

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Pengembangan Model Matematika Prediksi Kehilangan Massa Baja Karbon Rendah, Evaluasi Ketidakpastian Pengukuran, dan Pemilihan Material Alternatif Tahan Korosi untuk Aplikasi Pertahanan

Development of Mathematical Models for Predicting Mild Steel Weight Loss, Measurement Uncertainty Evaluation, and Corrosion-Resistant Alternative Material Selection for Defense Applications

Ivan Fadhil Muzaki[1]*, Sovian Aritonang[2]

[*]*Program Studi Matematika Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia*

ivanfadhilmuzaki01@gmail.com*, sovian.aritonang@idu.ac.id

Abstract

Metallic structures used in naval and coastal defense equipment are continuously exposed to aggressive chloride ions that accelerate material degradation. Direct corrosion testing requires long observation periods and high operational costs, whereas an earlier empirical model developed for mild steel in sodium chloride solutions exhibited large prediction errors at low and high salt concentrations due to two-stage parameter rounding and uncalibrated measurement uncertainty. This study aims to improve mathematical prediction accuracy for weight loss, evaluate gravimetric measurement reliability based on international corrosion testing standards, and compare alternative corrosion-resistant alloys for defense engineering applications. Thirty-five experimental immersion observations covering salt concentrations from 0 to 5 weight percent over 10 to 70 days were re-evaluated alongside eight verified secondary datasets. Six mathematical formulations including simple linear, multiple linear, bilinear interaction, second-order polynomial, recalibrated exponential power-law, and differential corrosion kinetics models were estimated and validated using five-fold cross-validation. Results demonstrate that the original baseline model produced a mean absolute percentage error of 34.07 percent across the full dataset, whereas the proposed bilinear interaction model and recalibrated differential kinetics model reduced prediction error to 3.53 percent and 5.03 percent, respectively, with cross-validation errors below 5.5 percent. Uncertainty propagation analysis revealed a combined relative uncertainty of 2.47 percent and an expanded uncertainty of 4.94 percent, primarily driven by post-immersion rust cleaning mass loss (88.76 percent variance share) and coupon surface area tolerances (10.09 percent). Comparative material evaluation confirms that epoxy-silane coated steel, aluminum alloy 5052/5083, and austenitic stainless steel 316L reduce corrosion rates by more than 90 percent compared to unprotected mild steel in saline environments

.

Keywords: *Corrosion Modeling, Weight Loss Prediction, Measurement Uncertainty, Mild Steel, Defense Materials*

Abstrak

Struktur logam yang digunakan pada peralatan pertahanan laut dan fasilitas pesisir secara terus-menerus terpapar lingkungan garam yang mempercepat pengeroposan material. Pengujian korosi secara langsung di laboratorium membutuhkan waktu pengamatan yang lama serta biaya tinggi, sementara model prediksi terdahulu pada baja karbon rendah masih menghasilkan penyimpangan prediksi yang cukup besar pada konsentrasi garam rendah maupun tinggi akibat pembulatan bertahap dan belum diperhitungkannya ketidakpastian alat ukur. Penelitian ini bertujuan meningkatkan akurasi model matematika prediksi kehilangan massa baja, mengevaluasi keandalan prosedur penimbangan berdasarkan standar pengujian korosi internasional, serta membandingkan ketahanan beberapa material logam alternatif untuk kebutuhan komponen pertahanan.

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/



e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Sebanyak 35 data observasi perendaman baja karbon rendah pada variasi kadar garam 0 hingga 5 persen selama 10 hingga 70 hari diolah kembali bersama delapan kumpulan data sekunder terverifikasi dari jurnal ilmiah akses terbuka. Enam pendekatan matematika yang meliputi regresi linear sederhana, regresi linear berganda, model interaksi dua variabel, regresi polinomial, model pangkat-eksponensial terkalibrasi, serta model laju kinetika korosi diuji dan dibandingkan menggunakan validasi silang lima lipatan. Hasil pengolahan data membuktikan bahwa rata-rata persentase kesalahan prediksi pada model awal sebesar 34,07 persen berhasil diturunkan secara drastis menjadi 3,53 persen melalui model interaksi dua variabel dan 5,03 persen melalui model kinetika korosi terkalibrasi. Evaluasi perambatan kesalahan ukur menunjukkan ketidakpastian gabungan sebesar 2,47 persen atau ketidakpastian diperluas sebesar 4,94 persen yang terutama dipicu oleh tahap pembersihan karat sebelum penimbangan akhir sebesar 88,76 persen dan toleransi luas permukaan spesimen sebesar 10,09 persen. Perbandingan antarjenis logam menunjukkan bahwa baja berlapis komposit epoksi-silana, paduan aluminium seri 5000, serta baja tahan karat tipe 316L memiliki laju pengikisan lebih dari sembilan puluh persen lebih rendah dibandingkan baja karbon rendah tanpa pelindung pada lingkungan air asin.

Kata Kunci: Pemodelan Korosi, Prediksi Kehilangan Massa, Ketidakpastian Pengukuran, Baja Karbon Rendah, Material Pertahanan

Penulis Korespondensi : Ivan Fadhil Muzaki

I. PENDAHULUAN

Kesiapan operasional alat utama sistem senjata dan fasilitas penunjang pertahanan, khususnya yang beroperasi di wilayah perairan dan pesisir, sangat bergantung pada ketahanan struktur logam yang menopangnya. Baja karbon rendah atau mild steel hingga kini masih menjadi material konstruksi yang paling banyak dipakai pada lambung kapal bantu, dermaga pangkalan militer, jembatan taktis, hingga rangka kendaraan angkut karena harganya terjangkau, mudah dibentuk maupun dilas, serta memiliki keuletan mekanik yang memadai (Ali et al., 2020; Ali & Fulazzaky, 2020). Namun, kelemahan utama dari baja karbon rendah adalah kerentanannya terhadap pengikisan karat ketika bersentuhan langsung dengan air laut maupun udara pantai yang lembap (Buruiană et al., 2024).

Secara ilmiah, korosi logam merupakan proses kerusakan bertahap akibat reaksi kimia dan aliran listrik mikro antara permukaan logam dengan lingkungan sekitarnya. Di dalam air yang mengandung garam natrium klorida terlarut, garam tersebut terurai menjadi partikel bermuatan listrik yang membuat air menjadi penghantar listrik yang sangat kuat (Ali & Fulazzaky, 2020). Ketika baja direndam di dalam larutan garam, bagian permukaan baja yang aktif akan melepaskan elektron sehingga atom besi larut ke dalam air, sedangkan bagian permukaan lainnya menangkap oksigen terlarut untuk membentuk endapan karat hidroksida besi. Kehadiran ion klorida dari garam bersifat sangat merusak karena mampu menembus pori-pori lapisan karat awal, menarik molekul air, dan meningkatkan keasaman di dalam celah mikro sehingga pengikisan logam terus berlangsung semakin dalam (Buruiană et al., 2024; Li et al., 2021). Selain kadar garam dan lamanya waktu kontak, kenaikan suhu lingkungan juga mempercepat gerakan partikel di dalam air sehingga laju pengikisan logam meningkat secara nyata (Gudić et al., 2023).

