
ANALISIS KOROSI PIPA PENDINGIN SEKUNDER RSG-GAS DENGAN TEKNIK *ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY*

Maman Kartaman Ajiriyanto¹, Rosika Kriswarini¹, Yanlinastuti¹, Diyah Erlina Lestari²

¹ Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan Puspipstek Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314

² Pusat Reaktor Serba Guna – BATAN

Kawasan Puspipstek Serpong Gd.30 Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: makar@batan.go.id

(Naskah diterima: 01-06-2018, Naskah direvisi: 10-06-2018, Naskah disetujui: 30-06-2018)

ABSTRAK

ANALISIS KOROSI PIPA PENDINGIN SEKUNDER RSG-GAS DENGAN TEKNIK *ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY (EIS)*. Reaktor serba guna G.A. Siwabessy menggunakan sistem pendingin sekunder untuk mengambil panas yang dihasilkan dari reaksi fisi uranium dalam reaktor. Material pipa pendingin termasuk jenis baja karbon. Media pendingin sekunder berupa air yang disuplai dari Puspipstek. Upaya untuk memperpanjang umur pakai pipa tersebut maka pada media pendingin air dimasukan senyawa kimia $ZnPO_4$ sebagai inhibitor korosi. Analisis korosi pipa sekunder tersebut dilakukan dengan pengujian korosi dengan metode EIS dan tafel. Pengujian korosi secara elektrokimia tersebut dengan sel tiga elektroda dalam media air, larutan HCl 0,05 M dan larutan NaCl 3%. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan konsentrasi inhibitor yang optimum yang ditambahkan dalam pendingin sekunder dan menentukan mekanis inhibisi serta efisiensi inhibitornya. Pengujian EIS dilakukan dalam rentang frekuensi 100 kHz sampai 0,02 Hz. Hasil pengujian dalam media HCl 0,05 M menunjukkan adanya perubahan parameter listrik seperti Rct, Cdl dan Rs. Hambatan Rct semakin besar dengan meningkatnya konsentrasi inhibitor. Pada konsentrasi inhibitor 90 ppm menghasilkan nilai Rct paling besar yaitu 81,16 ohm. Efisiensi penambahan inhibitor menghasilkan nilai maksimal sebesar 66,46% pada konsentrasi 90 ppm. Inhibitor kerak menjadi lebih efektif jika ditambahkan sedikit inhibitor lumut. Inhibitor campuran yang terdiri dari inhibitor lumut 20 ppm dan kerak 80 ppm dapat menurunkan laju korosi baik dalam media air maupun NaCl 3%. Nilai Rct inhibitor campuran dalam media air mencapai 2082 ohm dengan efisiensi 71% dan dalam larutan NaCl 3% sebesar 1403 ohm dengan efisiensi 75%. Laju korosi pada sampel dalam media NaCl 3% tanpa inhibitor, inhibitor lumut dan inhibitor kerak diperoleh berturut-turut 3,975, 3,576 dan 3,215 mpy. Hasil uji korosi menunjukkan bahwa inhibitor kerak mampu menurunkan laju korosi sedangkan Inhibitor lumut mempunyai fungsi utama bukan menurunkan laju korosi.

Kata kunci: korosi, pipa pendingin sekunder, EIS, inhibitor.

ABSTRACT

CORROSION ANALYSIS OF RSG-GAS SECONDARY COOLING PIPE USING ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY (EIS) TECHNIQUE. Multi-purpose reactor G.A. Siwabessy has a secondary cooling system facility to extract heat generated from uranium fission reactions in the reactor. The cooling pipe material is a type of carbon steel. Secondary cooling media is water supplied from Puspipstek. To extend the lifetime of the pipe, chemical compound $ZnPO_4$ was put on the water cooling media as a corrosion inhibitor. The corrosion analysis of secondary pipe was performed by corrosion testing using EIS and tafel method. The electrochemically corrosion test was performed with three electrode cells in water media, 0.05 M HCl solution and 3% NaCl solution. The aim is to obtain the optimum inhibitor concentration added in the secondary coolant and to determine the inhibition mechanism as well as the inhibitor efficiency. EIS testing was performed in the frequency range 100 kHz to 0.02 Hz in HCl 0,05M. Test results show changes in electrical parameters such as R_{ct} , C_{dl} and R_s . The inhibitor concentration increase then R_{ct} value increase. At inhibitor concentration of 90 ppm obtained the highest R_{ct} value is 81,29 ohm. Efficiency of the inhibitor addition produces maximum value is 66,75% at concentration of 90 ppm. The corrosion rate in samples on medium of 3% NaCl without inhibitor, moss inhibitor and corrosion inhibitor were 3.975, 3.576 and 3.215 mpy respectively. The addition of a mixture of corrosion inhibitors and moss inhibitors can decrease the corrosion rate up to 1.586 mpy quantitatively. The addition of inhibitors using ordinary water may inhibit interface reactions on the surface of the sample as indicated by the higher the inhibitor concentration the higher the R_{ct} value. In NaCl 3% medium also shows the same phenomenon relatively that the corrosion mechanism can be inhibited by increasing of R_{ct} value as well as in this condition, R_s value is constant relatively. The dominant fact that the addition of a corrosion inhibitor could decrease the corrosion rate. The moss inhibitors have a primary function not to decrease the corrosion rate.

