

MODEL MATEMATIKA LAJU KOROSI LOGAM DENGAN FAKTOR LINGKUNGAN YANG MEMPERCEPAT PROSES KOROSI

MATHEMATICAL MODEL OF METAL CORROSION RATE WITH ENVIRONMENTAL FACTORS THAT SPEED UP CORROSION

Rofila El Maghfiroh^{1§}, Mutia Lina Dewi², Rif'atul Khusniah³

¹Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang [Email: rofilaelmaghfiroh@polinema.ac.id]

²Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang [Email: mulinde13@gmail.com]

³Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang [Email: rkhusniah@polinema.ac.id]

[§]Corresponding Author

Received 05th Nov 2023; Accepted 12th Jun 2024; Published 14th Jun 2024;

Abstrak

Proses korosi sangat sering terjadi pada berbagai jenis logam, karena sifat alami dari logam. Faktor lingkungan juga mempengaruhi proses korosi logam, sehingga dibentuk model matematika laju korosi logam dengan faktor lingkungan yang mempercepat proses korosi. Model matematika tersebut dipengaruhi oleh molaritas logam awal (L), molaritas logam peralihan (N), molaritas produk terkorosi (K), dan molaritas lingkungan (X). Model matematika berbentuk sistem persamaan diferensial yang selanjutnya ditentukan titik kesetimbangannya. Titik kesetimbangan model matematika laju korosi logam dengan faktor lingkungan yang mempercepat proses korosi adalah stabil. Faktor lingkungan yang mempercepat proses korosi sangat mempengaruhi molaritas logam terkorosi. Molaritas produk terkorosi akan lebih cepat mencapai kondisi stabil, jika logam berada di lingkungan yang mempercepat proses korosi.

Kata Kunci: logam, korosi, lingkungan

Abstract

Corrosion process often occurs in different types of metals, due to the natural properties of metals. Environmental factors also affect the metals corrosion process, so a mathematical model of metal corrosion rate has been formed with environmental factors accelerating the corrosion process. The mathematical model influenced by initial metal molarity (L), transition metal molarity (N), corrosion product molarity (K), and environmental molarity (X). The mathematical model is a system of differential equations whose equilibrium point is then determined. The equilibrium point of the mathematical model of metal corrosion rate with environmental factors that accelerate the corrosion process is stable. Environmental factors that accelerate the corrosion process influence the corrosion product molarity. Corrosion products molarity will reach steady state more quickly if the metal is in an environment that accelerates the corrosion process.

Keywords: metal, corrosion, environment

1. Pendahuluan

Permasalahan terapan (mekanik, sipil, kimia atau listrik), sangat berkaitan dengan penggunaan material. Contohnya pada *transmission gear*, *structure for a buliding*, *oil refinery component*, dan *integrated circuit chip*. Material padat dikelompokkan dalam tiga klasifikasi dasar, yaitu logam, keramik, dan polimer [1]. Logam merupakan suatu benda padat yang memiliki banyak manfaat. Logam banyak dipakai untuk berbagai macam keperluan teknik, misalnya sebagai bahan struktur, pintu, jendela dan pipa [2].

Korosi merupakan proses alami terhadap logam sebagai akibat dari reaksi redoks antara logam dengan zat-zat yang berada di lingkungannya [3],[4],[5]. Lingkungan merupakan faktor utama yang menyebabkan korosi. Korosi dalam lingkungan air menjadi cukup penting, mengingat sebagian wilayah bumi adalah lautan. Kandungan garam yang terkandung dalam air laut mempunyai sifat korosif terhadap logam [6].

Saat ini korosi telah menjadi permasalahan pada seluruh sektor di dunia, misalnya dalam pengolahan, produksi, serta distribusi minyak dan gas bumi di seluruh dunia, yang secara ekonomi maupun dampak lingkungannya merugikan. Dari segi ekonomi, kerugian yang diakibatkan dari proses korosi adalah tingginya biaya perawatan. Pencegahan korosi dapat mengurangi besarnya kerugian akibat korosi [7],[8].

Laju korosi adalah kecepatan rambatan atau kecepatan penurunan kualitas bahan terhadap waktu [9]. Laju korosi logam dapat

direpresentasikan dalam bentuk sistem persamaan diferensial. Perilaku korosi logam dapat dianalisis dari solusi numerik sistem persamaan diferensial yang diperoleh.

