

**INVESTIGASI KOROSI BAJA TULANGAN BETON SIRIP
DENGAN PROTEKSI KATODIK ARUS TANDING MENGGUNAKAN
ANODA MMO-Ti MORTAR KONDUKTIF**

**M. Syaiful Anwar*, Arini Nikitasari, Efendi Maburri,
Sundjono dan Harsisto**

Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI
Gedung 470, Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan
E-mail: *moch026@lipi.go.id

Masuk tanggal : 22-09-2014, revisi tanggal : 20-11-2014, diterima untuk diterbitkan tanggal : 28-11-2014

Intisari

INVESTIGASI KOROSI BAJA TULANGAN BETON SIRIP DENGAN PROTEKSI KATODIK ARUS TANDING MENGGUNAKAN ANODA MMO-Ti MORTAR KONDUKTIF. Pada penelitian ini proteksi katodik arus tanding/ arus proteksi dengan menggunakan anoda *mixed metal oxide-titanium* (MMO-Ti) beton konduktif telah dilakukan terhadap baja tulangan beton baru yang terendam di dalam air laut pada variasi arus proteksi. Tujuan penelitian ini adalah untuk investigasi kinerja arus proteksi untuk mengurangi agresifitas lingkungan di sekitar beton bertulang baru dan untuk mengevaluasi beton bertulang baru setelah diaplikasikan arus proteksi. Proteksi katodik ini bervariasi dilakukan pada arus proteksi 100, 150 dan 200 mA/m² dari luas penampang baja tulangan. Standar NACE SP0290 digunakan sebagai kriteria standar proteksi katodik ini. Beberapa pengujian untuk melihat pengaruh arus proteksi pada saat catu daya dihidupkan dan dimatikan terhadap sifat korosi baja tulangan beton adalah *open circuit potential* (OCP) pada saat catu daya dihidupkan selama 3 menit dan kemudian dimatikan selama 4 jam, *tafel polarisasi* untuk mencatat potensial korosi, hambatan polarisasi, laju korosi pada saat awal dan setelah diaplikasikan arus proteksi dan *cyclic polarisasi* untuk mengetahui kerentanan baja tulangan beton terhadap korosi *pitting*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proteksi katodik yang diaplikasikan telah memenuhi kriteria dari standar NACE SP0290. Potensial korosi baja tulangan beton yang ditentukan setelah 4 jam dari arus proteksi dimatikan menghasilkan nilai potensial terendah/paling negatif dan nilai laju korosi lebih rendah dari pada benda uji tanpa arus proteksi (PPC 1) selama 30 hari perendaman dan tanpa terjadinya korosi sumuran (*pitting*).

Kata kunci: Proteksi katodik, Arus proteksi, MMO-Ti, Mortar konduktif, Potensial korosi, Laju korosi, Sumuran, Tafel, Cyclic polarization

Abstract

INVESTIGATION OF CORROSION OF REINFORCED CONCRETE WITH IMPRESS CURRENT CATHODIC PROTECTION USING MMO-Ti CONDUCTIVE MORTAR ANODE. In this study, impressed current cathodic protection using MMO-Ti conductive concrete anode was conducted in the new reinforced bar (rebar) concrete submerged in the seawater on the various protecting current. The aim of this study was to investigate performance of protecting current to reduce aggressive environment in the interface of new rebar concrete and also to evaluate new rebar concrete after application of protecting current. This technique was conducted on the various protecting current of 100, 150 and 200 mA/m² by surface area of rebar. NACE SP0290 was used as standard criteria of cathodic protection. Examinations were carried to observe the influent of protecting current at power supply 'on' and 'off' that was obtained before and after cathodic protection, such as open circuit potential (OCP) at switch 'on' up to 3 minutes and then switch 'off' up to 4 hours, *tafel polarisation* to record corrosion potential, polarisation resistant, corrosion rate at initial and after application of protecting current. Cyclic polarisation test was performed to know susceptibility of pitting corrosion on the rebar concrete. The result showed that this technique have been successfully applied and have been meet standard criteria of NACE SP0290. Their corrosion potential of rebar concrete obtained after 4 hours of switch 'off' lower as well as corrosion rate compared to sample without protecting current (PPC 1) during 30 days submerged in the seawater. Pitting corrosion not found in the all of samples.

