

# MODELLING KOROSI BAJA TULANGAN BETON PADA LINGKUNGAN YANG AGRESIF

Agus Purwanto\*

Jurusan Teknik Kimia-Fakultas Teknik  
Universitas Sebelas Maret-Surakarta

**Abstract :** *The measurement of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and the use of model are exercised to probe the undergoing corrosion process on concrete steel rebar under aggressive environment. The ordinary Randles model and original Matsuoka model turn out inadequate in fitting the measured EIS data. The uses of parallel model plus Warburg diffusion fit the data quite well and modifying the Matsuoka model increase the fitting accuracy even more. It can be seen that the corrosion process takes place in cyclical steps. Starting with passive stage, high rates corrosion and followed by passive layer formation. The passive layer then breakdown and the corrosion reaction starting again.*

**Keywords:** *EIS, modelling, concrete, rebar, Warburg, Matsuoka*

## PENDAHULUAN

Komponen konstruksi yang paling lazim digunakan sampai saat ini adalah beton. Keuntungan yang diperoleh dari penggunaan bahan ini sangat banyak antara lain kemudahannya untuk di bentuk, kekuatannya yang baik serta kemudahan bahan-bahan pembentuknya untuk diperoleh. Untuk menambah kekuatannya pada beton ditambahkan besi atau baja yang kemudian disebut sebagai beton bertulang. [4]

Karena lingkungan yang agresif, beton akan mengalami kerusakan. Kerusakan ini berupa retakan kecil sampai pengelupasan lapisan beton yang menempel pada tulangan hingga tulangan menjadi terekspos dengan udara. Kerusakan ini terjadi karena tulangan mengalami korosi dan akan dihasilkan suatu senyawa baru yaitu karat ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Perubahan baja menjadi karat akan menyebabkan pertambahan volumenya tergantung pada kondisi oksidasi besi-nya. Penambahan volume (kurang lebih 600 %) akan menyebabkan ekspansi beton dan keretakan.

Dinamakan lingkungan agresif bila tanah mempunyai kandungan 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 kondisi atmosfer yang mengandung sejumlah besar komponen garam dan sulfur. Kualitas beton yang dipengaruhi adalah ketidakmampuan tulangan untuk menahan beton dan adanya permeabilitas yang tinggi. Kasus ini terjadi pada banyak bangunan di teluk Arab, Amerika Latin dan pinggiran samudra pasifik.

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 fittingkan dengan sebuah model rangkaian elektronika ekuivalen. Fenomena dan kinetika proses terjadinya korosi dijelaskan dengan model ini. Pada saat ini model yang digunakan sebagai pendekatan proses korosi adalah model Randels dan Matsuoka. Dan ternyata dengan menggunakan model tersebut tidak diperoleh fitting yang memuaskan untuk data EIS yang diperoleh dari pengkondisian spesimen beton pada lingkungan klorida. Pada artikel ini akan dipaparkan model yang fit dengan data EIS dan fenomena-fenomena korosi yang mungkin terjadi.

## DASAR TEORI

Pengukuran korosi baja tulangan pada beton bertulang dapat dilakukan dengan beberapa metode. Macdonald, et. al. (1987) melakukan analisis viabilitas AC impedance spectroscopy untuk mendeteksi dan mencari lokasi korosi pada beton bertulang. Pada frekuensi yang sangat rendah komponen real dan imajiner kompleks impedance serta sudut phase bisa digunakan.

Bertuci (1996) melakukan perbandingan pendeteksian korosi baja tulangan dengan menggunakan noise elektrokimia dan *electrochemical impedance spectroscopy*. Hasilnya penggunaan pengukuran noise elektrokimia memberikan hasil yang tidak pasti dan penelitian lebih lanjut diperlukan sebelum metode ini dapat digunakan dengan cukup terpercaya untuk monitoring korosi.

