

KAJIAN KECEPATAN KOROSI BAJA TULANGAN BETON MENGUNAKAN MODEL MATSUOKA TERMODIFIKASI

Arif Jumari¹⁾, Agus Purwanto¹⁾, Adhi Ardiansyah²⁾

¹⁾ Staf Pengajar dan ²⁾ mahasiswa Jurusan Teknik Kimia UNS

Abstract : *Concrete is the most usual component used on construction. An aggressive environment was able to damage the concrete such as the corrosion of steel rebar of concrete. Many methods were used to evaluate the rate of corrosion of steel rebar of concrete, one of them was Electronic Impedance Spectroscopy (EIS). One of the models on EIS method was Modified Matsuoka Model. The aim of the research was to understand the influence of environment conditions and the concrete thickness on the rate of corrosion of concrete steel rebar. The rate of corrosion was represented by Warburg Impedance constant obtained from modified Matsuoka Model. A computer programming with matlab was developed from mathematical equations of total Impedance of electrical equivalent series model. This program was used to optimize the Warburg Impedance constant on varying concrete thickness and environment conditions. The results showed that the thicker the concrete the lower warburg constant that means the thicker the concrete the higher the corrosion protection of steel rebar. On every thickness of concrete the higher the NaCl concentration the higher the rate of corrosion of steel rebar till a maximum rate of corrosion then it became lower. so, there was a value of NaCl concentration giving a lowest corrosion protection of steel rebar for every thickness of concrete.*

Keywords : *steel rebar concrete, EIS, modified Matsuoka model, warburg impedance constant, steel rebar corrosion, rate of corrosion*

Pendahuluan

Komponen konstruksi yang paling lazim digunakan adalah beton. Keuntungannya antara lain mudah dibentuk, kuat serta mudah memperoleh bahan-bahan pembentuknya. Untuk menambah kekuatannya pada beton ditambahkan besi atau baja yang disebut sebagai beton bertulang. (Faber, et al., 1965)

Lingkungan yang agresif menyebabkan beton mengalami kerusakan antara lain korosi pada besi tulangan beton yang menghasilkan senyawa karat ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Perubahan baja menjadi karat akan menyebabkan pertambahan volumenya sehingga beton menjadi retak, pecah atau bahkan terkelupas. Lingkungan dinamakan lingkungan agresif bila tanah mengandung klorida dan sulfat yang tinggi. Kandungan klorida yang tinggi pada air tanah, temperatur lingkungan yang tinggi ($>40^\circ\text{C}$), relatif humidity yang tinggi ($>90\%$) serta atmosfer yang mengandung sejumlah besar komponen garam dan sulfur.

Ada banyak metode yang digunakan untuk mengevaluasi terjadinya korosi

tulangan pada beton. Salah satunya adalah metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*. Dengan metode ini data EIS di-fit dengan sebuah model rangkaian elektronika ekuivalen. Fenomena dan kinetika proses terjadinya korosi dijelaskan dengan model ini. Model untuk pendekatan proses korosi adalah model Randels dan model Matsuoka.

Dengan *modeling*, proses korosi dapat digambarkan dengan jelas sebagai sebuah rangkaian elektronika ekuivalen. Pada penelitian ini dipakai dua macam model rangkaian elektronika ekuivalen yaitu model Pararel +W dan model Modified Matsuoka. Pada kedua model elektronika ekuivalen terdapat komponen impedansi Warburg (W). Pada penelitian ini akan diteliti pengaruh kondisi lingkungan dan ketebalan beton terhadap nilai konstanta (k) pada impedansi Warburg.

Tinjauan Pustaka

Korosi baja tulangan pada beton adalah sebuah proses elektrokimia. Sel korosi terbentuk karena perbedaan konsentrasi ion dan gas disekitar logam.