Pemodelan matematika diformulasikan untuk dapat menjelaskan situasi kompleks yang sedang diamati [10]. Selanjutnya, akan dibahas skema pemodelan matematika laju korosi logam tanpa dan dengan faktor lingkungan yang mempercepat proses korosi. Dari skema model matematika dibentuk suatu sistem persamaan diferensial biasa. Persamaan diferensial biasa adalah suatu bentuk persamaan diferensial yang hanya mempunyai satu variabel bebas [11].

Oleh karena itu, pada artikel ini akan dibahas analisis numerik laju korosi logam tanpa dan dengan faktor lingkungan yang mempercepat proses korosi, dengan beberapa tahapan yaitu sebagai berikut.

- a. Membentuk model matematika laju korosi **tanpa** faktor lingkungan yang mempercepat proses korosi serta menentukan titik kesetimbangan dan kestabilannya.
- b. Membentuk model matematika laju korosi **dengan** faktor lingkungan yang mempercepat proses korosi serta menentukan titik kesetimbangan dan kestabilannya.
- c. Melakukan simulasi numerik terhadap model yang sudah dibentuk.
- d. Merepresentasikan hasil dari solusi numerik yang diperoleh.

2. Landasan Teori

Berikut adalah pengertian korosi serta pengertian persamaan diferensial.

2.1 Pengertian Korosi

Korosi adalah proses pengrusakan logam akibat reaksi elektrokimia antara logam dan lingkungannya [12]. Korosi dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu lingkungan (polusi udara, suhu, kelembaban dan keberadaan zat korosif), logam serta komponen dalam logam tersebut, misalnya struktur, bentuk kristal, komposisi, cara pencampuran, kemurnian [13].

2.2 Pengertian Persamaan Diferensial

Definisi berikut menjelaskan tentang persamaan diferensial.

Definisi 2.1. [14] *Persamaan diferensial adalah suatu persamaan yang memuat turunan-turunan dari satu atau lebih variabel tak bebas yang berkenaan dengan satu atau lebih variabel bebas.*

Definisi 2.2. [14] *Persamaan diferensial biasa adalah suatu persamaan yang memuat turunan-turunan dari satu atau lebih variabel tak bebas yang berkenaan dengan satu variabel bebas.*

Definisi 2.3 [14] *Orde dari persamaan diferensial adalah turunan tertinggi dari persamaan diferensial.*

3. Hasil Dan Pembahasan

Berikut adalah model matematika laju korosi

logam tanpa dan dengan faktor lingkungan yang mempercepat proses korosi.

Model Matematika Laju Korosi Logam Tanpa Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi



Gambar 1. Skema Model Matematika Laju Korosi Logam Tanpa Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi

Berdasarkan skema model matematika pada Gambar 1, maka dapat dibentuk sistem persamaan diferensial sebagai berikut.

$$\frac{dL}{dt} = bN - aL \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = aL - bN - \frac{pL}{r+L} \quad (2)$$

$$\frac{dK}{dt} = \frac{pL}{r+L} \quad (3)$$

syarat awal yang digunakan sebagai berikut.

$$L(0) = L_0, N(0) = N_0, K(0) = K_0 \quad (4)$$

dengan L adalah logam yang akan terkorosi, N adalah ion-ion logam (logam keadaan peralihan), K adalah hasil reaksi (produk terkorosi), a adalah laju perubahan logam menjadi ion-ion logam, b adalah laju perubahan ion-ion logam kembali menjadi logam, c adalah laju perubahan ion-ion logam menjadi produk terkorosi, p adalah laju reaksi dan r adalah konstanta Michaelis Menten. Nilai $a, b, c, p, r > 0$.

Titik kesetimbangan sistem persamaan diferensial pada persamaan (1), (2), dan (3), yaitu sebagai berikut.

$$E_1(L=0, N=0, K=K)$$

Nilai parameter $a = b = 0,5$; $p = 1$, dan $r = 1,3$ [8]; diperoleh matriks Jacobian, yaitu sebagai berikut.

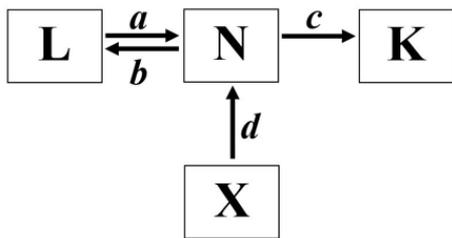
$$J = \begin{bmatrix} -0,5 & 0,5 & 0 \\ 0,5 - \frac{1}{1,3+L} + \frac{L}{(1,3+L)^2} & -0,5 & 0 \\ \frac{1}{1,3+L} - \frac{L}{(1,3+L)^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan matriks Jacobian, diperoleh nilai eigen yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0, \\ \lambda_2 &= -0,5 + 0,3669i, \\ \lambda_3 &= -0,5 - 0,3669i \end{aligned}$$

Dari uraian tersebut, didapatkan nilai eigen nol dan nilai eigen yang lain mempunyai bagian riil negatif, artinya titik kesetimbangan **stabil**.

