

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Pemodelan Kinetika Kehilangan Massa Baja Karbon pada Lingkungan Air Laut Menggunakan Model Linear dan Hukum Pangkat

Modeling the Mass Loss Kinetics of Carbon Steel in Seawater Using Linear and Power-Law Models

Jefann Cum Deo Panggabean*, Sovian Aritonang

*Program Studi Matematika Militer, Fakultas MIPA Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

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

Abstract

Ship hulls and maritime defence structures are largely made of carbon steel, which makes a quantitative estimate of its mass loss in seawater an engineering necessity. In this work, two kinetic models, a linear form $W(t) = a + bt$ and a power law $W(t) = At^n$, were fitted to published eight-month seawater immersion data for Grade A, AH-32 and DH-32 ship steels exposed at 18 °C, 0 °C and −10 °C. Linear and nonlinear least squares were used for parameter estimation, while R^2, MAE, RMSE and a hold-out test served as evaluation criteria. The power law yielded the smaller RMSE in 8 of the 9 conditions, with R^2 between 0.90 and 0.997, compared with 0.85–0.987 for the linear form. Exponents of 1.87–1.94 at 18 °C point to corrosion that was still accelerating during the early stage. In the hold-out test the power law was more accurate in 6 of 9 cases, although it overestimated losses when extrapolated, and direct nonlinear fitting outperformed log–log linearisation in every case.

Keywords **:** *Seawater Corrosion, Ship Steel, Power Law, Nonlinear Regression, Defence Materials*

Abstrak

Lambung kapal perang dan berbagai struktur pertahanan maritim sebagian besar tersusun dari baja karbon, sehingga besarnya kehilangan massa baja akibat korosi air laut perlu dapat diperkirakan secara kuantitatif. Dalam penelitian ini, dua model kinetika korosi, yakni bentuk linear $W(t) = a + bt$ dan hukum pangkat $W(t) = At^n$, dicocokkan pada data sekunder hasil uji perendaman air laut selama 8 bulan. Data tersebut mencakup tiga jenis baja kapal (Grade A, AH-32, dan DH-32) yang diuji pada suhu 18 °C, 0 °C, dan −10 °C. Parameter kedua model ditaksir menggunakan metode kuadrat terkecil linear dan nonlinear (Levenberg–Marquardt). Kinerja model kemudian dinilai melalui R^2, MAE, RMSE, dan uji prediksi *hold-out*, yaitu bulan 0–6 sebagai data latih dan bulan 7–8 sebagai data uji. Hukum pangkat menghasilkan RMSE yang lebih kecil pada 8 dari 9 kondisi dengan R^2 0,90–0,997, sementara model linear hanya mencapai 0,85–0,987. Pada suhu 18 °C, eksponen n berada pada rentang 1,87–1,94 ($n > 1$). Nilai ini memperlihatkan bahwa korosi pada tahap awal justru mengalami percepatan, berlawanan dengan anggapan yang umum dipakai, yaitu $n < 1$. Dalam uji *hold-out*, hukum pangkat unggul pada 6 dari 9 kondisi, meskipun hasilnya cenderung *overestimate* ketika diekstrapolasi. Selain itu, linearisasi log–log selalu memberikan RMSE yang lebih besar dibandingkan regresi nonlinear langsung. Hasil penelitian ini dapat menjadi landasan matematis dalam menyusun rencana pemeliharaan dan cadangan korosi (*corrosion allowance*) kapal TNI AL.

Kata Kunci: Korosi Air Laut, Baja Kapal, Hukum Pangkat, Regresi Nonlinear, Material Pertahanan

Penulis Korespondensi : Jefann Cum Deo Panggabean

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

I. PENDAHULUAN

Sebagai negara kepulauan, Indonesia menggantungkan sebagian besar kekuatan pertahanannya pada armada laut. Kapal patroli, kapal angkut, dermaga, hingga struktur lepas pantai milik TNI AL umumnya dibangun dari baja karbon maupun baja karbon-mangan berkekuatan tinggi, misalnya Grade A, AH-32, dan DH-32. Jenis baja ini memang kuat dan relatif murah. Namun, ion klorida dan oksigen terlarut dalam air laut membuatnya mudah terkorosi saat terendam (Refait et al., 2020). Akibatnya, pelat menipis, kekuatan struktur menurun, dan umur layan kapal menjadi lebih pendek. Biaya korosi di tingkat global bahkan ditaksir mencapai sekitar 3,4% dari PDB dunia (Koch et al., 2016). Oleh sebab itu, kemampuan *memprediksi* korosi sangat dibutuhkan, baik untuk menjamin keselamatan maupun untuk mengatur anggaran pemeliharaan alutsista.