Keywords: corrosion, secondary cooling pipe, EIS, inhibitor

PENDAHULUAN

Korosi didefinisikan sebagai degradasi dari material yang diakibatkan oleh reaksi kimia dengan material lainnya dan lingkungan. Dalam bidang metalurgi, proses korosi dapat dipandang sebagai suatu peristiwa atau reaksi senyawa kimia kembali ke bentuk asalnya atau bisa disebut sebagai kebalikan dari proses metalurgi ekstraksi. Peristiwa korosi terjadi akibat adanya reaksi kimia dan elektrokimia. Elemen-elemen utama yang dapat menyebabkan korosi terdiri dari material, lingkungan, kontak metalik, dan elektrolit[1]

Korosi merupakan salah satu permasalahan yang tidak dapat dihindari pada sistem pendingin reaktor nuklir yang memanfaatkan air sebagai media air pendingin untuk perpindahan panas, terlebih lagi untuk system pendingin tipe sirkulasi terbuka. Sistem pendingin sekunder Reaktor Serba Guna-G.A.Siwabessy (RSG-GAS) merupakan sistem pendingin resirkulasi ulang terbuka sehingga sangat mudah sekali komponen pada sistem tersebut berinteraksi dengan oksigen yang ada di lingkungan sekitar atau udara terbuka[2]. Interaksi logam dengan oksigen menyebabkan terjadinya proses oksidasi atau korosi. Pengendalian korosi pada sistem pendingin sekunder reaktor RSG-GAS dilakukan dengan penambahan bahan kimia sebagai inhibitor korosi menggunakan sistem injeksi, yang dioperasikan secara kontinyu selama sistem pendingin sekunder beroperasi. Penambahan bahan inhibitor ini mengakibatkan laju korosi pipa pendingin sekunder RSG-GAS sekitar <3 mpy (*miles per years*)[3]. Bahan dasar inhibitor korosi yang digunakan berupa senyawa kimia sintetis zinc fosfat ($ZnPO_4$)[4]. Penggunaan senyawa sintetis saat ini telah diatur secara ketat karena umumnya senyawa sintetis berbahaya dan tidak ramah terhadap lingkungan yang sebagian besar mengandung logam berat. Inhibitor kerak berfungsi untuk mengurangi korosi dan

kerak. Bahan aktifnya adalah fosfat dalam bentuk kompleks *zinc-phosphate* yang berfungsi untuk menurunkan laju korosi dengan menaikkan polarisasi katodik yaitu dengan mempengaruhi reaksi katodik pada reduksi O_2 dalam medium netral atau basa[5,6]. Ortofosfat menggeser kurva-kurva polarisasi anodik. Selain penambahan inhibitor korosi kerak juga dilakukan penambahan inhibitor antimikroba. Inhibitor antimikroba yang digunakan adalah sodium hipoklorit ($NaClO$) yang berfungsi membunuh mikroorganisme secara langsung. Penambahan inhibitor antimikroba ke dalam sistem pendingin sekunder RSG-GAS menyebabkan kenaikan kandungan klorin pada sistem tersebut[7]. Klorin merupakan oksidator kuat dan zat aktif yang mampu menghilangkan mikroorganisme dalam air melalui reaksi klorinasi. Penambahan inhibitor bertujuan untuk menurunkan laju korosi suatu logam, tetapi apabila penambahannya tidak tepat akan menyebabkan korosi yang semakin parah. Oleh karena itu, dalam rangka mempelajari perilaku korosi yang terjadi, dilakukan pengujian korosi dengan teknik EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*) dan tafel terhadap material pipa sekunder pada media air, HCl 0,05 M dan NaCl 3% dengan penambahan inhibitor. Melalui teknik tersebut khususnya teknik EIS akan dianalisis efisiensi penambahan inhibitor dan juga mengetahui mekanisme inhibisi dari bahan inhibitor tersebut. Mekanisme inhibisi dapat diketahui dari perubahan parameter listrik dari uji EIS yaitu tahanan polarisasi (R_p), tahanan larutan (R_s) dan kapasitas *double layer* (C_{dl})[8].

