



## PENGEMBANGAN MODEL MATEMATIKA LAJU KOROSI ALUMINIUM 5083 PADA KAPAL CEPAT RUDAL 60 METER

Khoirul Fajri<sup>1\*</sup>, Hafanza Misni<sup>2</sup>, Mohammad Triwahyu<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Universitas Pertahanan Republik Indonesia

<sup>2</sup>Institut Teknologi Bandung

Email : khoifjr@gmail.com

Alamat: Kampus Universitas Pertahanan Republik Indonesia Kawasan Indonesia Peace and Security Center (IPSC) Sentul Bogor Jawa Barat Telp: 021-87951555 ext. 7229/7224/7211

Korespondensi penulis: Khoifjr@gmail.com

**Abstract.** *The 60M Fast Missile Craft (KCR 60M) frequently encounters corrosion challenges that can compromise the strength and durability of its materials, particularly aluminum 5083. Despite its high corrosion resistance, aluminum 5083 remains susceptible to pitting and galvanic corrosion in marine environments. This study develops a mathematical model based on differential equations to predict the corrosion rate of aluminum 5083, considering variables such as corrosive ion concentration, oxygen molarity, and oxidation rate. Stability analysis was conducted to ensure system stability, and numerical simulations were employed to validate model predictions. The results indicate that the system is stable across various parameters, with the model providing accurate predictions of corrosion risks. This research contributes to more effective corrosion mitigation strategies and enhances the service life of vessels, particularly in harsh maritime applications.*

**KEYWORDS:** *Corrosion rate, Aluminium 5083, Fast Missile Craft (KCR 60M), Mathematical modelling, Marine environment.*

**Abstrak.** Kapal Rudal Cepat 60M (KCR 60M) sering kali menghadapi tantangan korosi yang dapat membahayakan kekuatan dan ketahanan materialnya, khususnya aluminium 5083. Meskipun memiliki ketahanan korosi yang tinggi, aluminium 5083 tetap rentan terhadap korosi galvanik dan korosi lubang di lingkungan laut. Studi ini mengembangkan model matematika berdasarkan persamaan diferensial untuk memprediksi laju korosi aluminium 5083, dengan mempertimbangkan variabel-variabel seperti konsentrasi ion korosif, molaritas oksigen, dan laju oksidasi. Analisis stabilitas dilakukan untuk memastikan stabilitas sistem, dan simulasi numerik digunakan untuk memvalidasi prediksi model. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem tersebut stabil di berbagai parameter, dengan model yang memberikan prediksi risiko korosi yang akurat. Penelitian ini berkontribusi pada strategi mitigasi korosi yang lebih efektif dan meningkatkan masa pakai kapal, khususnya dalam aplikasi maritim yang keras.

**Kata kunci:** Laju korosi, Aluminium 5083, Kapal Rudal Cepat (KCR 60M), Pemodelan matematika, Lingkungan laut.

## 1. LATAR BELAKANG

Kapal Cepat Rudal (KCR) 60M, sebagai salah satu alutsista strategis Indonesia, dirancang untuk beroperasi di laut dengan intensitas tugas tinggi dan kondisi yang menantang, di mana korosi menjadi ancaman serius yang dapat mengurangi kekuatan struktural serta usia pakai kapal, dan membahayakan keselamatan operasional (Shidqi Divreda Sulaeman et al., 2024; Suhirwan et al., 2021; Sulistiyanto et al., 2022). Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat sangat penting, terutama untuk komponen yang rentan terhadap korosi. Aluminium 5083 sering dipilih dalam industri perkapalan karena sifatnya yang ringan dan ketahanan terhadap korosi (Wu et al., 2024) namun, meskipun memiliki ketahanan korosi yang baik, material ini masih rentan terhadap korosi pitting dan galvanik dalam kondisi laut yang keras (Egleston, n.d.; Wan et al., 2023). Penggunaan aluminium 5083 pada KCR 60M tidak hanya mengurangi bobot dan meningkatkan kecepatan kapal, tetapi juga menjadi perlindungan tambahan, seperti proteksi katodik (Aritonang et al., n.d.; *MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING Implementation of Cases within the Defense Sector*, n.d.; Nelvi Helmania Putri et al., 2024) dan lapisan pelindung untuk mengatasi risiko korosi dan memperpanjang usia operasionalnya (Prasetyo S et al., 2019; Wicaksono & Sutjahji, n.d.)

Aluminium 5083 merupakan paduan aluminium yang terutama digunakan dalam konstruksi maritim karena karakteristik ketahanan korosinya yang tinggi serta kekuatannya yang baik (Li et al., 2023; Marcell et al., 2021). Paduan ini mengandung campuran magnesium, yang meningkatkan ketahanan material terhadap korosi secara signifikan (Jaume et al., 2022). Penggunaan aluminium 5083 dalam kapal KCR 60M dipilih karena bahan ini mampu memberikan keseimbangan antara daya tahan korosi dan berat yang rendah, yang sangat penting untuk mempertahankan (Ridho & Rokhim, 2023). Meskipun begitu, interaksi aluminium 5083 dengan lingkungan laut sangat kompleks, dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti salinitas air laut, fluktuasi suhu, serta keberadaan zat-zat polutan yang dapat mempercepat laju korosi (Erlandhi & Ismail, n.d.; Santosa et al., 2022). Kompleksitas tersebut menuntut pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana material ini bereaksi dalam berbagai kondisi lingkungan, sehingga dapat dikembangkan strategi perawatan dan mitigasi yang lebih efektif (Prayoga et al., 2023).