Mansfield, et. al (1996) mengumpulkan data noise potensial dan arus untuk foil besi murni yang di celupkan pada 0.5 N NaCl yang diaerasi, dideaerasi dan dengan penambahan inhibitor  $\text{NaNO}_2$  yang diaerasi. Noise potensial dan arus diperoleh pada permulaan tiap jam selama secara berurutan. Analisa statistik dan spektral dilakukan untuk menghasilkan nilai

resistansi noise. Noise resistansi dengan menggunakan dengan menggunakan standar deviasi potensial dan arus mempunyai nilai yang sama dengan resistansi polarisasi dengan pengukuran spektroskopi impedansi elektrokimia.

Impedansi elektrokimia diukur dengan memberikan potensial AC pada sel elektrokimia dan mengukur arus yang melalui sel. Bila digunakan potensial sinusoidal maka respon dari potensial ini adalah signal arus AC, yang terdiri dari frekwensi dan harmoniknya. Sinyal arus ini dapat dianalisa sebagai sejumlah fungsi sinusoidal (deret fourier). Impedansi elektrokimia biasanya diukur menggunakan signal dengan eksitasi kecil. Ini dilakukan sehingga respon sel adalah pseudo-linier. Pada sistem linier atau pseudo-linier, respon arus untuk potensial sinusoidal adalah sinusoid dengan frekwensi yang sama tetapi beda phase.

Signal diekspresikan sebagai fungsi waktu sebagai

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

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

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

Pada sistem linier  $I_t$  ketinggalan dengan phase  $\phi$  dan mempunyai amplitudo  $I_0$

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t - \phi) \quad (3)$$

Impedansi sistem dihitung dengan :

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

Dengan menggunakan hubungan Euler

$$\text{Exp}(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi \quad (4)$$

Impedansi bisa diekspresikan sebagai fungsi kompleks. Potensial digambarkan sebagai

$$E(t) = E_0 \exp(j\omega t) \quad (5)$$

Arus sebagai

$$I(t) = I_0 \exp(j\omega t - j\phi) \quad (6)$$

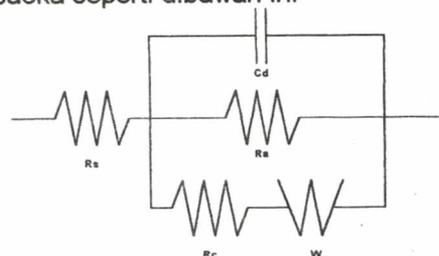
Sehingga Impedansi ditulis sebagai bilangan kompleks

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

Persamaan diatas merupakan ekspresi  $Z(\omega)$  yang terdiri dari bagian real dan imajiner. Bila bagian real diplotkan pada sumbu X dan bagian imajiner pada sumbu Y maka kita akan memperoleh sebuah "plot Nyquist".

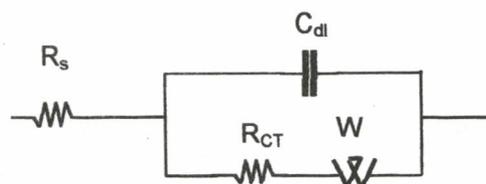
Matsuoka (1987) menggunakan studi impedansi pada korosi baja pada beton, reaksi

korosi dapat dijelaskan dengan sirkuit ekuivalen yang diwakili kombinasi paralel resistansi reaksi anodik dan reaksi katodik yang dikendalikan oleh diffusi. Penggunaan baik AC impedance maupun pengukuran potensial sisa memberikan hasil yang akurat untuk monitoring korosi pada beton bertulang. Model rangkaian ekuivalen yang diusulkan Matsuoka seperti dibawah ini



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen yang diusulkan Matsuoka et. al.