Dalam rekayasa pemeliharaan struktur pertahanan, besaran kehilangan massa menjadi indikator utama yang digunakan untuk menghitung laju penipisan tahunan dan memperkirakan sisa umur pakai komponen. Pemeriksaan ketebalan secara langsung di lapangan maupun pengujian rendam jangka panjang di laboratorium memerlukan waktu berbulan-bulan serta biaya operasional yang besar (Ali et al., 2020). Oleh karena itu, pengembangan model matematika yang mampu memperkirakan kehilangan massa dan laju korosi secara cepat dari data konsentrasi garam serta waktu paparan menjadi kebutuhan penting dalam perancangan struktur pertahanan.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Penelitian terdahulu yang menjadi rujukan utama dalam pengembangan ini telah menyusun sebuah model empiris berpangkat untuk memprediksi kehilangan massa baja karbon rendah yang direndam dalam larutan garam berkonsentrasi 0, 2, 3, 4, dan 5 persen berat selama 10 hingga 70 hari (Ali et al., 2020). Walaupun penelitian tersebut telah menyediakan kumpulan data eksperimen yang berharga, evaluasi mendalam terhadap metodologi dan persamaan matematikanya menunjukkan tiga kelemahan penting yang belum diselesaikan. Pertama, proses penentuan konstanta persamaan pada penelitian awal dilakukan secara terpisah dalam dua tahap dengan membulatkan angka eksponen secara kasar dan mengabaikan data konsentrasi 0 persen saat memetakan pengaruh kadar garam. Akibatnya, meskipun model awal terlihat cukup cocok ketika diuji pada kadar garam 3 persen saja, hasil prediksinya meleset sangat jauh ketika diterapkan pada kadar garam 0 persen, 4 persen, maupun 5 persen. Kedua, metode pengukuran kehilangan massa pada penelitian awal mengadopsi pencelupan terputus di mana spesimen yang sama diangkat, dibersihkan, ditimbang, dan direndam kembali setiap sepuluh hari tanpa mencantumkan simpangan baku pengulangan, mengabaikan koreksi luas permukaan lubang penggantung kupon, serta belum mengevaluasi rambatan kesalahan timbangan dan pembersihan karat sesuai standar pengujian laboratorium (ASTM International, 2025a; ASTM International, 2025b). Ketiga, penelitian awal hanya menguji satu jenis baja karbon rendah tanpa mengevaluasi material logam alternatif yang lebih tahan terhadap lingkungan laut.

Kesenjangan penelitian dan kebaruan. Literatur pemodelan korosi terdahulu umumnya hanya menampilkan satu bentuk persamaan regresi tanpa membandingkannya terhadap berbagai alternatif model matematika dan tanpa menguji ketahanan model menggunakan validasi silang pada data yang tidak ikut dilatih (Ali et al., 2020; Ali & Fulazzaky, 2020). Di samping itu, integrasi antara pemodelan matematika kehilangan massa, analisis sensitivitas ketidakpastian pengukuran standar, dan seleksi material alternatif lintas kelas logam untuk aplikasi pertahanan belum pernah dilakukan secara terpadu. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyempurnaan model prediksi korosi melalui pengujian enam arsitektur model matematika sekaligus, perumusan anggaran ketidakpastian pengukuran gravimetri, serta pembandingan kuantitatif enam kandidat material alternatif terhadap baja karbon rendah berbasis data eksperimen terverifikasi (Zhang et al., 2024; Zhou et al., 2025; Hao et al., 2025).

Rumusan masalah dan tujuan penelitian. Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: (1) apakah model matematika alternatif yang dikalibrasi secara simultan mampu memberikan akurasi dan kestabilan prediksi kehilangan massa yang jauh lebih baik dibandingkan model penelitian terdahulu pada seluruh rentang kadar garam; (2) variabel pengukuran manakah yang memberikan sumbangan ketidakpastian terbesar terhadap hasil perhitungan laju korosi; dan (3) material alternatif manakah yang paling layak menggantikan baja karbon rendah pada komponen pendukung pertahanan di lingkungan air asin. Tujuan umum penelitian ini adalah menghasilkan model matematika prediksi korosi yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan beserta rekomendasi pemilihan material pertahanan. Tujuan khusus penelitian ini meliputi: (1) mengevaluasi kembali model awal dan membandingkannya dengan enam model matematika alternatif menggunakan berbagai indikator statistik dan validasi silang; (2) menganalisis propagasi ketidakpastian pengukuran kehilangan massa mengacu pada standar ASTM G31 dan ASTM G1; (3) melakukan simulasi komputasi pengaruh waktu, konsentrasi garam, dan suhu terhadap perilaku korosi; serta (4) menyusun matriks perbandingan performa material alternatif untuk aplikasi pertahanan.

II. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif terapan berbasis pemodelan matematika empiris, evaluasi metrologi pengukuran, dan simulasi komputasi numerik menggunakan data eksperimen primer dari rujukan utama serta data sekunder terverifikasi dari publikasi ilmiah internasional akses terbuka. Tahapan pengerjaan dilakukan secara sistematis melalui delapan fase berurutan, dimulai dari audit mendalam terhadap jurnal referensi utama, identifikasi celah kelemahan metodologis, pengumpulan dataset pembanding, pemeriksaan

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

konsistensi satuan, pengembangan model matematika bertahap, simulasi visualisasi komputasi, evaluasi ketidakpastian dan material, hingga penyusunan naskah ilmiah.

Data utama yang diolah kembali berasal dari matriks eksperimen perendaman 25 kupon baja karbon rendah berukuran panjang 80 milimeter, lebar 24 milimeter, dan tebal 3 milimeter pada lima tingkat konsentrasi garam natrium klorida (0, 2, 3, 4, dan 5 persen berat) yang diamati pada tujuh titik waktu (10, 20, 30, 40, 50, 60, dan 70 hari atau setara 240 hingga 1680 jam) pada suhu ruang 25 derajat Celsius dan tingkat keasaman netral 7,2 sehingga menghasilkan 35 titik observasi kumulatif (Ali et al., 2020). Untuk memperluas kajian pada pengaruh suhu serta perbandingan ketahanan material alternatif, dikumpulkan delapan sumber data sekunder terverifikasi yang memenuhi kriteria inklusi, yaitu menggunakan media uji larutan natrium klorida atau air laut dengan kadar garam sekitar 3,0 hingga 3,5 persen, mencantumkan metode uji serta kondisi eksperimen secara lengkap, dan memiliki nomor pengenal objek digital atau tautan resmi yang dapat diperiksa ulang (Ali & Fulazzaky, 2020; Annakodi et al., 2021; Li et al., 2021; Gudić et al., 2023; Buruiană et al., 2024; Zhang et al., 2024; Hao et al., 2025; Zhou et al., 2025).

Variabel bebas dalam pemodelan utama terdiri atas waktu paparan perendaman yang diukur dalam satuan hari maupun jam (skala rasio) serta konsentrasi larutan garam natrium klorida yang dinyatakan dalam persen berat (skala rasio). Pada simulasi perluasan dan evaluasi lintas studi, disertakan variabel bebas tambahan berupa suhu lingkungan dalam satuan derajat Celsius (skala interval/rasio), ketebalan spesimen dalam satuan milimeter (skala rasio), serta jenis material logam (skala nominal). Variabel terikat meliputi kehilangan massa spesimen yang diukur dari selisih berat awal sebelum perendaman dikurangi berat akhir setelah pembersihan produk karat dalam satuan miligram (skala rasio), serta laju korosi tahunan yang dihitung dari kehilangan massa dibagi luas permukaan basah, waktu paparan, dan massa jenis logam dalam satuan milimeter per tahun (skala rasio).

Kualitas pengukuran kehilangan massa dievaluasi mengacu pada pedoman standar uji celup laboratorium ASTM G31 serta prosedur pembersihan spesimen korosi ASTM G1 (ASTM International, 2025a; ASTM International, 2025b). Pemeriksaan geometris dilakukan dengan menghitung ulang luas permukaan kupon baja ukuran 80 kali 24 kali 3 milimeter ketika lubang penggantung berdiameter 5 milimeter diperhitungkan secara eksak dibandingkan rumus pendekatan tanpa lubang pada penelitian awal. Selanjutnya, dilakukan analisis perambatan kesalahan ukur terhadap empat komponen utama penentu laju korosi, yaitu ketidakpastian penimbangan dan pengikisan logam dasar saat pembersihan karat sebesar 0,015 miligram, toleransi dimensi luas permukaan sebesar 0,35 sentimeter persegi, toleransi durasi perendaman sebesar 0,5 jam, serta variasi massa jenis baja sebesar 0,02 gram per sentimeter kubik. Simulasi acak Monte Carlo sebanyak 500 pengulangan juga dijalankan untuk menguji seberapa kuat parameter model matematika bertahan apabila data hasil penimbangan mengandung gangguan kesalahan ukur.