Model Matematika Laju Korosi Logam dengan Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi



Gambar 2. Skema Model Matematika Laju Korosi Logam dengan Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi

Dari Gambar 2, maka dapat dibentuk sistem persamaan diferensial sebagai berikut:

$$\frac{dL}{dt} = bN - aL \tag{5}$$

$$\frac{dN}{dt} = aL - bN - \frac{pL}{r+L} - \frac{pX}{r+X} \tag{6}$$

$$\frac{dK}{dt} = \frac{pL}{r+L} + \frac{pX}{r+X} \tag{7}$$

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{pX}{r+X} \tag{8}$$

dengan syarat awal sebagai berikut.

$$L(0) = L_0, N(0) = N_0, \tag{9}$$

$$K(0) = K_0, X(0) = X_0.$$

dengan L adalah logam yang akan terkorosi, N adalah ion-ion logam (logam keadaan peralihan), K adalah hasil reaksi (produk terkorosi), X adalah faktor lingkungan, a adalah laju perubahan logam menjadi ion-ion logam, b adalah laju perubahan ion-ion logam Kembali menjadi logam, c adalah laju perubahan ion-ion logam menjadi produk terkorosi, p adalah laju reaksi dan r adalah konstanta Michaelis Menten. Nilai $a, b, c, p, r > 0$.

Titik kesetimbangan sistem persamaan diferensial pada persamaan (5), (6), (7) dan (8), yaitu sebagai berikut.

$$E_1(L=0, N=0, K=K, X=0)$$

Nilai parameter $a = b = 0,5$; $p = 1$, dan $r = 1,3$ [8]; diperoleh matriks Jacobian, yaitu sebagai berikut.

$$J = \begin{bmatrix} -0,5 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0,5 - \frac{1}{1,3+L} + \frac{L}{(1,3+L)^2} & -0,5 & 0 & -\frac{1}{1,3+X} + \frac{X}{(1,3+X)^2} \\ \frac{1}{1,3+L} - \frac{L}{(1,3+L)^2} & 0 & 0 & \frac{1}{1,3+X} - \frac{X}{(1,3+X)^2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{1,3+X} + \frac{X}{(1,3+X)^2} \end{bmatrix}$$

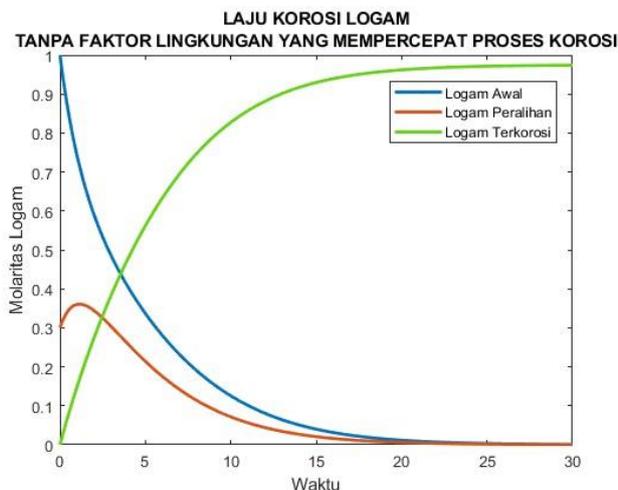
Berdasarkan matriks Jacobian, diperoleh nilai eigen yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0, \\ \lambda_2 &= -0,5 + 0,3669i, \\ \lambda_3 &= -0,5 - 0,3669i, \\ \lambda_4 &= -0,7692 \end{aligned}$$

Dari uraian tersebut, didapatkan nilai eigen nol dan nilai eigen yang lain mempunyai bagian riil negatif, artinya titik kesetimbangan **stabil**.

Simulasi Numerik Laju Korosi Logam Tanpa Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi

Sistem persamaan diferensial pada persamaan (1), (2), dan (3) merepresentasikan molaritas logam di kondisi awal, logam dalam keadaan peralihan serta logam terkorosi (produk korosi). Asumsi syarat awal yang digunakan untuk simulasi numerik adalah $L(0) = 1$, $N(0) = 0,3$ dan $K(0) = 0$, dengan L adalah molaritas logam, N adalah molaritas logam peralihan dan K adalah molaritas logam terkorosi.