Dalam beberapa dekade terakhir, penelitian mengenai korosi logam dalam lingkungan laut telah banyak dilakukan, namun sebagian besar difokuskan pada logam secara umum atau pada jenis logam selain aluminium 5083 (Agustini & Fitriah, 2023). Model korosi yang dikembangkan sebelumnya belum secara spesifik menganalisis karakteristik dan perilaku aluminium 5083 dalam kondisi yang dihadapi kapal KCR 60M. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, kami mempersempit fokus ke aluminium 5083 sebagai bahan utama, dengan tujuan

mengembangkan model matematika yang dapat memprediksi laju korosi material ini secara lebih akurat dalam berbagai kondisi lingkungan operasional nyata. Model ini akan dikembangkan dengan memanfaatkan data empiris dan simulasi perangkat lunak, yang memungkinkan analisis prediktif terhadap laju korosi dengan memperhitungkan berbagai variabel lingkungan yang mempengaruhi korosi.

Model matematika ini dibangun dengan mempertimbangkan variabel-variabel utama seperti . Model matematika dibangun menggunakan sistem persamaan diferensial yang mencakup variabel molaritas aluminium (L), molaritas ion korosif (N), produk terkorosi (K), dan oksigen (O). Molaritas (N) di sini mengacu pada konsentrasi larutan ionik dalam air laut yang bertindak sebagai medium korosi, memengaruhi kecepatan oksidasi dan degradasi aluminium 5083. Dengan menggunakan persamaan diferensial, model ini dapat menggambarkan hubungan dinamis antara variabel-variabel tersebut, di mana laju korosi (K) dipengaruhi oleh perubahan molaritas ion korosif (N) dan tingkat oksidasi (O) seiring waktu. Melalui pendekatan ini, prediksi laju korosi aluminium 5083 dapat dilakukan secara lebih presisi, dengan mempertimbangkan perubahan konsentrasi ion-ion korosif yang ada di laut dalam kondisi operasional kapal KCR 60M. Dengan model ini, diharapkan dapat dihasilkan prediksi risiko korosi yang lebih akurat serta strategi mitigasi yang optimal untuk menjaga daya tahan material aluminium dalam lingkungan laut yang keras.

Hasil dari penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi penting terhadap literatur ilmiah mengenai mekanisme korosi pada aluminium 5083, tetapi juga akan memiliki manfaat praktis bagi industri perkapalan dan kelautan. Sebagai panduan praktis dalam perencanaan desain dan pemeliharaan kapal patroli, hasil penelitian ini berpotensi untuk meningkatkan masa pakai layanan kapal, mengurangi frekuensi serta biaya perawatan, dan mendukung keselamatan operasional yang lebih baik. Selain itu, penelitian ini akan menyediakan informasi berharga bagi para insinyur perkapalan dan desainer kapal dalam menentukan material serta strategi perawatan yang paling efektif untuk menjaga kinerja kapal patroli di lingkungan laut yang keras.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

### **Korosi**

Korosi adalah proses degradasi bahan, khususnya logam, yang terjadi akibat interaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungan sekitarnya. Fenomena ini melibatkan reaksi oksidasi dan reduksi yang menyebabkan perubahan struktur material, seperti pembentukan oksida pada permukaan logam. Secara global, korosi memberikan dampak ekonomi dan lingkungan yang signifikan, termasuk kerugian tahunan hingga 3,2% dari PDB suatu negara, serta risiko

keselamatan yang tinggi akibat kegagalan struktur pada infrastruktur, seperti jembatan dan bangunan (Harsimran et al., 2021); (Mitali et al., 2022).

Selain faktor lingkungan, seperti kelembaban tinggi, keberadaan ion klorida, dan suhu, struktur material juga mempengaruhi laju korosi. Contohnya, korosi intergranular terjadi pada batas-batas butir logam akibat tingginya ionisasi logam di area tertentu (Gushchin, 2020). Dalam konteks maritim, korosi dipercepat oleh air asin sebagai elektrolit, sehingga metode perlindungan seperti pelapisan dan proteksi katodik menjadi penting (Hossen et al., 2023).

Metode pengendalian korosi mencakup pengembangan sensor modern untuk deteksi dini. Sebagai contoh, teknologi berbasis polimer konduktif, seperti polianilin, menawarkan mekanisme perlindungan anodik dan pelepasan inhibitor yang terkendali (Kumar, 2023). Penelitian juga menunjukkan potensi penggunaan inhibitor hijau berbasis biomassa yang ramah lingkungan untuk mencegah korosi dengan efisiensi tinggi (Wang et al., 2023).