Penelitian mengenai inhibitor korosi pada pipa pendingin sekunder telah dilakukan oleh beberapa peneliti diantaranya adalah dengan menggunakan teknik perubahan berat dan elektrokimia. Laju korosi pipa pendingin menghasilkan laju korosi paling rendah yaitu 0,13 mpy pada kadar inhibitor anorganik 100 ppm. Pengujian tersebut dilakukan pada media air

yang statis[9]. Penambahan inhibitor anorganik Nalco pada pipa pendingin sekunder menghasilkan laju korosi sangat rendah pada kadar 100 ppm[3,7].

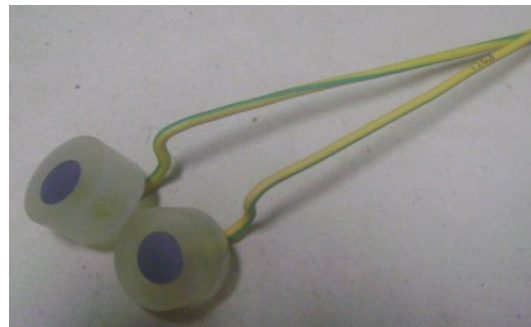
Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan inhibitor korosi kerak dengan konsentrasi yang bervariasi dan inhibitor antimikroba terhadap laju korosi baja karbon sebagai material pendingin sekunder RSG-GAS dalam media air Puspipstek, HCl 0,05 M dan larutan NaCl 3%. Pengukuran laju korosi dengan teknik polarisasi atau analisis tafel sedangkan efisiensi inhibitor diukur dengan uji EIS. Teknik uji korosi EIS ini dapat memberikan informasi secara kualitatif dan kuantitatif mengenai mekanisme inhibisi yang terjadi pada pipa tersebut.

METODOLOGI

Material yang digunakan untuk analisis korosi berasal dari material baja karbon pipa sekunder reaktor RSG-GAS. Material pipa tersebut dipotong dan dibubut menjadi bentuk silinder atau *disk* dengan diameter 10 mm dan ketebalan 5 mm. Sampel uji/spesimen kemudian *dimounting* menggunakan resin epoksi. Bagian permukaan sampel dibiarkan terbuka agar kontak langsung dengan larutan uji. Pada saat *dimounting*, spesimen dihubungkan dengan kawat kabel (tembaga) sebagai penghubung arus. Permukaan spesimen yang terbuka diampelas bertahap dengan kertas amplas SiC dari ukuran *mesh* 500, 800, dan 1200. Setelah itu sampel uji dicuci dengan larutan aseton dan dibilas dalam air demin lalu dikeringkan. Spesimen uji korosi ditunjukkan pada Gambar 1.

Media korosi yang digunakan adalah dari air pendingin sekunder reaktor riset, larutan HCl 0,05 M dan larutan NaCl 3%[10][11]. Inhibitor yang digunakan dalam penelitian ini adalah inhibitor kerak dan lumut. Bahan dasar inhibitor kerak berupa senyawa kimia sintetis zinc fosfat ($ZnPO_4$), inhibitor lumut dari bahan NaClO. Metode EIS pada rentang frekuensi 100 kHz sampai

0,02 Hz. Metode ini digunakan untuk mengetahui mekanisme inhibisi dari inhibitor. Penambahan inhibitor kerak divariasikan dari 0, 50, 60, 70, 80, 90, 100 dan 110 ppm dalam media HCl 0,05 M. Efisiensi inhibitor dihitung dengan persamaan (1)[12].