Secara normal, baja tulangan akan mempunyai lapisan film tipis FeO.OH pada permukaannya yang akan membuat baja pasif terhadap proses korosi. Film protektif ini akan stabil pada lingkungan alkalin dari semen portland yang dihidrasi, biasanya mempunyai pH > 13. Pasifitas film akan rusak dengan penurunan alkalinitas hingga di bawah pH 11 atau karena keberadaan ion klorida. Pada beton yang permeable korbonasi menyebabkan penurunan pH. (Mehta, 1991)

Tindakan yang dilakukan untuk mengatasi korosi pada baja tulangan dapat berupa tindakan pencegahan yaitu mencegah atau menghentikan terjadinya proses korosi seperti pemilihan material, proteksi katodik (*cathodiak protection*) atau tindakan perbaikan (*repair*). (Bentur, et al., 1997). Penggunaan beton mutu tinggi merupakan salah satu pencegahan korosi baja tulangan pada beton bertulang. Penutupan beton yang cukup dan rasio air/semen yang rendah akan meningkatkan waktu yang dibutuhkan ion klorida untuk mencapai baja tulangan. Meskipun demikian penutupan yang terlalu besar akan menyebabkan keretakan mengelupas (*shrinkage cracking*), yang bisa dikontrol dengan penambahan aditif fiber. Aditif beton dan material pengganti semen seperti abu terbang, slag atau asap silika dapat mengurangi ukuran pori. (Daily, et al., 1998). Untuk mengatasi karbonasi biasa dilakukan dengan membuat beton mutu tinggi yang mempunyai pori-pori dan konektivitas antar pori yang kecil. Penambahan mikrosilika dan aditif tertentu bisa mengurangi ukuran pori dan menghambat intrusi karbon dioksida yang baik pula. (Broomfield, 2000).

Macdonald, et al. (1987) melakukan analisa viabilitas spektroskopi impedansi AC untuk mendeteksi dan mencari lokasi korosi pada beton bertulang. Pada frekuensi yang sangat rendah komponen riil dan imajiner kompleks impedansi serta sudut fase dapat digunakan. Matsuoka (1987) menggunakan studi impedansi pada korosi baja pada beton, reaksi korosi dapat dijelaskan dengan sirkuit

ekuivalen yang diwakili kombinasi paralel resistansi reaksi anodik dan reaksi katodik yang dikendalikan oleh difusi. Penggunaan impedansi AC maupun pengukuran potensial bisa memberikan hasil yang akurat untuk monitoring korosi pada beton bertulang.

Resistensi listrik adalah kemampuan elemen rangkaian untuk menahan aliran arus listrik. Hukum Ohm mendefinisikan bahwa resistensi adalah rasio antara voltase E dan arus I.

$$R = \frac{E}{I} \quad (1)$$

Walaupun ini sebagai hubungan yang diketahui dengan baik tetapi penggunaannya dibatasi pada resistor ideal. Keadaan yang sebenarnya yang terjadi pada elemen rangkaian menunjukkan kelakuan yang lebih kompleks. Parameter rangkaian yang umum digunakan adalah impedansi. Seperti resistansi, impedansi adalah ukuran kemampuan rangkaian menahan arus listrik.

Impedansi elektrokimia diukur dengan memberikan potensial AC pada sel elektrokimia dan mengukur arus yang melalui sel. Besaran ini biasanya diukur dengan menggunakan sinyal dengan eksitasi kecil.

Sinyal diekspresikan sebagai fungsi waktu adalah

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) \quad (2)$$

Hubungan antara frekuensi radial (radians/detik) dengan frekuensi (hertz) adalah

$$\omega = 2 \pi f \quad (3)$$

Pada sistem linier I_t ketinggalan dengan fase ϕ dan mempunyai I_0

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t - \phi) \quad (4)$$

Impedansi sistem dihitung dengan:

$$Z = \frac{E(t)}{I(t)} = \frac{E_0 \cos(\alpha t)}{I_0 \cos(\alpha t - \phi)} = Z_0 \frac{\cos(\alpha t)}{\cos(\alpha t - \phi)} \quad (5)$$

Dengan menggunakan hubungan Euler $\exp(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi$ (6)

Impedansi bisa diekspresikan sebagai fungsi kompleks. Potensial digambarkan sebagai

