

PEMODELAN DAN PENYELESAIAN NUMERIK DARI PERMASALAHAN ARUS LISTRIK SELAMA PROSES KOROSI BESI BERLANGSUNG YANG DIDASARKAN PADA SIFAT KIMIA LARUTAN

Arif Fatahillah²

Program Studi Pendidikan Matematika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas
Jember

arif.fkip@unej.ac.id

Abstrak. Proses korosi merupakan suatu kejadian alami yang terjadi pada berbagai logam, dimana proses korosi tersebut dapat dijelaskan secara elektrokimia dengan menggunakan sel Galvani. Proses korosi besi bergantung pada derajat keasaman (pH) suatu larutan, konsentrasi besi dan temperatur larutan elektrolit yang digunakan pada sel elektrokimia. Proses korosi besi pada sel elektrokimia ini juga bisa menimbulkan arus listrik selama proses berlangsung. Pada penelitian ini dibangun suatu bentuk model dari permasalahan arus listrik serta menyelesaikan permasalahan tersebut dengan menggunakan metode elemen hingga. Arus listrik yang dimodelkan didasarkan pada arus listrik yang terjadi pada kutub katode dan anode serta waktu iterasi yang digunakan. Berdasarkan hasil penelitian besarnya arus listrik yang terjadi pada sel elektrokimia dipengaruhi oleh perbedaan lama waktu dan temperatur larutan yang dipakai pada sel elektrokimia tersebut.

Kata kunci : Korosi Besi, Arus Listrik, Metode Elemen Hingga.

PENDAHULUAN

Logam merupakan suatu benda padat yang memiliki banyak manfaat bagi manusia, misalnya adalah besi. Suatu kejadian korosi dari besi adalah suatu kejadian yang terjadi secara alami. Karatan bisa digambarkan sebagai kehancuran suatu material oleh tindakan yang melingkupi lingkungan, dimana perlawanan suatu material terhadap karatan tergantung dari banyaknya variabel-variabel sebagai kekayaan material diri sendiri, karakteristik-karakteristik lingkungan dan lainnya.

Aspek penting di dalam karatan suatu material adalah karakteristik-karakteristik pengangkutan massa, yang terjadi oleh pemindahan panas, migrasi dan difusi. Sifat distribusi dari akibat-akibat yang ditimbulkan dalam suatu benda tergantung pada karakteristik sistem gaya dan benda itu sendiri.

Suatu kejadian karatan yang nyata adalah suatu proses galvanis dengan logam yang bekerja sebagai suatu anode, suatu katode dan sebagai satu konduktor untuk elektron-elektron. Simulasi yang kuantitatif karatan besi berhubungan dengan kemungkinan peramalan pembusukan batu-batu konglomerat yang berisi butir-butir besi, jadi disini diarahkan untuk membangun suatu model karatan sedapat mungkin bebas dari konteks secara fisik dan bisa dihubungkan ke suatu model dari reaksi kimia. Fokus pada penelitian ini adalah suatu

pemodelan matematika dari reaksi-reaksi elektrokimia yang berlangsung selama proses korosi dengan menggunakan metode elemen hingga dan ditunjukkan secara geometris sebagai suatu proses sel elektrokimia. Dalam penelitian ini melibatkan reaksi redoks di dalam sel elektrokimia dengan menggunakan suatu model diferensial parsial berdasar pada hukum dari kimia fisika.

1. Persamaan Dasar

Aspek penting di dalam karatan suatu material adalah karakteristik-karakteristik pengangkutan massa, yang terjadi oleh pemindahan panas, migrasi dan difusi sebagaimana yang disebutkan dalam Hukum *Planck-Nernst* tentang massa larutan \underline{J}_k dari jenis k yaitu:

$$\underline{J}_k = - D_k \nabla C_k - \frac{z_k F D_k}{RT} C_k \nabla \underline{Q} \quad (1)$$

dengan :

D_k = adalah tetapan difusi

C_k = konsentrasi di dalam Molar (moles/liter)

z_k = angka muatan

F = konstanta Faraday

\underline{Q} = tegangan elektrik di dalam larutan elektrolit

R = konstanta gas

T = temperatur mutlak

persamaan itu kemudian diangkut oleh migrasi di dalam medan elektrik oleh difusi molekuler (Atkins,1990). Untuk masing-masing jenis, persamaan pengangkutan dapat ditulis dalam bentuk penyelesaian asam aki berikut:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(- \frac{z_k F D_k}{RT} \nabla \underline{Q} \right) \cdot C_k \right] - D_k \nabla^2 C_k = S_k \quad (2)$$

dengan S_k adalah suatu istilah untuk menghitung produksi atau kehancuran ion-ion dari jenis k karena reaksi kimia, sebagai contoh, di dalam kasus eliminasi dari ion Fe^{+2} karena pembentukan karat. Proses korosi dalam kasus ini, reaksi kimia berlangsung hanya di alat penghubung antara elektroda-elektroda dan larutan elektrolit.