Di bidang rekayasa, kehilangan massa atau ketebalan akibat korosi lazim dinyatakan sebagai fungsi dari waktu. Ada dua bentuk yang paling banyak digunakan. Bentuk pertama adalah model linear, yang mengasumsikan laju korosi tetap. Bentuk kedua adalah model hukum pangkat (*power law*) $W = At^n$, yang dipakai dalam standar ISO 9224 serta dalam berbagai kajian korosi (Panchenko and Marshakov, 2017; Panchenko et al., 2021). Eksponen n pada model ini memiliki makna fisik. Jika $n < 1$, korosi melambat karena lapisan karat bersifat melindungi; jika $n = 1$, lajunya konstan; dan jika $n > 1$, korosi berlangsung semakin cepat. Pada struktur kapal, model korosi yang nonlinear terhadap waktu telah dikembangkan dan dikaji oleh Zayed, Garbatov and Guedes Soares (2018) serta Woloszyk and Garbatov (2022). Di sisi lain, Melchers (2020) menjelaskan bahwa korosi baja di air laut berlangsung dalam beberapa tahap (multifase), sehingga satu model sederhana belum tentu sesuai untuk seluruh rentang waktu. Temuan Seechurn and Chuttoo (2022) di perairan tropis Mauritius juga menunjukkan bahwa kehilangan massa baja S235 mengikuti hukum pangkat dengan n yang mendekati 1.

Uji perendaman terhadap baja kapal Grade A, AH-32, dan DH-32 telah dilakukan oleh Rajput et al. (2020) di tiga lingkungan, yaitu air laut, air tawar, dan udara, pada suhu 18 °C, 0 °C, dan −10 °C. Pengujian berlangsung selama 8 bulan, dan massa spesimen dicatat setiap bulan. Untuk memodelkan kehilangan ketebalan, mereka menggunakan polinomial orde dua dengan variabel suhu, waktu, dan salinitas. Pendekatan ini memadai untuk interpolasi. Akan tetapi, parameternya tidak bisa ditafsirkan secara kinetika, dan penulisnya sendiri mengakui bahwa model tersebut belum dapat diandalkan untuk prediksi jangka panjang.

Penelitian ini memberikan tiga kontribusi, yaitu: (a) taksiran parameter kinetika korosi untuk sembilan kondisi baja–suhu, (b) perbandingan dua model menggunakan tiga metrik dan uji *hold-out*, serta (c) bukti numerik mengenai perbedaan dua cara estimasi hukum pangkat. Lebih jauh, penelitian ini memperlihatkan bahwa konsep matematika seperti regresi, metode kuadrat terkecil, dan analisis galat dapat diterapkan secara langsung untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pemeliharaan material pertahanan.

II. METODE

Jenis penelitian ini adalah penelitian kuantitatif yang bertumpu pada data sekunder dan pemodelan matematika. Tahapannya meliputi: (1) pengambilan data massa dari Rajput et al. (2020), (2) perhitungan kehilangan massa, (3) estimasi parameter kedua model, (4) evaluasi galat, dan (5) pengujian kemampuan prediksi.

Data penelitian bersumber dari Rajput et al. (2020), *Ships and Offshore Structures*, 15(6), 661–669. Tabel 1 merangkum kondisi eksperimen pada sumber tersebut. Dari seluruh data yang tersedia, hanya data **perendaman air laut** yang digunakan. Dengan demikian, terdapat 3 jenis baja × 3 suhu = 9 kondisi, dan setiap kondisi memiliki 9 titik waktu (bulan 0 sampai 8).

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 1. Kondisi eksperimen pada data sumber (Rajput et al., 2020)

Aspek	Keterangan
Jenis baja	Grade A (baja lunak), AH-32 dan DH-32 (baja kapal berkekuatan tinggi)
Spesimen	Kupon tarik, tebal 6 mm, panjang ukur 60 mm, massa ±1 kg, 2 spesimen per kondisi (dirata-ratakan)
Media	Air laut alami dari Yongho-dong, Busan, 3000 ml per spesimen, diganti tiap minggu
Salinitas air laut	rata-rata 2,6% (2,1–3,1%)
Oksigen terlarut	rata-rata 9,0 mg/l (6,7–11,3 mg/l)
Suhu	18 °C (ruang), 0 °C, −10 °C
Durasi	8 bulan, penimbangan tiap ±1 bulan (30–40 hari), ketelitian 1 g

Ada dua hal yang perlu diperhatikan. Pertama, pada −10 °C suhu sudah berada di bawah titik beku air laut, sehingga besar kemungkinan spesimen terperangkap di dalam es. Kedua, massa awal DH-32 pada −10 °C tercatat 1044 g, jauh lebih besar daripada spesimen lain (±998 g), dan angka ini kemungkinan merupakan kesalahan pencatatan pada sumber. Karena analisis didasarkan pada selisih terhadap massa awal masing-masing spesimen,

Model linear. Model ini mengasumsikan bahwa baja kehilangan massa dengan laju tetap b (g/bulan):

$$W_L(t) = a + b\,t$$

Nilai a dan b ditentukan dengan metode kuadrat terkecil, yakni dengan meminimumkan jumlah kuadrat galat. Setelah turunan parsial terhadap a dan b disamakan dengan nol, diperoleh solusi tertutup berikut:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{N}(t_i - \bar{t})\,(W_i - \bar{W})}{\sum_{i=1}^{N}(t_i - \bar{t})^2}, \qquad a = \bar{W} - b\,\bar{t}$$