Gambar 1 . Sampel pipa sekunder untuk uji korosi.

$$\% IE = \frac{R_{ct}(\text{inh}) - R_{ct}}{R_{ct}} \times 100\% \quad (1)$$

Pengujian EIS juga dilakukan dalam media air dan NaCl 3% dengan penambahan campuran inhibitor kerak 80 ppm dan lumut 20 ppm. Penentuan laju korosi secara kuantitatif melalui metode tafel. Uji korosi metode tafel dilakukan pada rentang potensial dari -250 mV sampai +250 mV terhadap open circuit potential (E_{ocp}). Pengujian diawali dengan pengukuran E_{ocp} hingga kondisi stabil sekitar 60 menit[13]. Sel korosi yang digunakan untuk metode EIS maupun tafel terdiri dari tiga elektroda seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian sel korosi

Pengujian lainnya adalah uji komposisi kimia menggunakan *X-ray Fluorescence* (XRF), analisis kadar karbon dengan *C/S analyzer*, dan mikro struktur dengan mikroskop optik. Uji komposisi kimia dan mikrostruktur diperlukan untuk mengetahui jenis atau spesifikasi pipa baja yang digunakan dan karakteristik mikrostrukturnya yang dapat mempengaruhi laju korosi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis komposisi kimia menggunakan XRF dan *C/S analyzer* diperoleh unsur penyusun dari material baja karbon untuk pipa sekunder reaktor RSG-GAS seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia material pipa pendingin sekunder RSG-GAS.

Unsur	Konsentrasi (%)
C	0,230
Si	0,170
P	0,008
S	0,004
Cr	0,012
Mn	0,337

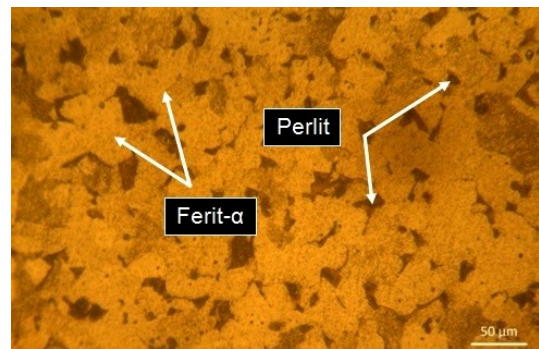
Material pipa sekunder RSG-GAS memiliki kadar karbon sekitar 0,23% dan jumlah kandungan unsur yang lain <2% sehingga material tersebut dapat dikategorikan sebagai baja karbon rendah (kadar karbon <0,25%). Analisis mikrostruktur sampel pipa pendingin sekunder menggunakan mikroskop optik ditunjukkan pada Gambar 3. Mikrostruktur yang dihasilkan berupa struktur butir dengan matrik ferit- α (butir lebih terang)[14][15] yang dietsa menggunakan larutan pikral. Pada Gambar 3 terlihat bahwa struktur butir material pipa tersebut adalah equiakial dan homogen.

Berdasarkan diagram fasa, sampel uji dengan kadar karbon sekitar 0,23% akan menghasilkan fasa ferit- α dan sementit

(Fe₃C)[15]. Fraksi berat fasa ferit secara skematik diperoleh sekitar 96,8% dan sementit 3,1%. Perhitungan fraksi berat fasa-fasa tersebut berdasarkan kaidah *lever rule*[15].



(a)



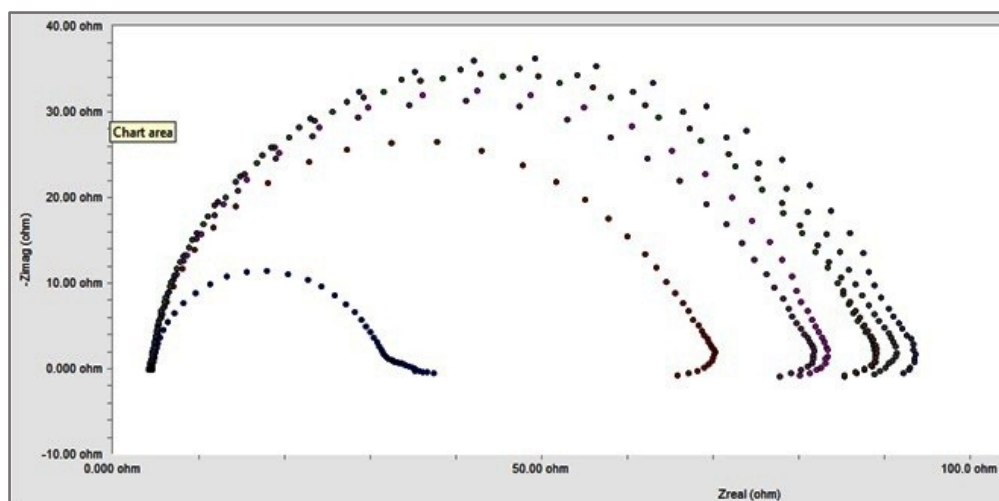
(b)