Keywords: Cathodic protection, Protecting current, MMO-Ti, Conductive mortar, Corrosion potential, Corrosion current, Pitting, Tafel, Cyclic polarisation

PENDAHULUAN

Korosi pada tulangan beton merupakan penyebab dari kerusakan struktur beton. Penyebab kerusakan tersebut meliputi masuknya garam ke dalam beton dan karbonasi beton. Salah satu kondisi yang rentan sekali terhadap serangan korosi tersebut terjadi pada struktur beton yang terekspos di daerah marine. Korosi merupakan proses elektrokimia dan salah satu teknologi yang telah teruji mampu untuk mengendalikan korosi tersebut adalah proteksi katodik^[1].

Secara prinsip, teknik proteksi katodik ini dapat menurunkan nilai potensial baja tulangan beton ke arah lebih negatif daripada potensial korosinya (E_{COR}), mengurangi perbedaan potensial antara daerah anodik dan katodik sehingga dapat menurunkan laju korosi sampai pada nilai terkecil. Hal ini dapat dicapai dengan cara memberikan arus searah (DC) kepada baja tulangan beton. Proteksi katodik yang memakai Arus DC dari catu daya dinamakan *impressed current cathodic protection* (ICCP) dimana logam yang lebih nobil daripada baja tulangan digunakan sebagai anoda sedangkan arus DC yang diperoleh dari logam yang lebih aktif dari baja tulangan dinamakan anoda korban^[2].

Arus atau elektron yang mengalir menuju baja tulangan akan meningkatkan reaksi katodik dan memindahkan ion klorida yang ada di sekitar baja tulangan. Reaksi katodik ini menghasilkan ion-ion hidroksil yang berasal dari oksigen dan air. Kemudian ion-ion tersebut berpindah melalui selimut beton menuju ke anoda untuk dioksidasi menjadi oksigen dan elektron. Elektron mengalir ke sumber arus dan menutup rangkaian listrik sehingga sirkulasi arus tersebut cenderung meningkatkan reaksi katodik daripada reaksi anodik. Rapat arus yang relatif moderat dapat digunakan untuk mengembalikan kondisi pasifasi baja tulangan beton tersebut^[3].

Proteksi katodik untuk menghambat proses korosi pada struktur beton pertama kali digunakan oleh Stratfull dengan menginstalasi sistem proteksi katodik aspal-kokas di atas dek jembatan *Sly Park* di California^[4]. Kemudian bermunculan berbagai jenis anoda seperti sistem anoda yang diselipkan di dalam bahan konduktif, anoda titanium katalis yang ditanam ke beton konduktif, lapisan polimer konduktif, sistem anoda pita titanium dan anoda semprot termal seng yang digunakan sebagai sistem proteksi katodik pada dek jembatan^[5]. Batang polimer konduktif, pita seng, niobium yang terlapis oleh platina tertanam di dalam pasta konduktif dan batang grafit telah dicoba pada pilar jembatan *Burlington Bay Skyway* oleh penelitian dan pengembangan cabang Departemen Perhubungan dan Komunikasi Ontario selama tahun 1982-1983^[6]. Kessler dan Powers telah menggunakan anoda karet konduktif untuk melindungi tiang pancang beton bertulang di lingkungan kelautan^[7].

Dari sekian anoda yang telah dikembangkan masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Pada penelitian saat ini, sistem anoda yang digunakan terdiri dari mortar konduktif yang mengandung serat karbon sebagai anoda sekunder sedangkan MMO-Ti ditanam di mortar konduktif sebagai anoda primer. Proteksi katodik ICCP yang menggunakan sistem anoda tersebut pada rapat arus yang relatif moderat diaplikasikan pada benda uji beton bertulang yang terendam di air laut yang diambil dari kawasan wisata bahari. Tujuan penelitian ini adalah untuk menyigi kinerja arus proteksi untuk mengurangi agresifitas lingkungan di sekitar beton bertulang baru dan untuk mengevaluasi beton bertulang baru setelah diaplikasikan arus proteksi.