Model rangkaian ekuivalen lain yang digunakan untuk menginterpretasi data EIS adalah model Randels. Model ini terdiri dari  $R_s$  yang diseri dengan C paralel dengan  $R_{ct}$  dan W. Bagan rangkaiannya adalah sebagai berikut :

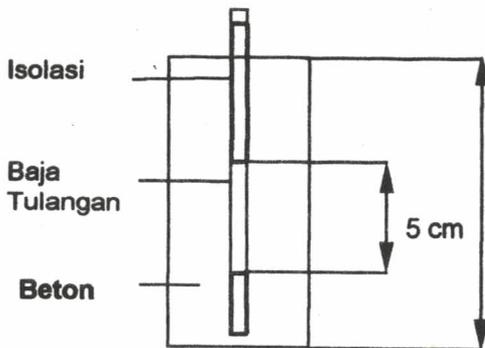
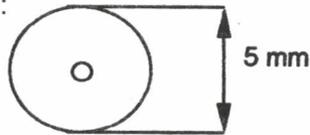


Gambar 2. Rangkaian ekuivalen yang diusulkan Randles.

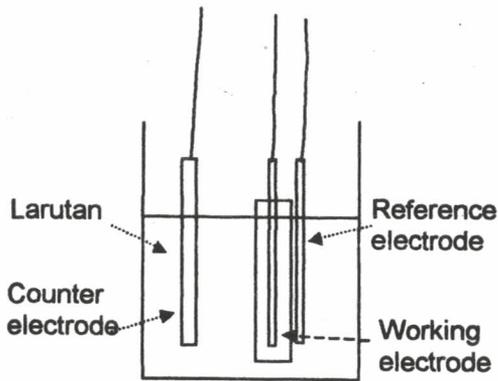
## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan membuat spesimen beton tulangan. Beton dibuat dengan perbandingan semen: pasir: koral = 1:2:3; 1:2:2; 1:2:0 dan 1:4:0. Pengkondisian laboratorium dilakukan dengan mencelupkan spesimen pada larutan garam. Konsentrasi garam yang digunakan 10 gr/lit, 20 gr/lit, 50 gr/lit, 100 gr/lit dan 150 gr/lit. Pencelupan dilakukan secara terus-menerus dan dilakukan dengan menjaga beton selalu tercelup dengan kedalaman yang konstan.

Rangkaian peralatan penelitian adalah sebagai berikut :



a. Konstruksi sample

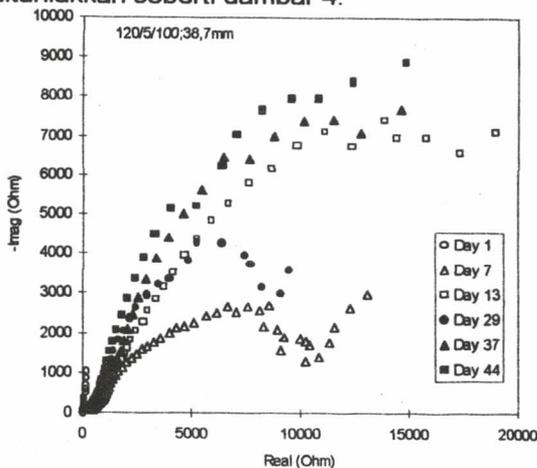


b. Rangkaian Pengukuran

Gambar 3. Bagan pengukuran dengan metode EIS.

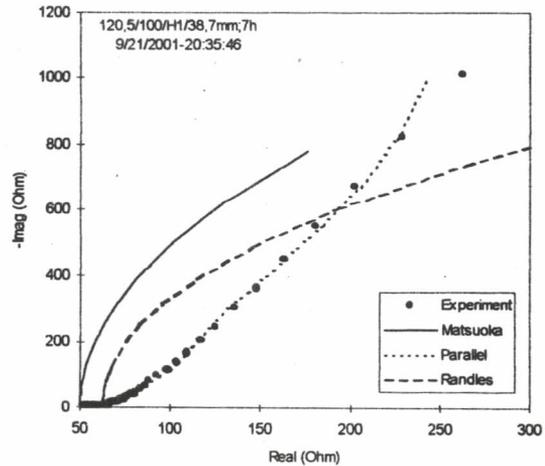
**HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI**

Data pengukuran dengan metode EIS ditunjukkan seperti gambar 4.



Gambar 4. Data EIS sample diukur pada berbagai waktu.