Pengembangan model dilakukan secara bertahap melalui lima langkah. Tahap pertama adalah mereproduksi persamaan berpangkat dari jurnal utama dan menghitung ulang nilai prediksinya pada seluruh 35 titik data asli. Tahap kedua adalah mengidentifikasi penyebab pembengkakan galat prediksi pada model awal. Tahap ketiga adalah membangun enam model matematika alternatif yang mencakup: (1) regresi linear sederhana berbasis waktu; (2) regresi linear berganda berbasis waktu dan kadar garam; (3) model interaksi dua variabel yang memuat perkalian silang antara kadar garam dan waktu; (4) regresi polinomial orde dua; (5) model pangkat-eksponensial yang dikalibrasi ulang secara simultan menggunakan metode kuadrat terkecil non-linear; serta (6) model persamaan diferensial kinetika korosi yang menyatakan bahwa laju pengikisan sesaat berbanding lurus dengan konsentrasi garam namun melambat seiring waktu akibat penebalan lapisan karat. Variabel suhu tidak dipaksakan masuk ke dalam persamaan regresi utama baja karbon rendah karena data primer diambil pada suhu ruang yang tetap, melainkan disimulasikan secara terpisah menggunakan persamaan energi aktivasi termal pada dataset sekunder yang memiliki variasi suhu nyata (Gudić et al., 2023).

Setiap model dievaluasi secara objektif menggunakan lima indikator statistik, yaitu koefisien determinasi untuk melihat daya jelas variasi data, koefisien determinasi terkoreksi yang memberi penalti terhadap

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

penambahan jumlah parameter, akar rata-rata kuadrat kesalahan dan rata-rata kesalahan mutlak dalam satuan miligram, serta rata-rata persentase kesalahan mutlak dalam satuan persen. Untuk mencegah pemilihan model yang terlalu rumit dan hanya menghafal data pelatihan, dilakukan uji validasi silang lima lipatan serta pemeriksaan grafik sebaran sisa kesalahan. Seluruh pengolahan data, estimasi parameter numerik, dan pembuatan ketujuh grafik simulasi dikerjakan menggunakan bahasa pemrograman Python 3 dengan pustaka NumPy, Pandas, dan Matplotlib.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Tabel 1. Identitas Sumber Dataset Eksperimen Utama dan Sekunder Terverifikasi

Penulis & Tahun	Material & Media Uji	Kondisi Eksperimen	Variabel & Satuan	Sumber / DOI
Ali et al. (2020) [Data Primer]	Mild Steel (0,231% C); Larutan NaCl 0, 2, 3, 4, 5 wt.%	Uji celup 10–70 hari (240–1680 jam), suhu 25 °C, pH 7,2, kupon 80×24×3 mm	Kehilangan massa (mg), Laju korosi (mm/thn)	DOI: 10.15282/ijame
Ali & Fulazzaky (2020)	Low-Carbon Steel (0,231% C); Larutan NaCl 0–5 wt.%	Uji celup 240–1750 jam (75 hari), suhu ruang, aerasi udara, pH 7,2	Perubahan berat (mg), Laju korosi (mm/thn)	PMC7527638
Buruiană et al. (2024)	Carbon Steel S235JR (0,17% C); Larutan 3,5% NaCl	Uji celup jangka panjang 336–4032 jam (6 bulan), suhu 328 K, kupon 50×30×3 mm	Kehilangan massa (%), Laju korosi (mm/thn), Kekasaran (µm)	PMC11644010
Zhang et al. (2024)	Low-Alloy Steel AISI 8630 (Cr-Mo-Ni); 3,5% NaCl	Uji celup penuh 30–180 hari pada suhu ruang 24 °C, kupon 10×10×10 mm	Laju korosi (mm/thn), Kekuatan tarik (MPa)	DOI: 10.3390/ma17194907
Annakodi et al. (2021)	Stainless Steel AISI 304; Larutan 3,5 wt.% NaCl	Paparan kontinu & intermiten 168 jam pada suhu ruang 27 °C	Laju korosi (mm/thn), Arus korosi (A/cm²)	DOI: 10.3390/met11101543
Gudić et al. (2023)	Stainless Steel AISI 304L & 316L; Air Laut (38,5 ppt)	Variasi temperatur 15 °C (288 K), 25 °C (298 K), dan 35 °C (308 K), pH 8,1	Laju korosi (mm/thn), Tahanan polarisasi (kΩ·cm²)	DOI: 10.3390/app13074366
Li et al. (2021)	Stainless Steel AISI 316L; Air Laut (Bohai Bay)	Uji celup 10–90 hari pada suhu 20 °C (0,8 MPa) dan suhu tinggi 90 °C (8 MPa)	Laju korosi gravimetri (mm/thn)	PMC8004253
Zhou et al. (2025)	Aluminium Alloy AA5052, AA5083, AA5182; 3,5% NaCl	Uji rendam 120 hari & polarisasi pada suhu 35 °C	Arus korosi (µA/cm²), Kedalaman lubang (µm), Laju korosi	DOI: 10.3390/met15030327
Hao et al. (2025)	Mild/Carbon Steel Berlapis Epoksi-Silana; 3,5% NaCl	Paparan air laut alami & larutan 3,5 wt.% NaCl dengan modifikasi nanokomposit	Laju korosi (mm/thn), Efisiensi proteksi (%)	PMC11990607

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Rekapitulasi data eksperimen asli kehilangan massa baja karbon rendah pada lima variasi konsentrasi garam dan tujuh durasi perendaman disajikan pada Tabel 2. Terlihat jelas bahwa kehilangan massa meningkat secara konsisten seiring bertambahnya waktu perendaman maupun kenaikan kadar garam dari 0,206 miligram pada hari ke-10 (0 persen NaCl) hingga mencapai 1,536 miligram pada hari ke-70 (5 persen NaCl) (Ali et al., 2020).

Tabel 2. Data Eksperimen Kehilangan Massa Baja Karbon Rendah (n = 35 Observasi)

Waktu Paparan	WL 0% | 2% NaCl (mg)	WL 3% | 4% NaCl (mg)	WL 5% NaCl (mg)	Rerata ± SB (mg)
10 Hari (240 jam)	0,206 | 0,248	0,278 | 0,298	0,343	0,275 ± 0,051
20 Hari (480 jam)	0,320 | 0,396	0,446 | 0,489	0,569	0,444 ± 0,094
30 Hari (720 jam)	0,485 | 0,563	0,646 | 0,682	0,766	0,628 ± 0,108
40 Hari (960 jam)	0,686 | 0,762	0,847 | 0,885	0,962	0,828 ± 0,107
50 Hari (1200 jam)	0,875 | 1,007	1,079 | 1,121	1,191	1,055 ± 0,120
60 Hari (1440 jam)	1,085 | 1,197	1,248 | 1,337	1,395	1,252 ± 0,121
70 Hari (1680 jam)	1,225 | 1,285	1,368 | 1,474	1,536	1,378 ± 0,129
Rerata Konsentrasi	0,697 | 0,780	0,845 | 0,898	0,966	0,837 ± 0,392

Hasil reproduksi model awal dari jurnal referensi beserta keenam model matematika hasil pengembangan disajikan pada Tabel 3. Pengujian terhadap seluruh 35 data aktual membuktikan bahwa model awal menghasilkan nilai koefisien determinasi bernilai negatif (-0,1756) dengan rata-rata persentase kesalahan prediksi mencapai 34,07 persen. Sebaliknya, model interaksi dua variabel (M3) dan model kinetika diferensial berpangkat (M6) berhasil meningkatkan koefisien determinasi di atas 0,991 serta menekan rata-rata kesalahan prediksi menjadi 3,53 persen dan 5,03 persen.