PROSEDUR PERCOBAAN

Preparasi benda uji

Benda uji berupa beton bertulang berbentuk tabung yang memiliki diameter

60 mm dan tinggi 250 mm. Pembuatan beton bertulang dilakukan dengan cara mencampurkan semen PPC (*portland pozzolan cement*), pasir yang berukuran kurang dari 4,76 mm (mesh 4) dan air pada perbandingan masing-masing 1:3:0,8. Komposisi kimia semen PPC ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia semen PPC

Senyawa Oksida	Hasil (%berat)
CaO	59,07
SiO ₂	23,61
Al ₂ O ₃	6,97
Fe ₂ O ₃	3,78
MgO	1,51
SO ₂	1,52
Na ₂ O	0,58
K ₂ O	0,76
LOI	1,72

Baja ulir SNI 07-2052-2002 yang memiliki diameter 19 mm dan panjang 250 mm digunakan sebagai tulangan beton dimana lapisan luar daripada baja ini dibersihkan dengan cara mensikat dengan sikat non-korosif di dalam larutan 500 ml HCl + 3,5 g *hexaminetetramine*. Komposisi kimia baja ulir ditampilkan pada Tabel 2.

Campuran beton yang telah merata tersebut dituang/dicor ke dalam cetakan dengan menempatkan baja tulangan sirip pada tengah-tengah cetakan sedalam 230 mm sehingga luas area yang terekspos oleh beton 140 cm². Setelah 1 hari, cetakan tersebut dibongkar dan dilakukan proses *curing* selama 28 hari di dalam air kapur jenuh. Kemudian proses pelapisan sistem anoda pada beton bertulang dilakukan setelah proses *curing* selesai sehingga didapatkan selimut beton 28 mm.

Tabel 2. Komposisi kimia baja tulangan sirip

Unsur	Hasil (%berat)
C	0,32
Mn	0,52
Si	0,19
S	0,01
Cu	0,2
Ni	0,05
Cr	0,22
Mo	0,009
P	0,006
Fe	Bal.

Sistem anoda yang digunakan pada penelitian ini adalah mortar konduktif sebagai anoda sekunder dan MMO-Ti (*mix metal oxide-titanium*) sebagai anoda primer yang tertanam di dalam mortar konduktif. Mortar konduktif terdiri dari semen, pasir dan air pada perbandingan masing-masing 1:1:0,5 dan serat karbon dengan panjang 6 mm yang berbentuk *chopped* sebanyak 1 vol.%. MMO-Ti memiliki coating MMO dengan tebal 39 – 47 μ m dan komposisi kimianya terdiri dari Ir 0,15; Ta 1,26 dan Ti 98,59 % massa. Beton bertulang yang telah terlapis oleh sistem anoda tersebut kemudian digunakan sebagai benda uji pada penelitian ini.

Pengujian

Sebelum dilakukan pengujian, bagian sisi atas dan bawah benda uji tersebut ditutup dengan resin epoksi. Pengujian dilakukan pada kondisi benda uji direndam di dalam air laut sedalam 50% dari tinggi benda uji selama 30 hari. Sifat fisik dan kimia air laut yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 3.

Pada awal pengujian, benda uji diukur potensial korosi awal (E_{Corr}), hambatan polarisasi awal (R_p) dan laju korosi awal (K_{Corr}). Kemudian benda uji dikenakan proteksi katodik dengan cara mengalirkan arus DC yang berasal dari catu daya sebesar 100, 150 dan 200 mA/m² dari luas area baja tulangan yang terekspos oleh beton selama 30 menit. Benda uji (baja tulangan) dihubungkan pada negatif *port* dan sistem anoda dihubungkan pada positif *port* dan

multimeter Keithley 197A digunakan untuk memonitoring arus yang mengalir ke baja tulangan beton.

Tabel 3. Hasil uji air laut

No.	Parameter	Satuan	Hasil uji
A. Physical			
1.	Total Suspended Solids (TSS)	mg/l	22,0
B. Chemical			
1.	pH	-	7,2
2.	Salinitas	‰	28,5
3.	Chloride (Cl)	mg/l	15070,7
4.	COD	mg/l	404,9
5.	BOD	mg/l	109
6.	Magnesium (Mg)	mg/l	5,3
7.	Sulphate (SO ₄)	mg/l	445
8.	Dissolved Oxygen (DO)	mg/l	12,0
9.	Nitrate (NO ₃ -N)	mg/l	14
10.	Sodium (Na)	mg/l	5,2