Model hukum pangkat. Pada model ini, laju korosi diperbolehkan berubah seiring waktu:

$$W_P(t) = A\,t^{\,n}, \qquad \frac{dW_P}{dt} = nA\,t^{\,n-1}$$

Turunan di atas menunjukkan bahwa laju korosi menurun bila n < 1, konstan bila n = 1, dan meningkat bila n > 1. Model ini juga memenuhi syarat fisis W(0) = 0. Karena kedua model sama-sama memiliki dua parameter, perbandingan di antara keduanya bersifat adil.

Parameter A dan n ditaksir melalui dua pendekatan:

1. **Linearisasi log–log.** Kedua ruas persamaan dilogaritmakan sehingga terbentuk persamaan garis lurus, kemudian diselesaikan dengan regresi linear biasa. Titik t = 0 tidak diikutkan karena ln 0 tidak terdefinisi:

$$\ln W = \ln A + n \ln t$$

2. **Kuadrat terkecil nonlinear (NLS).** Pada pendekatan ini, parameter dicari secara langsung dengan meminimumkan jumlah kuadrat galat pada skala aslinya. Karena solusi tertutup tidak tersedia, digunakan algoritma iteratif Levenberg–Marquardt sebagaimana tersedia pada pustaka SciPy (Virtanen et al., 2020):

$$\min_{A,\,n} S(A,n) = \sum_{i=1}^{N}(W_i - A\,t_i^{\,n})^2$$

$$\boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k + (\mathbf{J}^T\mathbf{J} + \lambda\,\mathbf{I})^{-1}\mathbf{J}^T\mathbf{r}, \qquad \boldsymbol{\theta} = (A,n)^T$$

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Pada persamaan tersebut, **J** adalah matriks Jacobian yang memuat turunan parsial model terhadap A dan n, **r** adalah vektor residual, dan λ adalah parameter peredam. Hasil NLS dijadikan model hukum pangkat utama, sementara hasil linearisasi berfungsi sebagai pembanding (rumusan masalah 4).

Tingkat kecocokan model dinilai dengan tiga metrik (Chicco, Warrens and Jurman, 2021; Hodson, 2022), dengan W_i sebagai data dan $\hat{W}_i$ sebagai keluaran model:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(W_i - \hat{W}_i)^2}{\sum(W_i - \bar{W})^2}, \quad \text{MAE} = \frac{1}{N}\sum|W_i - \hat{W}_i|, \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(W_i - \hat{W}_i)^2}$$

R^2 mengukur seberapa besar variasi data yang mampu dijelaskan oleh model; semakin dekat ke 1, semakin baik. MAE menyatakan rata-rata galat mutlak, sedangkan RMSE memberikan bobot yang lebih besar pada galat berukuran besar. Kedua metrik ini bersatuan gram, dan nilai yang lebih kecil menandakan model yang lebih baik. Mengingat jumlah parameter kedua model sama, kriteria informasi seperti AIC akan menghasilkan urutan yang sama dengan RMSE, sehingga tidak perlu dihitung tersendiri.

Rumusan masalah 3 dijawab dengan melatih ulang setiap model hanya menggunakan data bulan 0–6, lalu memakainya untuk memprediksi bulan 7 dan 8. RMSE pada kedua titik uji tersebut menggambarkan kemampuan model dalam meramal, bukan hanya kemampuannya menyesuaikan diri dengan data yang sudah ada.

Seluruh perhitungan dikerjakan dengan Python 3 menggunakan pustaka NumPy dan SciPy, khususnya fungsi polyfit dan curve_fit (Virtanen et al., 2020).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Secara garis besar, hukum pangkat lebih cocok dengan data pada 8 dari 9 kondisi dan lebih akurat dalam prediksi pada 6 dari 9 kondisi. Sementara itu, perendaman pada 18 °C menyebabkan kehilangan massa 2,3–3,4 kali lebih besar dibandingkan pada 0 °C.

Massa rata-rata spesimen yang terendam air laut (dua spesimen untuk setiap kondisi) disajikan pada Tabel 2. Data ini disalin dari Rajput et al. (2020).