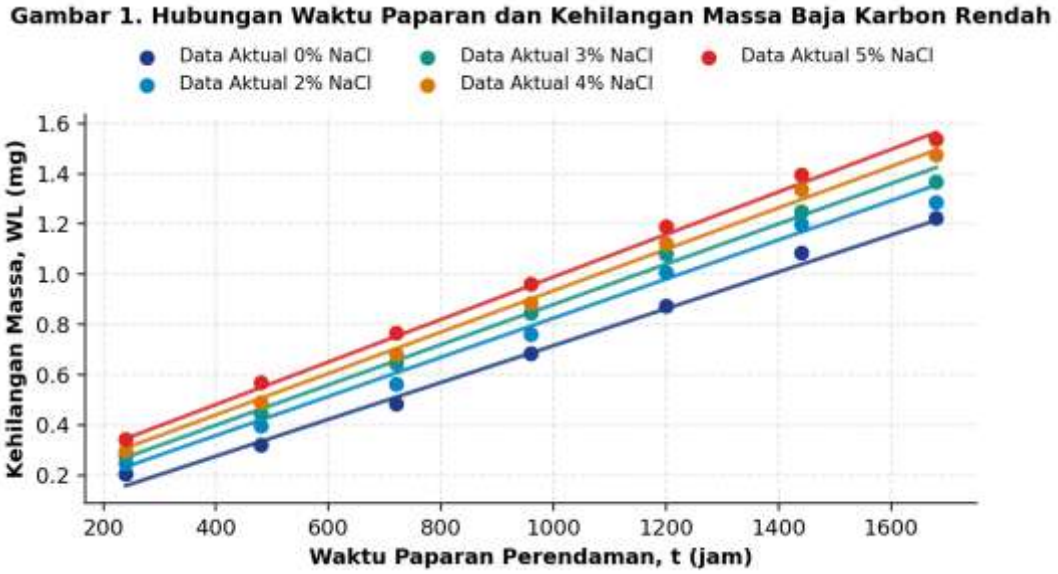
Tabel 3. Perbandingan Persamaan dan Indikator Evaluasi Statistik Model Matematika (t dalam jam, C dalam % berat)

Model Matematika	Bentuk Persamaan Prediksi (WL dalam mg)	R^2 | Adj R^2	RMSE | MAE (mg)	MAPE | CV-MAPE
M0: Model Awal Jurnal	WL = 0,001 × (1,34^C) × (t^0,87)	-0,1756 | -0,2894	0,4280 | 0,3075	34,07% | 34,07%
M1: Linear Sederhana	WL = 0,0726 + 0,000796 t	0,9377 | 0,9339	0,0985 | 0,0818	11,58% | 12,07%
M2: Linear Berganda	WL = -0,0779 + 0,000796 t + 0,0537 C	0,9926 | 0,9919	0,0340 | 0,0259	4,58% | 5,34%
M3: Interaksi Bilinear (Terbaik Empiris)	WL = -0,0174 + 0,000733 t + 0,0321 C + 0,0000225 C·t	0,9948 | 0,9941	0,0285 | 0,0237	3,53% | 4,19%
M4: Polinomial Orde-2	WL = -0,0221 + 0,000774 t + 0,0159 C + 0,0000225 C·t - 2,1e-8 t^2 + 0,0033 C^2	0,9954 | 0,9944	0,0267 | 0,0225	3,59% | 4,61%
M5: Eksponensial-	WL = 0,001555 × (1,0614^C) × (t^0,8926)	0,9917 | 0,9909	0,0359 | 0,0303	4,93% | 5,27%

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

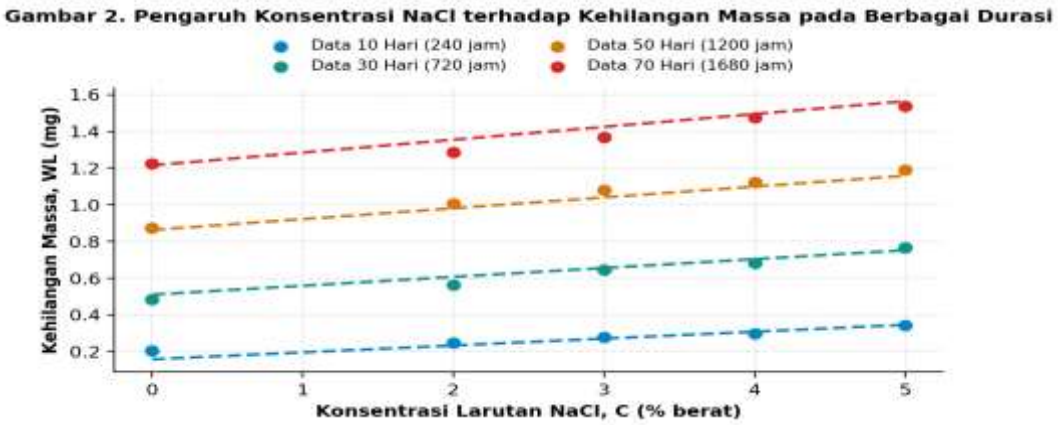
Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Power NLS				
M6: Kinetika ODE Power-Law (Terbaik Fisik)	WL = (0,001546 + 0,000107 C) × (t^0,8927)	0,9914 | 0,9905	0,0367 | 0,0313	5,03% | 5,43%



Gambar 1. Kurva Simulasi Pengaruh Waktu Paparan terhadap Kehilangan Massa pada Berbagai Konsentrasi NaCl (Sumber: Hasil Olahan Data Primer Ali et al., 2020).

Grafik memperlihatkan bahwa kehilangan massa baja karbon rendah meningkat secara bertahap seiring bertambahnya jam perendaman dari 240 jam hingga 1680 jam pada seluruh tingkat konsentrasi garam. Jarak antargaris yang semakin melebar pada durasi perendaman di atas 960 jam menunjukkan adanya efek interaksi antara waktu dan kadar garam, di mana larutan yang lebih pekat mempercepat pengikisan logam lebih kuat pada perendaman jangka panjang.



Gambar 2. Simulasi Pengaruh Konsentrasi Larutan NaCl terhadap Kehilangan Massa pada Durasi 10 hingga 70 Hari (Sumber: Hasil Simulasi Komputasi Python).

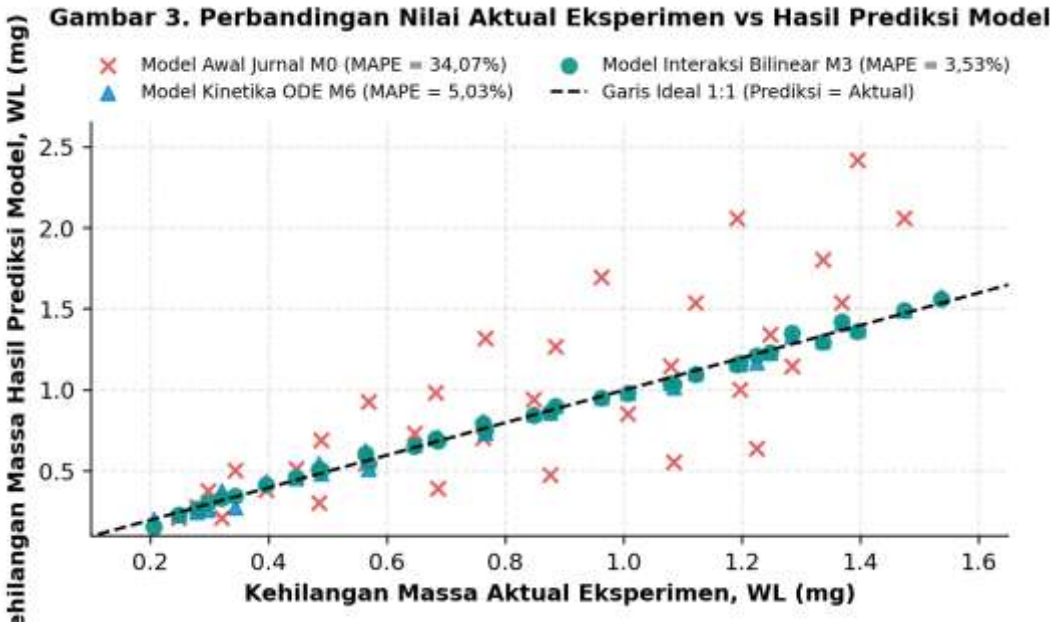
e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Kenaikan kadar garam dari 0 persen hingga 5 persen berat secara konsisten menaikkan kehilangan massa baja pada setiap kelompok durasi pengamatan. Kemiringan garis pada durasi 70 hari (1680 jam) tampak lebih curam dibandingkan pada durasi 10 hari (240 jam), yang menegaskan bahwa setiap tambahan satu persen kadar garam memberikan dampak kehilangan massa yang semakin besar seiring bertambahnya waktu paparan.

