



PERFORMA KOROSI BAJA KARBON PADA UJI SIMULASI PIPA UNTUK SISTEM SALURAN AIR PENDINGIN

Ahmad Royani*, Siska Prifiharni, Gadang Priyotomo, Joko Triwardono, Sundjono

Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI

Gedung 470 Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia 15314

*Email : ahma047@lipi.go.id

Masuk Tanggal : 23-06-2019, revisi tanggal : 06-08-2019, diterima untuk diterbitkan tanggal 09-10-2019

Intisari

Masalah utama dalam sistem pendingin air dalam unit pembangkit listrik panas bumi meliputi korosi, deposit dan *slime* (lendir). Korosi dapat memperpendek umur pakai peralatan sistem pendingin air karena mengakibatkan penurunan efisiensi operasi, kebocoran dan polusi. Masalah-masalah tersebut sangat kompleks dan banyak faktor penyebabnya. Di sisi lain, sebagian besar sistem air pendingin di industri mengandung komponen baja karbon yang mudah terkorosi. Untuk mengetahui nilai laju korosi baja karbon pada unit pembangkit listrik panas bumi, maka dilakukan uji simulasi menggunakan sistem resirkulasi air terbuka pada temperatur 37 °C. Proses simulasi dilakukan dengan metode interval test dan berdasarkan standar NACE RP0775. Laju korosi baja tersebut diukur dengan metode pengurangan berat. Morfologi permukaan dan komposisi produk korosi dikarakterisasi menggunakan SEM (*scanning electron microscopy*), XRD (*x-ray diffractometer*) dan EDS (*energy dispersive spectroscopy*). Nilai laju korosi baja karbon hasil uji simulasi selama 1, 3 dan 4 minggu masing-masing sebesar 2,29 *mmpy*; 1,23 *mmpy*; dan 0,93 *mmpy*. Terjadi penurunan laju korosi jika waktu simulasi diperpanjang akibat terbentuknya lapisan produk korosi pada permukaan baja. Sementara itu, parameter air yang paling menentukan laju korosi adalah DO (*dissolved oxygen*). Perubahan DO sangat mempengaruhi kecepatan laju korosi. Berdasarkan morfologi produk korosi, serangan korosi terjadi secara lokal yang sebarannya merata. Produk korosi berupa senyawa oksida dalam bentuk Fe₃O₄, FeOOH dan Fe₂O₃.

Kata Kunci: Baja karbon, korosi, NACE RP0775, simulasi, pengurangan berat

Abstract

The main problem in cooling water systems in geothermal power plant units is caused by corrosion, deposits, and slime. Corrosion can shorten the life of cooling water system equipment due to a decrease in operating efficiency, leakage, and pollution. These problems, occur very complex and associated with many causes. On the other hand, most cooling water systems in the industry contain carbon steel components that are easily corroded. To determine the value of the corrosion rate of carbon steel in a geothermal power plant, a simulation test using an open recirculating system at 37 °C was carried out. The simulation process was done by an interval test method and based on NACE RP0775 standard. The corrosion rate of the carbon steel specimen was determined by weight loss method. The morphology of surface and composition of corrosion products are characterized using SEM (scanning electron microscopy), XRD (x-ray diffractometer) and EDS (energy dispersive spectroscopy). The corrosion rate values of carbon steel from the simulation obtained after 1, 3 and 4 weeks were 2.29 mmpy; 1.23 mmpy; and 0.93 mmpy, respectively. There was a decrease in the corrosion rate by the extent of the simulation time due to the formation of corrosion product layers on the steel surface. Meanwhile, the most decisive water parameter that affects the corrosion rate of the specimen is DO (dissolved oxygen). The change of DO greatly affects the corrosion rate of carbon steel. Based on the morphology of corrosion product, the corrosion attacks occur locally. The corrosion products identified were the oxide compounds of Fe₃O₄, FeOOH and Fe₂O₃.

Keywords: Carbon steel, corrosion, NACE RP0775, simulation test, weight loss

1. PENDAHULUAN

Masalah utama dalam sistem pendingin air dalam unit pembangkit listrik panas bumi meliputi korosi, deposit dan *slime* (lendir). Korosi dapat memperpendek umur pakai peralatan sistem pendingin air karena mengakibatkan penurunan efisiensi operasi, kebocoran dan polusi. Deposit dan slime selain dapat menurunkan efisiensi panas pada alat penukar panas juga menyebabkan korosi lokal yaitu korosi dibawah deposit karena adanya perbedaan konsentrasi oksigen [1]. Masalah-masalah tersebut, terjadi dengan sangat kompleks dan banyak faktor penyebabnya.