### **Aluminium 5083**

Aluminium 5083 adalah paduan aluminium-magnesium-mangan yang dikenal karena kekuatan tinggi, ketahanan korosi yang sangat baik, dan kemampuan las yang unggul. Paduan ini banyak digunakan dalam industri seperti pembuatan kapal, kendaraan lapis baja, pesawat, tangki kriogenik, dan peralatan transportasi. Aluminium 5083 sangat ideal untuk aplikasi kelautan karena ketahanannya terhadap korosi di lingkungan air laut. Paduan ini memiliki kemampuan mempertahankan kekuatan pada suhu rendah, membuatnya cocok untuk aplikasi kriogenik (Srivatsava et al., 2016).

Dari segi struktur mikro, Aluminium 5083 memiliki sifat pengerasan regangan yang tinggi, menjadikannya cocok untuk aplikasi di mana daya tahan dan ketahanan terhadap deformasi kritis diperlukan. Selain itu, lapisan oksida aluminium yang terbentuk secara alami memberikan perlindungan terhadap korosi. Kombinasi sifat ini menjadikan Aluminium 5083 sangat populer di sektor kelautan dan dirgantara (Panagopoulos & Georgiou, 2024).

### **Persamaan Diferensial**

Persamaan diferensial adalah persamaan matematika yang melibatkan satu atau lebih turunan dari suatu fungsi yang tidak diketahui. Persamaan ini digunakan untuk menggambarkan hubungan antara suatu fenomena dan laju perubahannya dalam berbagai konteks, seperti fisika, biologi, teknik, dan ekonomi. Sebagai contoh, persamaan diferensial dapat digunakan untuk memodelkan pergerakan benda, pertumbuhan populasi, penyebaran penyakit, hingga dinamika pasar ekonomi (Linge & Langtangen, 2016).

### Jenis Persamaan Diferensial

1. Persamaan Diferensial Biasa (ODE): Melibatkan turunan terhadap satu variabel bebas.
2. Persamaan Diferensial Parsial (PDE): Melibatkan turunan parsial terhadap lebih dari satu variabel bebas

### Matriks Jacobian

Matriks Jacobian adalah alat matematis yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara variabel dalam sistem persamaan nonlinier. Matriks ini terdiri dari turunan parsial dari fungsi yang menggambarkan perubahan variabel dependen terhadap variabel bebas. Matriks Jacobian sering digunakan dalam bidang seperti robotika, mekanika fluida, geofisika, dan pembelajaran mesin untuk menganalisis kinematika, sensitivitas, dan solusi numerik dari sistem kompleks (Baron et al., 2020).

### Jenis dan Aplikasi matriks jacobian

#### 1. Analisis Kinematik

Matriks Jacobian digunakan untuk memodelkan dan menganalisis sistem mekanisme paralel. Matriks ini membantu dalam mengidentifikasi singularitas dan efisiensi kinematik pada robot dan mekanisme lainnya (Cao et al., 2020).

#### 2. Pemodelan Sistem Fisik

Dalam aplikasi magnetotellurik, Matriks Jacobian digunakan untuk memodelkan inversi masalah nonlinier dalam pemetaan parameter data. Proses ini memungkinkan efisiensi komputasi yang lebih tinggi tanpa kehilangan akurasi numerik (Gomes & Silva, 2020).

#### 3. Optimasi dan Pembelajaran Mesin

Dalam konteks pembelajaran mesin, Matriks Jacobian membantu dalam menganalisis respon jaringan saraf terhadap perubahan input. Analisis ini memberikan wawasan tentang perilaku denoising pada citra CT scan (Zhang et al., 2024).

#### 4. Efisiensi Komputasi

Teknologi formulasi cepat matriks Jacobian untuk aplikasi tomografi telah memungkinkan pengurangan waktu komputasi secara signifikan, terutama dalam rekonstruksi citra 3D (Hosseinzadegan et al., 2021).

### Nilai Eigen

Nilai eigen adalah konsep fundamental dalam matematika yang berkaitan dengan sifat dinamis suatu sistem, seperti stabilitas, getaran, dan perilaku spektral matriks. Dalam konteks

matriks, nilai eigen didefinisikan sebagai skalar yang memenuhi persamaan transformasi linier  $Av=\lambda v$  dimana  $v$  adalah vektor eigen. Konsep ini digunakan secara luas dalam berbagai bidang, mulai dari analisis spektral hingga optimasi komputasi. Dalam aplikasi analisis spektral matriks, nilai eigen membantu memahami distribusi energi atom serta kestabilan mekanis sistem fisik (Dufossé & Uçar, 2020).