Gambar 3. Laju Korosi Logam Tanpa Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi

Berdasarkan Gambar 3, molaritas logam awal, logam peralihan dan logam terkorosi akan stabil pada waktu tertentu. Hal ini sesuai dengan analisis kestabilan titik kesetimbangan yang diperoleh bahwa titik kesetimbangan dari sistem persamaan diferensial pada persamaan (1), (2), dan (3) adalah stabil. Tabel berikut menjelaskan nilai molaritas dari logam awal (L), logam peralihan (N), dan

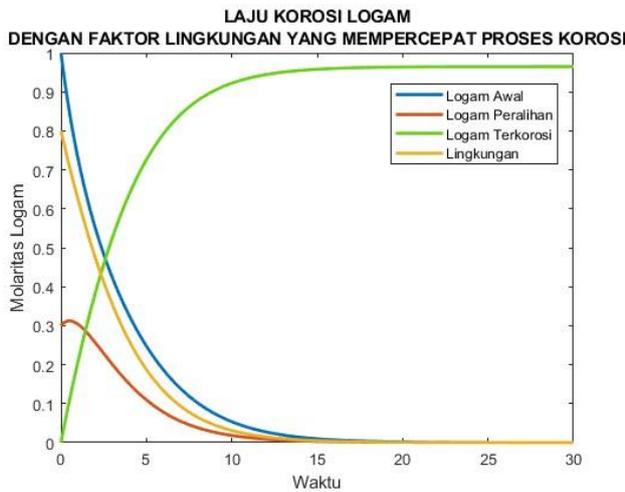
logam terkorosi (K) secara lebih detail pada satuan waktu tertentu.

Tabel 1. Molaritas Logam Tanpa Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi

t	Molaritas Logam		
	$L(t)$	$N(t)$	$K(t)$
0	1,0000	0,3000	0
5	0,3207	0,2031	0,5822
10	0,1251	0,0713	0,8277
15	0,0367	0,0189	0,9333
20	0,0111	0,0055	0,9625
25	0,0030	0,0015	0,9717
30	0,0009	0,0004	0,9740

Simulasi Numerik Laju Korosi Logam dengan Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi

Sistem persamaan diferensial pada persamaan (5), (6), (7), dan (8) merepresentasikan molaritas logam di kondisi awal, logam dalam keadaan peralihan, logam terkorosi (produk korosi) dan lingkungan yang mempercepat proses korosi. Asumsi yang digunakan sebagai syarat awal adalah $L(0) = 1$; $N(0) = 0,3$; $K(0) = 0$ dan $X(0) = 0,8$; dengan L adalah molaritas logam, N adalah molaritas logam peralihan, K adalah molaritas logam terkorosi, dan X adalah molaritas lingkungan yang mempercepat proses korosi.



Gambar 4. Laju Korosi Logam dengan Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi

Berdasarkan Gambar 4, molaritas logam awal, logam peralihan, logam terkorosi dan lingkungan yang mempercepat proses korosi akan stabil pada waktu tertentu. Seperti pada analisis kestabilan titik kesetimbangan yang diperoleh bahwa titik kesetimbangan dari sistem persamaan diferensial pada persamaan (5), (6), (7), dan (8) adalah stabil. Tabel berikut menjelaskan nilai molaritas dari logam awal (L), logam peralihan (N), logam terkorosi (K) dan lingkungan (X) secara lebih detail pada satuan waktu tertentu.

Tabel 2. Molaritas Logam dengan Faktor Lingkungan yang Mempercepat Proses Korosi

t	Molaritas Logam			
	$L(t)$	$N(t)$	$K(t)$	$X(t)$
0	1,0000	0,3000	0	0,8000
5	0,2222	0,0963	0,7537	0,1646
10	0,0531	0,0180	0,9227	0,0307
15	0,0093	0,0028	0,9584	0,0044
20	0,0016	0,0005	0,9640	0,0006
25	0,0003	0,0001	0,9648	0,0001
30	0,0001	0	0,9650	0

Berdasarkan Gambar 3 dan Gambar 4, jika logam berada di lingkungan yang mempercepat proses korosi, molaritas produk terkorosi akan lebih cepat mencapai kondisi stabil. Sedangkan Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan bahwa lingkungan yang mempercepat proses korosi sangat mempengaruhi molaritas produk terkorosi $K(t)$ pada satuan waktu tertentu. Dikondisi normal, pada $t = 5$, molaritas $K(t) = 0,5822$. Hal ini akan berbeda jika logam berada di kondisi adanya faktor lingkungan yang mempercepat proses korosi, karena pada $t = 5$, molaritas $K(t) = 0,7537$.