Tabel 2. Massa rata-rata baja di air laut, m(t) dalam gram

Bulan	Grade A 18 °C	Grade A 0 °C	Grade A −10 °C	AH-32 18 °C	AH-32 0 °C	AH-32 −10 °C	DH-32 18 °C	DH-32 0 °C	DH-32 −10 °C
0	1003,5	1002,0	1006,5	1008,5	1003,5	1007,0	997,0	998,5	1044,0
1	1002,5	1001,5	1006,0	1007,5	1003,0	1007,0	995,5	997,5	1043,5
2	1001,5	1000,0	1005,0	1004,5	1003,0	1004,5	993,0	997,0	1043,0
3	998,0	997,5	1005,0	1003,0	1002,0	1004,0	991,0	995,0	1042,5
4	995,0	996,5	1005,5	1001,0	1001,0	1004,0	989,0	993,0	1040,0
5	991,5	995,5	1004,5	994,5	1000,5	1003,5	983,5	991,5	1038,0
6	983,0	993,5	1004,0	984,5	998,5	1003,0	973,5	990,5	1035,0
7	977,0	991,0	1003,0	978,0	996,0	1002,0	967,0	989,5	1032,5
8	972,0	988,5	1002,0	972,0	992,0	1001,5	961,0	988,0	1029,0

Sumber: Rajput et al. (2020), Tabel 2 dan 3. Baja AH-32 tertulis "AH-36" pada salah satu tabel sumber.

Sebagai ilustrasi, perhitungan untuk baja Grade A pada 18 °C di bulan ke-8 adalah sebagai berikut:

$$W(8) = 1003{,}5 - 972{,}0 = 31{,}5\ \text{g}, \qquad W_{\%}(8) = \frac{31{,}5}{1003{,}5} \times 100\% = 3{,}14\%$$

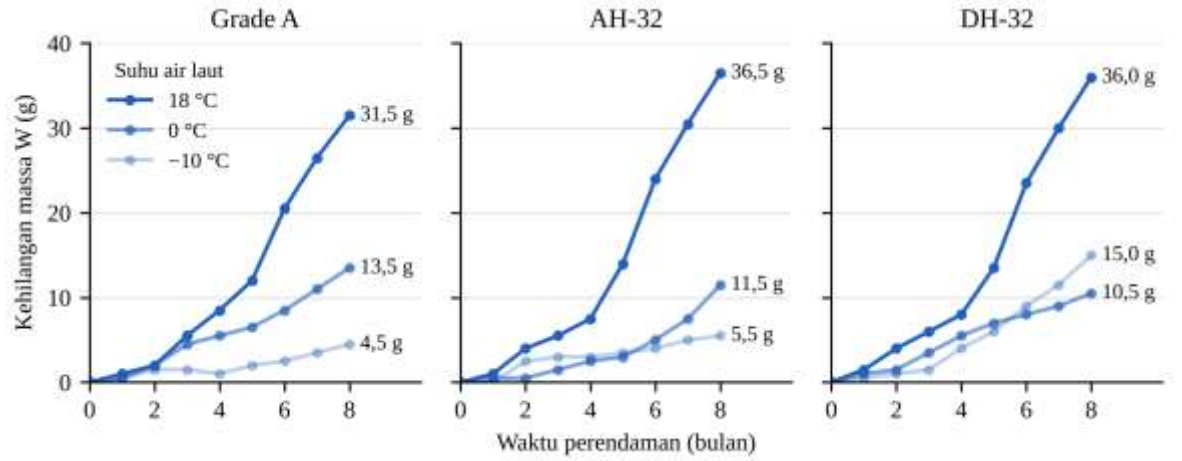
Langkah yang sama diterapkan pada semua bulan dan kondisi. Tabel 3 memuat hasil akhir pada bulan ke-8, sedangkan perkembangan W(t) dari bulan ke bulan diperlihatkan pada Gambar 1.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 3. Kehilangan massa kumulatif setelah 8 bulan di air laut

Baja	Suhu	W(8) (g)	W%(8) (%)	Laju rata-rata W(8)/8 (g/bulan)
Grade A	18 °C	31,5	3,14	3,94
Grade A	0 °C	13,5	1,35	1,69
Grade A	−10 °C	4,5	0,45	0,56
AH-32	18 °C	36,5	3,62	4,56
AH-32	0 °C	11,5	1,15	1,44
AH-32	−10 °C	5,5	0,55	0,69
DH-32	18 °C	36,0	3,61	4,50
DH-32	0 °C	10,5	1,05	1,31
DH-32	−10 °C	15,0	1,44	1,88