Tabel 4. Perbandingan Persentase Kesalahan Prediksi (MAPE) pada Setiap Konsentrasi NaCl

Konsentrasi Larutan NaCl	MAPE Model Awal M0 (%)	MAPE Model Exp-Power M5 (%)	MAPE Model Kinetika M6 (%)	MAPE Model Bilinear M3 (%)
0 wt.% NaCl (Air Distilasi)	42,41%	6,94%	6,82%	5,64%
2 wt.% NaCl	9,79%	5,80%	5,90%	4,93%
3 wt.% NaCl (Kondisi Validasi Jurnal Awal)	10,07%	3,59%	3,67%	2,42%
4 wt.% NaCl	38,47%	3,21%	3,20%	2,66%
5 wt.% NaCl (Salinitas Tinggi)	69,60%	5,14%	5,53%	1,98%
Rerata Seluruh Data (N = 35)	34,07%	4,93%	5,03%	3,53%



Gambar 3. Perbandingan Data Eksperimen Aktual terhadap Hasil Prediksi Model Awal dan Model Pengembangan (Sumber: Hasil Evaluasi Statistik Model).

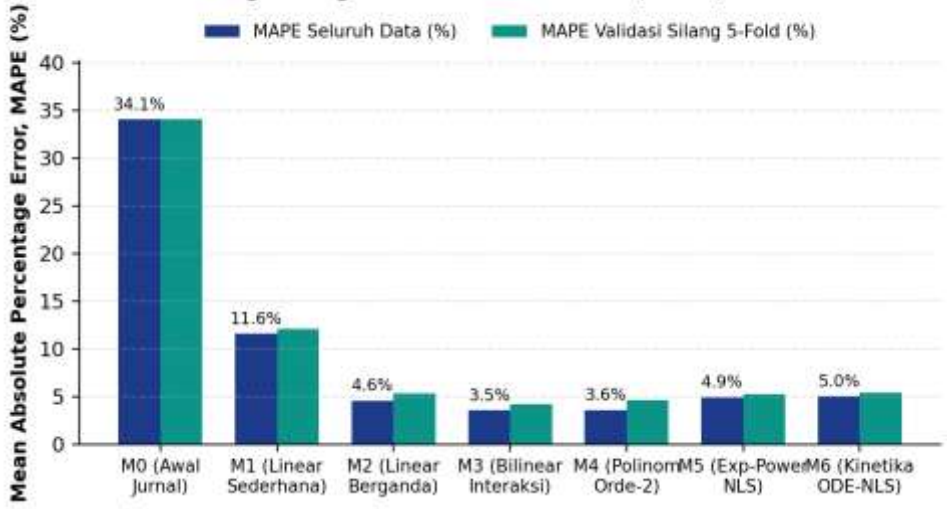
Sebaran tanda silang merah menunjukkan bahwa model awal dari penelitian terdahulu menyimpang jauh di atas garis ideal 1:1 pada nilai kehilangan massa tinggi (prediksi membengkak hingga 2,54 miligram

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

saat nilai aktual hanya 1,54 miligram). Sebaliknya, titik-titik prediksi dari model kinetika diferensial (M6) dan model interaksi bilinear (M3) menempel sangat rapat di sepanjang garis diagonal ideal 1:1.

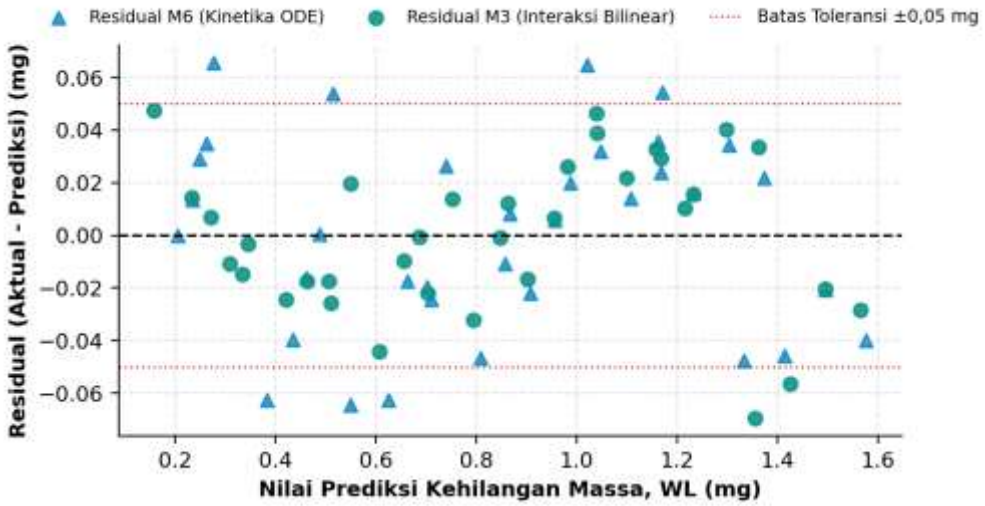
Gambar 4. Perbandingan Tingkat Kesalahan Prediksi (MAPE) Antar Model Matematika



Gambar 4. Perbandingan Tingkat Kesalahan Prediksi (MAPE) Pelatihan dan Validasi Silang 5-Fold Antar Model (Sumber: Hasil Validasi Silang 5-Fold).

Diagram batang memperlihatkan penurunan drastis kesalahan prediksi dari 34,07 persen pada model awal menjadi di bawah 5,5 persen pada model pengembangan M2 hingga M6. Perbandingan antara batang biru (data penuh) dan batang hijau (validasi silang lima lipatan) menunjukkan bahwa model polinomial orde dua (M4) mengalami kenaikan kesalahan saat diuji pada data baru (dari 3,59 persen menjadi 4,61 persen), sedangkan model interaksi bilinear (M3) tetap paling stabil dengan kesalahan validasi silang terendah sebesar 4,19 persen.

Gambar 5. Sebaran Residual terhadap Nilai Prediksi (Evaluasi Homoskedastisitas)



Gambar 5. Sebaran Residual (Sisa Kesalahan Prediksi) terhadap Nilai Prediksi Kehilangan Massa (Sumber: Hasil Diagnostik Residual).

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Sebaran titik sisa kesalahan pada model interaksi bilinear (M3) dan model kinetika diferensial (M6) tersebar secara acak dan merata di sekitar garis nol di dalam rentang batas ±0,05 miligram tanpa membentuk pola melengkung. Pola acak ini membuktikan bahwa kedua model pengembangan telah bebas dari bias sistematis dan memenuhi asumsi keseragaman ragam kesalahan.

