

KAJIAN MODEL MATSUOKA PADA KOROSI BAJA TULANGAN BETON

Agus Purwanto, Arif Jumari dan Eko Lestiawan
Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik UNS

Abstract: *Modified Matsuoka model had been proven giving satisfactory fitting to EIS (electrochemical impedance spectroscopy) data on steel rebar corrosion. To understand complete phenomenon on steel rebar corrosion, computer simulation was used. The value of model parameter was changed and Nyquist diagrams were developed. Nyquist diagrams were used to understand the corrosion phenomenon because of the changing of model parameter. From the simulation, it found that warburg impedance must be multiply by 0.707 from infinite warburg impedance equation. It means that ion diffusion in concrete is follow to finite warbug impedance. W , R_4 , R_6 and R_s showed significant influence to corrosion rates. C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_{dl} and R_5 parameters did not show significant influence to corrosion rates. Low frequency on EIS measurement showed significant influence to corrosion rate than high ones.*

Keywords: Modified Matsuoka models, EIS, steel rebar corrosion, Nyquist diagram, corrosion rates, Warburg impedance

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 dibentuk, 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. (Faber et.al., 1965)

Karena lingkungan yang agresif, beton akan mengalami kerusakan. Kerusakan ini berupa retakan kecil sampai pengelupasan lapisan beton yang menempel pada tulangan hingga tulangan 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. Lingkungan dikatakan agresif bila tanah mempunyai kandungan klorida dan sulfat yang tinggi, kandungan klorida yang tinggi pada air tanah, serta kondisi atmosfer yang banyak mengandung 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 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. Model Matsuoka yang dimodifikasi memberikan hasil fitting yang paling baik bila dilihat dari SSE-nya.

Penelitian ini bertujuan mendapatkan gambaran yang lengkap tentang proses korosi baja tulangan beton lewat simulasi komputer dan untuk mengetahui pengaruh perubahan R_s , R_1 .. R_6 , C_{dl} , C_1 .. C_4 , dan w pada plot Nyquist impedansi totalnya. Dengan modelling, proses korosi dapat digambarkan dengan jelas sebagai sebuah rangkaian listrik ekuivalen. Penelitian ini bisa digunakan sebagai dasar pemahaman yang lebih baik agar

dapat diperoleh pencegahan korosi baja tulangan yang paling baik.

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 alkaline dari semen portland yang dihidrasi, biasanya mempunyai pH >13. Pasivitas film akan rusak dengan penurunan alkalinitas hingga dibawah pH 11 atau karena keberadaan ion klorida. (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 (*cathodic 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 klorid untuk mencapai baja tulangan. Meskipun demikian penutupan yang terlalu besar akan menyebabkan keretakan mengelupas (*shrinkage cracking*), Aditif beton dan material pengganti semen seperti abu terbang, slag, asap silika dan material lain dapat mengurangi ukuran pori untuk menambah durabilitas. (Daily, 1998) Untuk mengatasi karbonasi bisa dilakukan dengan membuat beton mutu tinggi yang mempunyai pori-pori yang kecil. mengurangi ukuran pori bisa memberikan perlindungan yang baik terhadap karbon dioksida. (Broomfield, 2000).

Macdonald, et. al. (1987) melakukan analisis viabilitas AC impedance spectroscopy untuk mendeteksi korosi pada beton bertulang. Pada frekuensi yang sangat rendah komponen real dan imajiner

kompleks impedance serta sudut phase bisa 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 AC impedance memberikan hasil yang akurat untuk monitoring korosi pada beton bertulang.

Resistansi listrik adalah kemampuan elemen rangkaian untuk menahan aliran arus listrik. Hukum ohm mendefinisikan bahwa resistansi adalah rasio antara voltage dan arus.

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

Walaupun ini sebagai hubungan yang diketahui dengan baik tetapi penggunaannya di batasi pada resistor ideal. Keadaan yang sebenarnya yang terjadi pada elemen rangkaian menunjukkan kelakuan yang lebih kompleks. Parameter rangkaian yang lebih umum digunakan adalah impedansi. Seperti resistansi, impedansi adalah sebuah ukuran kemampuan rangkaian untuk menahan arus listrik. Tidak seperti resistansi, impedansi tidak dibatasi penyederhanaan-penyederhanaan diatas. Impedansi elektrokimia biasanya diukur dengan memberikan potensial AC pada sel elektrokimia dan mengukur arus yang melalui sel. Impedansi elektrokimia biasanya diukur menggunakan signal dengan eksitasi kecil. Signal 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 phase ϕ dan mempunyai amplitudo I_0

