**PEMODELAN DAN PENYELESAIAN NUMERIK**

**DARI PERMASALAHAN KOROSI BESI YANG DIDASARKAN**

**PADA SIFAT KIMIA LARUTAN**

**Arif Fatahillah [[1]](#footnote-2)**

**arif.fkip@unej.co.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.

 Pada penelitian ini dibangun suatu bentuk model diferensial dari permasalahan korosi besi berdasarkan sifat kimia larutan yang terdapat pada sel elektrokimia, serta menyelesaikan permasalahan tersebut dengan menggunakan metode elemen hingga*.* Model korosi yang dibangun didasarkan pada konsentrasi besi, temperatur larutan, serta waktu iterasi yang digunakan.

Berdasarkan hasil penelitian bagian logam besi yang rawan terkena korosi adalah bagian logam yang berfungsi sebagai anode dan terdapat pengaruh perbedaaan lama waktu, konsentrasi besi serta temperatur larutan terhadap proses korosi besi dan jumlah massa yang tereduksi selama proses korosi.

**Kata Kunci** : Korosi Besi, Konsentrasi Besi, Elektrokimia, 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 (Shifler, 2005).

 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.

**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 *J*k dari jenis k yaitu:

*J*k = – *Dk*$∇$*Ck* – $\frac{z\_{k}FD\_{k}}{RT}$ *Ck*$∇∅$ (1)

dengan :

*Dk* = adalah tetapan difusi

*Ck* = konsentrasi di dalam Molar (moles/liter)

*zk* = angka muatan

*F* = konstanta Faraday

$∅$ = 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:

$\frac{ ∂C\_{k}}{∂t}$ + $∇$ . [(– $\frac{z\_{k}FD\_{k}}{RT}$ $∇∅$) . *Ck*] – *Dk* $∇$2*Ck*= *Sk* (2)

dengan *Sk* 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.

Satu persamaan untuk tegangan elektrik tersebut dapat diperoleh dengan mempertimbangkan arus elektrik total dan mengabaikan kenetralan elektrik larutan elektrolit. Newman (1996) menjelaskan bahwa kuat arus elektrik *I* di dalam larutan elektrolit itu dialirkan dalam perubahan terus menerus massa larutan dari ion oleh hukum *Faraday*:

$$i=F\sum\_{k}^{}z\_{k}J\_{k} (3)$$

Suatu statemen dari kenetralan elektro bahwa kuat arus elektrik itu tidak divergen, mengakibatkan :

$∇$ *. i =* 0(4)

dengan mensubstitusikan Persamaan (3) ke Persamaan (4) kita memperoleh:

 $∇$ *. (*$\sum\_{k}^{}z\_{k}Jk$*) =* 0 (5)

dan menggunakan hukum PlanckNernst (1) kita menemukan satu persamaan untuk tegangan elektrik:

$∇$$\left[\left(\sum\_{k}^{}\frac{z\_{k}FD\_{k}}{RT}Ck\right)∇∅\right] $*= – ∑ Dk* $∇$*2Ck*  (6)

dengan mengabaikan gradien konsentrasi maka Persamaan (6) mereduksi menjadi persamaan *Laplace,* yaitu :

 $∇$2 $∅$ = 0.

**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 *H2O* yang dielektrolisis dengan elektrode besi (*Fe*), dimana didalam larutan terdapat beberapa spesi antara lain ion *H+* dan *OH-* dari hasil ionisasi *H2O* sebagai pelarut dan ion *Fe2+* yang berasal dari ionisasi elektrode. Ion-ion *Fe2+* bergerak menuju kutub negatif dan ion-ion *OH-* bergerak menuju kutub positif (Sudarmo,2006).

 katode

 L

Fe2+

Fe2+

H2O

H2O

 e

e-

Fe2+

 Katode L 0 Anode 0

**Gambar 2.1 Gambar skematik lokasi Anode dan Katode pada proses korosi (kiri) dan Sel Galvani (kanan) (Botte,2005)**

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 (1996) menjelaskan satu-satunya reaksi yang berlangsung di kutub positip adalah pemutusan logam, dalam hal ini adalah besi (Fe) yaitu:

(A) *Fe → Fe+2* + 2e-, *E0A* = - 0,44 V (oksidasi) (7)

di mana E0A adalah potensi patokan reaksi (A). Kerapatan arus yang dihasilkan oleh reaksi (A) ditulis oleh persamaan ButlerVolmer yaitu :

*iA = i0A .* $\left\{exp\left[(1-α\_{A})\frac{F\_{zA}}{RT}η\_{A}\right]-exp\left[-α\_{A}\frac{F\_{zA}}{RT}η\_{A}\right]\right\}$ (8)

dengan :

*i0A* = kerapatan pertukaran arus dari reaksi (A), adalah kerapatan arus yang dievaluasi ketika jaring arus di elektroda adalah nol (nilai ini diperoleh secara eksperimen),

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

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

*ήA* = tegangan lebih ( *δǿ - EA* ), di mana δǿ adalah variasi di dalam potensi antara elektroda dan larutan elektrolit dan *EA* = 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:

 *JFe+2=* $\frac{i\_{A}}{Fz\_{Fe^{+2}}}$

 *JH+ = 0* ; pada x = 0. (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 *H2O* sehingga terjadi reduksi terhadap *H2O* :

(B) *4H+ + O2 +4e-→ 2H2O; E0B* = 1,23 V.