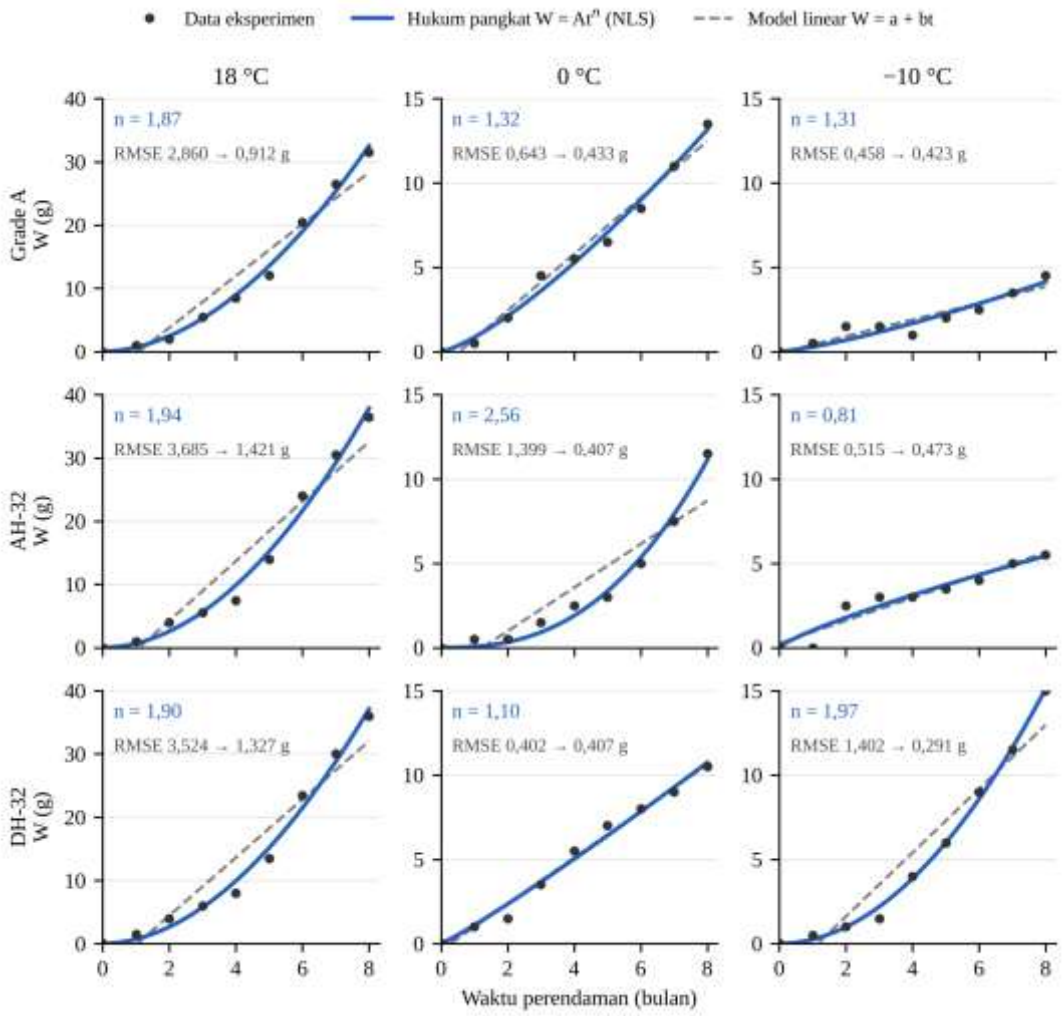


Gambar 1. Kehilangan massa kumulatif W(t) baja di air laut (data: Rajput et al., 2020, diolah)

Dari Gambar 1 terlihat bahwa kurva pada 18 °C tidak berbentuk garis lurus, tetapi melengkung ke atas. Selama bulan 0–4, kehilangan massa hanya 7,5–8,5 g, sedangkan pada bulan 4–8 angkanya mencapai 23–29 g. Bentuk lengkungan inilah yang mendasari pengujian hukum pangkat sebagai pembanding model linear.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 2. Kurva model linear (putus-putus) dan hukum pangkat (biru) terhadap data; garis linear digambar mulai dari titik W = 0 (data: Rajput et al., 2020, diolah)

Gambar 2 memperlihatkan bahwa garis lurus memotong lengkungan data. Garis tersebut berada terlalu tinggi pada bulan 2–5 dan terlalu rendah pada bulan 7–8, terutama pada 18 °C. Sebaliknya, kurva hukum pangkat mampu mengikuti lengkungan itu karena eksponennya n > 1. Nilai parameter dan metrik selengkapnya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter model dan metrik kecocokan (N = 9 titik per kondisi; nilai terbaik dicetak tebal)

Baja	Suhu (°C)	a (g)	b (g/bulan)	R^2 linear	MAE linear (g)	RMSE linear (g)	A	n	R^2 pangkat	MAE pangkat (g)	RMSE pangkat (g)
Grade A	18	−4,46	4,100	0,9320	2,573	2,860	0,672	1,866	**0,9931**	**0,741**	**0,912**
Grade A	0	−0,92	1,675	0,9784	0,564	0,643	0,841	1,322	**0,9902**	**0,335**	**0,433**
Grade A	−10	−0,08	0,492	0,8850	0,365	0,458	0,274	1,305	**0,9017**	**0,338**	**0,423**
AH-32	18	−5,20	4,717	0,9161	3,163	3,685	0,667	1,942	**0,9875**	**1,160**	**1,421**
AH-32	0	−1,61	1,292	0,8503	1,173	1,399	0,055	2,557	**0,9873**	**0,365**	**0,407**