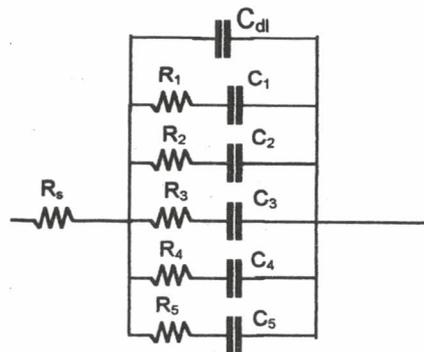
Data diambil untuk spesimen yang tercelup pada 100 gr NaCl/lit dengan diameter beton 38,7mm serta perbandingan semen:pasir = 1:2. Dari data tersebut difit-kan ke model Matsuoka dan Randles seperti ditunjukkan pada gambar 5.



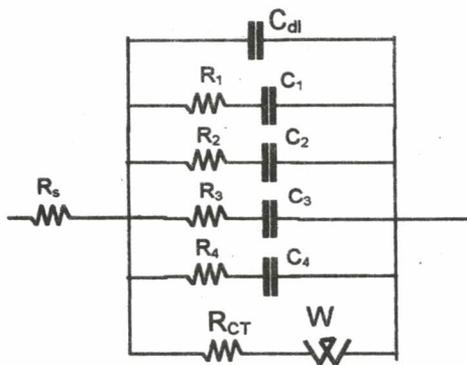
Gambar 5. Fitting model ke data EIS untuk data pada hari pertama pencelupan.

Dari gambar 5 terlihat dengan jelas bahwa model Matsuoka dan model Randles tidak fit dengan data eksperimen.

Model ekuivalen Paralel dan Paralel + W diusulkan untuk mendapatkan fitting yang lebih baik. Model ekuivalen Paralel dan Paralel + W seperti ditunjukkan pada gambar 6.

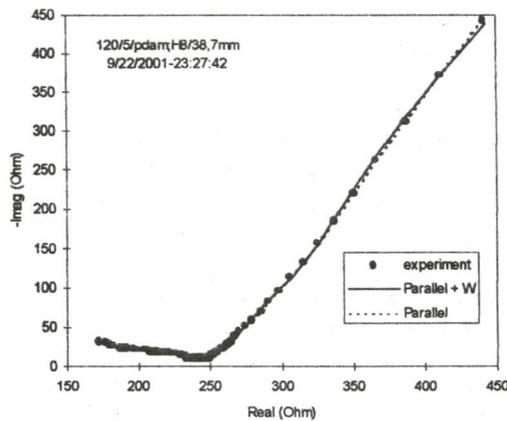


(a) Model Paralel



(b) Model Paralel + W

Gambar 6. Model Paralel dan Paralel + W



Gambar 7. Fitting model Paralel dan Paralel+W dengan data EIS pada hari ke-8 pencelupan

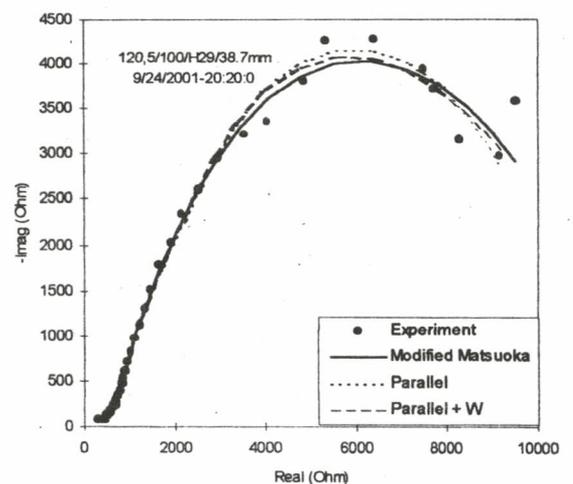
Model Paralel seperti pada gambar 6.a. terdiri dari pasangan seri resistan dan kapasitan yang kemudian diparalel. Sedang pada model paralel+W, penambahan W menunjukkan adanya efek difusi warburg pada proses. Kedua model ini fit dengan baik untuk data-data pada awal pencelupan seperti gambar 7. Nilai parameter fitting ditunjukkan pada tabel 1.