Gambar 3. Hasil pemeriksaan mikrostruktur sampel pipa pendingin sekunder RSG-GAS

(a). Perbesaran 100 kali

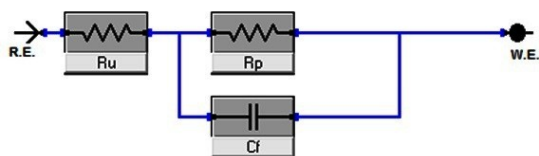
(b). Perbesaran 150 kali

Perilaku korosi sampel pipa pendingin sekunder dianalisis berdasarkan hasil pengujian EIS dan tafel[16][17]. Pengujian EIS pada rentang frekuensi 100 kHz – 0,02 Hz ditunjukkan pada Gambar 4. Gambar 4 memperlihatkan kurva *Nyquist* sampel uji dalam larutan HCl 0,05 M tanpa dan dengan inhibitor pada konsentrasi 0–110 ppm.



Gambar 4. Kurva Nyquist baja karbon dengan penambahan inhibitor kerak 0 – 110 ppm.

Hasil pengujian EIS tersebut ditampilkan dalam alunan *Nyquist* berupa diagram berbentuk setengah lingkaran yang merupakan plot impedansi nyata (*real*) terhadap impedansi imajiner (*imaginer*). Parameter listrik yang dihasilkan yaitu $R_{ct}(R_p)$, $R_s(R_u)$ dan $C_{dl}(C_f)$ diperoleh berdasarkan *fitting* data dengan rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 5. Besaran R_s adalah tahanan larutan yang tergantung dari konsentrasi ion, jenis ion dan geometri area penghantar arus. R_{ct} adalah tahanan transfer muatan yang dibentuk oleh reaksi elektrokimia tunggal pada permukaan logam yang dikendalikan secara kinetika.



Gambar 5. Rangkaian listrik ekuivalen[12]

Secara umum penambahan inhibitor akan menaikkan tahanan transfer muatan atau R_{ct} . Hal ini menunjukkan bahwa penambahan inhibitor menghambat transfer muatan atau elektron dari permukaan logam ke media larutan sehingga reaksi oksidasi atom-atom besi dan reduksi ion dalam larutan menurun. Secara detail parameter elektrokimia atau listrik berupa R_{ct} , R_s dan C_{dl} ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter elektrokimia sampel baja karbon dalam media HCl 0,05 M dengan variasi konsentrasi inhibitor kerak

Kons. Inh. (ppm)	R_s (ohm)	R_{ct} (ohm)	C_f (μF)	Efisiensi (%)
blanko	4,653	27,22	88,78	-
50	4,498	61,38	123,1	55,65
60	4,488	72,20	104,8	62,30
70	4,456	78,94	136,4	65,52
80	4,450	79,29	148,4	65,67
90	4,473	81,16	159,3	66,46
100	4,433	74,18	183,5	63,31
110	4,396	83,26	188,7	67,31

Penambahan konsentrasi inhibitor dari 50–110 ppm menaikkan nilai R_{ct} . Nilai R_{ct} naik hingga mencapai maksimum pada konsentrasi 90 ppm dan terjadi ketidak stabilan pada konsentrasi diatas 90 ppm. Pada konsentrasi inhibitor 90 ppm mencapai nilai R_{ct} sebesar 81,16 ohm. Sementara untuk nilai R_s relatif tidak berubah yaitu sekitar 4,48 ohm. Hal ini dapat dijelaskan bahwa larutan dengan konsentrasi inhibitor yang berbeda tidak mempengaruhi tahanan larutannya (R_s). Perubahan hambatan hanya terjadi pada permukaan sampel yang ditunjukkan adanya kenaikan nilai R_{ct} . Transfer muatan dari permukaan logam ke dalam larutan dihambat dan berakibat pada

reaksi oksidasi dan reduksi yang menurun. Nilai R_{ct} pada media sebelum ditambah inhibitor (blanko) lebih kecil dibandingkan dengan media setelah ditambah inhibitor. Semakin tinggi konsentrasi inhibitor dari 50 ppm sampai dengan 90 ppm maka nilai R_{ct} semakin besar sebanding dengan nilai efisiensi inhibitor. Efisiensi inhibitor mencapai nilai 66,46% pada konsentrasi 90 ppm dan sedikit turun pada konsentrasi 100 ppm. Kenaikan efisiensi inhibitor menunjukkan bahwa telah terjadi proses pelapisan permukaan sampel oleh inhibitor sebagai penghambat terjadinya korosi sampai konsentrasi optimum 90 ppm [18,19]. Meningkatnya nilai R_{ct} menunjukkan adanya lapisan protektif pada permukaan logam [20]. Pada konsentrasi inhibitor diatas 90 ppm, lapisan protektif tersebut bertambah tebal dan diduga pecah yang ditunjukkan dengan penurunan nilai tahanan R_{ct} .