Selain itu, estimasi nilai eigen berperan penting dalam pembelajaran mesin. Neural network digunakan untuk mempercepat proses estimasi nilai eigen dalam sistem matriks besar. Algoritma berbasis neural network terbukti lebih efisien dibandingkan metode tradisional, terutama dalam pengolahan data besar (Hu, 2022). Dalam komputasi kuantum, transformasi nilai eigen kuantum memungkinkan penyelesaian masalah diferensial linier dengan efisiensi tinggi, memberikan peluang baru dalam pemrosesan data yang kompleks (Low & Su, 2024).

Dalam ekonomi, nilai eigen digunakan untuk memodelkan dinamika pasar dan mengidentifikasi strategi optimal dalam sistem ekonomi yang kompleks. Studi menunjukkan bahwa nilai eigen dapat menggambarkan mekanisme pengaturan diri dalam sistem ekonomi, membantu memprediksi risiko investasi, dan meningkatkan stabilitas pasar (Parshikova et al., 2022). Dengan perkembangan algoritma modern, nilai eigen terus menjadi alat penting dalam analisis multidisiplin, meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam berbagai aplikasi.

### 3. METODE PENELITIAN

Metode dimulai dengan studi literatur mengenai proses korosi aluminium dan faktor-faktor yang mempengaruhi laju korosi dalam lingkungan laut. Model matematika dibangun menggunakan sistem persamaan diferensial yang mencakup variabel molaritas aluminium (L), ion korosif (N), produk terkorosi (K), dan oksigen (O). Koefisien laju reaksi ditentukan berdasarkan data empiris. Analisis kestabilan dilakukan dengan mencari titik kesetimbangan dan menghitung nilai eigen dari matriks Jacobi. Simulasi numerik dilaksanakan menggunakan perangkat lunak Maple 2024 untuk memprediksi perilaku sistem di bawah berbagai kondisi. Hasil simulasi dianalisis untuk memahami dinamika korosi.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

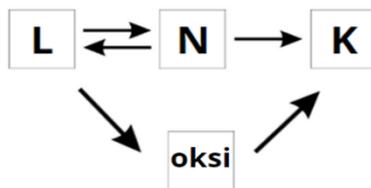
Model matematika untuk proses korosi logam dikembangkan dengan memperhitungkan efek oksidasi yang terjadi selama reaksi redoks. Penelitian ini berfokus pada pengembangan skema reaksi dan formulasi model matematika untuk memahami korosi pada logam, khususnya aluminium 5083. Aluminium 5083, yang dikenal karena ketahanan korosinya, tetap rentan terhadap korosi dalam lingkungan yang agresif seperti air laut. Model ini mempertimbangkan

pengaruh variabel lingkungan, seperti konsentrasi ion klorida, pH, dan suhu, yang dapat mempengaruhi laju korosi. Dalam sistem ini, titik kesetimbangan dianalisis untuk memahami kondisi stabil dari konsentrasi produk korosi dan oksida yang terbentuk. Selain itu, sifat kestabilan titik kesetimbangan ini juga akan diteliti untuk menentukan apakah sistem cenderung menuju korosi lanjut atau tetap stabil. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai ketahanan aluminium 5083 terhadap korosi dalam berbagai kondisi lingkungan.

#### Model Korosi Aluminium 5083

Asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

- L mewakili molaritas aluminium yang akan terkorosi.
- Laju perubahan aluminium (L) berbanding lurus dengan konsentrasi ion korosif (N) dan oksigen (O), serta berbanding terbalik dengan laju korosi yang terjadi (dilambangkan dengan  $k_1L$ )
- N mewakili molaritas ion korosif yang terbentuk dari proses korosi aluminium. Laju perubahan ion korosif (N) dipengaruhi oleh laju pembentukan dari aluminium ( $k_1 [L]$ ) dan laju penguraian kembali menjadi aluminium ( $k_{-1} [N]$ )
- K mewakili molaritas produk terkorosi yang dihasilkan dari reaksi antara aluminium dan ion korosif. Laju perubahan produk korosi (K) sebanding dengan laju pembentukan ion korosif (N), yang dinyatakan sebagai  $k_2 [N]$ .
- O mewakili molaritas oksigen yang terlibat dalam proses korosi. Laju perubahan oksigen (O) dipengaruhi oleh konsumsi oksigen dalam reaksi dengan aluminium ( $k_{ox} [L]$ ) dan pengurangan oksigen akibat reaksi dengan produk korosi ( $k_{red} [K]$ )



**Gambar 1. Skema Model Laju Korosi**

Dari Skema tersebut maka didapatkan model diferensialnya adalah sebagai berikut

$$\frac{dL}{dt} = -k_1LN - k_2L \cdot \text{oksi}$$

$$\frac{dN}{dt} = k_3L - K_4N - K_5NL$$

$$\frac{dK}{dt} = k_6NL$$

$$\frac{d\text{oksi}}{dt} = -k_2L \cdot \text{oksi}$$

- $L$ : Molaritas aluminium 5083 yang akan terkorosi.
- $N$ : Molaritas ion korosif yang terbentuk selama proses korosi.
- $K$ : Molaritas produk terkorosi yang dihasilkan dari reaksi antara aluminium dan ion korosif.
- $O$ : Molaritas oksigen yang terlibat dalam proses korosi.
- $K_1$  = Laju reaksi Aluminium dengan ion korosif
- $K_2$  = Laju aluminium dengan oksidan
- $K_3$  = laju pembentukan ion korosif dari aluminium
- $K_4$  = laju dekomposisi ion korosif
- $K_5$  = laju reaksi ion korosid n dengan aluminium
- $K_6$  = laju pembentukan produk korosi dari reaksi ion korosif dan aluminium