Fabel 1: Nilai parameter fitting untuk pencelupan pada hari ke-8.

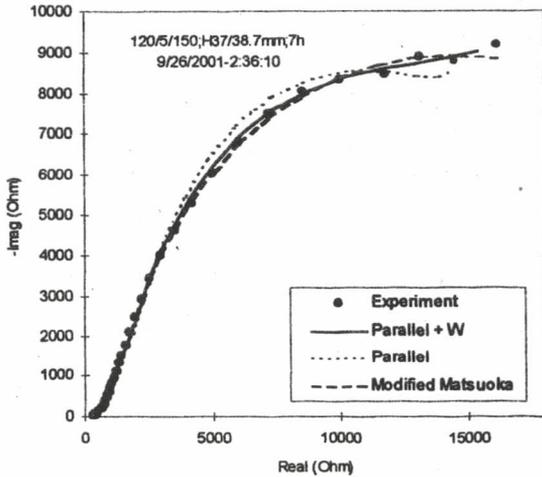
Model Paralel		Model Paralel Plus Warburg	
$R_s, \Omega$	1.377E+02	$R_s, \Omega$	1.069E+02
$R_1, \Omega$	2.422E+02	$R_1, \Omega$	1.155E+03
$C_1, F$	7.560E-04	$C_1, F$	9.383E-06
$R_2, \Omega$	2.986E+02	$R_2, \Omega$	4.133E+02
$C_2, F$	9.150E-05	$C_2, F$	1.733E-04
$R_3, \Omega$	1.847E+02	$R_3, \Omega$	3.657E+02
$C_3, F$	1.097E-07	$C_3, F$	8.510E-04
$R_4, \Omega$	8.084E+02	$R_4, \Omega$	1.241E+03
$C_4, F$	1.531E-03	$C_4, F$	1.680E-03
$R_5, \Omega$	5.267E+02	$R_{CT}, \Omega$	1.267E+02
$C_5, F$	1.139E-06	$W, \Omega$	4.909E+04
$C_{dl}, F$	2.567E-08	$C_{dl}, F$	7.691E-09
SSE	448.35	SSR	50.09

Model tersebut dapat menggambarkan keadaan basah dan kering pada beton. Pada awal pencelupan beton bagian dalam kering dan akan berlaku seperti kapasitor sedang beton bagian luar sudah mulai terisi oleh larutan sehingga akan berlaku seperti resistor. Setelah terjadi pencelupan yang semakin lama, larutan dan klorida semakin mendekati baja tulangan dan proses korosi mulai terjadi. Pada beberapa keadaan, model paralel tidak memenuhi untuk bagian frekuensi rendah. Pada frekuensi rendah impedansi didominasi oleh proses difusi. Untuk mengakomodasi efek ini ditambahkan komponen W (Warburg), sehingga model menjadi Paralel + W.

Gambar 8 menunjukkan fitting model Paralel, Paralel + W dan Matsuoka yang dimodifikasi untuk pencelupan pada hari ke 29 dan ke-37.



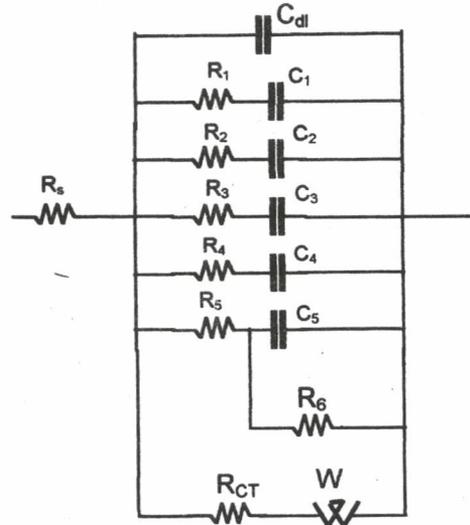
(a)



(b)

Gambar 8. Fitting model Paralel dan model Matsuoka Modified pada data EIS untuk waktu pencelupan hari (a) ke-29 dan (b) ke-37, diameter baja tulangan 5 mm dan diameter beton 37,8 mm.