$$E(t) = E_0 \exp(j\omega t) \quad (7)$$

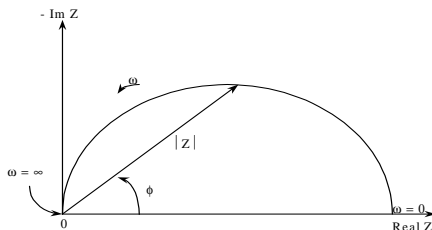
Arus sebagai

$$I(t) = I_0 \exp(j\omega t - j\phi) \quad (8)$$

Sehingga impedansi ditulis sebagai bilangan kompleks

$$Z = \frac{E}{I} = Z_0 \exp(j\phi) = Z_0(\cos \phi + j \sin \phi)$$

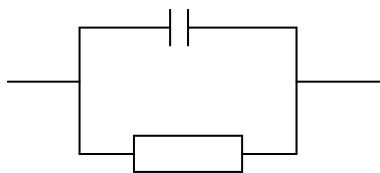
Persamaan (9) merupakan ekspresi $Z(\omega)$ yang terdiri dari bagian riil dan imajiner. Bila bagian riil diplotkan pada sumbu X dan bagian imajiner pada sumbu Y maka kita akan memperoleh sebuah "plot Nyquist". Catatan bahwa pada plot ini sumbu Y adalah negatif dan tiap titik pada plot Nyquist adalah impedansi pada satu frekuensi.



Gambar 1. Plot Nyquist dengan vektor Impedansi (Gamry).

Pada plot Nyquist, impedansi bisa ditunjukkan sebagai vektor panjang $|Z|$. Sudut antara vektor ini dengan sumbu X adalah ϕ dimana $\phi = \arg(Z)$. Plot Nyquist mempunyai satu kekurangan yaitu pada saat anda melihat data pada plot anda tidak bisa mengetahui frekuensi yang digunakan untuk mendapatkan data tersebut.

Plot Nyquist di atas dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 2. Sirkuit ekuivalen sederhana dengan satu konstanta waktu (Gamry).

Data EIS biasanya dianalisa dengan mem-fit-kannya dengan model rangkaian elektronik ekuivalen. Kebanyakan elemen rangkaian pada model adalah elemen listrik seperti

resistor, kapasitor dan induktor. Supaya berguna, elemen pada model harus mempunyai dasar elektrokimia fisik sistem. Sebagai contoh, kebanyakan model mengandung resistor yang menggambarkan resistensi sel model. Beberapa pengetahuan mengenai impedansi dan beberapa rangkaian komponen menjadi sangat penting. Pada tabel dibawah ini memberikan elemen rangkaian yang umum, persamaan arusnya terhadap voltase dan impedansinya.

Tabel 1. Elemen listrik yang umum (Gamry).

Komponen	Arus vs Voltase	Impedansi
Resistor	$E = IR$	$Z = R$
Induktor	$E = L \frac{dI}{dt}$	$Z = j\omega L$
Kapasitor	$I = C \frac{dE}{dt}$	$Z = - \frac{1}{j\omega C}$

Sebuah lapisan ganda listrik yang berada pada *interface* antara elektroda dengan elektrolit di sekitarnya. *Double layer* ini dibentuk dari ion di permukaan elektoda. Arus pada elektroda dipisahkan dari ion-ion ini. Pemisahan sangat kecil, dengan order angstrom. Arus yang dipisahkan oleh insulator membentuk kapasitor. Nilai kapasitansi *double layer* tergantung dari potensial elektroda, temperatur, konsentrasi ion, jenis ion, lapisan oksida, kekasaran elektroda, adsorpsi, impuritas dan lain-lain.

Difusi dapat menimbulkan impedansi yang dikenal dengan impedansi Warburg. Impedansi ini tergantung pada frekuensi pertubasi potensial. Pada frekuensi tinggi impedansi Warburg kecil karena reaktan berdifusi tidak terlalu jauh. Pada frekuensi rendah reaktan berdifusi lebih jauh sehingga meningkatkan impedansi Warburg.

Persamaan untuk impedansi Warburg "tak hingga" adalah:

$$W = w(\omega)^{-1/2}(1 - j) \quad (10)$$

Bentuk impedansi Warburg ini hanya cocok untuk lapisan difusi yang mempunyai tebal tak hingga. Ini bukan kasus yang umum. Bila lapisan difusi dibatasi maka kita tidak akan bisa

menggunakan persamaan di atas, dan kita akan memperoleh bentuk:

$$W = w\omega^{-1/2}(1-j) \tanh\left(\delta\left(\frac{j\omega}{D}\right)^{1/2}\right) \quad (11)$$