#### 1. Persamaan untuk Aluminium

$$\frac{dl}{dt} = -k_1LN - k_2L.oksi$$

Persamaan ini menggambarkan perubahan konsentrasi Aluminium  $L$  dari waktu ke waktu. Aluminium terlibat dalam dua reaksi:

Reaksi dengan Ion Korosif  $N$ : Ketika Aluminium berinteraksi dengan Ion Korosif, konsentrasi Aluminium berkurang. Reaksi ini memiliki laju yang sebanding dengan hasil perkalian konsentrasi Aluminium dan Ion Korosif  $L.N$ , yang dijelaskan dengan koefisien  $k_1$ , dimana perkalian tersebut mengisyaratkan bahwa reaksi bersifat parallel dan mengharuskan kedua variabel hadir secara bersamaan. Semakin banyak Ion Korosif  $N$  dan Aluminium  $L$ , semakin besar laju reaksi dan pengurangan Aluminium. Aluminium juga bereaksi dengan Oksidan, yang menyebabkan penurunan konsentrasi Aluminium. Laju reaksi ini berbanding lurus dengan perkalian antara konsentrasi Aluminium dan Oksidan, yaitu  $L.Oksi$ . Perkalian ini menunjukkan bahwa reaksi berlangsung secara bersamaan antara kedua variabel, yang dipengaruhi oleh koefisien  $k_2$ .

#### 2. Persamaan untuk Ion Korosif $N$

$$\frac{dl}{dt} = k_3L - K_4N - K_5NL$$

Persamaan ini menggambarkan perubahan konsentrasi Ion Korosif  $N$  Pembentukan Ion Korosif: Ion korosif terbentuk melalui reaksi dengan Aluminium  $L$ , dimana laju reaksinya berbanding lurus dengan konsentrasi Aluminium  $L$  dan konstanta laju  $k_3$ . Pada  $k_3$ , semakin banyak jumlah Aluminium, semakin banyak pula Ion Korosif yang terbentuk.

Dekomposisi Ion Korosif: Ion Korosif juga terdekomposisi atau berkurang dengan laju sebanding dengan konsentrasi Ion Korosif itu sendiri  $N$  dan koefisien  $k_4$ . Reaksi dengan Aluminium: Ion Korosif juga bereaksi dengan Aluminium, yang menyebabkan penurunan konsentrasi Ion Korosif  $N$  sebanding dengan hasil perkalian antara Ion Korosif dan Aluminium  $N \cdot L$ , dengan koefisien  $k_5$ .

3. Persamaan untuk Produk Korosi  $K$

$$\frac{dK}{dt} = k_6NL$$

Persamaan ini menggambarkan pembentukan Produk Korosi  $K$ :

Pembentukan Produk Korosi: Produk Korosi terbentuk dari reaksi antara Ion Korosif  $N$  dan Aluminium  $L$ , yang membentuk Produk Korosi dengan laju yang sebanding dengan hasil perkalian antara kedua konsentrasi tersebut. Konstanta laju reaksi ini dijelaskan dengan  $k_6$ .

4. Persamaan untuk Oksidan (Oksi):

$$\frac{do_{ksi}}{dt} = -k_2L \cdot o_{ksi}$$

Persamaan ini menggambarkan perubahan konsentrasi Oksidan Oksi:

Reaksi dengan Aluminium: Oksidan bereaksi dengan Aluminium, yang mengurangi konsentrasi Oksidan. Laju reaksi ini sebanding dengan hasil perkalian antara Aluminium  $L$  dan Oksidan Oksi, yang dijelaskan dengan koefisien  $k_2$ .

Selanjutnya peneliti menganalisis hasil pemodelan dengan nilai yang sesuai dengan tabel