2. Kondisi Awal

Ditinjau dari elektrokimia, proses karatan besi merupakan peristiwa teroksidasinya logam besi oleh oksigen yang berasal dari udara. Pada gambar 2.1 ditunjukkan bahwa larutan H_2O yang dielektrolisis dengan elektrode besi (Fe), dimana didalam larutan terdapat beberapa spesi antara lain ion H^+ dan OH^- dari hasil ionisasi H_2O sebagai pelarut dan ion Fe^{2+} yang berasal dari

ionisasi elektrode. Ion-ion Fe^{2+} bergerak menuju kutub negatif dan ion-ion OH^- bergerak menuju kutub positif (Sudarmo,2006).

Selama proses korosi berlangsung akan melibatkan reaksi reduksi-oksidasi (redoks) di dalam sel elektrolisis dengan menggunakan suatu model diferensial parsial berdasar pada hukum dari kimia fisika. Newman (1991) menjelaskan satu-satunya reaksi yang berlangsung di kutub positif adalah pemutusan logam, dalam hal ini adalah besi (Fe) yaitu:



di mana E^0_A adalah potensi patokan reaksi (A). Kerapatan arus yang dihasilkan oleh reaksi (A) ditulis oleh persamaan ButlerVolmer yaitu :

$$i_A = i_{0A} \cdot \left\{ \exp \left[(1 - \alpha_A) \frac{Fz_A}{RT} \eta_A \right] - \exp \left[-\alpha_A \frac{Fz_A}{RT} \eta_A \right] \right\} \quad (8)$$

dengan :

i_{0A} = kerapatan pertukaran arus dari reaksi (A), adalah kerapatan arus yang dievaluasi ketika jaring arus di elektroda adalah nol (nilai ini diperoleh secara eksperimen),

α_A = koefisien transfer untuk reaksi (A) (nilai ini diperoleh secara eksperimen, dengan suatu perkiraan yang baik adalah 1/2),

z_A = nomor dari elektron-elektron yang ada di dalam reaksi (A),

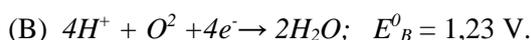
η_A = tegangan lebih ($\delta\phi - E_A$), di mana $\delta\phi$ adalah variasi di dalam potensi antara elektroda dan larutan elektrolit dan E_A = potensial elektroda pada arus kosong.

Seperti halnya jenis Fe^{+2} yang dilibatkan di dalam reaksi anoda, kita dapat berasumsi bahwa perubahan terus menerus massanya tidak akan kosong, maka ketika kerapatan arus itu dievaluasi dari persamaan (2), kita dapat menggunakan hukum Faraday untuk mengevaluasi perubahan terus menerus dari massa:

$$\left. \begin{aligned} J_{Fe^{+2}} &= \frac{i_A}{Fz_{Fe^{+2}}} \\ J_{H^+} &= 0 \quad ; \text{ pada } x = 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Perubahan terus menerus digunakan sebagai syarat batas di kutub positif untuk persamaan pengangkutan.

Pada kutub katode, diantara zat-zat yang paling mudah mengalami reduksi adalah molekul H_2O sehingga terjadi reduksi terhadap H_2O :



Tingkat kerapatan arus dikatode sekali lagi dapat dievaluasi menurut persamaan ButlerVolmer, dengan mempertimbangkan reaksi (B):

$$i_B = -i_{0B} \left\{ \exp \left[(1 - \alpha_B) \frac{Fz_B}{RT} \eta_B \right] - \exp \left[-\alpha_B \frac{Fz_B}{RT} \eta_B \right] \right\}, \quad (10)$$

dengan:

i_{0B} = kerapatan pertukaran arus dari reaksi (B),

α_B = koefisien transfer untuk reaksi (B),

z_A = angka dari elektron yang ada di dalam reaksi (B),

η_B = tegangan lebih,

dengan tanda negatif yang berarti bahwa aliran hasil positif yang ada dari elektroda ke larutan elektrolit, yang berkebalikan arah dengan sumbu.