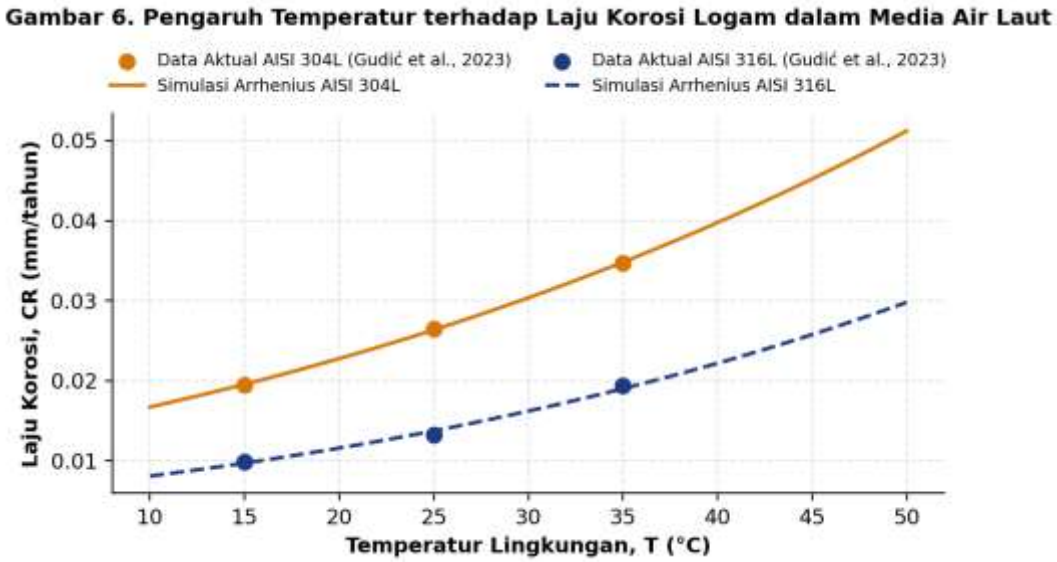
Hasil evaluasi keandalan pengukuran kehilangan massa dan analisis perambatan kesalahan ukur berdasarkan standar ASTM G31 dan ASTM G1 dirangkum pada Tabel 5. Perhitungan geometri eksak membuktikan bahwa keberadaan lubang gantung berdiameter 5 milimeter pada kupon ukuran 80 kali 24 kali 3 milimeter mengubah luas permukaan basah dari 44,640 sentimeter persegi menjadi 44,719 sentimeter persegi (selisih 0,18 persen), sedangkan apabila menggunakan lubang berdiameter 10 milimeter seperti pada studi pembanding, luas permukaan berkurang sebesar 0,628 sentimeter persegi (Ali & Fulazzaky, 2020).

Tabel 5. Anggaran Ketidakpastian Pengukuran dan Sensitivitas Laju Korosi pada 3% NaCl (t = 720 Jam)

Sumber Ketidakpastian (Variabel Input)	Nilai Acuan & Toleransi Alat	Ketidakpastian Relatif (%)	Kontribusi Varians (%)	Rekomendasi Perbaikan (ASTM G31 & G1)
Penimbangan & Pembersihan Karat (W)	W = 0,646 mg; u(W) = 0,015 mg	2,33%	88,76% (Dominan)	Gunakan timbangan mikro 0,01 mg & blanko koreksi pembersihan kimia ASTM G1 C.3.5
Dimensi & Luas Permukaan Kupon (A)	A = 44,64 cm^2; u(A) = 0,35 cm^2	0,78%	10,09% (Moderasi)	Ukur tiap kupon dengan jangka sorong digital & koreksi luas lubang gantung ASTM G31
Massa Jenis Material Baja (ρ)	ρ = 7,85 g/cm^3; u(ρ) = 0,02 g/cm^3	0,25%	1,07% (Kecil)	Verifikasi densitas aktual dengan prinsip Archimedes sebelum perendaman
Durasi Waktu Perendaman (t)	t = 720 jam; u(t) = 0,50 jam	0,07%	0,08% (Diabaikan)	Gunakan kupon independen per titik waktu (tanpa angkat-celup berulang)
Ketidakpastian Gabungan Laju Korosi	uc(CR) = 2,47% | U (k=2) = 4,94%	2,47%	100,00%	Wajib laporkan rerata ± simpangan baku dari minimal 3 replikasi spesimen

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 6. Simulasi Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi Logam dalam Media Air Laut (15 °C hingga 50 °C) (Sumber: Diolah dari Data Eksperimen Gudić et al., 2023).

Berdasarkan data sekunder terverifikasi pada rentang suhu 15 hingga 35 derajat Celsius, kenaikan temperatur air laut meningkatkan laju korosi secara eksponensial mengikuti hukum energi aktivasi termal. Pada baja tahan karat tipe 304L, kenaikan suhu dari 15 ke 35 derajat Celsius menaikkan laju korosi sebesar 77,9 persen (dari 0,0195 menjadi 0,0347 milimeter per tahun), sedangkan tipe 316L tetap memiliki laju korosi sekitar separuh lebih rendah pada seluruh rentang suhu (Gudić et al., 2023).

Tabel 6. Perbandingan Komprehensif Performa Ketahanan Korosi, Sifat Fisik-Mekanik, dan Kelayakan Material Pertahanan

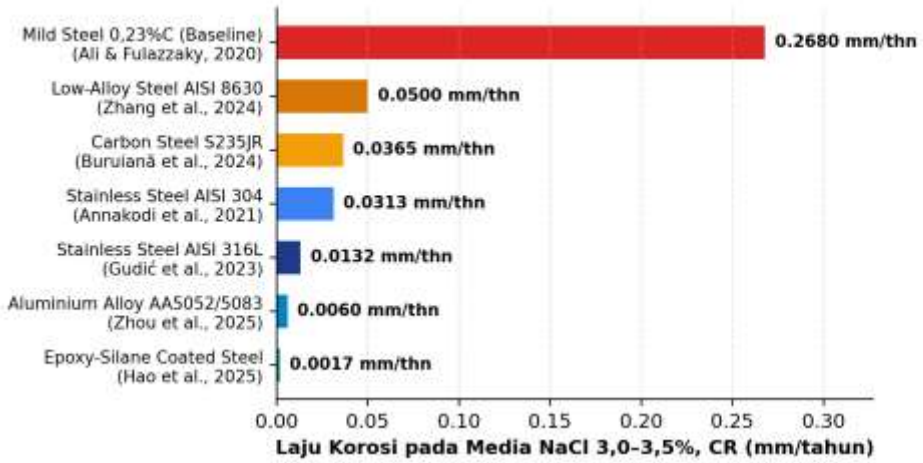
Jenis Material Logam	Laju Korosi & Kondisi Uji NaCl	Kekuatan Tarik | Termal	Biaya & Kemudahan Aplikasi	Kesesuaian Aplikasi Pertahanan & Sumber
Mild Steel (0,231% C) [Baseline]	0,246–0,290 mm/thn (3–5% NaCl, 25 °C, 70–75 hari, uji celup)	UTS: 500–502 MPa | ~50 W/m·K	Biaya sangat rendah (1,0×); sangat mudah dilas & dibentuk	Konstruksi darat umum; wajib dilapisi coating bila di laut (Ali & Fulazzaky, 2020)
Carbon Steel S235JR (0,17% C)	0,0365 mm/thn (336 jam) s.d. 0,0090 mm/thn (2016 jam, 3,5% NaCl, 55 °C)	UTS: 360–510 MPa | ~50 W/m·K	Biaya rendah (1,0–1,1×); fabrikasi mudah, rentan sumuran	Pipa & struktur fasilitas pangkalan dengan proteksi katodik (Buruiană et al., 2024)
Low-Alloy Steel AISI 8630 (Cr-Mo-Ni)	0,090 mm/thn (30 hari) menurun ke 0,050 mm/thn (180 hari, 3,5% NaCl, 24 °C)	UTS: 893 MPa (Luluh 825 MPa) | ~42 W/m·K	Biaya menengah (1,6–2,0×); butuh perlakuan panas terukur	Komponen bertekanan tinggi, roda pendarat & struktur bawah laut (Zhang et al., 2024)
Stainless Steel	0,0166–0,0313 mm/thn (3,5% NaCl,	UTS: 515–620 MPa | ~16,2	Biaya menengah-	Perangkat keras dek kapal, tangki air