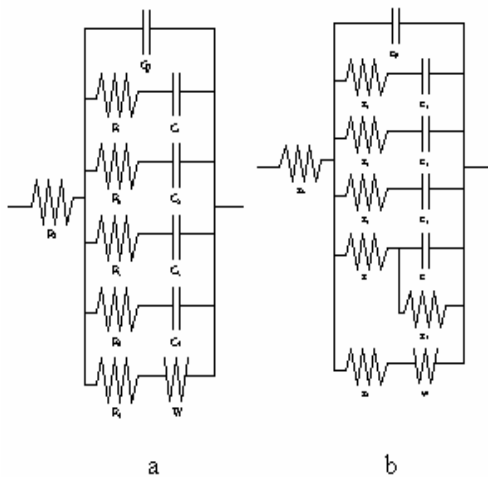
Bentuk persamaan (11) dapat disederhanakan menjadi:

$$W = kw\omega^{-1/2}(1-j) \quad (12)$$

$$\text{Dengan } k = \tanh\left(\delta\left(\frac{j\omega}{D}\right)^{1/2}\right)$$

Metodelogi Penelitian

Dalam penelitian ini mula-mula dibuat model matematis impedansi total dari model-model rangkaian listrik ekuivalen. Model-model adalah sebagai berikut :



Gambar 3. Model rangkaian listrik ekuivalen

a. Model Pararel+W.

b. Model Modified Matsuoka.

Dengan menggunakan Matlab dibuat program komputer untuk menghitung impedansi total dari persamaan yang disusun. Pada program komputer akan dihitung nilai konstanta Warburg (k) dengan menggunakan optimasi. Nilai konstanta diperoleh dengan apabila persen kesalahan bernilai kecil dan mendekati nol.

Setelah pembuatan program selesai maka data-data dari berbagai kondisi lingkungan dan ketebalan lapisan beton dimasukkan dan akan

diperoleh nilai k dari setiap kondisi lingkungan dan ketebalan lapisan beton.

Hasil Dan Pembahasan

Persamaan Matematis Impedansi Total

Persamaan matematis impedansi total dari Model Pararel+W dan Model Modified Matsuoka adalah sebagai berikut:

$$Z_{C_{dl}} = -\frac{1}{\omega C_{dl}i} \quad (13)$$

$$Z_1 = R_1 - \frac{1}{\omega C_1i} \quad (14)$$

$$Z_2 = R_2 - \frac{1}{\omega C_2i} \quad (15)$$

$$Z_3 = R_3 - \frac{1}{\omega C_3i} \quad (16)$$

$$Z_4 = R_4 - \frac{1}{\omega C_4i} \quad (17)$$

$$Z_5 = R_5 + W \quad (18)$$

Persamaan-persamaan di atas digabungkan, maka didapatkan persamaan impedansi total untuk Model Pararel+W:

$$Z_{total} = R_s + \left(\frac{1}{Z_{C_{dl}}} + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5}\right)^{-1} \quad (19)$$

Persamaan impedansi total untuk model modified matsuoka sama dengan model pararel+W. Pada model modified matsuoka persamaan (23) diubah menjadi:

$$Z_4 = R_4 + \left(\frac{1}{R_6} - \omega C_4i\right)^{-1} \quad (20)$$

Dari persamaan-persamaan di atas maka dibuat program komputer untuk menghitung nilai k pada persamaan (11) dengan cara optimasi.

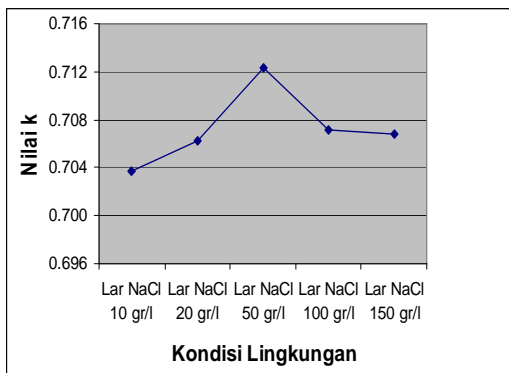
Beton Bertulang dengan Tebal 5 mm

Berdasarkan data eksperimen, maka dapat dihitung nilai k untuk beton dengan tebal 5 mm pada berbagai kondisi lingkungan. Hasil perhitungan nilai k ditunjukkan dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 2. Data nilai k pada berbagai kondisi lingkungan pada beton dengan tebal 5 mm.