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

 *iB = - i0B* $\left\{exp\left[(1-α\_{B})\frac{F\_{zB}}{RT}η\_{B}\right]-exp\left[-α\_{B}\frac{F\_{zB}}{RT}η\_{B}\right]\right\}$, (10)

dengan:

*i0B* = kerapatan pertukaran arus dari reaksi (B),

*άB* = koefisien transfer untuk reaksi (B),

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

*ήB* = 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:

 *JFe+2=* 0

 *JH+ =* $\frac{i\_{B}}{Fz\_{H^{+}}}$ ; pada x = L (11)

**Syarat Awal**

Setiap larutan memiliki derajat keasaman (pH) yang berbeda-beda dan berpengaruh terhadap proses korosi suatu logam. Svante Arhenius (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 (*H2O*) dipisahkan di dalam ion *H+* dan *OH-* dalam jumlah yang ditentukan oleh kesetimbangan konstan dari reaksi *disosiasi* (pemisahan), yaitu:

*H2O H+ + OH-* (12)

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 [*CH+*]dan pOH = – log [*COH-*] (13)

dengan *CH+* adalah konsentrasi dari ion *H+* dan *COH-* adalah konsentrasi dari ion *OH-* dimana pada kesetimbangan air murni, berlaku:

pH + pOH = 14 (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.

**Metode 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:

$\left[K\right]\left\{r\right\}+\left[K\_{t}\right]\left\{\dot{r}\right\}=\left\{R\right\}$ (15)

dengan:

[*K*],[*Kt*] = 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:

$$\left[K\right]\left(θ\left\{r\right\}\_{t+∆t}+\left(1-θ\right)\left\{r\right\}\_{t}\right)+$$

$$ \left[K\_{t}\right]\left\{θ\left\{\frac{∂\left\{r\right\}}{∂t}\right\}\_{t+∆t}+\left(1-θ\right)\left\{\frac{∂\left\{r\right\}}{∂t}\right\}\_{t}\right\}=\left\{R\right\}\_{t+∆t} (16)$$

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

$$ \frac{1}{2}\left\{\left\{\frac{∂\left\{r\right\}}{∂t}\right\}\_{t+∆t}+\left\{\frac{∂\left\{r\right\}}{∂t}\right\}\_{t}\right\}≅\frac{\left\{r\right\}\_{t+∆t}-\left\{r\right\}\_{t}}{Δt} (17)$$

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

$$\left(\left[K\right]+\frac{2}{Δt}\left[K\_{t}\right]\right)\left\{r\right\}\_{t+∆t}=2\left\{R\right\}\_{t+∆t}-\left(\left[K\right]-\frac{2}{Δt}\left[K\_{t}\right]\right)\left\{r\right\}\_{t} (18)$$

Persamaan yang sudah didapat akan divisualisasikan dengan menggunakan program MATLAB 7.0. hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.1 dibawah:

 

1. (b)



(c)

**Gambar 5.1. Proses Korosi Besi didasarkan pada perbedaan Waktu (a), Konsentrasi Besi (b), dan Temperatur larutan (c).**

Berdasarkan gambar yang diperoleh dapat ditentukan hubungan bahwa semakin lama waktu yang dibutuhkan maka kemungkinan terjadinya korosi semakin meningkat, demikian juga sebaliknya. Pengaruh konsentrasi besi terhadap proses korosi besi yaitu semakin besar konsentrasi besi yang dipakai maka kemungkinan terjadinya korosi besi semakin meningkat dan sebaliknya. Faktor ketiga yang berpengaruh adalah temperatur larutan yang dipakai, semakin besar temperatur yang dipakai maka kemungkinan terjadinya korosi justru semakin mengecil. Pernyataan tersebut bersesuaian dengan hukum *Planck-Nernst* tentang pengangkutan massa dan hukum *Faraday I* dimana massa yang dihasilkan atau tereduksi berbanding lurus terhadap waktu dan konsentrasi logam yang digunakan tetapi berbanding terbalik dengan temperatur larutan.

**Kesimpulan**

Berdasarkan simulasi yang sudah di buat maka dapat disimpulkan beberapa hal disini pada suatu logam bagian yang paling rawan terkena korosi adalah bagian logam yang berfungsi sebagai kutub anode, dalam hal ini terdapat pada awal logam. Semakin lama waktu yang digunakan maka bagian logam yang mengalami penurunan nilai konsentrasi pada akhir iterasi akan semakin panjang dalam arti daerah yang rawan terkorosi lebih panjang sehingga massa logam yang tereduksi oleh korosi semakin banyak demikian juga sebaliknya.

Faktor konsentrasi besi awal juga berpengaruh terhadap proses korosi, yaitu semakin tinggi nilai konsentrasi besi yang dipakai maka penurunan nilai konsentrasi besi pada akhir iterasi juga semakin panjang dalam arti daerah yang rawan terkorosi lebih luas, sehingga jumlah massa yang dihasilkan untuk konsentrasi yang lebih besar memiliki jumlah massa tereduksi lebih besar demikian juga sebaliknya. Faktor temperatur juga berpengaruh terhadap korosi besi yaitu semakin tinggi suhu larutan yang dipakai dalam larutan elektrolit maka penurunan konsentrasi semakin pendek, dalam arti daerah yang rawan terkorosi lebih mengecil, sehingga massa tereduksi yang dihasilkan akan semakin mengecil 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), *Elementery Finite Elemen 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. (1996), *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.

Shifler D. A, (2005) “Corrosion Science”, *Physical Science,* Vol. 47, Hal 2335–2352.

Sudarmo U., (2006), *Kimia*, Erlangga, Jakarta

Wirjosoedirjo S. J, (1988), *Dasar-Dasar Metode Elemen Hingga*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

1. Dosen Pendidikan Matematika FKIP Universitas Jember, Jember [↑](#footnote-ref-2)