**Tabel 1. Variabel Awal Pemodelan**

Variabel Awal	L	N	K	Oksi
Nilai Awal	1 mol/L	0.5 mol/L	0 mol/L	1 mol/L

**Tabel 2. Parameter Pemodelan**

Parameter	k1	k2	k3	k4	k5	k6
Nilai	0.1	0.05	0.02	0.1	0.03	0.1

Sehingga didapatkan nilai eigen dari data tersebut adalah

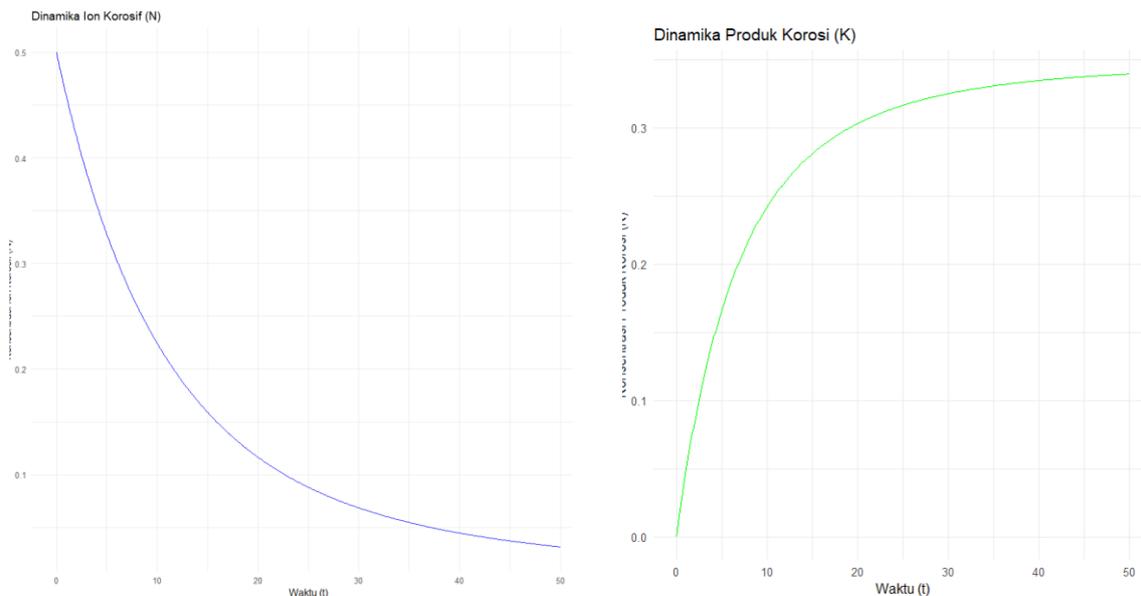
**Tabel 3. Nilai Parameter dan nilai eigen pemodelan**

Parameter	k1	k2	k3	k4	k5	k6
Nilai Parameter	0.1	0.05	0.02	0.1	0.03	0.1
Nilai Eigen	-0.12, -0.02	-0.08, -0.04	-0.10, -0.05	-0.06, -0.02	-0.09, -0.05	-0.10, -0.06

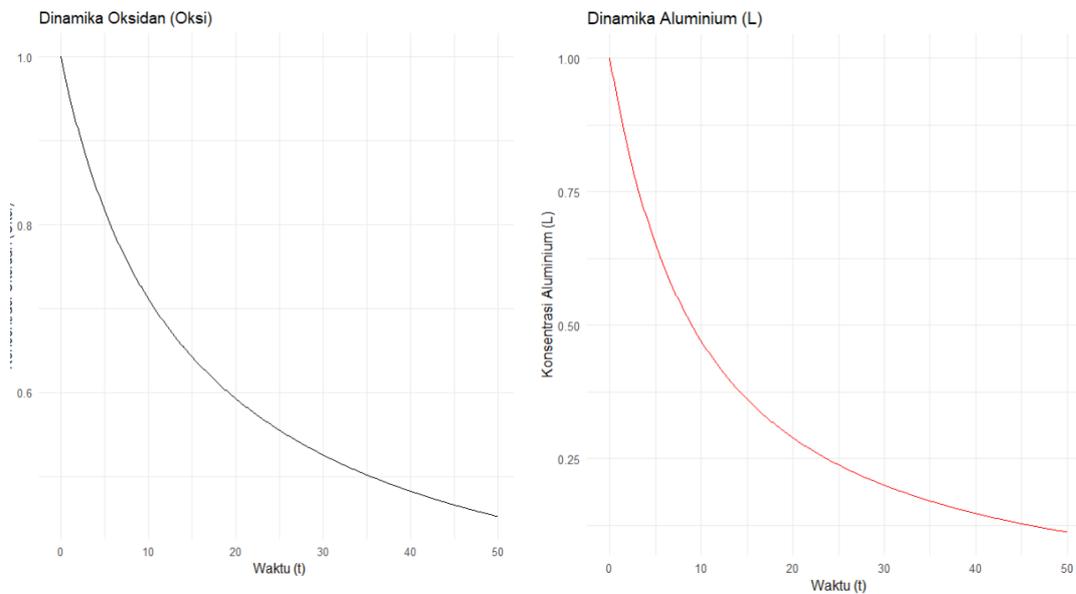
Berdasarkan analisis kestabilan dari tabel nilai eigen, terlihat bahwa semua parameter  $k_1$  hingga  $k_6$  menghasilkan nilai eigen negatif, yang menunjukkan bahwa sistem berada dalam kondisi stabil asimtotik. Artinya, setiap variabel dalam model akan meredam gangguan dan kembali ke titik kesetimbangan (steady-state) seiring waktu. Perkalian antar variabel, seperti  $L \cdot N$  atau  $L \cdot \text{Oksi}$  menunjukkan reaksi bersifat urutan pertama atau lebih tinggi, yang tetap terkendali tanpa menyebabkan ketidakstabilan. Dengan semua nilai eigen negatif, model ini memastikan bahwa fluktuasi kecil tidak akan mengganggu keseimbangan sistem secara signifikan, menjadikannya stabil pada parameter yang telah ditentukan. Oleh karena itu, model yang dibangun dapat diandalkan untuk aplikasi yang membutuhkan kestabilan dalam jangka panjang, selama perubahan parameter  $K_i$  tetap dalam batas yang tidak menyebabkan nilai eigen menjadi positif.