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

Dengan menggunakan hubungan Euler

$$\text{Exp}(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi \quad (5)$$

Impedansi bisa diekspresikan sebagai fungsi kompleks. Potensial digambarkan sebagai

$$E(t) = E_0 \exp(j\omega t) \quad (6)$$

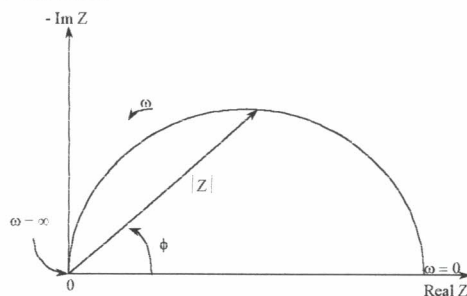
Arus sebagai

$$I(t) = I_0 \exp(j\omega t - j\phi) \quad (7)$$

Sehingga Impedansi tulis sebagai bilangan kompleks

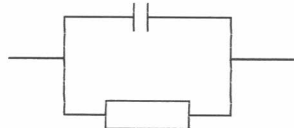
$$Z = \frac{E}{I} = Z_0 \exp(j\phi) = Z_0 (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (8)$$

Persamaan 8 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". Catatan bahwa pada plot ini sumbu Y adalah negatif dan tiap titik pada plot nyquist adalah impedansi pada satu frekwensi.



Gambar 1. Plot Nyquist dengan vektor impedansi. (gamry)

Pada plot Nyquist, impedansi bisa ditunjukkan sebagai vektor panjang $|Z|$. Sudut antara vektor ini dan sumbu X adalah ϕ dimana $\phi = \arg(Z)$. Plot Nyquist diatas adalah untuk rangkaian seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. Sirkuit ekuivalen sederhana

Data EIS biasanya dianalisa dengan mem-fit-kannya dengan model rangkaian listrik 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. Pada tabel dibawah ini memberikan elemen rangkaian yang umum, persamaan

arusnya terhadap voltage dan (7) impedansinya.

Tabel 1. Elemen listrik yang umum (Gamry)

Komponen	Voltage	Impedansi
Resistor	$E = I.R$	$Z = R$
Induktor	$E = L.dI/dt$	$Z = j\omega L$
Kapasitor	$I = C.dE/dt$	$Z = 1/j\omega C$

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

Polarisasi elektroda yaitu pada saat potensial suatu elektroda dipaksa dari potensial open sirkuitnya. Pada saat elektroda dipolarisasi, itu dapat menyebabkan arus mengalir melalui reaksi elektrokimia yang terjadi di permukaan elektroda. Jumlah arus dikendalikan oleh kinetika reaksi dan difusi reaktan menuju dan dari elektroda.

Pada sel dimana elektroda terjadi korosi seragam pada open sirkuit, potensial open sirkuit yang terjadi dikendalikan oleh kesetimbangan antara dua reaksi elektrokimia yang berbeda. Satu reaksi menghasilkan arus katodik dan yang lainnya menghasilkan arus anodik. Potensial open sirkuit berakhir pada saat potensial arus katodik dan anodik sama dan ini disebut mixed potensial. Nilai arus dari kedua reaksi dinamakan arus korosi. Pada saat ada dua reaksi sederhana, secara kinetik dikendalikan oleh reaksi, potesial sel berhubungan dengan arus dengan persamaan Butler-Volmer.

$$I = I_{corr} \left(10^{\frac{2.303(E-E_{OC})}{\beta_a}} - 10^{\frac{-2.303(E-E_{oc})}{\beta_c}} \right) \quad (9)$$

Bila digunakan signal yang kecil sebagai pendekatan maka akan diperoleh :

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c) R_p} \quad (10)$$

I_{corr} bisa dihitung dari R_p dan selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung kecepatan korosi :

$$CR = I_{corr} \frac{KEW}{dA} \quad (11)$$

Diffusi dapat menimbulkan impedansi yang dikenal dengan impedansi Warburg. Impedansi ini tergantung pada frekuensi perturbasi potensial. Pada frekuensi tinggi impedansi Warburg kecil karena reaktan berdiffusi tidak terlalu jauh. Pada frekuensi rendah reaktan berdiffusi lebih jauh sehingga meningkatkan impedansi Warburg. Persamaan untuk impedansi Warburg adalah :

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

Pada persamaan diatas w adalah koefisien warburg yang didefinisikan sebagai :

$$w = \frac{RT}{n^2 F^2 A \sqrt{2}} \left(\frac{1}{C_0 \sqrt{D_0}} + \frac{1}{C_R \sqrt{D_R}} \right) \quad (13)$$

Kapasitor terbentuk pada saat dua pelat konduktif dipisahkan oleh media non-konduktif, yang disebut dengan dielektrik. Nilai kapasitansi tergantung dari ukuran pelat, jarak antar pelat dan properties dielektrika. Dibawah ini adalah model elemen yang umum digunakan untuk menginterpretasikan data EIS.