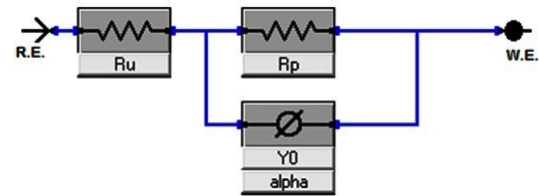
Hasil analisis kurva *Nyquist* untuk inhibitor (campuran inhibitor kerak 80 ppm dan inhibitor lumut 20 ppm) dalam media air dan NaCl 3% ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter elektrokimia dalam media air dan NaCl 3% dengan inhibitor campuran.

Media	$R_s(R_u)$	$R_{ct}(R_p)$	Y_0
Air	273,2	592,3	1,618E-3
Air + inhibitor	257,7	2082,0	7,424E-3
NaCl 3%	0,452	348,1	2,295E-3
NaCl 3% + inhibitor	0,504	1403,0	6,035E-3

Parameter listrik yang dihasilkan dengan media air dan NaCl 3% yaitu R_{ct} , R_s dan Y_0 diperoleh berdasarkan *fitting* data dengan rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 6. Larutan NaCl 3% memiliki konduktivitas tinggi yang dicirikan dengan nilai hambatan larutan sangat rendah (<1 ohm). Larutan dengan konduktivitas tinggi sangat sesuai untuk analisis korosi dengan teknik tafel ataupun EIS. Hambatan

larutan R_s dalam media air dan penambahan inhibitor campuran mempunyai nilai sama.

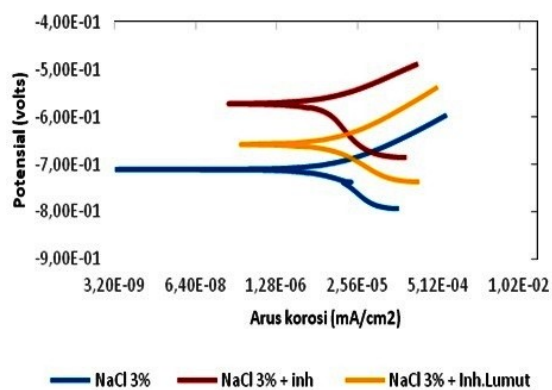


Gambar 6. Rangkaian listrik ekuivalen

Nilai R_s pada median air sebelum ditambah inhibitor dan setelah ditambah inhibitor relative sama yaitu 273 ohm dan 257 ohm. Nilai R_s dalam larutan NaCl 3% tanpa inhibitor dan dengan inhibitor campuran juga menunjukkan nilai yang sama yaitu sebesar 0,45 ohm (tanpa inhibitor) dan 0,50 ohm (inhibitor campuran) [21]. Penambahan inhibitor campuran tidak mempengaruhi konduktivitas larutan. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan inhibitor tidak mempengaruhi konduktivitas larutan.

Nilai R_{ct} (Tabel 3) menunjukkan kenaikan sangat signifikan ketika dalam larutan ditambahkan inhibitor campuran. Penambahan inhibitor campuran dalam media air merubah hambatan antar muka atau R_{ct} dari 592,3 ohm menjadi 2082 ohm, sedangkan dalam media NaCl 3% kenaikan hambatan R_{ct} dari 348,1 ohm menjadi 1403 ohm. Kenaikan nilai R_{ct} disebabkan inhibitor korosi yang ditambahkan menempel dan melapisi permukaan logam. Pada permukaan logam akan terjadi lapisan pasif yang menghambat transfer muatan dari larutan ke sampel dan sebaliknya. Efisiensi penambahan inhibitor campuran dalam media air sebesar 71% sedangkan dalam media NaCl 3% sebesar 75%. Penambahan inhibitor campuran (inh. lumut 20 ppm dan inh. kerak 80 ppm) sangat efektif untuk menghambat laju korosi melalui mekanisme penghambat transfer muatan pada permukaan logam dan tidak mempengaruhi konduktivitas larutan.