Untuk mengetahui proteksi katodik yang dilakukan telah sesuai dengan kriteria standar NACE SP0290^[8] maka arus DC yang dikenakan tadi dimatikan sehingga didapatkan potensial natural selama 4 jam. Jika selisih antara potensial natural (E_{natural}) dan potensial saat arus DC dimatikan ($E_{\text{CP off}}$) sama dengan atau lebih besar daripada 100 mV maka proteksi katodik yang dilakukan pada beton bertulang telah memenuhi kriteria dari standar tersebut. Setelah itu, potensial (E_{Corr}) dan laju korosi (K_{Corr}) diukur setiap hari dalam 30 hari yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari proses proteksi katodik yang telah dilakukan tersebut. Setelah 30 hari pengujian, benda uji dilakukan juga pengukuran *pitting* potensial (E_{pit}) untuk mengetahui kerentanan terhadap korosi *pitting*.

Susunan sirkuit uji elektrokimia sebagai berikut benda uji sebagai elektroda kerja, grafit sebagai elektroda lawan dan SCE (*saturated colomel electrode*) sebagai elektroda referensi. Semua parameter korosi seperti E_{Corr} , R_p dan K_{Corr} didapatkan dengan menggunakan metode *Tafel* pada range potensial dari -200

sampai +200 mV dari OCP (*open circuit potential*) dengan laju pembacaan 1,5 mV/s, E_{natural} dan $E_{\text{CP off}}$ didapatkan dengan cara mencatat potensial dalam fungsi waktu dan E_{pit} didapatkan dengan menggunakan metode *cyclic polarisation*. *Cyclic polarisation* dilakukan pada range potensial antara -200 mV sampai +1500 mV dari OCP pada laju pembacaan maju 5 mV/s dan laju pembacaan mundur 2,5 mV/s. Setelah mencapai nilai potensial +1500 mV, polarisasi mundur dilakukan untuk menemukan potensial *pitting* (E_{pit}) dan potensial repasifikasi. Alat *Gamry Instruments* Seri G750 digunakan untuk mendapatkan semua parameter korosi tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 4 menunjukkan benda uji yang direndam sebagian di air laut yang akan diaplikasikan pada berbagai variasi arus proteksi. Pada tabel tersebut juga menyajikan potensial korosi (E_{corr}) awal, hambatan polarisasi (R_p) awal dan laju korosi (K_{corr}) awal. Potensial korosi awal bervariasi antara -200,3 sampai -321,7 mV (SCE).

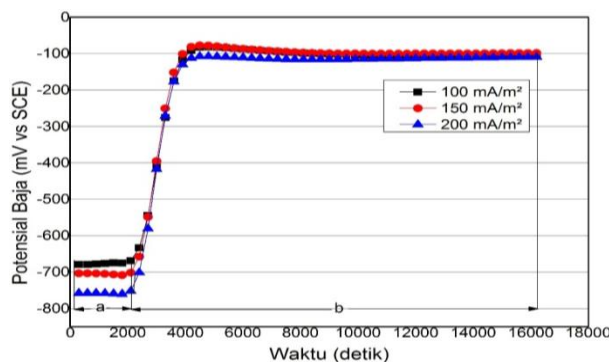
Tabel 4. Potensial korosi awal (E_{Corr}), hambatan polarisasi awal (R_p) dan laju korosi awal (K_{Corr}) untuk benda uji yang direndam sebagian di air laut

Benda Uji	Arus Proteksi (mA/m ²)	E_{corr} (mV vs. SCE)	R_p (Ωm^2)	K_{corr} ($\mu\text{m}/\text{tahun}$)
PPC1	0	-200,3	36827	8,22E-04
PPC2	100	-321,7	45,3	0,67
PPC3	150	-292,1	55,7	0,54
PPC4	200	-295,8	52	0,58

Hambatan polarisasi awal didapatkan dari persamaan *Stern-Geary*, $R_p = B/I_{\text{corr}}$, dimana konstanta *Stern-Geary*, B sama dengan 26 mV untuk logam baja aktif dan arus korosi (I_{corr}) diperoleh dari hasil *tafel* polarisasi. Hambatan polarisasi awal bervariasi antara 52 sampai 36827 Ωm^2 . Laju korosi awal bervariasi antara 8,22E-04 sampai 0,67 $\mu\text{m}/\text{tahun}$.