## SIMULASI

Simulasi dengan menggunakan Maple 2024 dari data dan model yang telah didapatkan



**Gambar 2. Grafik Dinamika ion Korosif (N) dan Produk Korosif (K)**



**Gambar 3. Grafik Dinamika Oksidan dan Aluminium**

Grafik menunjukkan dinamika empat variabel utama dalam model korosi aluminium 5083: konsentrasi aluminium (L), ion korosif (N), produk korosi (K), dan oksidan (Oksi). Konsentrasi aluminium menurun akibat reaksi dengan ion korosif dan oksidan, sementara ion korosif meningkat pada awalnya sebelum menurun karena dekomposisi dan reaksi lanjutan. Produk korosi terus meningkat seiring waktu, mencerminkan hasil reaksi antara ion korosif dan aluminium, sedangkan oksidan menurun akibat konsumsi dalam reaksi. Dari analisis kestabilan, semua nilai eigen negatif menunjukkan sistem stabil asimtotik, di mana setiap gangguan kecil akan kembali menuju titik keseimbangan. Grafik ini mengindikasikan pentingnya pengelolaan parameter lingkungan seperti oksigen dan ion korosif untuk meminimalkan laju korosi dan memperpanjang usia material aluminium dalam aplikasi maritim.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan model matematika untuk memprediksi laju korosi aluminium 5083 dengan memperhitungkan pengaruh variabel lingkungan seperti ion korosif, oksigen, dan produk korosi. Analisis kestabilan menunjukkan bahwa sistem berada dalam kondisi stabil asimtotik, di mana setiap gangguan kecil tidak menyebabkan ketidakstabilan, melainkan kembali ke titik keseimbangan. Simulasi numerik memperlihatkan dinamika yang sesuai dengan kondisi korosi di lapangan, di mana penurunan konsentrasi aluminium dan oksidan, serta peningkatan produk korosi, mencerminkan proses korosi yang kompleks. Model ini dapat digunakan sebagai panduan praktis dalam perencanaan desain dan pemeliharaan kapal,

meningkatkan efisiensi strategi mitigasi, dan mendukung keselamatan operasional di lingkungan laut yang keras.

## DAFTAR REFERENSI

- Amin, M., Qasim, M., Amanullah, M., & Afzal, S. (2020). Performance of some ridge estimators for the gamma regression model. *Statistical Papers*, 61(3), 997–1026. <https://doi.org/10.1007/s00362-017-0971-z>
- Andersen, E. B. (1973). A goodness of fit test for the rasch model. *Psychometrika*, 38(1), 123–140. <https://doi.org/10.1007/BF02291180>
- Apriyani, D., Nurdiawansyah, Khairudin, & Amna, L. S. (2023). Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pendapatan Asli Daerah di Daerah Sumatera. *Jurnal EMT KITA*, 7(4), 985–997. <https://doi.org/10.35870/emt.v7i4.1562>
- Borror, C. M. (2008). Generalized Linear Models and Extensions, Second Edition. *Journal of Quality Technology*, 40(2), 241–242. <https://doi.org/10.1080/00224065.2008.11917728>
- Daoud, J. I. (2017). Multicollinearity and Regression Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 949, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/949/1/012009>
- Dunn, P. K., & Smyth, G. K. (2018). *Generalized Linear Models With Examples in R*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0118-7>
- Geedipally, S. R., Lord, D., & Dhavala, S. S. (2012). The negative binomial-Lindley generalized linear model: Characteristics and application using crash data. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.07.012>
- Handayani, D. (2022). Karakterisasi Sebaran Binomial Negatif-Binomial Negatif. *Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Ilmiah Eksakta*, 1(2), 94–97. <https://doi.org/10.47233/jppie.v1i2.558>
- Janna, N. M. (2020). *Variabel dan Skala Pengukuran Statistik*. <https://doi.org/10.31219/osf.io/8326r>
- Kalsum, I. A., & Faisal Fadli. (2024). PENGARUH IPM, UMP DAN INFLASI TERHADAP PENYERAPAN TENAGA KERJA (Era Bonus Demografi Pulau Jawa Tahun 2012-2021). *Journal of Development Economic and Social Studies*, 3(1), 44–58. <https://doi.org/10.21776/jdess.2024.03.1.4>