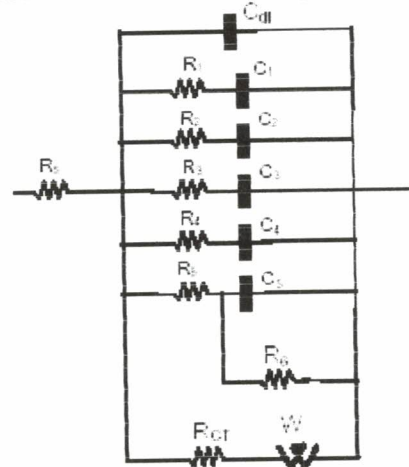
Tabel 2. Model-model rangkaian ekuivalen yang umum.(Gamry)

Elemen Ekuivalen	Impedansi
R	R
C	$1/j\omega C$
L	$j\omega L$
W	$w(\omega)^{-1/2}(1-j)$

KERANGKA PEMIKIRAN

Pada penelitian ini menggunakan variabel $R_s, R_1..R_6, C_{dl}, C_1..C_4$, dan w terhadap plot diagram Nyquist impedansi totalnya. R_s merepresentasikan resistansi larutan, $R_1..R_6$ merepresentasikan resistansi antara larutan dengan bagian beton yang belum terbasahi. C_{dl} adalah kapasitansi yang timbul karena adanya

lapisan dubel listrik pada interface antara elektroda dengan elektrolit sekitarnya. $C_1..C_4$ adalah kapasitansi karena dua pelat konduktif dipisahkan oleh media non-konduktif, yang disebut dengan dielektrik. Sedang w adalah koefisien pada impedansi warburg karena adanya efek diffusi pada material. Model modified matsuoka telah terbukti dapat fit sangat baik dengan data eksperimental dibanding dengan model lain bila dilihat dari SSE-nya. Model tersebut adalah sebagai berikut :



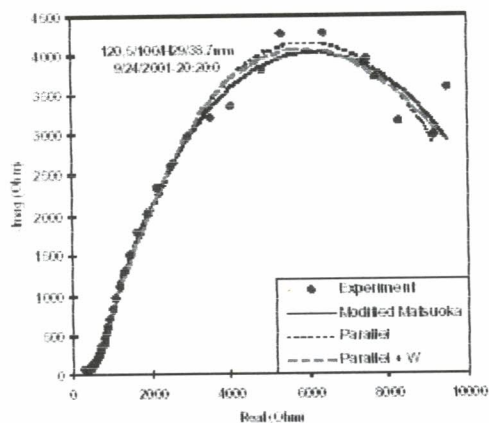
Gambar 3. Model Matsuoka yang dimodifikasi

Dari bagan diatas akan disusun persamaan impedansi total yang akan digunakan untuk menghitung semua parameter yang diubah. Data awal parameter adalah sebagai berikut :

Tabel 3. Nilai parameter yang dijadikan acuan dalam simulasi.

Parameter	Nilai
R_s, Ω	2.169×10^2
R_1, Ω	1.298×10^3
C_1, F	1.619×10^{-6}
R_2, Ω	1.666×10^3
C_2, F	5.598×10^{-6}
R_3, Ω	1.114×10^3
C_3, F	2.595×10^{-7}
R_4, Ω	5.742×10^3
C_4, F	1.851×10^{-5}
R_5, Ω	1.701×10^2
R_6, Ω	6.404×10^3
C_{dl}, F	8.179×10^{-9}
w, Ω	5.290×10^4

Plot dari parameter untuk waktu pencelupan hari ke-29, diameter baja tulangan 5 mm dan diameter beton 37,8 mm tercelup pada larutan NaCl dengan konsentrasi 100 gr/lit diatas pada diagram Nyquist adalah :



Gambar 4. Plot parameter pada diagram Nyquist untuk model Modified Matsuoka.

METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini mula-mula dibuat model matematis impedansi total dari model Modified Matsuoka pada gambar 3. kemudian dibuat program komputernya dengan menggunakan Matlab. Nilai parameter pada tabel 3 dimasukkan ke program komputer tersebut sehingga dapat diperoleh Plot diagram Nyquist. Diagram Nyquist yang diperoleh tersebut difittingkan dengan grafik plot diagram Nyquist pada gambar 4. Apabila diperoleh hasil fitting yang sama maka program dapat digunakan untuk langkah selanjutnya, tetapi bila tidak maka pada persamaan Warburg disimulasikan dengan menambahkan konstanta k. nilai konstanta k dapat diperoleh dengan menggunakan metode optimasi pada Matlab. Setelah konstanta k diperoleh dimasukkan ke program untuk diperoleh diagram Nyquist, lalu dihitung persen kesalahan impedansi totalnya terhadap diagram Nyquist pada gambar 4. Jika persen kesalahannya bernilai kecil mendekati nol maka program dianggap benar dan dapat digunakan. Setelah itu nilai parameter R_s , R_1 , R_6 , C_{dl} , C_1 , C_4 , dan w pada program diubah-

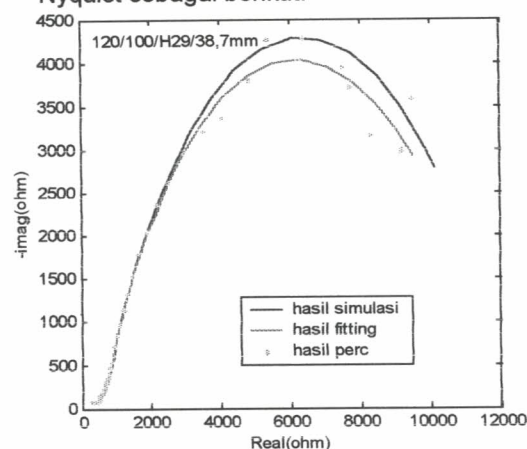
ubah dengan berbagai variasi kenaikan dan penurunan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada gambar dapat diperoleh persamaan matematis impedansi total model sebagai berikut :

$$Z_{total} = R_s + \left(R_1 + \frac{1}{\omega C_1 j}\right)^{-1} + \left(R_2 + \frac{1}{\omega C_2 j}\right)^{-1} + \left(R_3 + \frac{1}{\omega C_3 j}\right)^{-1} + \frac{1}{(R_5 + W)} + (\omega C_{dl} j) + \left(R_4 + \left(\frac{1}{R_6} + \omega C_4 j\right)^{-1}\right)^{-1} \quad (14)$$