Semakin tinggi hambatan polarisasi yang dimiliki benda uji maka semakin rendah laju korosinya. Hal tersebut ditemukan pada benda uji PPC 1 yang memiliki nilai hambatan polarisasi paling tinggi sebesar $36827 \Omega m^2$ dan laju korosi paling kecil sebesar $8,22E-04 \mu m/tahun$. Pada benda uji PPC 2 memiliki nilai hambatan polarisasi paling kecil sebesar $45,3 \Omega m^2$ dan laju korosi paling tinggi sebesar $0,67 \mu m/tahun$. Hal tersebut menunjukkan bahwa telah terjadi intrusi klorida yang berasal dari air laut menuju beton bertulang namun sedikit.

Gambar 1 menunjukkan aplikasi dari kriteria 100 mV polarisasi. Ketika baja tulangan beton tidak terproteksi katodik maka dinamakan potensial korosi awal (E_{corr}) yang ditampilkan pada Tabel 4. Ketika proteksi katodik diaplikasikan selama 30 menit pada variasi arus proteksi maka potensial baja tulangan bergeser ke arah katodik atau bergeser ke arah potensial yang lebih negatif dari potensial korosi awal, yang diasumsikan dengan nilai $E_{CP\ on}$ pada Gambar 1(a). Setelah arus proteksi dari catu daya dimatikan, potensial baja tulangan kemudian meningkat secara tiba-tiba yang dinamakan *instant off potential* ($E_{CP\ off}$). Peningkatan tersebut disebabkan karena adanya pengaruh dari resistivitas beton^[9]. Kemudian, peningkatan asimtotik potensial baja tulangan terlihat sampai kondisi stabil yang dinamakan potensial natural ($E_{natural}$) pada Gambar 1(b).



Gambar 1. Aplikasi dari kriteria 100 mV polarisasi dimana Potensial Baja Tulangan saat: (a) $E_{CP\ on}$ selama 30 menit, (b) $E_{CP\ off}$ dan $E_{natural}$ 4 jam pada variasi arus proteksi

Gambar 1 juga menunjukkan bahwa semakin tinggi arus proteksi yang diaplikasikan maka semakin negatif pergeseran potensial baja tulangan beton. Aplikasi arus proteksi 100, 150 dan 200 mA/m^2 didapatkan $E_{CP\ off}$ sebesar -668,9; -701,8 dan -752,3 mV. Tidak seperti kasus baja dalam air laut, potensial baja tulangan dalam beton tidak perlu ditekan sampai lebih rendah dari potensial ‘proteksi’ (-850 mV vs CSE) karena efek yang menguntungkan dari selimut beton seperti alkalinitasnya^[3].

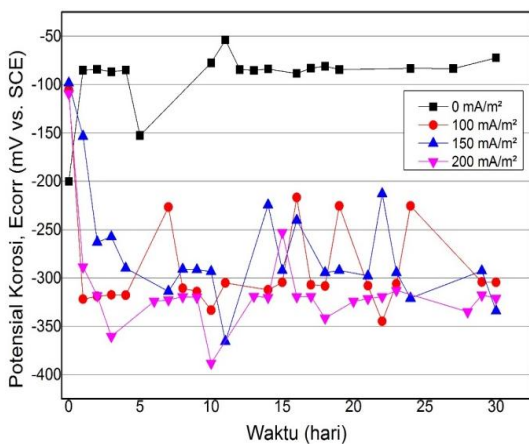
$E_{natural}$ didapatkan selama 4 jam sebesar -105,5; -98,4 dan -109,3 mV. Menurut Bennet dan Turk^[10] dan Pedferri^[11], periode 4 jam dibutuhkan untuk mencapai stabilisasi $E_{natural}$. Selisih antara $E_{natural}$ dan $E_{CP\ off}$ merupakan nilai dari depolarisasi baja tulangan di dalam beton yang ditampilkan pada Tabel 5. Pada Tabel 5 juga menunjukkan bahwa nilai polarisasi semakin tinggi dengan semakin tingginya arus proteksi yang diaplikasikan pada baja tulangan beton. Nilai polarisasi yang didapatkan pada semua benda uji lebih besar dari 100 mV sehingga telah memenuhi kriteria dari NACE SP0290.