Kondisi lingkungan	Nilai k
Larutan NaCl 10 gr/l	0,70368
Larutan NaCl 20 gr/l	0,70618
Larutan NaCl 50 gr/l	0,71227
Larutan NaCl 100 gr/l	0,70711
Larutan NaCl 150 gr/l	0,70679

Dari tabel di atas diketahui bahwa kondisi lingkungan berupa larutan NaCl maka konsentrasi NaCl mempengaruhi nilai k. Hubungan antara konsentrasi NaCl dengan nilai k dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4. Hubungan konsentrasi NaCl dengan Konstanta Warburg pada tebal beton dengan 5 mm.

Dari gambar dapat dilihat bahwa konstanta Warburg, k pada konsentrasi larutan NaCl 10 gr/l adalah paling kecil dan nilai k bertambah besar pada konsentrasi larutan NaCl 20 gr/l. Pada konsentrasi larutan NaCl 50 gr/l nilai k mencapai maksimum dan kemudian pada konsentrasi larutan NaCl 100 gr/l nilai k menurun dan 150 gr/l nilai k menurun tetapi penurunannya tidak terlalu besar.

Nilai k merupakan fungsi dari ketebalan lapisan difusi. Berdasarkan grafik hubungan konsentrasi larutan NaCl dengan nilai k diketahui bahwa mula-mula tebal lapisan difusi adalah tipis kemudian menebal dengan bertambahnya konsentrasi larutan NaCl. Pada konsentrasi NaCl 50 gr/l ketebalan

lapisan difusi adalah maksimum kemudian lapisan difusi menipis kembali dengan bertambahnya konsentrasi NaCl.

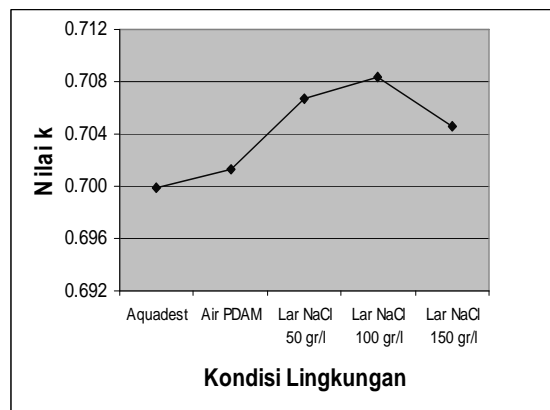
Beton Bertulang dengan tebal 16,85 mm

Berdasarkan data eksperimen, maka dapat dihitung nilai k untuk beton dengan tebal 16,85 mm pada berbagai kondisi lingkungan. Hasil perhitungan ditunjukkan nilai k dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 3. Data nilai k pada berbagai kondisi lingkungan pada beton dengan tebal 16,85 mm.

Kondisi lingkungan	Nilai k
Aquadest	0,69989
Air PDAM	0,70135
Larutan NaCl 50 gr/l	0,70674
Larutan NaCl 100 gr/l	0,70835
Larutan NaCl 150 gr/l	0,70456

Dari tabel di atas diketahui bahwa kondisi lingkungan berupa aquadest, air PDAM dan larutan NaCl. Pada kondisi lingkungan berupa aquadest dan air PDAM kandungan NaCl sangat kecil bahkan tidak ada pada aquadest. Konsentrasi NaCl pada setiap kondisi lingkungan mempengaruhi nilai k. Hubungan antara kondisi lingkungan dengan nilai k dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 5. Hubungan konsentrasi NaCl dengan Konstanta Warburg pada tebal beton dengan 16.85.

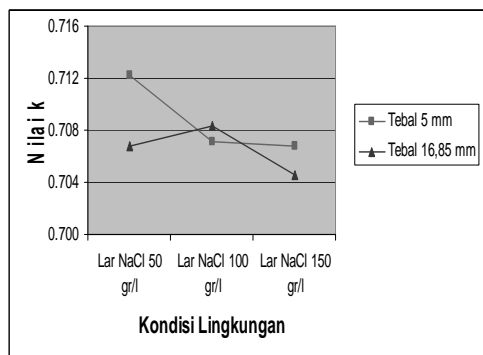
Dari gambar dapat dilihat bahwa nilai k pada aquadest adalah paling kecil

dan nilai k bertambah besar pada PDAM dan konsentrasi larutan NaCl 50 gr/l. Kenaikan nilai k dari aquadest ke PDAM tidak terlalu besar, hal ini disebabkan karena perbedaan konsentrasi NaCl pada aquadest dan PDAM tidak terlalu besar. Pada konsentrasi larutan NaCl 100 gr/l nilai k mencapai maksimum dan kemudian pada konsentrasi larutan NaCl 150 gr/l nilai k menurun.