Hasil pengujian korosi metode tafel ditunjukkan pada Gambar 7. Metode tafel digunakan untuk menentukan laju korosi secara kuantitatif suatu logam dalam media yang konduktif. Parameter elektrokimia yang diperoleh dari pengukuran polarisasi atau tafel adalah E_{corr} , R_p , β_a dan β_c . Parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung arus korosi (I_{corr}) yang berbanding lurus dengan laju korosinya.



Gambar 7. Pengujian korosi metode tafel dalam media NaCl 3%.

Pengujian dilakukan pada rentang potensial dari -250 mv sampai +250 mv terhadap E_{ocp} . Pada rentang potensial tersebut akan terjadi reaksi reduksi dan oksidasi. Reaksi reduksi berlangsung dari potensial -250 mv sampai potensial korosi E_{corr}/E_{ocp} . Setelah melewati potensial korosi maka akan terjadi reaksi oksidasi hingga potensial 250 mV vs E_{ocp} . Laju korosi sampel pipa pendingin sekunder dalam media NaCl 3% tanpa inhibitor, inhibitor lumut dan inhibitor kerak berturut turut 3,975, 3,576 dan 3,215 mpy. Penambahan inhibitor kerak mampu menurunkan laju korosi dari 3,975 mpy hingga 3,215 mpy. Hal ini sesuai dengan kurva *Nyquist* pada Gambar 4 yaitu penambahan inhibitor dapat menaikkan nilai R_{ct} dimana nilai R_{ct} berbanding terbalik dengan arus korosi (I_{corr}). Semakin besar R_{ct} maka I_{corr} makin rendah dan pada akhirnya laju korosi makin rendah. Data yang diperoleh dari pengukuran EIS sangat

berhubungan dengan pengukuran polarisasi atau analisis tafel [20]. Pemberian inhibitor korosi dapat membentuk lapisan pasif dipermukaan material yang berfungsi sebagai penghalang antara logam dengan media yang korosif. Terbentuknya lapisan pasif ini dapat memutus mata rantai korosi dengan memisahkan logam dari media korosifnya [4].