Tabel 5. Hasil uji yang dibandingkan dengan kriteria 100 mV polarisasi dari NACE SP0290

Benda Uji	Arus Proteksi (mA/m^2)	$E_{natural}$ 4 jam (mV vs. SCE)	$E_{CP\ off}$ (mV vs. SCE)	Polarisasi (mV)	Kriteria dari NACE
PPC 2	100	-105,5	-668,9	563,4	Ya
PPC 3	150	-98,4	-701,8	603,4	Ya
PPC 4	200	-109,3	-752,3	643	Ya

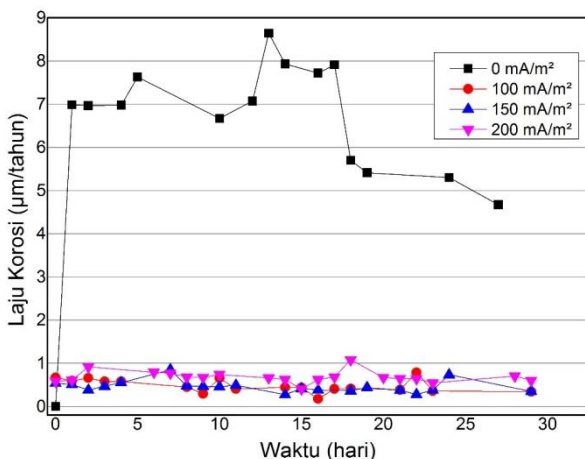
Gambar 2 menampilkan potensial korosi baja tulangan beton yang ditentukan setelah 4 jam dari arus proteksi dimatikan. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa saat 4 jam setelah arus proteksi dimatikan, potensial korosi benda uji tanpa diaplikasikan arus proteksi memiliki nilai lebih negatif (-200 mV vs SCE) daripada potensial korosi benda uji pada variasi arus proteksi. Kemudian pada hari berikutnya sampai hari ke 30, potensial korosi benda uji tanpa arus proteksi memiliki nilai rata-

rata lebih besar dari -100 mV sedangkan benda uji pada variasi arus proteksi memiliki nilai potensial korosi lebih negatif. Nilai potensial terendah/paling negatif sebesar -388,3 mV vs SCE ditemukan pada benda uji PPC 4 pada hari ke 10. Perubahan potensial korosi terhadap waktu, baik nilai pergeseran potensial lebih positif maupun nilai pergeseran potensial lebih negatif pada masing-masing benda uji, tidak dapat didefinisikan sebagai tingkat keparahan proses korosi yang terjadi^[12].



Gambar 2. Potensial korosi baja tulangan beton yang ditentukan 4 jam setelah aplikasi arus proteksi

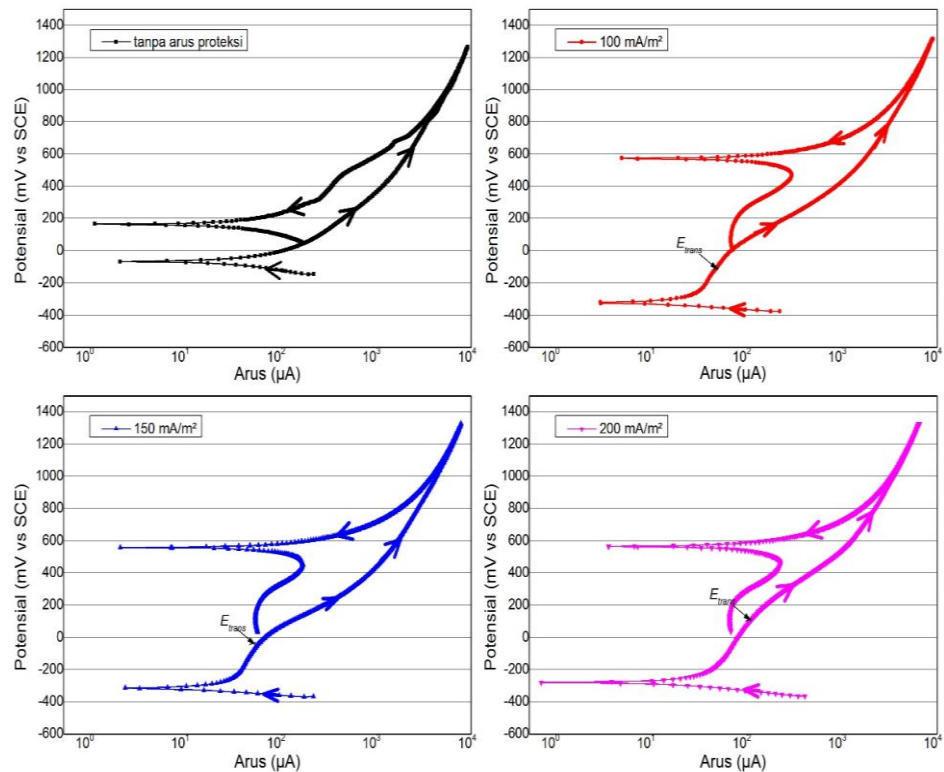
Nilai laju korosi digunakan untuk mengetahui tingkat keparahan proses korosi secara kuantitatif yang ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Laju korosi baja tulangan beton yang ditentukan 4 jam setelah aplikasi arus proteksi