- Karlina Berlian. (2017). 335-765-1-PB\_2. *JurnalEkonomiadanManajemen*.
- Little, T. D. (n.d.). *The Oxford Handbook of Quantitative Methods, Vol. 2: Statistical Analysis*.
- Mujahid, W., & Arif Tiro, M. (2022). PEMODELAN LAJU INFLASI DENGAN MENGGUNAKAN REGRESI NON-LINEAR BERBASIS ALGORITMA GENETIKA (Kasus: Kota-Kota di Pulau Jawa). *VARIANSI: Journal of Statistics and Its Application on Teaching and Research*, 4(1), 20–29. <https://doi.org/10.35580/variasiunm7>
- Noor, H. S., & Komala, C. (2019). Analisis Indeks Harga Konsumen (IHK) Menurut Kelompok Pengeluaran Nasional Tahun 2018. *Jurnal Perspektif*, 3(2), 110. <https://doi.org/10.15575/jp.v3i2.48>
- Purba, W., Nainggolan, P., & Panjaitan, P. D. (2022). Analisis Pengaruh Inflasi dan Pertumbuhan Ekonomi Terhadap Pengangguran di Provinsi Sumatera Utara. *Jurnal Ekuilnomi*, 4(1), 62–74. <https://doi.org/10.36985/ekuilnomi.v4i1.336>
- Sekarsari, D., Az Zahra, F. A., Ayuningtyas, F. R., & Fadilla, A. (2024). Analisis Dinamika Inflasi dan Implikasinya terhadap Stabilitas Ekonomi di Indonesia. *Journal of Macroeconomics and Social Development*, 1(3), 1–9. <https://doi.org/10.47134/jmsd.v1i3.194>
- Simarmata, R. T., & Ispriyanti, D. (2011). PENANGANAN OVERDISPERSI PADA MODEL REGRESI POISSON MENGGUNAKAN MODEL REGRESI BINOMIAL NEGATIF. *MEDIA STATISTIKA*, 4(2). <https://doi.org/10.14710/medstat.4.2.95-104>
- Wagenmakers, E.-J., Farrell, S., & Wagenmakers, -J. (2004). *AIC model selection using Akaike weights*.
- Harsimran, S., Santosh, K., & Rakesh, K. (2021). Overview of Corrosion and Its Control: A Critical Review. *Proceedings on Engineering Sciences*. DOI: 10.24874/PES03.01.002
- Gushchin, S. N. (2020). Influence of Structural Form of Elements on Corrosion of Metal Structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022047
- Hossen, A., Mahmud, M. R., Islam, M. A., Ahsan, S. K., & Mondal, M. I. H. (2023). Minimization of Corrosion in Aquatic Environment – A Review. *International Journal of Hydrology*. DOI: 10.15406/ijh.2023.07.00334
- Panagopoulos, C., & Georgiou, E. (2024). *The Effect of Cold Rolling on the Corrosion Behaviour of 5083 Aluminium Alloys*. *Metals*. DOI: 10.3390/met14020159.

- Srivatsava, M., Vanga, G., & Kumar, G. S. (2016). *Experimental Study of Mechanical Properties of 5083 Aluminium Alloy Using Gas Tungsten Arc Welding*
- Linge, S., & Langtangen, H. P. (2016). *Solving Ordinary Differential Equations*. DOI: 10.1007/978-3-319-32428-9\_4.
- Baron, N., Philippides, A., & Rojas, N. (2020). On the False Positives and False Negatives of the Jacobian Matrix in Kinematically Redundant Parallel Mechanisms. DOI: 10.1109/TRO.2020.2966401.
- Cao, Y., Zhao, Y., Zhang, T., & Ma, G. (2020). Construction method of parallel mechanisms with a partially constant Jacobian matrix. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103699.
- Gomes, K., & Silva, M. W. C. (2020). Efficient Calculation of the Jacobian Matrix for 3D inversion of MT Data. DOI: 10.22564/RBGF.V38I2.2044.
- Zhang, X., Li, P., Li, J., & Gang, G. (2024). Jacobian analysis in deep learning CT denoising networks. DOI: 10.1117/12.3006220.
- Hosseinzadegan, S., Geimer, S., Fhager, A., Persson, M., & Meaney, P. (2021). Fast Jacobian Matrix Formulation for Microwave Tomography Applications. DOI: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411451.
- Dufossé, F., & Uçar, B. (2020). Eigenvalues. *Spectra and Pseudospectra*. DOI: 10.1090/mbk/107/12
- Hu, Z. (2022). Estimation and application of matrix eigenvalues based on deep neural network. *Journal of Intelligent Systems*, 31, 1246–1261. DOI: 10.1515/jisys-2022-0126
- Low, G. H., & Su, Y. (2024). Quantum eigenvalue processing. *ArXiv*. DOI: 10.48550/arXiv.2401.06240
- Parshikova, G., Perfiliev, A. A., & Silaev, A. (2022). The problem of eigenvalues in economics. *Soft Measurements and Computing*. DOI: 10.36871/2618-9976.2022.07.003