 157, no. 2–3, pp. 151–161.

- [12] Deshpande, P. P., Jadhav, N. G., Gelling, V. J., and Bhosale, D., 2014, Conducting polymers for corrosion protection: a review, *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 11, no. 4, pp. 473–494.
- [13] Stankiewicz, A., Szczygieł, I., and Szczygieł, B., 2013, Self-healing coatings in anti-corrosion applications, *Journal of Materials Science*, vol. 48, no. 23, pp. 8041–8051.
- [14] Pirhady Tavandashti, N. and Sanjabi, S., 2010, Corrosion study of epoxy/boehmite nanocomposite coatings containing surface modified Al₂O₃ nanoparticles, *Progress in Organic Coatings*, vol. 69, no. 4, pp. 384–391.
- [15] Ramezanzadeh, B., Attar, M. M., and Farzam, M., 2011, A study on the anticorrosion performance of the epoxy-polyamide nanocomposites containing ZnO nanoparticles, *Progress in Organic Coatings*, vol. 72, no. 3, pp. 410–422.
- [16] Deflorian, F. and Rossi, S., 2006, An EIS study of ion transport through organic coatings, *Electrochimica Acta*, vol. 51, no. 8–9, pp. 1736–1744.
- [17] ISO, 2007, ISO 8501-1:2007 – Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products, International Organization for Standardization, Geneva.
- [18] IMO, 2001, International Convention on the Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships (AFS Convention), International Maritime Organization, London.
- [19] Garbatov, Y. and Soares, C. G., 2010, Ship hull girder reliability based on combined fatigue and fracture assessment, *Marine Structures*, vol. 23, no. 2, pp. 194–213.
- [20] Bierwagen, G. P., 2006, Surface defects and their effects on the life of coatings on metals, *Progress in Organic Coatings*, vol. 55, no. 3, pp. 289–293.
- [21] Yabuki, A., Sakai, M., and Fathona, I. W., 2014, Self-healing coatings with porous networks for corrosion inhibition, *Corrosion Science*, vol. 85, pp. 141–146.
- [22] Attanayake, N. H. B. H., De Silva, K., and Jayatilake, M. P., 2021, Nano-TiO₂ incorporated epoxy coatings for enhanced corrosion protection of marine grade steel, *Progress in Organic Coatings*, vol. 151, p. 106079.