Pada gambar tersebut nilai laju korosi tertinggi ditemukan pada sampel uji PPC 1 tanpa arus proteksi pada hari ke 13 sebesar $8,64 \mu\text{m}/\text{tahun}$ sedangkan nilai laju korosi terendah ditemukan pada sampel uji PPC 2 setelah diaplikasikan arus proteksi $100 \text{ mA}/\text{m}^2$ pada hari ke 16 sebesar $0,18 \mu\text{m}/\text{tahun}$. Gambar tersebut juga menunjukkan bahwa pada saat awal benda uji diekspos di dalam air laut, benda uji PPC 1 tanpa diaplikasikan arus proteksi memiliki nilai laju korosi lebih rendah daripada benda uji yang akan diaplikasikan arus proteksi. Namun, benda uji PPC 2 – PPC 4 yang telah diaplikasikan arus proteksi, pada hari berikutnya menghasilkan nilai laju korosi lebih rendah daripada benda uji tanpa arus proteksi. Hal tersebut mengindikasikan bahwa adanya pengaruh protektif dari aplikasi arus proteksi selama 30 menit dimana arus proteksi tersebut mampu menghambat laju korosi akibat agresifitas air laut yang mengandung parameter fisik dan kimia sesuai Tabel 3. Menurut L. Coppola et al^[13], baja tulangan beton yang terendam di dalam air laut mempunyai nilai resistivitas listrik rendah dan laju korosi pada baja tulangan beton diakibatkan oleh difusi dari oksigen terlarut melalui selimut beton yang basah.

Adanya ion klorida (Cl), sulphate (SO_4) dan nitrate ($\text{NO}_3\text{-N}$) di dalam kandungan air laut (Tabel 3) dapat mengakibatkan kerentanan baja tulangan beton terhadap serangan korosi lokal terutama korosi sumuran (*pitting*)^[14].



Gambar 4. *Cyclic polarisation* baja tulangan beton pada variasi arus proteksi yang diambil setelah hari ke 30

Namun, setelah dilakukan uji *cyclic polarisation* yang disajikan pada Gambar 4, menunjukkan bahwa benda uji tanpa dan setelah aplikasi arus proteksi tidak ditemukan adanya daerah pasif ketika semua benda uji tersebut terendam di dalam air laut. Semua benda uji tersebut juga menunjukkan polarisasi mundur berada diatas polarisasi maju dan tidak menunjukkan adanya potensial pitting ketika arus mencapai lebih dari 7 mA. Pada benda uji yang telah diaplikasikan arus proteksi menunjukkan adanya potensial transpasif (E_{trans}) sebesar -109,8 mV, -66,4 mV dan 145 mV untuk benda uji PPC 2, PPC 3 dan PPC 4. Di atas E_{trans} ini arus dapat meningkat karena pelarutan lapisan pasif tanpa terjadinya korosi sumuran. Hal tersebut mengindikasikan bahwa adanya selimut beton sebesar 28 mm yang dimiliki pada semua benda uji yang terendam di dalam air laut dapat menghambat penetrasi klorida menuju ke baja tulangan beton selama 30 hari perendaman.