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Baja	Suhu (°C)	a (g)	b (g/bulan)	R² linear	MAE linear (g)	RMSE linear (g)	A	n	R² pangkat	MAE pangkat (g)	RMSE pangkat (g)
AH-32	−10	0,24	0,675	0,9198	0,383	0,515	1,016	0,806	**0,9321**	**0,344**	**0,473**
DH-32	18	−4,79	4,600	0,9191	3,054	3,524	0,708	1,904	**0,9885**	**1,151**	**1,327**
DH-32	0	−0,39	1,375	**0,9874**	0,321	**0,402**	1,096	1,097	0,9870	**0,316**	0,407
DH-32	−10	−2,18	1,892	0,9239	1,210	1,402	0,251	1,971	**0,9967**	**0,196**	**0,291**

RMSE hukum pangkat lebih kecil daripada model linear pada 8 dari 9 kondisi. Selisih paling mencolok muncul pada 18 °C, ketika RMSE turun dari 2,86–3,69 g (linear) menjadi 0,91–1,42 g (hukum pangkat), atau berkurang sekitar 61–68%. Model linear hanya sedikit lebih unggul pada DH-32 di 0 °C (RMSE 0,402 g vs 0,407 g). Secara matematis, hal ini dapat dipahami karena eksponen pada kondisi tersebut n = 1,097 ≈ 1, sedangkan untuk n = 1 hukum pangkat W = At tidak lain adalah garis lurus yang melalui titik asal. Artinya, model linear merupakan kasus khusus dari hukum pangkat.

Ketidaklinearan data juga tampak dari nilai intersep a. Pada 8 dari 9 kondisi, a bernilai negatif (hingga −5,20 g), yang berarti model linear seolah-olah "menyatakan" bahwa baja sudah bertambah massanya pada t = 0. Kondisi ini mustahil secara fisis dan menandakan bahwa data melengkung ke atas (cembung), sehingga garis lurus terpaksa memotong sumbu tegak di bawah nol. Masalah ini tidak terjadi pada hukum pangkat karena W(0) = 0.

Pada −10 °C, R² kedua model lebih rendah, yaitu 0,885–0,932 untuk Grade A dan AH-32. Rendahnya nilai ini lebih disebabkan oleh kecilnya sinyal daripada buruknya model. Total kehilangan massa hanya 4,5–5,5 g, padahal ketelitian timbangan 1 g. Bahkan, massa Grade A sempat naik 0,5 g pada bulan ke-4. Dengan rasio sinyal terhadap derau sekecil itu, perbedaan metrik antarmodel pada −10 °C belum cukup kuat untuk dijadikan dasar pemilihan model.

Hasil prediksi model yang dilatih dengan data bulan 0–6 untuk meramal bulan 7 dan 8 ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Prediksi bulan 7 / bulan 8 (g) dan RMSE prediksi

Baja	Suhu (°C)	Data aktual	Prediksi linear	Prediksi pangkat	RMSE linear (g)	RMSE pangkat (g)
Grade A	18	26,5 / 31,5	19,93 / 23,14	27,30 / 36,14	7,52	**3,33**
Grade A	0	11,0 / 13,5	9,79 / 11,25	10,18 / 11,91	1,81	**1,27**
Grade A	−10	3,5 / 4,5	2,71 / 3,07	2,50 / 2,74	**1,15**	1,43
AH-32	18	30,5 / 36,5	22,50 / 26,13	33,36 / 45,74	9,26	**6,84**
AH-32	0	7,5 / 11,5	5,00 / 5,79	6,33 / 8,04	4,41	**2,58**
AH-32	−10	5,0 / 5,5	5,07 / 5,77	4,68 / 5,17	**0,20**	0,32
DH-32	18	30,0 / 36,0	22,14 / 25,66	31,34 / 41,93	9,18	**4,30**
DH-32	0	9,0 / 10,5	9,50 / 10,93	10,16 / 12,01	**0,47**	1,35
DH-32	−10	11,5 / 15,0	9,00 / 10,46	12,62 / 16,90	3,66	**1,56**

Hukum pangkat memberikan prediksi yang lebih akurat pada 6 dari 9 kondisi. Meski begitu, arah kesalahan kedua model berbeda. Pada 18 °C, model linear selalu meremehkan kehilangan massa bulan ke-8 sebesar 26–29% (contohnya 23,14 g berbanding 31,5 g pada Grade A), sedangkan hukum pangkat melebihkan sebesar 15–25% (36,14–45,74 g). Dengan kata lain, nilai aktual berada di antara kedua prediksi. Dalam konteks pemeliharaan kapal, kesalahan yang meremehkan lebih berisiko karena dapat menyebabkan inspeksi atau penggantian pelat terlambat dilakukan. Karena itu, untuk peramalan jangka pendek, hukum pangkat dapat diperlakukan sebagai batas atas yang konservatif, sedangkan model linear sebagai batas bawahnya.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 6. Parameter hukum pangkat dari dua metode estimasi