Nilai parameter pada tabel 4 dimasukkan ke model matematis impedansi total dan difittingkan dengan data fitting Modified Matsuoka yang dapat sehingga dapat diperoleh plot Nyquist sebagai berikut:



Gambar 5. Hasil simulasi impedansi total

Pada grafik diatas hasil yang diperoleh dari simulasi tidak sama dengan hasil fitting modified matsuoka. Oleh karena itu supaya diperoleh hasil fitting yang sama maka pada impedansi Warburg tak hingga disimulasi dengan menambahkan nilai konstanta k. Nilai konstanta k dapat dicari dengan menggunakan metode optimasi dan diperoleh nilai sebesar 0,707. dengan persen kesalahan untuk nilai impedansi totalnya sebesar 0,0173 %.

Untuk frekuensi dilimitkan mendekati nol maka akan diperoleh impedansi total sebagai berikut:

$$Z_{\text{total}} = R_s + R_{eq} \quad (15)$$

dimana

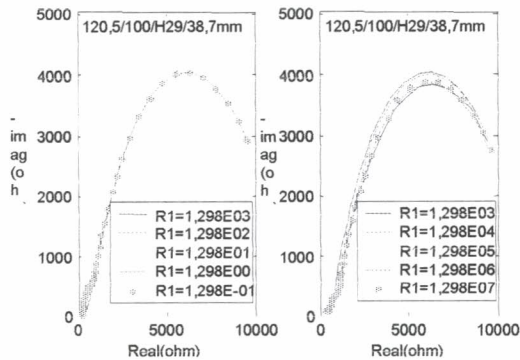
$$1/R_{eq} = 1/(R_4 + R_6) + 1/(R_5 + W) \quad (16)$$

karena R_s adalah resistansi yang terjadi karena konsentrasi larutan, maka resistansi polarisasi (R_p), yaitu :

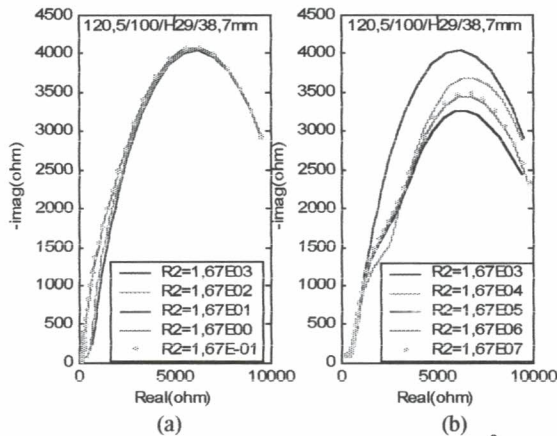
$$R_p = R_{eq} \quad (17)$$

Untuk nilai laju korosi berbanding terbalik terhadap resistansi polarisasi.

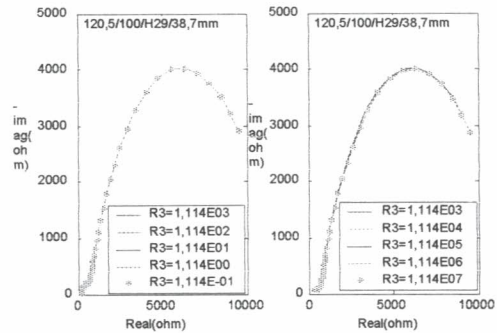
Pengubahan Parameter R_1 , R_2 , dan R_3



Gambar 6. a. untuk variabel $R_1 < 1,298 \times 10^3$
b. untuk variabel $R_1 > 1,298 \times 10^3$



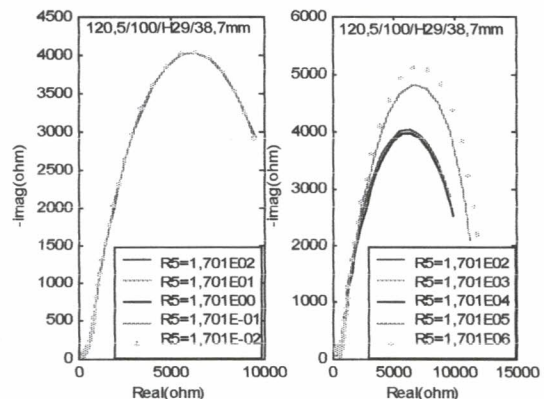
Gambar 7. a. untuk variabel $R_2 < 1,666 \times 10^3$
b. untuk variabel $R_2 > 1,666 \times 10^3$



Gambar 8. a. untuk variabel $R_3 < 1,114 \times 10^3$
b. untuk variabel $R_3 > 1,114 \times 10^3$

Pada grafik diatas untuk hasil pengubahan nilai R_1 , R_2 , dan R_3 dengan harga dibawah dan diatas parameter menunjukkan terjadinya perubahan yang sangat kecil sehingga bisa diabaikan, sehingga perubahan terhadap laju korosinya sangat kecil. Maka untuk resistansi pada pori beton yang terisi oleh larutan yang direpresentasikan dengan R_1 , R_2 , dan R_3 tidak akan berpengaruh terhadap model dengan perubahan nilai parameternya.