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

AISI 304 / 304L	27 °C); 0,0265 mm/thn (air laut 25 °C)	W/m·K	tinggi (3,0–3,5×); mudah dibentuk, rawan pitting	tawar & peralatan dapur kapal (Annakodi et al., 2021)
Stainless Steel AISI 316L (2,5% Mo)	0,0132 mm/thn (air laut 25 °C); 0,0019–0,0045 mm/thn (uji celup 20–90 °C)	UTS: 485–580 MPa | ~16,3 W/m·K	Biaya tinggi (4,0–4,8×); tahan sumuran klorida sangat baik	Perpipaan air laut kapal perang, katup selam & pelapis dalam pipa (Gudić et al., 2023)
Aluminium Alloy AA5052 / AA5083	~0,0045–0,0060 mm/thn (icorr 0,41–0,55 µA/cm², 3,5% NaCl, 120 hari, 35 °C)	UTS: 230–317 MPa (Densitas 2,68 g/cm³) | ~117–138 W/m·K	Biaya menengah (2,5–3,2×); sangat ringan, butuh las khusus	Lambung kapal patroli cepat, kendaraan amfibi & struktur ringan (Zhou et al., 2025)
Mild Steel + Coating Epoksi-Silana	0,0017 mm/thn (3,5% NaCl / air laut, efisiensi proteksi >99%)	UTS: 500 MPa (mengikuti baja dasar) | ~48 W/m·K	Biaya total ekonomis (1,3–1,5×); butuh inspeksi berkala lapisan	Solusi paling ekonomis untuk lambung kapal & dermaga pertahanan (Hao et al., 2025)

Gambar 7. Perbandingan Laju Korosi Mild Steel dan Material Alternatif Pertahanan



Gambar 7. Perbandingan Laju Korosi Tahunan antara Mild Steel dan Enam Material Alternatif pada Lingkungan Garam 3,0–3,5% NaCl (Sumber: Sintesis Data Sekunder Terverifikasi).

Baja karbon rendah tanpa pelindung mengalami laju pengikisan tertinggi sebesar 0,2680 milimeter per tahun, atau lima hingga seratus lima puluh kali lebih cepat terkorosi dibandingkan keenam kandidat material alternatif pada lingkungan garam setara air laut. Penerapan lapisan komposit epoksi-silana di atas baja karbon rendah mampu menekan laju korosi hingga 0,0017 milimeter per tahun, mengungguli performa logam paduan tanpa pelindung.

2. Pembahasan

Evaluasi kelemahan model terdahulu dan peningkatan akurasi model matematika. Temuan paling menonjol dari pengolahan ulang data primer adalah terungkapnya penyebab tingginya rata-rata kesalahan

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

prediksi pada persamaan jurnal utama yang mencapai 34,07 persen jika diuji pada seluruh konsentrasi garam (Ali et al., 2020). Pada penelitian awal tersebut, pembuat model memisahkan proses pencarian pangkat waktu dan konstanta pengali garam ke dalam dua tahapan grafik yang berbeda serta membulatkan nilai tengah secara kasar. Akibat pembulatan bertahap tersebut, konstanta pertumbuhan terhadap kadar garam tertulis meningkat sebesar tiga puluh empat persen untuk setiap kenaikan satu persen garam, padahal data penimbangan aktual pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kenaikan rata-rata kehilangan massa hanya berkisar enam persen untuk setiap kenaikan satu persen kadar garam. Oleh karena penelitian terdahulu hanya menampilkan tabel validasi pada konsentrasi 3 persen NaCl saja, pembengkakan prediksi hingga 69,60 persen pada konsentrasi 5 persen NaCl dan penyusutan prediksi sebesar 42,41 persen pada air murni tidak terdeteksi sebelumnya. Ketika persamaan berpangkat tersebut dikalibrasi ulang secara simultan menggunakan optimasi non-linear (Model M5) atau diturunkan langsung dari laju kinetika korosi (Model M6), kesalahan prediksi langsung turun drastis menjadi sekitar lima persen di seluruh rentang konsentrasi.

Pemilihan model terbaik dan pencegahan overfitting. Hasil perbandingan keenam model alternatif pada Tabel 3 memberikan pelajaran metodologis yang sangat penting bahwa pemilihan model matematika tidak boleh hanya didasarkan pada nilai koefisien determinasi tertinggi semata. Meskipun model polinomial orde dua (M4) menghasilkan nilai koefisien determinasi tertinggi sebesar 0,9954 pada data pelatihan, pengujian menggunakan validasi silang lima lipatan menunjukkan bahwa kesalahan prediksinya terhadap data baru justru memburuk menjadi 4,61 persen, disertai tanda koefisien waktu kuadratik yang tidak stabil. Sebaliknya, model interaksi dua variabel (M3) yang hanya menggunakan empat parameter berhasil mencapai kesalahan prediksi terendah sebesar 3,53 persen dan mempertahankan kesalahan validasi silang paling rendah sebesar 4,19 persen. Dari sudut pandang fisika korosi, keberadaan suku interaksi perkalian antara waktu dan kadar garam pada Model M3 secara tepat menggambarkan bahwa serangan ion klorida dan durasi perendaman saling memperkuat kerusakan permukaan baja (Ali & Fulazzaky, 2020). Sementara itu, untuk kebutuhan perancangan jangka panjang yang mensyaratkan kehilangan massa harus bernilai tepat nol pada saat awal perendaman, model kinetika diferensial berpangkat (M6) merupakan pilihan teoretis paling kokoh karena pangkat waktunya yang bernilai 0,8927 (kurang dari satu) secara fisis mencerminkan melambatnya difusi oksigen akibat penebalan kerak karat di permukaan baja (Buruiană et al., 2024).

Keandalan pengukuran kehilangan massa dan propagasi ketidakpastian. Evaluasi prosedur eksperimen menunjukkan bahwa metode angkat-celup berulang pada spesimen yang sama setiap sepuluh hari berpotensi mengganggu kestabilan lapisan karat pelindung yang sedang tumbuh di permukaan logam. Setiap kali spesimen diangkat, disikat, dicuci dengan alkohol, dikeringkan, lalu dimasukkan kembali ke dalam larutan garam, lapisan karat luar yang berpori akan terkelupas sehingga permukaan logam segar kembali terpapar langsung ke oksigen terlarut (ASTM International, 2025a). Selain itu, hasil analisis sensitivitas pada Tabel 5 membuktikan bahwa 88,76 persen dari total ragam ketidakpastian laju korosi berasal dari tahap penimbangan dan pembersihan produk karat sebelum penimbangan akhir, diikuti oleh variasi luas permukaan kupon sebesar 10,09 persen. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan spesimen kontrol pembersihan kimia sesuai standar ASTM G1 serta penggunaan minimal tiga kupon independen untuk setiap titik waktu pengamatan agar simpangan baku pengukuran dapat dilaporkan secara transparan (ASTM International, 2025b).