Nilai k merupakan fungsi dari ketebalan lapisan difusi. Berdasarkan grafik hubungan konsentrasi larutan NaCl dengan nilai k diketahui bahwa mula-mula tebal lapisan difusi adalah tipis kemudian menebal dengan bertambahnya konsentrasi larutan NaCl. Pada konsentrasi NaCl 100 gr/l ketebalan lapisan difusi adalah maksimum kemudian lapisan difusi menipis kembali dengan bertambahnya konsentrasi NaCl.

Perbandingan Nilai k pada Beton dengan tebal 5 mm dan 16,85 mm pada kondisi lingkungan yang sama.

Apabila nilai k beton dengan tebal 5 mm dibandingkan dengan nilai k pada beton dengan tebal 16,85 maka didapatkan hasil bahwa nilai k dipengaruhi oleh tebal beton. Grafik nilai k pada beton dengan tebal 5 mm dan 16,85 pada kondisi lingkungan yang sama dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 6. Perbandingan konstanta warburg pada beton 5mm dan 16,85 mm pada konsentrasi NaCl yang sama.

Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa pada kondisi lingkungan larutan NaCl 50 gr/l beton dengan tebal 5 mm

mempunyai nilai k lebih besar dibandingkan dengan beton dengan tebal 16,85 mm, yaitu 0,71227 dibanding dengan 0,70674. Pada kondisi lingkungan larutan NaCl 100 gr/l beton dengan tebal 5 mm mempunyai nilai k lebih kecil dibandingkan dengan beton dengan tebal 16,85 mm, yaitu 0,70711 dibanding dengan 0.70835. Pada kondisi lingkungan larutan NaCl 150 gr/l beton dengan tebal 5 mm mempunyai nilai k lebih besar dibandingkan dengan beton dengan tebal 16,85 mm, yaitu 0,70679 dibanding dengan 0.70456.

Secara rata-rata maka beton dengan tebal 5 mm mempunyai k lebih tinggi dibandingkan dengan beton dengan tebal 16,85 mm. Hal ini terjadi karena beton dengan tebal 5 mm mempunyai luas permukaan yang lebih kecil daripada beton dengan tebal 16,65 mm. Sehingga jumlah ion yang berdifusi persatuan luas permukaan lebih banyak pada beton dengan tebal 5 mm. Akibat dari hal itu maka tebal rata-rata lapisan difusi pada beton dengan tebal 5 mm lebih besar daripada beton dengan tebal 16,85 mm.

Kesimpulan

1. Kondisi lingkungan dan ketebalan beton mempengaruhi kecepatan korosi beton bertulang yang ditandai oleh perubahan nilai konstanta Warburg, k.
2. Kondisi lingkungan digambarkan oleh konsentrasi NaCl. Mula-mula pada konsentrasi NaCl rendah nilai k kecil. Kemudian dengan bertambahnya konsentrasi NaCl maka nilai k bertambah besar hingga mencapai nilai maksimum. Kemudian nilai k bertambah kecil pada konsentrasi NaCl yang lebih tinggi. Hal ini berarti ada nilai konsentrasi NaCl yang memberikan perlindungan minimum pada korosi baja tulangan beton
3. Secara rata-rata beton dengan tebal 16,85 mempunyai nilai k yang lebih kecil daripada beton dengan tebal 5 mm. Berdasarkan hal itu maka beton dengan tebal 16,85 memberikan perlindungan terhadap

korosi lebih baik daripada beton dengan tebal 5 mm.

Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai kecepatan difusi NaCl dalam beton bertulang untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik terhadap korosi yang disebabkan oleh tingginya konsentrasi NaCl pada suatu kondisi lingkungan.