Pengubahan Parameter R_5

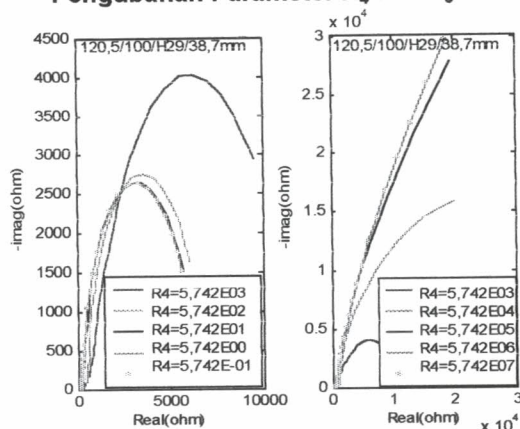


Gambar 9. a. untuk variabel $R_5 < 1,701 \times 10^2$
b. untuk variabel $R_5 > 1,701 \times 10^2$

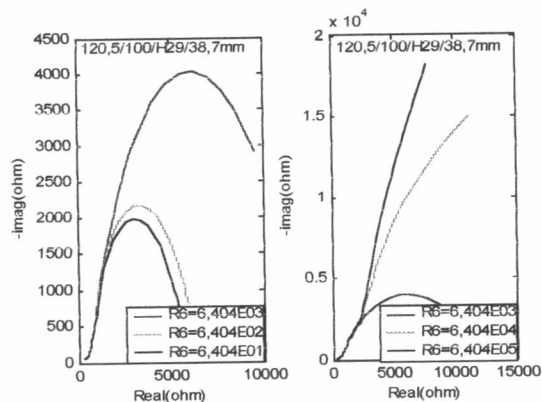
Dari grafik diatas untuk pengubahan R_5 dibawah parameter mengalami perubahan yang sangat kecil sekali pada impedansi totalnya sehingga dapat diabaikan. Sedangkan untuk pengubahan R_5 diatas parameter,

menunjukkan bahwa impedansi totalnya menjadi naik. Kenaikan ini akan semakin tinggi pada frekuensi rendah mendekati nol. Untuk resistansi polarisasi pada frekuensi rendah mendekati nol jika R_5 semakin besar maka resistansi polarisasinya semakin besar dan sebaliknya. Dari hasil pengubahan tersebut untuk resistansi pada pori beton yang terisi oleh larutan yang direpresentasikan oleh R_5 dapat mempengaruhi model jika nilainya diatas parameter yakni akan semakin turun untuk laju korosinya. Sedang untuk nilai R_5 dibawah parameter tidak akan memberi perubahan yang berarti pada laju korosinya. Penurunan resistansi disebabkan oleh ion klorida dalam beton yang meningkatkan konduktivitas. Kecepatan reaksi korosi dikendalikan oleh adanya air dan oksigen di katoda. Reaksi anodik akan membentuk ion hidrogen yang akan menurunkan pH dan menciptakan kondisi yang baik untuk terjadinya korosi dengan merusak.

Pengubahan Parameter R_4 dan R_6



(a) (b)
Gambar 10. a. untuk variabel $R_4 < 5,742 \times 10^3$
b. untuk variabel $R_4 > 5,742 \times 10^3$



(a) (b)
Gambar 11. a. untuk variabel $R_6 < 6,404 \times 10^3$
b. untuk variabel $R_6 > 6,404 \times 10^3$

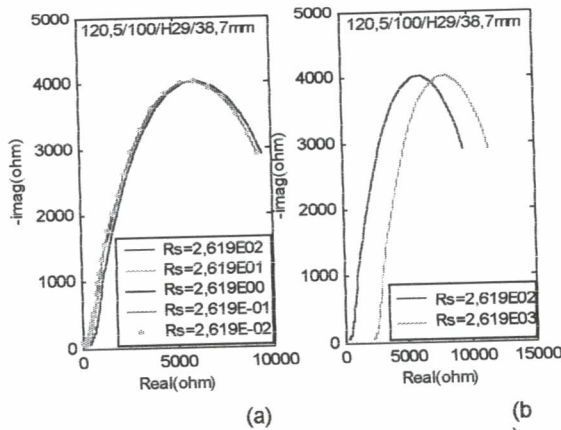
Pada plot grafik diatas, dengan pengubahan nilai R_4 dan R_6 dibawah parameter menunjukkan nilai impedansi total semakin turun pada frekuensi rendah mendekati nol. Sedangkan untuk hasil pengubahan nilai R_4 dan R_6 diatas parameter menunjukkan bahwa nilai impedansi totalnya akan semakin naik pada frekuensi rendah mendekati nol. Pada frekuensi tinggi baik pada nilai dibawah maupun diatas parameter hampir tidak mengalami perubahan.