Baja	Suhu (°C)	A (log–log)	n (log–log)	RMSE log–log (g)	A (NLS)	n (NLS)	RMSE NLS (g)
Grade A	18	0,803	1,747	1,267	0,672	1,866	**0,912**
Grade A	0	0,625	1,508	0,669	0,841	1,322	**0,433**
Grade A	−10	0,534	0,897	0,516	0,274	1,305	**0,423**
AH-32	18	0,976	1,710	2,051	0,667	1,942	**1,421**
AH-32	0	0,299	1,581	1,258	0,055	2,557	**0,407**
AH-32	−10	1,577	0,554	0,603	1,016	0,806	**0,473**
DH-32	18	1,299	1,538	2,517	0,708	1,904	**1,327**
DH-32	0	0,884	1,219	0,473	1,096	1,097	**0,407**
DH-32	−10	0,362	1,733	0,797	0,251	1,971	**0,291**

Pada semua kondisi, regresi nonlinear langsung menghasilkan RMSE yang lebih kecil, dengan penurunan 14–68%. Penyebabnya bersifat matematis. Linearisasi meminimumkan galat dalam skala logaritma, yang pada dasarnya sama dengan meminimumkan galat *relatif*. Konsekuensinya, titik-titik awal yang bernilai kecil (misalnya W = 0,5 g, padahal ketelitiannya 1 g) memperoleh bobot yang sangat besar, sedangkan titik t = 0 harus dibuang. Perbedaan ini bahkan dapat mengubah kesimpulan fisis. Pada Grade A −10 °C, linearisasi menghasilkan n = 0,897 (korosi melambat), sementara NLS menghasilkan n = 1,305 (korosi mempercepat). Oleh karena itu, untuk data korosi yang nilai awalnya kecil, estimasi hukum pangkat sebaiknya dilakukan dengan NLS.

2. Pembahasan

Pengaruh suhu. Pada 18 °C, kehilangan massa mencapai 31,5–36,5 g (3,1–3,6%), atau sekitar 2,3–3,4 kali lipat dibandingkan 0 °C (10,5–13,5 g). Laju linear b pun turun dari 4,10–4,72 g/bulan menjadi 1,29–1,68 g/bulan. Pola ini sejalan dengan prinsip kinetika kimia, yaitu reaksi elektrokimia korosi berjalan lebih lambat pada suhu rendah, dan sesuai pula dengan temuan Rajput et al. (2020). Pada −10 °C, Grade A dan AH-32 hanya kehilangan 4,5–5,5 g karena air laut membeku sehingga perpindahan oksigen dan ion sangat terhambat. Hasil DH-32 pada −10 °C (15,0 g, lebih besar daripada di 0 °C) menyimpang dari pola tersebut dan kemungkinan berkaitan dengan anomali massa awal 1044 g pada data sumber.

Makna eksponen n > 1. Ketiga baja pada 18 °C memiliki n = 1,87–1,94, yang berarti laju korosinya justru bertambah seiring waktu. Temuan ini berbeda dari anggapan umum dalam ISO 9224 bahwa n < 1 karena lapisan karat melindungi baja. Ada beberapa kemungkinan penyebabnya: (1) pada bulan-bulan awal, lapisan oksida bawaan pabrik (*mill scale*) masih melindungi permukaan, lalu sedikit demi sedikit rusak; (2) air laut diganti setiap minggu, sehingga pasokan oksigen tetap tinggi dan karat yang longgar ikut terbuang; dan (3) korosi baja di air laut berlangsung multifase, dan data 8 bulan kemungkinan baru merekam fase awal hingga peralihannya (Melchers, 2020; Melchers et al., 2024). Karena itu, nilai n > 1 tidak boleh diekstrapolasi ke rentang tahunan, sebab prediksinya akan membengkak. Hal ini selaras dengan kecenderungan *overestimate* yang terlihat pada uji *hold-out*.

Perbandingan jenis baja. Pada 18 °C, kehilangan massa AH-32 dan DH-32 (36,0–36,5 g) sedikit lebih besar daripada Grade A (31,5 g). Jadi, kekuatan tarik yang lebih tinggi tidak dengan sendirinya disertai ketahanan korosi yang lebih baik. Bagi kapal yang menggunakan baja berkekuatan tinggi agar pelatnya dapat dibuat lebih tipis, cadangan korosi terhadap ketebalan pelat menjadi semakin kritis.

Implikasi untuk pertahanan. Suhu perairan Indonesia berkisar 27–31 °C, lebih hangat daripada kondisi terhangat dalam data ini (18 °C). Dengan melihat tren suhu pada Tabel 3, laju korosi kapal TNI AL kemungkinan lebih tinggi daripada hasil penelitian ini. Dari penelitian ini dapat disarankan bahwa (1) uji korosi jangka pendek sebaiknya dianalisis menggunakan hukum pangkat berbasis NLS, bukan hanya laju rata-

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

rata; dan (2) penentuan jadwal inspeksi sebaiknya menggunakan prediksi konservatif (batas atas) agar kegagalan struktur tidak terjadi sebelum perbaikan dilakukan.