Korosi dapat dicegah dengan beberapa cara berikut, yaitu memilih logam yang tepat untuk suatu lingkungan dengan kondisi-kondisinya, memberi lapisan pelindung agar lapisan logam terlindung dari lingkungannya, memperbaiki lingkungan supaya tidak korosif [15].

4. Kesimpulan Dan Saran

Molaritas logam terkorosi akan lebih cepat mencapai kondisi stabil, jika logam berada di lingkungan yang mempercepat proses korosi. Pada lingkungan normal, saat $t = 5$, molaritas logam terkorosi $K(t) = 0,5822$, dan mencapai kondisi stabil saat $t = 20$. Pada lingkungan yang mempercepat proses korosi, saat $t = 5$, molaritas logam terkorosi $K(t) = 0,7537$ dan mencapai kondisi stabil saat $t = 15$.

Penambahan inhibitor untuk memperlambat laju korosi dapat dilakukan pada penelitian lebih lanjut.

5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Politeknik Negeri Malang yang telah mendanai keberlangsungan Penelitian dalam Dana DIPA Swadana Reguler Kompetisi.

Daftar Pustaka

- [1] Maghfiroh, R.E. & Zaman, M.B. 2020. Distribusi Panas Pada Kawat Tembaga Silinder Dengan Arus Listrik. *MAs Journal* 2(2), p.33-39.
- [2] Maghfiroh, R.E. & Zaman, M.B. 2020. Proses Penyebaran Konduksi Panas 1-Dimensi Pada Pipa Besi. *Transformasi. Jurnal Pendidikan Matematika dan Matematika* 4(1), p.251-258.
- [3] Fatahillah, A. 2010. Pemodelan Dan Penyelesaian Numerik Dari Permasalahan Korosi Besi Yang Didasarkan Pada Sifat Kimia larutan. *KadikMa* 2(1), p.71-80.
- [4] Sumanto & Maghfiroh, R.E. 2018. Korosi Logam Dalam Air Bersih Dari Sumber Telogo Towo Kota Batu. *Jurnal Flywheel* 9(1), p.5-9.
- [5] Saputro, F.D. 2017. Variasi Media Pengkorosi dan Waktu Terhadap Laju Korosi Pada Logam Baja Rendah Karbon (*Mild Steel*) dengan Pemodelan Kondisi Sirip Kemudi Kapal. *JTM* 5(3), p.59-66.
- [6] Oktarina, K. & Lesmana, Y. 2019. Analisis Perbandingan Laju Korosi Plat Kapal 17QIF3563586 P15 di Perairan Pelabuhan Panjang dan Pelabuhan Bakauheni Lampung. *Distilasi* 4(1), p.8-18.
- [7] Islami, dkk. 2021. Pengaruh Lingkungan Korosif dan Beban Mekanis Terhadap Perilaku Korosi pada Material Stainless Steel AISI-304. *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology* 5(2), p.28-33.
- [8] Wahyuningrum, D., dkk. 2012. Model Matematika Laju Korosi Logam Baja Karbon dengan Penambahan Inhibitor. *Jurnal Matematika & Sains* 17(1), p.10-18.
- [9] Afandi, Y. K., dkk. 2015. Analisa Laju Korosi pada Pelat Baja Karbon dengan Variasi Ketebalan Coating. *Jurnal Teknis ITS* 4(1), p.G-1-G-5.
- [10] Ndi, M.Z. 2022. *Pemodelan Matematika*, PT. Naya Expanding Management, Pekalongan.
- [11] Sitompul, H.A. & Siahaan, E.W.B. 2023. Solusi Numerik Persamaan Diferensial Biasa Orde Dua dengan Sistem Persamaan Nonlinier. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil* 11(1), p.312-322.
- [12] Yunus, A. 2011. Korosi Logam dan Pengendaliannya. *Jurnal Polimesin* 9(1), p.847-852.
- [13] Toda, C.O. & Sulistyorini, E. 2023. Analisis Laju Korosi Pada Baja ST 37 Akibat Perlakuan Panas Bertingkat, Vol.2, p.366-380.
- [14] Ross, S.L. 1984. *Differential Equations*, Third Edition, John Willey & Sons, Inc., Canada.
- [15] Utomo, B. 2009. Jenis Lorosi dan Penanggulangannya. *KAPAL* 6(2), p.138-141.