Untuk resistansi polarisasi pada frekuensi rendah mendekati nol jika pengubahan nilai R_4 dan R_6 semakin besar maka akan menyebabkan resistansi polarisasinya semakin besar dan sebaliknya. Maka untuk resistansi pada pori beton yang terisi oleh larutan yang direpresentasikan oleh R_4 dan R_6 memberikan pengaruh yang cukup berarti terhadap model Modified Matsuoka terutama pada frekuensi rendah mendekati nol. Sehingga untuk pengubahan R_4 dan R_6 bertambah besar maka laju korosinya semakin kecil dan sebaliknya. Sehingga jika semakin banyak larutan mengisi pori-pori beton maka laju korosi yang terjadi pada beton akan semakin kecil, hal ini disebabkan karena terhambatnya arus menuju ke baja tulangan oleh larutan tersebut.

Pada frekuensi rendah mendekati nol, gabungan antara R_4 dan R_6 yang berangkaian paralel memiliki nilai jauh lebih kecil daripada $R_5 + W$. karena rangkaian antara paralel $R_4 + R_6$ dan $R_5 + W$ adalah paralel maka

menunjukkan bahwa paralel $R_4 + R_6$ lebih mengontrol daripada $R_5 + W$. jadi reaksi anodik yang mengontrol kecepatan korosi.

Pengubahan Parameter R_s



Gambar 12. a. untuk variabel $R_s < 2,619 \times 10^{-2}$
b. untuk variabel $R_s > 2,619 \times 10^{-2}$

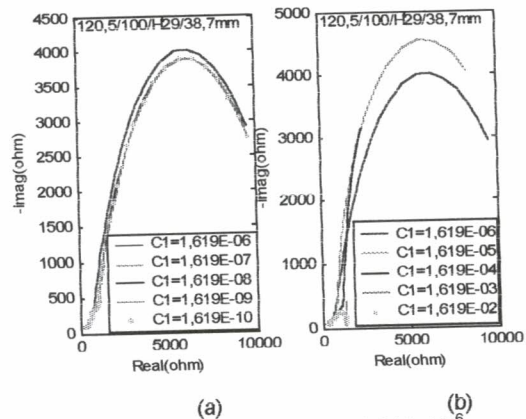
Pada grafik diatas, untuk pengubahan R_s dibawah parameter terjadi penurunan terhadap impedansi totalnya, tetapi penurunannya kecil. Untuk pengubahan R_s diatas parameter terjadi kenaikan yang besar pada impedansi totalnya terutama pada nilai real akan bergeser ke arah naik, sedangkan nilai imajinernya hampir tetap.

Resistansi karena konsentrasi larutan yang direpresentasikan oleh R_s akan sangat berpengaruh terhadap model. Laju korosi akan semakin turun seiring dengan kenaikan nilai R_s . Dan sebaliknya laju korosi akan semakin naik dengan turunnya nilai R_s , tetapi kenaikan tidak terlalu besar.

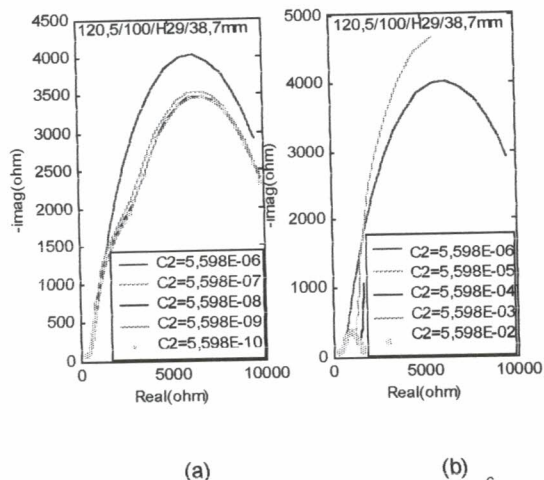
Menurut Matsuoka bertambahnya nilai R_s dapat disebabkan oleh terbentuknya deposit CaCO_3 yang merupakan hasil reaksi antara CO_2 dari udara dan CaOH_2 dalam beton. CaCO_3 ini akan akan menutup sebagian pori terutama bagian atas beton yang berkontak dengan udara. CO_2 masuk ke beton lewat bagian atas yang tidak tercelup larutan NaCl . Adanya CaCO_3 dapat dilihat dengan adanya deposit putih yang terbentuk pada permukaan

bagian atas beton. Dengan tertutupnya sebagian pori ini akan meningkatkan resistivitas beton sehingga meningkatnya nilai R_s .