Keterbatasan. Data yang digunakan hanya mencakup 8 bulan, berupa rata-rata dua spesimen per kondisi, dengan ketelitian timbangan 1 g, dan berasal dari air laut Korea Selatan. Lebar spesimen juga tidak dilaporkan, sehingga kehilangan massa belum bisa dikonversi menjadi kehilangan ketebalan (mm/tahun). Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data jangka panjang dari perairan tropis Indonesia serta model multifase seperti model Melchers.

IV. KESIMPULAN

Hasil analisis data perendaman air laut selama 8 bulan dari Rajput et al. (2020) menjawab keempat rumusan masalah sebagai berikut. (1) Hukum pangkat $W = At^n$ lebih sesuai daripada model linear, dengan RMSE yang lebih kecil pada 8 dari 9 kondisi dan R^2 sebesar 0,90–0,997; pada 18 °C, RMSE berkurang 61–68%, sementara model linear menghasilkan intersep negatif pada 8 kondisi yang tidak bermakna secara fisis. (2) Laju korosi linear menurun dari 4,10–4,72 g/bulan (18 °C) menjadi 1,29–1,68 g/bulan (0 °C); eksponen n pada 18 °C sebesar 1,87–1,94 menandakan bahwa korosi tahap awal sedang mengalami percepatan, dan baja berkekuatan tinggi AH-32 maupun DH-32 tidak lebih tahan korosi dibandingkan Grade A. (3) Pada uji *hold-out*, hukum pangkat lebih akurat pada 6 dari 9 kondisi; pada 18 °C, model linear meremehkan kehilangan massa bulan ke-8 sebesar 26–29%, sedangkan hukum pangkat melebihkannya 15–25%, sehingga keduanya dapat dipakai sebagai batas bawah dan batas atas prediksi jangka pendek. (4) Regresi nonlinear (Levenberg–Marquardt) selalu lebih akurat daripada linearisasi log–log, dengan RMSE 14–68% lebih kecil, dan pada satu kondisi linearisasi bahkan membalik kesimpulan mengenai nilai n. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan penggunaan data jangka panjang (lebih dari satu tahun) dari perairan tropis Indonesia, pengukuran langsung kehilangan ketebalan, serta pengujian model multifase atau model yang memasukkan suhu sebagai variabel, misalnya persamaan Arrhenius.

DAFTAR PUSTAKA

Chicco, D., Warrens, M. J. and Jurman, G. (2021) 'The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation', *PeerJ Computer Science*, 7, e623. doi: 10.7717/peerj-cs.623.

Hodson, T. O. (2022) 'Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not', *Geoscientific Model Development*, 15(14), pp. 5481–5487. doi: 10.5194/gmd-15-5481-2022.

Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M. and Payer, J. (2016) *International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study (IMPACT)*. NACE International.

Melchers, R. E. (2020) 'A review of trends for corrosion loss and pit depth in longer-term exposures', *Corrosion and Materials Degradation*, 1(1), pp. 42–58. doi: 10.3390/cmd1010004.

Melchers, R. E., Jeffrey, R., Chaves, I. A. and Petersen, R. B. (2024) 'Predicting corrosion for life estimation of ocean and coastal steel infrastructure', *Materials and Corrosion*. doi: 10.1002/maco.202314201.

Panchenko, Y. M. and Marshakov, A. I. (2017) 'Prediction of first-year corrosion losses of carbon steel and zinc in continental regions', *Materials*, 10(4), 422. doi: 10.3390/ma10040422.

Panchenko, Y., Marshakov, A., Igonin, T. and Nikolaeva, L. (2021) 'Estimation of long-term corrosion resistance of structural metals and mapping the continental territory of the Russian Federation for various time periods', *Corrosion Engineering, Science and Technology*. doi: 10.1080/1478422X.2020.1862967.

Rajput, A., Park, J. H., Noh, S. H. and Paik, J. K. (2020) 'Fresh and sea water immersion corrosion testing on marine structural steel at low temperature', *Ships and Offshore Structures*, 15(6), pp. 661–669. doi: 10.1080/17445302.2019.1664128.

Refait, P., Grolleau, A.-M., Jeannin, M., Rémazeilles, C. and Sabot, R. (2020) 'Corrosion of carbon steel in marine environments: Role of the corrosion product layer', *Corrosion and Materials Degradation*, 1(1), pp. 198–218.

Seechurn, Y. and Chuttoo, L. S. (2022) 'Corrosion of carbon steel in Mauritian water bodies', *Matéria (Rio de Janeiro)*, 27(2), e13166. doi: 10.1590/S1517-707620220002.1366.

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T. et al. (2020) 'SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python', *Nature Methods*, 17(3), pp. 261–272. doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Woloszyk, K. and Garbatov, Y. (2022) 'Advances in modelling and analysis of strength of corroded ship structures', *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(6), 807. doi: 10.3390/jmse10060807.

Zayed, A., Garbatov, Y. and Guedes Soares, C. (2018) 'Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions', *Ocean Engineering*, 163, pp. 299–306.