SIMPULAN

Pengujian korosi dengan metode EIS menunjukkan bahwa mekanisme inhibisi dalam media HCl 0,05 M membentuk lapisan pasif yang protektif pada permukaan logam yang ditunjukkan dengan nilai R_{ct} yang naik signifikan sebesar 81,16 ohm pada konsentrasi 90 ppm. Inhibitor kerak $ZnPO_4$ dapat menghambat transfer muatan dari permukaan logam kedalam larutan sehingga reaksi oksidasi dan reduksi menurun. Penambahan inhibitor dalam jumlah kecil dan mencapai kondisi efisiensi maksimum pada konsentrasi 90 ppm dengan efisiensi sebesar 66,46%. Penambahan inhibitor kerak optimum pada konsentrasi 80 ppm dengan laju korosi 3,215 mpy. Inhibitor kerak menjadi lebih efektif jika ditambahkan sedikit inhibitor lumut. Inhibitor campuran yang terdiri dari inhibitor lumut 20 ppm dan kerak 80 ppm dapat menurunkan laju korosi baik dalam media air maupun NaCl 3%. Nilai R_{ct} inhibitor campuran dalam media air mencapai 2082 ohm dengan efisiensi 71% dan dalam larutan NaCl3% sebesar 1403 ohm dengan efisiensi 75%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Ibu.Ir. Dian Angraini atas diskusi tentang *basic science* dan *research novelty*, Bapak Setia Permana dan Bapak Junaedi yang telah membantu dalam preparasi sampel uji serta Ibu Rahayu Kusumastuti (PTKRN) yang telah berkenan memberikan sampel baja karbon sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D.A. Jones, "Principles and prevention of corrosion", 2nd Ed., Macmillan Publishing Company, New York, pp.83-85, 1992.
- [2] Sumijanto, "Analisis efektivitas hidrazin (N₂H₂) sebagai alternatif inhibitor korosi pada sistem pendingin sekunder RSG-GAS", *Prosiding PPI-PDIPTN 2006*, hal. 96-103.
- [3] E.L. Diyah, R. Elisabeth, B.U. Setyo, "Pengaruh inhibitor korosi terhadap bahan sistem pendingin sekunder RSG-GAS", *Prosiding Seminar hasil Penelitian P2TRR 2004*, hal.334-345.
- [4] Febrianto, R.S. Geni, L.B. Sofia, "Analisis laju korosi dengan penambahan inhibitor korosi pada pipa sekunder reaktor RSG-GAS", *Prosiding Seminar Nasional VI, SDM Teknologi Nuklir*, 2010, hal. 615-620, Yogyakarta.
- [5] S.H. Olivera, A.G.A.L. Maria, P.F. Francisca, R.S.V. Magda, P. Silva, L.U.F. Severino, "Control of microbiological corrosion on carbon steel with sodium hypochlorite and biopolymer", *International Journal of Biological Macromolecules*, pp. 27-35, 2016.
- [6] A. Matsuzaki, M. Nagoshi, H. Noro, M. Yamashita and N. Hara, "Self-healing effect by zinc phosphate and calcium silicate included in organic-inorganic composite coating on 55% Al-Zn coated steel sheet", *Material Transaction*, vol. 52, pp.1244-1254, 2011.
- [7] R.S. Geni, "Pengendalian proses korosi pada sistem pendingin sekunder RSG-GAS 30MW", *Prosiding Seminar Nasional ke-19 Teknologi Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir*, 2013, hal.137-146, Yogyakarta.
- [8] Gamry Reference 600, *Defining High Performance Electrochemistry, Potentiostat Specification*, 2012.
- [9] A. Pradityana, Sulistijono, A. Shahab, L. Noerochim, and D. Susanti, "Inhibition of corrosion of carbon steel in 3,5% NaCl solution by Myrmecodia Pendans extract", pp.1-6, 2016.
- [10] I. Karliana, "Studi inhibitor kaliksarena pada sistem pendingin sekunder RSG-GAS, Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN," *Buku I Prosiding PPI-PDIPTN, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-BATAN*, 2009, Yogyakarta.
- [11] S. Velrani, B. Jeyaprabha, P. Prakash, "Inhibition of mild steel corrosion in 3.5% NaCl medium using 1-Butyl-3-Methylimidazolium chloride", *International Journal of Innovative Science*, vol.1, pp.57-69, 2014.
- [12] A. Wahyuningsih, Y. Sunarya, S. Aisyah, "Matenamina sebagai inhibitor korosi baja karbon dalam lingkungan sesuai kondisi pertambangan minyak bumi", *Jurnal Sains dan Teknologi Kimia*, vol. 1, no. 1, pp.17-29, 2010.
- [13] ASTM G59, "Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements", 2003.
- [14] R.E.E. Smallman, *Metalurgi Fisik Moderen (Edisi 4)*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama, 1991.
- [15] P.L. Mangonon, *The Principles of material selection for engineering design*. New Jersey, Prentice-Hall Inc. 1999.
- [16] N. Dkhireche, A. Dahami, A. Rochdi, J. Hmimou, R. Touir, *et al.*, "Corrosion and scale inhibition of low carbon steel in cooling water system by 2-propargyl-5-o-hydroxyphenyltetrazole", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, pp.1996-2003, 2013.
- [17] D.M.T.Syahra, Munasir, "Analisis Sifat Korosi Material Pelapis Pani-Sio₂/Cat Pada Medium NaCl 1 M Dengan

-
- Metode EIS”, *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*, vol. 03, hal.101-105, 2015.
- [18] O. Kassou, M. Galai, R. A. Ballakhmima, N. Dkhireche, A. Rochdi, M. E. Touhami, R. Tourir, A. Zarrouk, “Comparative study of low carbon steel corrosion inhibition in 200 ppm NaCl by amino acid compounds”, *Journal Material Environment Science*, pp. 1147-1155, 2015.
- [19] M.A. Ameer, A.M. Fekry, A.A. Ghoneim, F.A. Attaby, “Electrochemical corrosion inhibition of steel in alkaline chloride solution”, *International Journal of Electrochemical Science*, pp.1847-1861, 2010.
- [20] N. Ghali, A. Addon, B. Mutel, B. Benstaali, F. Bentiss, “Corrosion inhibition of carbon steel in 0.5 M NaCl aqueous solution by humid air plasma treatment”, *The European Physical Journal Applied Physics*, pp.30801-p1-p8, 2013.
- [21] E.M. Sherif, H.S. Abdo, K.A Khalil and A.M. Nabawy, “Corrosion properties in sodium chloride solutions of Al-TiC composites in situ synthesized by HFIHF”, *Journal Metal*, pp.1799-1811, 2015.