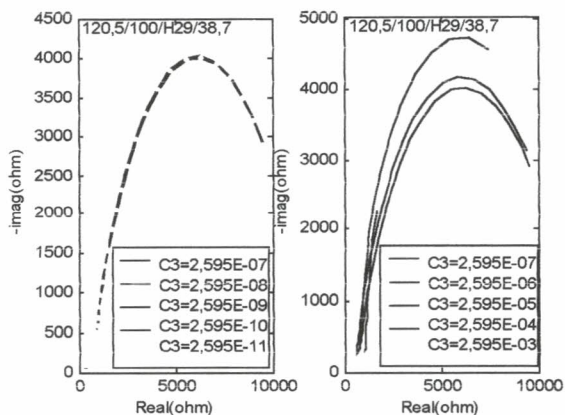
Pengubahan Parameter C_1, C_2, C_3 , dan C_4



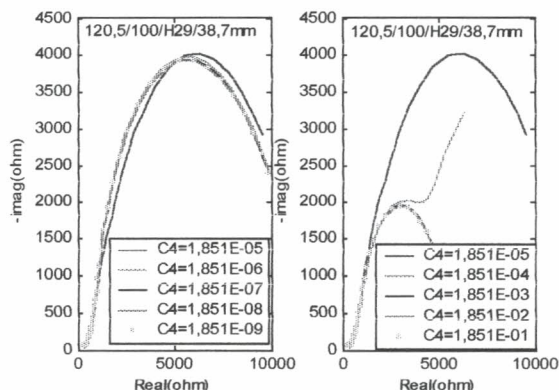
Gambar 13. a. untuk variabel $C_1 < 1,619 \times 10^{-6}$
b. untuk variabel $C_1 > 1,619 \times 10^{-6}$



Gambar 14. a. untuk variabel $C_2 < 5,598 \times 10^{-6}$
b. untuk variabel $C_2 > 5,598 \times 10^{-6}$



(a) (b)
Gambar 15. a. untuk variabel $C_3 < 2,595 \times 10^{-7}$
b. untuk variabel $C_3 > 2,595 \times 10^{-7}$



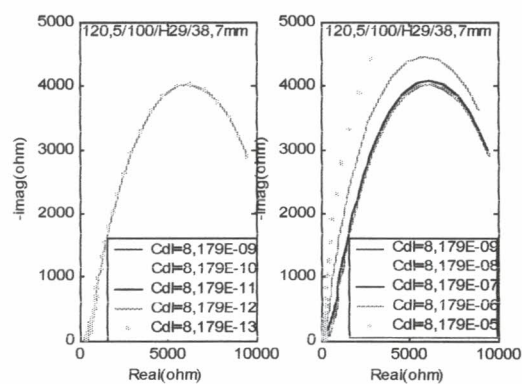
(a) (b)
Gambar 16. a. untuk variabel $C_4 < 1,851 \times 10^{-5}$
b. untuk variabel $C_4 > 1,851 \times 10^{-5}$

Hasil dari pengubahan nilai parameter C_1 , C_2 , C_3 , dan C_4 pada grafik diatas, menunjukkan bahwa dengan pengubahan nilai dibawah parameter akan menyebabkan kenaikan yang sangat kecil pada impedansi totalnya, sehingga perubahannya dapat diabaikan. Sedangkan untuk pengubahan diatas parameter menunjukkan penurunan yang sangat besar, terutama pada frekuensi rendah mendekati nol. C_1 , C_2 , C_3 , dan C_4 pada nilai dibawah parameter tidak akan mempengaruhi laju korosi pada model Modified Matsuoka. Sedang untuk nilai diatas parameter akan sangat berpengaruh sekali pada laju korosinya yakni semakin tinggi.

Besar kecilnya kapasitansi double layer ini dipengaruhi oleh kandungan air

dan lapisan oksida. Kondisi percobaan pada suhu kamar dengan deviasi yang rendah dan konsentrasi ionik pada permukaan elektroda konstan, sehingga tebal lapisan oksida menjadi berpengaruh pada nilai parameter C . semakin tebal lapisan oksida maka akan semakin kecil nilai kapasitansi double layer dan sebaliknya. Sehingga baja tulangan akan sangat korosif lapisan oksida yang sangat tipis. Jika semakin banyak beton mengandung air akan semakin tinggi nilai kapasitansinya.

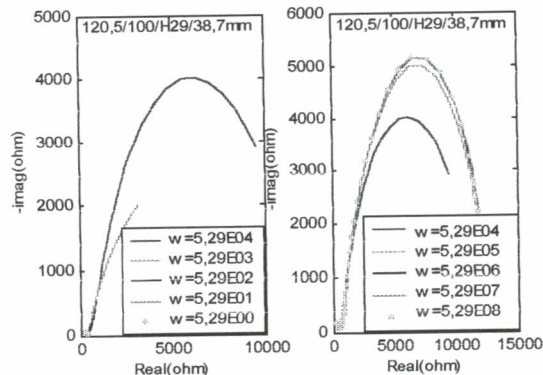
Pengubahan Parameter C_{dl}



(a) (b)
Gambar 17. a. untuk variabel $C_{dl} < 8,179 \times 10^{-9}$
b. untuk variabel $C_{dl} > 8,179 \times 10^{-9}$

Pada grafik diatas menunjukkan bahwa pada nilai C_{dl} dibawah parameter menghasilkan perubahan yang sangat kecil pada impedansi totalnya. Untuk pengubahan nilai C_{dl} diatas parameter akan memberikan penurunan yang sangat besar pada impedansi totalnya, terutama pada frekuensi mendekati nol. Hal tersebut menyebabkan laju korosi akan semakin naik dengan kenaikan C_{dl} , sedangkan untuk penurunan C_{dl} tidak akan berpengaruh pada laju korosinya. Penurunan yang dialami oleh C_{dl} dapat disebabkan oleh semakin kecilnya permitivitas beton yang dikarenakan adanya penebalan hasil korosi. Permitivitas beton mula-mula besar karena adanya kandungan air yang tinggi tetapi setelah produk korosi terbentuk maka permitivitasnya akan semakin kecil.