Syarat batas untuk persamaan-persamaan pengangkutan (2) diperoleh sama seperti sebelumnya, dengan mempertimbangkan bahwa hanya ion H^+ yang dilibatkan di dalam reaksi katode, karena perubahan terus menerus maka massanya tidak akan kosong:

$$\left. \begin{aligned} J_{Fe^{+2}} &= 0 \\ J_{H^+} &= \frac{i_B}{Fz_{H^+}} \end{aligned} \right\} \text{ ; pada } x = L \quad (11)$$

3. Kondisi Awal

Setiap larutan memiliki derajat keasaman (pH) yang berbeda-beda dan berpengaruh terhadap proses korosi suatu logam. Svante Arrhenius (1887) mengemukakan bahwa *Asam* adalah suatu senyawa yang bila dilarutkan dalam air akan menghasilkan ion *Hidronium* (H^+), sedangkan *Basa* adalah suatu senyawa yang dilarutkan didalam air akan menghasilkan ion *Hidroksida* (OH^-) (Sudarmo, 2006). Sebagaimana diketahui, suatu pecahan kecil dari molekul-molekul air (H_2O) dipisahkan di dalam ion H^+ dan OH^- dalam jumlah yang ditentukan oleh kesetimbangan konstan dari reaksi *disosiasi* (pemisahan), yaitu:



Konsentrasi ion *Hidronium* (H^+) dan ion *Hidroksida* (OH^-) dalam suatu larutan encer umumnya sangat rendah tetapi sangat menentukan sifat-sifat dari larutan terutama larutan dalam air, sehingga *Sorensen* (1868-1939) mengusulkan konsep pH dan pOH untuk menghindari penggunaan angka yang sangat kecil (Sudarmo, 2006). Menurut *Sorensen* pH dan pOH merupakan fungsi logaritma negatif dari konsentrasi ion H^+ dan ion OH^- dalam suatu larutan, dan dirumuskan sebagai berikut:

$$pH = -\log [C_{H^+}] \text{ dan } pOH = -\log [C_{OH^-}] \quad (13)$$

dengan C_{H^+} adalah konsentrasi dari ion H^+ dan C_{OH^-} adalah konsentrasi dari ion OH^- dimana pada kesetimbangan air murni, berlaku:

$$pH + pOH = 14 \quad (14)$$

Konsentrasi-konsentrasi ion tersebut dinyatakan dalam satuan *Molar* (M), dimana molaritas menyatakan banyaknya mol zat terlarut dalam setiap 1 liter larutan (mol/liter). Air murni memiliki pH = 7, sehingga konsentrasi dari kedua ion baik ion H⁺ dan ion OH⁻ senilai dengan 10⁻⁷ *Molar*. Semakin kecil nilai pH suatu larutan maka tingkat keasaman larutan tersebut semakin tinggi demikian juga sebaliknya.

4. Tes Numerik

Metode Elemen Hingga merupakan salah satu metode pendekatan numerik yang mendasarkan permasalahan pada tiap-tiap elemen bagian yang dinamakan elemen hingga. Setiap permasalahan yang ada akan diselesaikan dengan pendekatan kuadratik, dimana bentuk penyelesaian dari metode elemen hingga memiliki bentuk persamaan matriks:

$$[K]\{r\} + [K_t]\{\dot{r}\} = \{R\} \quad (15)$$

dengan:

$[K], [K_t]$ = matriks sifat rakitan

$\{r\}$ = vektor dari besaran simpul yang tak diketahui

$\{R\}$ = vektor parameter gaya rakitan

Persamaan Matriks Global selanjutnya akan diselesaikan terhadap waktu, dimana dalam penyelesaian ini akan digunakan pendekatan beda hingga dengan pola Crack-Nicholson. Persamaan penyusun matriks global dapat dituliskan dalam bentuk beda hingga sebagai:

$$[K](\theta\{r\}_{t+\Delta t} + (1-\theta)\{r\}_t) + [K_t]\left\{\theta\left\{\frac{\partial\{r\}}{\partial t}\right\}_{t+\Delta t} + (1-\theta)\left\{\frac{\partial\{r\}}{\partial t}\right\}_t\right\} = \{R\}_{t+\Delta t} \quad (16)$$

Jika diambil $\theta = \frac{1}{2}$ maka akan diperoleh pola Crack-Nicholson, dengan pola pendekatan:

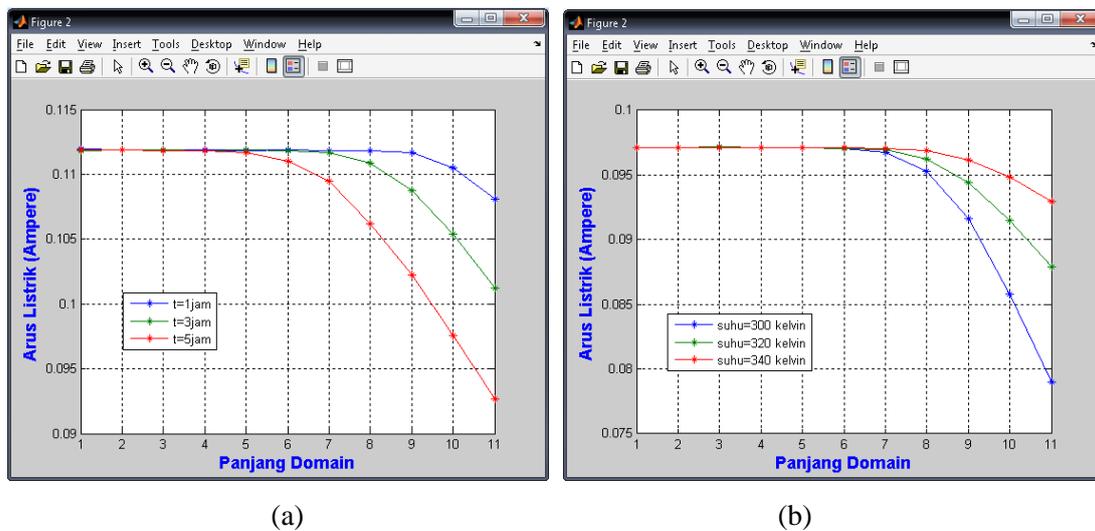
$$\frac{1}{2}\left\{\left\{\frac{\partial\{r\}}{\partial t}\right\}_{t+\Delta t} + \left\{\frac{\partial\{r\}}{\partial t}\right\}_t\right\} \cong \frac{\{r\}_{t+\Delta t} - \{r\}_t}{\Delta t} \quad (17)$$

Sehingga untuk persamaan matriks global memiliki bentuk pendekatan terhadap waktu sebagai berikut:

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta t}[K_t]\right)\{r\}_{t+\Delta t} = 2\{R\}_{t+\Delta t} - \left([K] - \frac{2}{\Delta t}[K_t]\right)\{r\}_t \quad (18)$$

Persamaan arus listrik yang timbul selama proses korosi pada sel elektrokimia, dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik dengan program MATLAB 7.0. hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.1. Berdasarkan simulasi yang didapat maka dapat diketahui semakin lama iterasi yang

digunakan maka arus listrik yang muncul pada tiap node semakin menurun, demikian juga sebaliknya. Faktor temperatur juga berpengaruh terhadap nilai arus listrik yang muncul yaitu semakin besar temperatur larutan yang dipakai maka arus listrik yang terjadi pada tiap node juga semakin meningkat dimana kedua hubungan tadi bersesuaian dengan hukum *Faraday I* dan hukum pengangkutan massa *Planck-Nernst* yaitu arus listrik berbanding terbalik terhadap waktu dan berbanding lurus dengan temperatur larutan.



Gambar 5.1 Arus Listrik yang didasarkan terhadap perbedaan waktu (a) dan temperatur larutan (b).

KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi yang sudah di buat maka dapat disimpulkan beberapa hal, pada arus listrik faktor waktu berpengaruh terhadap besar kecilnya arus listrik yang muncul yaitu semakin bertambahnya waktu maka nilai arus listrik yang muncul akan semakin mengecil, sedangkan pada faktor temperatur larutan yang dipakai dapat ditentukan hubungan bahwa semakin meningkatnya temperatur larutan elektrolit yang dipakai maka nilai arus listrik yang muncul juga akan semakin meningkat, demikian juga sebaliknya.

DAFTAR PUSTAKA

Atkins P.W. (1990), *Physical Chemistry*, Oxford University Press, Oxford.
 Away A.G. (2006), *MATLAB Programming*, Informatika, Bandung.

- Botte, V., Mansutti, D., Pascarelli, A., (2005), “Numerical Modeling of Iron Corrosion Due to An Acidic Aqueous Solution”, *Applied Numerical Mathematics*, Vol. 55, Hal 253-263.
- Brady, James E. (1990), *Principles and Structures General Chemistry*, harcourt Brace Jovanovich Collage Outline Series, Orlando Florida.
- Chapra, S. C. (2005), *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientist*, New York, USA.
- Desai C.S. (1979), *Elementary Finite Element Method*, Polytechnic Institute of Virginia, USA.
- Kanginan, M. (2006), *Fisika 2*, Erlangga, Jakarta
- Mathews, J. H. (1993), *Numerical Methods for Mathematics, Science and Engineering*, Prentice Hall International, New York
- Munir, R. (2003), *Metode Numerik*, Informatika, Bandung.
- Newman, J. S. (1991), *Electrochemical Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Perez, F. R., Garcia, K. E., Morales, A. L., Sanchez, L. C., Arboleda, J. D., Mira, J. M., Osorio, J. Greneche, J. M., Barrero, C. A., (2006), “Marine Corrosion of Iron : Mathematical Modelling of The Processes and Measurement of Last Mass”, *Revista Colombiana De Fisica*, Vol. 38, No. 3, hal 1138-1141
- Segerlind, L. J. (1937), *Applied Finite Element Analysis*, Michigan state University, USA.
- Sudarmo U., (2006), *Kimia*, Erlangga, Jakarta
- Wirjosoedirjo S. J, (1988), *Dasar-Dasar Metode Elemen Hingga*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.