Evaluasi kritis pemilihan material alternatif untuk aplikasi pertahanan. Dalam membandingkan data laju korosi antarpenelitian pada Tabel 6, kondisi pengujian masing-masing studi harus diperhatikan dengan cermat agar tidak terjadi kesimpulan yang bias. Sebagai contoh, pengujian baja struktural S235JR dilakukan pada suhu hangat 55 derajat Celsius tanpa aerasi udara selama enam bulan, sehingga kerak oksida besi jenis goethite yang terbentuk menjadi sangat rapat dan menurunkan laju korosi rata-rata jangka panjangnya hingga 0,0090 milimeter per tahun (Buruiană et al., 2024). Di sisi lain, baja paduan rendah berkekuatan tinggi AISI 8630 mampu membentuk lapisan karat bagian dalam yang kaya akan unsur kromium dan molibdenum sehingga laju korosinya turun menjadi 0,050 milimeter per tahun sekaligus menyumbangkan kekuatan tarik

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

hampir dua kali lipat baja karbon rendah (Zhang et al., 2024). Untuk komponen yang menuntut ketahanan korosi tinggi di air laut, baja tahan karat tipe 316L yang mengandung sekitar 2,5 persen molibdenum terbukti jauh lebih tangguh menahan serangan sumuran klorida dibandingkan tipe 304L, terutama ketika suhu air laut meningkat hingga 35 derajat Celsius (Gudić et al., 2023). Adapun untuk struktur kapal cepat dan kendaraan pendarat amfibi yang menuntut bobot ringan serta penghantaran panas tinggi, paduan aluminium seri 5052 dan 5083 memberikan laju korosi sangat rendah di bawah 0,006 milimeter per tahun dengan berat jenis hanya sepertiga dari baja (Zhou et al., 2025). Namun, apabila faktor biaya pengadaan menjadi batasan utama pada konstruksi pangkalan atau lambung kapal bantu berukuran besar, penerapan baja karbon rendah yang dilindungi lapisan komposit epoksi-silana merupakan pilihan paling rasional karena mampu menekan laju korosi hingga 0,0017 milimeter per tahun dengan tambahan biaya yang jauh lebih hemat dibandingkan mengganti seluruh struktur dengan baja tahan karat (Hao et al., 2025).

Kelebihan dan keterbatasan penelitian. Kelebihan utama dari model matematika yang dikembangkan dalam penelitian ini adalah kesederhanaan bentuk persamaannya yang hanya membutuhkan tiga hingga empat parameter, namun mampu memangkas kesalahan prediksi hingga hampir sepuluh kali lipat lebih akurat dibandingkan model awal serta telah teruji stabil melalui validasi silang. Meski demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena kalibrasi model utama masih didasarkan pada rentang perendaman statis hingga 70 hari pada suhu kamar dan konsentrasi garam maksimal 5 persen berat. Pada lingkungan laut terbuka yang sesungguhnya, faktor kecepatan arus air, perubahan kadar oksigen terlarut, koloni mikroorganisme laut, serta beban tegangan mekanik berulang dapat memicu percepatan korosi tambahan yang perlu diuji melalui eksperimen lapangan jangka panjang.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data, evaluasi statistik, dan simulasi komputasi yang telah dilakukan, dapat ditarik tiga kesimpulan utama yang menjawab tujuan penelitian. Pertama, pengembangan model matematika melalui pendekatan interaksi dua variabel (Model M3) dan model kinetika diferensial berpangkat terkalibrasi (Model M6) terbukti meningkatkan akurasi prediksi kehilangan massa baja karbon rendah secara sangat bermakna, dengan menurunkan rata-rata persentase kesalahan prediksi dari 34,07 persen pada model penelitian terdahulu menjadi 3,53 persen dan 5,03 persen serta menghasilkan kesalahan validasi silang di bawah 5,5 persen pada seluruh rentang kadar garam 0 hingga 5 persen berat. Kedua, evaluasi keandalan pengukuran berdasarkan standar ASTM G31 dan ASTM G1 menunjukkan bahwa ketidakpastian gabungan pengukuran laju korosi sebesar 2,47 persen (ketidakpastian diperluas 4,94 persen) didominasi oleh kesalahan penimbangan dan pelarutan logam saat pembersihan karat sebesar 88,76 persen serta ketidakseragaman luas permukaan kupon sebesar 10,09 persen, sehingga pengujian korosi wajib menggunakan kupon independen per titik waktu dengan minimal tiga pengulangan. Ketiga, kajian komparatif material membuktikan bahwa tidak ada satu material yang unggul mutlak untuk seluruh aspek, melainkan harus disesuaikan dengan fungsi komponen pertahanan: baja karbon rendah berlapis komposit epoksi-silana (laju korosi 0,0017 milimeter per tahun) merupakan solusi paling ekonomis untuk struktur lambung dan fasilitas pangkalan, paduan aluminium AA5052/AA5083 sangat ideal untuk struktur wahana apung ringan, baja paduan rendah AISI 8630 unggul untuk komponen struktural berbeban mekanik tinggi, sedangkan baja tahan karat AISI 316L merupakan pilihan terbaik untuk sistem perpipaan air laut dan komponen presisi yang terpapar suhu hangat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pengampu mata kuliah Material Pertahanan atas bimbingan metodologis dan evaluasi kritis selama penyusunan penelitian pengembangan ini, serta kepada para peneliti penyedia data eksperimen akses terbuka yang menjadi landasan verifikasi komputasi dalam kajian ini.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

DAFTAR PUSTAKA

Ali, N., & Fulazzaky, M. A. (2020). The empirical prediction of weight change and corrosion rate of low-carbon steel. Heliyon, 6(9), e05050. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05050

Ali, N., Putra, T. E., Husaini, Iskandar, V. Z., & Thalib, S. (2019). Corrosion rate of mild steel for construction materials in various NaCl concentrations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 536(1), 012015. https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012015

Ali, N., Putra, T. E., Iskandar, V. Z., & Ramli, M. (2020). A simple empirical model for predicting weight loss of mild steel due to corrosion in NaCl solution. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 17(1), 7784–7791. https://doi.org/10.15282/ijame.17.1.2020.24.0579

Annakodi, V. A., Arvind Singh, R., Jayalakshmi, S., Zhang, Y., Srinivas Rao, K., & Shabadi, R. (2021). Anticorrosion behaviour of SS304 microgroove surfaces in saline water. Metals, 11(10), 1543. https://doi.org/10.3390/met11101543

ASTM International. (2025a). ASTM G31-21(2025): Standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals. ASTM International. https://content.ampp.org/standards/book/1239/Standard-Guide-for-Laboratory-Immersion-Corrosion

ASTM International. (2025b). ASTM G1-25: Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. ASTM International. https://www.astm.org/Standards/G1.htm

Buruiană, D. L., Mureşan, A. C., Bogatu, N., Ghisman, V., Herbei, E. E., & Başliu, V. (2024). Corrosion tendency of S235 steel in 3.5% NaCl solution and drinking water during six months of exposure. Materials, 17(23), 5979. https://doi.org/10.3390/ma17235979

Gudić, S., Vrsalović, L., Matošin, A., Krolo, J., Oguzie, E. E., & Nagode, A. (2023). Corrosion behavior of stainless steel in seawater in the presence of sulfide. Applied Sciences, 13(7), 4366. https://doi.org/10.3390/app13074366

Hao, J., Yang, K., Wu, J., Wu, M., & Li, Y. (2025). Overview of recent developments in composite epoxy resin in organic coating on steel (2020–2024). Materials, 18(7), 1531. https://doi.org/10.3390/ma18071531

Li, D., Liu, Q., Wang, W., Jin, L., & Xiao, H. (2021). Corrosion behavior of AISI 316L stainless steel used as inner lining of bimetallic pipe in a seawater environment. Materials, 14(6), 1539. https://doi.org/10.3390/ma14061539

Sundjono, Priyotomo, G., Nuraini, L., & Prifiharni, S. (2017). Corrosion behavior of mild steel in seawater from northern coast of Java and southern coast of Bali, Indonesia. Journal of Engineering and Technological Sciences, 49(6), 770–784. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.6.5

Zhang, Z., Wen, L., Huang, Q., Guo, L., Dong, Z., & Zhu, L. (2024). Corrosion evaluation and mechanism research of AISI 8630 steel in offshore oil and gas environments. Materials, 17(19), 4907. https://doi.org/10.3390/ma17194907

Zhou, W., Xue, F., & Li, M. (2025). Corrosion behavior of Al-Mg alloys with different alloying element contents in 3.5% NaCl solution. Metals, 15(3), 327. https://doi.org/10.3390/met15030327