Pengubahan Parameter w



(a) a. untuk variabel $w < 5,29 \times 10^4$
 (b) b. untuk variabel $w > 5,29 \times 10^4$

Hasil dari pengubahan nilai parameter w pada grafik diatas, menunjukkan bahwa pada pengubahan w dibawah nilai parameter akan menyebabkan terjadinya penurunan yang sangat besar pada impedansi totalnya. Penurunan ini dapat menyebabkan kenaikan yang besar pada laju korosinya. Sedang untuk pengubahan w diatas parameter menunjukkan terjadinya kenaikan pada impedansi totalnya, sehingga laju korosinya akan semakin tinggi dengan naiknya nilai w . Untuk resistansi polarisasi pada frekuensi rendah mendekati nol jika pengubahan nilai w semakin besar maka akan menyebabkan resistansi polarisasinya semakin besar dan Sebaliknya.

Ketebalan selimut beton sangat berpengaruh terhadap impedansi Warburg. Hal ini berhubungan dengan kemampuan ion-ion untuk menembus beton. Semakin tebal beton semakin besar hambatan diffusinya sehingga akan memperlambat proses terjadinya korosi. Ion-ion akan semakin lama mencapai baja tulangan. Pada nilai impedansi Warburg yang tinggi tahanan difusi beton terhadap masuknya ion tinggi pula sehingga ion tidak akan dapat bergerak jauh masuk kedalam beton. Dan ini akan menyebabkan kecepatan korosi baja tulangan menjadi rendah.

KESIMPULAN

1. Permodelan matematis yang diajukan akan sesuai dengan diagram Nyquist pada model Modified Matsuoka apabila ditambahkan konstanta sebesar 0,707 pada Impedansi Warburg.
2. Laju korosi pada model Modified Matsuoka sangat dipengaruhi oleh nilai parameter w , R_4 , R_6 , dan R_5 . Untuk C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_{dl} dan R_5 akan sangat berpengaruh terhadap laju korosi pada model jika nilainya diatas parameter. Sedangkan nilai R_1 , R_2 , dan R_3 tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap laju korosi pada model.
3. Frekuensi rendah mendekati nol lebih mempengaruhi laju korosi pada model bila dibandingkan dengan frekuensi tinggi.

SARAN

Supaya diperoleh beton yang tahan terhadap korosi maka dalam pembuatan beton harus diperhatikan faktor-faktor yang dapat menghambat dan mempercepat laju korosi. Faktor penghambat perlu diperbesar dan sebaliknya faktor pemercepat perlu diperkecil seminimal mungkin.

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_0	= Koefisien difusi oksidan.
D_R	= Koefisien difusi reduktan.
A	= Luas permukaan 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 (Farads)
 j = bagian imajiner pada bilangan kompleks
 R_s = resistansi larutan
 $R_1..R_6$ = resistansi antara larutan dengan bagian beton yang belum terbasahi.
 C_{dl} = kapasitansi yang timbul karena adanya lapisan dobel listrik pada interface antara elektroda dengan elektrolit sekitarnya.
 $C_1..C_4$ = kapasitansi karena dua pelat konduktif dipisahkan oleh media non-konduktif, yang disebut dengan dielektrik
 w = koefisien pada impedansi warburg karena adanya efek difusi pada material.
 W = Impedansi Warburg

DAFTAR PUSTAKA

- Albery, John, 1975, *Electrode Kinetics*, Clarendon Press, Oxford, pp 18-91.
 Bentur, A., Diamond, S., Berke, N.S., 1997, *Corrosion of Reinforcement in Concrete Structure*, I, E & FN SPON, London.
 Faber, John, Mead, Frank, 1965, *Reinforcement Concrete*, ELBS ed., The English Language Book Society and E&F.N. Spon LTD., pp 1-60.
 Fontana, Mars G., 1986, *Corrosion Engineering*, 3-rd ed., McGraw Hill Book Company, pp 372-373, 499-502.
 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.
 Matsuoka, K., Murata, T., Kihira, H., Ito, S., 1987, *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, pp 42-48.
 Purwanto, A., 2002, *Reinforced steel corrosion and the use of cement*

adittives for corrosion protection",
Master Thesis, Sepuluh
 Nopember Institute of
 Technology-Surabaya.
 Hanselman, D. & Littlefield, B., 1997,
The Student Edition Of Matlab,
 The mathworks, Inc. Published by
 Prentice-Hall, Inc, Upper Saddler
 River, New Jersey