Dari hasil penelitian pada proteksi katodik arus tanding pada baja tulangan beton baru menggunakan anoda MMO-Ti beton konduktif dapat disimpulkan bahwa:

1. Aplikasi proteksi katodik arus tanding pada baja tulangan beton pada variasi arus proteksi menghasilkan pergeseran potensial yang lebih negatif daripada potensial korosi alaminya. Semakin tinggi arus proteksi yang diaplikasikan maka semakin negatif pergeseran potensial baja tulangan beton yang diperoleh.
2. Pergeseran potensial menuju ke arah lebih positif daripada potensial korosi awal setelah arus proteksi dimatikan dan dipantau selama 4 jam menjadikan bukti bahwa proteksi katodik tersebut berjalan dengan baik.
3. Nilai polarisasi yang didapatkan pada semua benda uji lebih besar dari 100 mV sehingga telah memenuhi kriteria dari NACE SP0290.

4. Potensial korosi baja tulangan beton yang ditentukan setelah 4 jam dari arus proteksi dimatikan menghasilkan nilai potensial terendah/paling negatif sebesar -388,3 mV vs SCE ditemukan pada benda uji PPC 4 pada hari ke 10.
5. Laju korosi baja tulangan beton yang ditentukan setelah 4 jam dari arus proteksi dimatikan menghasilkan nilai laju korosi lebih rendah daripada nilai laju korosi pada benda uji tanpa arus proteksi selama 30 hari perendaman.
6. Selama 30 hari perendaman, semua benda uji tidak ditemukan adanya korosi *pitting*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dengan tulus mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI yang telah membiayai penelitian ini melalui kegiatan Tematik 2014.

REFERENSI

- [1] Xu, Jing., Wu Yao.2009.,,Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode". *Constr. Build. Mater.* 23 . hal. 220–2226.
- [2] Yehia, Sherif., dan Joshua Host. 2010.,,Conductive Concrete for Cathodic Protection of Bridge Decks". *ACI Materials Journal*, V. 107, No. 6.
- [3] Polder R.B. 2005.,,Electrochemical techniques for corrosion protection and maintenance". Corrosion in reinforced concrete structures, edited by Hans Böhni.Woodhead Publishing Ltd. England.
- [4] R.F. Stratfull.1974.,,Experimental cathodic protection of a bridge deck". *Mater Perform* 1974;13, hal. 24–36.
- [5] WJ, Ellis., Colson Robert E.1980.,,Cathodic protection of concrete bridge structures". Final report NCHRP project, hal. 12–19 September.
- [6] H.C, Schell., Manning D.G.1985.,,Evaluating the performance of cathodic protection systems on reinforced concrete bridge substructures". *Mater Perform* 1985;24:18–25.
- [7] RJ, Kessler., Powers RG.1989.,,Conductive rubber as an impressed current anode". *Mater Perform* 1989;28:24–7.
- [8] NACE SP0290, "Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structure". NACE International, Houston, TX, 2007, 15
- [9] Araujo, A., Z. Panossian, Z. Lourenço.2013.,,Cathodic protection for concrete structures". *Ibracon Structures and Materials Journal*. Volume 6, Number 2 hal. 178-193, ISSN 1983-4195.
- [10] Bennett, J. Turk T.1994.,,Technical alert: criteria for the cathodic protection of reinforced concrete bridge elements". Washington: SHRP. 14p. (SHRP-S-359).
- [11] Pedferri, P.1996.,,Cathodic protection and cathodic prevention". *Construction and Building Materials*, Oxford, v.10, n. 5, hal. 391-402.
- [12] Groysman, A.2010.,,Corrosion for Everybody". Springer Dordrecht Heidelberg London New York. ISBN 978-90-481-3476-2.
- [13] Coppola, L., R. Fratesi, S. Monosi, P. Zaffaroni, and M. Collepari.1996.,,Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Structures Submerged in Seawater". *American Concrete Institute*. Volume 163, hal. 127-150.

- [14] Zapp, Philip E., John W. Van Zee. Electrochemical Studies of Nitrate-Induced Pitting in Carbon Steel. the National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, 5285 Port Royal Road, Springfield, VA. WSRC-MS-98-00865.