Model Modified Matsuoka ditunjukkan seperti gambar 9. Model ini pada dasarnya seperti model Matsuoka tetapi diparalel dengan rangkaian R-C. Dengan model Modified Matsuoka, reaksi katodik dan anodik pada elektroda kerja dapat diketahui.



Gambar 9. Model Modified Matsuoka

Parameter fitting untuk spesimen yang dicelupkan pada hari ke-29 seperti ditunjukkan pada tabel 2. Bila dibandingkan sum of square error (SSE) maka model Modified Matsuoka menunjukkan SSE yang terkecil sehingga fitting yang diberikan paling baik. Gambar 8.a. menunjukkan bahwa kondisi pada saat itu adalah aktif. Hal ini ditandai dengan grafik yang melengkung tajam pada frekuensi yang rendah. Selama proses korosi terjadi, film produk yang berupa padatan terbentuk pada permukaan baja tulangan untuk kemudian membentuk lapisan pasif. Pada saat keadaan pasif terjadi, respon EIS seperti ditunjukkan pada gambar 8.b. Gambar 8.b. menunjukkan respon pada frekuensi rendah yang naik dan ini menandakan adanya dominasi proses difusi. Keadaan pasif ini tidak berlangsung lama karena adanya penetrasi chloride yang akan menurunkan pH dan merusak lapisan pasif. Keadaan ini akan berlangsung terus dan berulang-ulang.

Pada penelitian Matsuoka keadaan berulang-ulang dilakukan dengan cara mencelupkan spesimen beberapa saat, kemudian diangkat beberapa saat dan dicelupkan lagi dan begitu seterusnya dilakukan secara berulang-ulang. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa keadaan aktif-pasif juga terjadi pada saat pencelupan spesimen secara terus menerus. Hal ini menunjukkan bahwa keadaan aktif-pasif bukan hanya dipengaruhi oleh proses pembasahan melainkan juga karena terbentuknya lapisan pasif dipermukaan baja. Sehingga lapisan ini akan dapat menahan difusi ion.

Table 2: Parameter fitting pada hari ke-29, diameter baja tulangan 5 mm, diameter beton 38,7 mm

	Parallel model	Parallel plus Warburg model	Modified Matsuoka model
$R_s, \Omega$	2.648E+02	$R_s, \Omega$ 2.632E+02	$R_s, \Omega$ 2.169E+02
$R_1, \Omega$	2.816E+02	$R_1, \Omega$ 8.756E+02	$R_1, \Omega$ 1.298E+03
$C_1, F$	1.793E-07	$C_1, F$ 6.782E-06	$C_1, F$ 1.619E-06
$R_2, \Omega$	9.124E+02	$R_2, \Omega$ 5.060E+02	$R_2, \Omega$ 1.666E+03
$C_2, F$	7.265E-06	$C_2, F$ 1.189E-06	$C_2, F$ 5.598E-06
$R_3, \Omega$	9.816E+03	$R_3, \Omega$ 2.892E+02	$R_3, \Omega$ 1.114E+03
$C_3, F$	8.281E-04	$C_3, F$ 1.587E-07	$C_3, F$ 2.595E-07
$R_4, \Omega$	5.140E+02	$R_4, \Omega$ 5.346E+03	$R_4, \Omega$ 5.742E+03
$C_4, F$	1.333E-06	$C_4, F$ 9.106E-06	$C_4, F$ 1.851E-05
$R_5, \Omega$	6.095E+03	$R_{CT}, \Omega$ 8.715E+03	$R_5, \Omega$ 1.701E+02
$C_5, F$	9.970E-06		$R_{CT}, \Omega$ 6.404E+03
$C_{dl}, F$	2.289E-08	$C_{dl}, F$ 2.208E-08	$C_{dl}, F$ 8.179E-09
		$W, \text{ohm}$ 1.932E+03	$W, \Omega$ 5.290E+04
SSE	4.79E+05	SSR 4.75E+05	SSE 4.65E+05