Daftar Lambang

E	= Potensial Elektroda (volt)
I	= Arus (Ampere)
R	= Resistansi listrik (ohm)
I_0	= Amplitudo
ϕ	= Phase
Z	= Impedansi (ohm)
R_p	= Resistansi polarisasi (ohm)
ω	= Frekuensi radial
D_O	= Koefisien difusi oksidan
D_R	= Koefisien difusi reduktan
A	= Luas penampang elektroda (cm^2)
C^*	= Konsentrasi bulk dari spesies yang berdifusi (mol/cm^3)
δ	= Tebal lapisan difusi Nerst (cm)
D	= Nilai rata-rata koefisien difusi dari spesies terdifusi
L	= Induktor (Henry)
f	= Frekuensi (Hz)
I_{corr}	= Arus korosi (Ampere)
d	= Densitas (gram/cm^3)
C	= Kapasitansi (Farad)
j	= Bagian imajiner pada bilangan kompleks
R_s	= Resistansi larutan (ohm)
$R_1 \dots R_6$	= Resistansi antara larutan dengan bagian beton yang belum terbasahi
C_{dl}	= Kapasitansi yang timbul karena adanya lapisan ganda listrik pada interface antara elektroda dengan elektrolit disekitarnya
$C_1 \dots C_4$	= Kapasitansi karena dua pelat konduktif dipisahkan oleh media non-konduktif yang disebut dielektrik
w	= Koefisien pada impedansi Warburg karena adanya efek difusi pada material
W	= Impedansi Warburg.

Daftar Pustaka

- Albery, John, 1975, *Electrode Kinetics*, Clarendon Press Press, Oxford, pp 18–91
- Bemtur, A., Diamond, S., Berke, N.S., 1997, *Corrosion of Reinforcement in Concrete Structure*, I, E & FN SPON, London
- Bertuci, Ugo, 1996, *A Comparison of Electrochemical Noise and Impedance Spectroscopy for the Detection of Corrosion in Reinforcement Concrete*, *Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Application*, ASTM STP 127, Jeffrey R. Kearns, John R. Scully, Pierre R. Roberge, David L. Reichert, and John L. Dawson, Eds, American Society for Testing and Material, pp 39–58
- Faber, John, Mead, Frank, 1965, *Reinforcement Concrete*, ELBS ed., The English Language Book Society and E & FN SPON Ltd., pp 1–60
- Felui, S., M. Morcillo, Chico, B., 1999, *Effect of Distance from Sea on Atmospheric Corrosion Rate*, *Corrosion – The Journal of Science and Engineering*, Vol. 55, No. 9, September, NACE International – The Corrosion Society, pp 883–891
- Fontana, Mars G., 1986, *Corrosion Engineering*, 3rd ed., McGraw Hill Book Company, pp 372–373, 499–502
- Hanselman, D., Littlefield, B., 1997, *The Student Edition of Matlab*, The Mathwork, Inc. Published by Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey
- Hausmann, D.A., 1998, *A Probability Model of Steel Corrosion in Concrete*, *Material Performance*, Vol. 37, No. 10, October, An Official NACE International Publication, USA, pp 64–68
- John, D.G., Eden, D.A., Langford, P.E., Dawson, J.L., 1987, *Corrosion Measurement on Reinforcement Steel and Monitoring of Concrete Structures*, Symposium of Corrosion of Metal in Concrete,

- Proceeding of the Corrosion / 87 Symposium on Corrosion of Metal in Concrete, National Corrosion of Corrosion Engineering, pp 159–167
- Macdonald, Digby, D., McKubre, M., Urquidi-Macdonald, M., 1987, *Theoretical Assessment of AC Impedance Spectroscopy for Detecting Corrosion of Rebar in Reinforcement Concrete*, Symposium Corrosion of Metal in Concrete, Proceeding of the Corrosion / 87 Symposium on Corrosion of Metal in Concrete, National Corrosion of Corrosion Engineering, pp 30–41
- Mansfield, Florian, Xiao, Hong, 1996, *Electrochemical Noise and Impedance Analysis of Iron in Chloride Medium, Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications*, ASTM STP 127, Jeffrey R. Kearns, John R. Scully, Pierre R. Roberge, David L. Reichert, and John L. Dawson, Eds, American Society for Testing and Material, pp 59–78
- Matsuoka, K., Kurata, T., Kihira, H., Ito, S., 1987, *Monitoring of Corrosion of Reinforcement Bar in Concrete*, Symposium Corrosion of Metal in Concrete, Proceeding of the Corrosion / 87 Symposium on Corrosion of Metal in Concrete, National Corrosion of Corrosion Engineering, pp 42–48
- Purwanto, A., 2002, *Reinforcement steel corrosion and The Use of Cement Aditives for Corrosion Protection*, Master Thesis, Sepuluh November Institute of Technology – Surabaya