### KESIMPULAN

1. Dapat dibuktikan bahwa penggunaan model untuk analisa korosi dengan metode EIS dapat memberikan gambaran tentang proses korosi secara lebih baik.
2. Dua model diusulkan untuk digunakan sebagai analisa EIS yaitu model paralel+W dan model Modified Matsuoka.
3. Keadaan aktif-pasif tidak hanya terjadi karena proses pembasahan dan pengeringan seperti yang telah dilakukan Matsuoka tetapi juga dapat terjadi pada pencelupan yang terus menerus.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada BPPS yang telah mendanai riset ini sehingga dapat diselesaikan dengan baik sebagai thesis program Master Jurusan Teknik Kimia ITS. Ucapan terimakasih disampaikan pula kepada bapak Ir. Minta Yuwana, MS yang telah membimbing penelitian ini.

### DAFTAR NOTASI

E	Potensial (volt)
I	Arus (Ampere)
$j$	Bagian Imaginer
$\omega$	Frekuensi (herzt)
t	Waktu (detik)
Z	Impedansi (Ohm)

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Albery, John, *Electrode Kinetics*, Clarendon Press, Oxford, 1975, pp 18-91
- [2] Bentur, A., Diamond, S., Berke, N.S., *Corrosion of Reinforcement in Concrete Structure*, I, E & FN SPON, London, 1997
- [3] Bertuci, Ugo, *A Comparison of Electrochemical Noise and Impedance Spectroscopy for the Detection of Corrosion in Reinforced Concrete*, *Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications*, ASTM STP 127, Jeffery R. Kearns, John R. Scully, Pierre R. Roberge, David L. Reichert, and John L. Dawson, Eds., American Society for Testing and Material, 1996, pp 39-58.
- [4] Faber, John, Mead, Frank, *Reinforcement Concrete*, ELBS ed., The English Language Book Society and E&F.N. Spon LTD., 1965, pp 1-60
- [5] Felui, S., M. Morcillo, Chico, B., *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, 1999, pp 883-891
- [6] Fontana, Mars G., *Corrosion Engineering*, 3-rd ed., McGraw Hill Book Company, pp 372-373, 1986, 499-502.
- [7] Hausmann, D.A., *A Probability Model of Steel Corrosion in Concrete*, *Material Performance*, Vol. 37, No.10, October, An official NACE international Publication, USA, 1998, pp 64-68

- [8] John, D.G., Eden, D.A., Langford, P.E., Dawson, J.L., *Corrosion Measurement on Reinforcing Steel and Monitoring of Concrete Structures*, Corrosion of Metal in Concrete, Proceedings of the Corrosion / 87 Symposium on Corrosion of Metal in Concrete, National Corrosion of Corrosion Engineers, 1987, pp 159-167.
- [9] Macdonald, Digby D., McKubre, M., Urquidí-Macdonald, M., *Theoretical Assessment of AC Impedance Spectroscopy for Detecting Corrosion of Rebar in Reinforced Concrete*, Corrosion of Metal in Concrete, Proceedings of the Corrosion / 87 Symposium on Corrosion of Metal in Concrete, National Corrosion of Corrosion Engineers, 1987, pp 30-41.
- [10] Masfield, Florian, Xiao, Hong, *Electrochemical Noise and Impedance Analysis of Iron in Chloride Media*, Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications, ASTM STP 127, Jeffery R. Kearns, John R. Scully, Pierre R. Roberge, David L. Reichert, and John L. Dawson, Eds., American Society for Testing and Material, 1996, pp 59-78
- [11] Matsuoka, K., Murata, T., Kihira, H., Ito, S., *Monitoring Of Corrosion Of Reinforcing Bar in Concrete*, Corrosion of Metal in Concrete, Proceedings of the Corrosion / 87 Symposium on Corrosion of Metal in Concrete, National Corrosion of Corrosion Engineers, 1987, pp 42-48.
- [12] Purwanto, A., *Reinforced steel corrosion and the use of cement additives for corrosion protection*, Master Thesis, Sepuluh Nopember Institute of Technology-Surabaya, 2002