Sumber air baku pada sistem pendingin dalam industri dapat berasal dari air tanah, danau, sungai dan air laut [2]. Pada umumnya, air baku tersebut mengandung padatan tersuspensi dan padatan terlarut yang dapat menyebabkan terjadinya korosi atau deposit.

Sistem sirkulasi air pada sistem pendingin terdiri dari sistem sekali putaran (*once through*), resirkulasi tertutup, dan resirkulasi terbuka [2]. Sistem *once through* menyalurkan air pada unit pendingin dan membuangnya kembali ke sumber air. Pada sistem tertutup, kehilangan air sangat rendah sehingga tidak ada penambahan air selama beroperasinya unit pendingin. Sementara, dalam sistem terbuka terjadi kehilangan air sehingga harus memiliki suplai air yang ditambahkan sebagai pengganti. Dengan demikian, pada resirkulasi tertutup mineral yang terakumulasi jauh lebih sedikit daripada di dalam sistem terbuka dimana terjadi penambahan sejumlah air dari make-up water. Air pendingin dalam sistem resirkulasi terbuka dan sekali putaran biasanya terkontaminasi sejumlah zat terlarut, padatan tersuspensi, dan mikroorganisme. Oleh karena itu, pembentukan deposit, terjadinya korosi dan pembentukan lendir pada sistem resirkulasi terbuka dan sekali putar umumnya lebih signifikan daripada di sistem tertutup [3].

Sebagian besar material pada sistem air pendingin di industri mengandung komponen yang dibuat dari paduan tembaga dan baja. Baja karbon digunakan sebagian besar di unit penukar panas pada sistem resirkulasi tertutup dan terbuka [4,5]. Baja karbon digunakan pada bagian unit penukar panas dan menara pendingin sedangkan stainless steel terdapat dalam sistem perpipaan [6]. Oleh karena itu, penting untuk memahami perilaku korosi dari material-material tersebut akibat fluida dalam sistem unit penukar panas.

Salah satu faktor yang mempengaruhi terbentuknya korosi dan deposit (*scale*) pada

unit penukar panas adalah kandungan fluida itu sendiri. Parameter-parameter kritis untuk fluida meliputi suhu, kecepatan fluida, konduktivitas, total padatan terlarut (TDS), kekerasan, pH, alkalinitas dan indeks saturasi [7]-[9].

1.1. Kecepatan Fluida

Kecepatan fluida tinggi dapat menyebabkan korosi erosi pada permukaan logam [10]. Di industri panas bumi dan migas, fluida berkecepatan tinggi ini sering ditemukan di ujung sumur (*wellhead*) bertekanan tinggi [11]. Fluida berkecepatan tinggi dapat mencegah inhibitor korosi menempel pada permukaan logam dan menghilangkan lapisan pelindung dari logam [12]. Kecepatan fluida rendah dapat menyebabkan jenis korosi under deposit [10]. Daerah dengan kecepatan rendah dapat berfungsi sebagai tempat inkubasi bagi sulfat reducing bacteria (SRB). Lokasi-lokasi ini juga cenderung menahan air pada titik-titik rendah dalam garis aliran [13].

1.2. Konduktivitas dan Total Padatan Terlarut (TDS)

Konduktivitas adalah ukuran kemampuan air untuk menghantarkan arus listrik dan mengindikasikan jumlah padatan terlarut (TDS) dalam air. Air suling murni memiliki konduktivitas sangat rendah dan air laut memiliki konduktivitas yang tinggi [14]. Padatan terlarut terdapat pada bahan senyawa kimia dan zat dalam air yang akan bergabung untuk membentuk deposit yang tidak larut di permukaan unit penukar panas atau yang disebut sebagai "*scale*". *Scale* yang keras menempel pada permukaan, secara bertahap menumpuk dan mulai mengganggu aliran fluida pipa, sehingga perpindahan panas dan tekanan air menurun [7].

1.3. pH

pH adalah ukuran seberapa asam atau basa air. pH kurang dari 7 menunjukkan keasaman, sedangkan pH lebih besar dari 7 menunjukkan air bersifat basa. Kontrol pH sangat penting untuk sebagian besar program pengolahan air pendingin. Secara umum, ketika pH lingkungan asam, kecenderungan terjadinya korosi meningkat dan sebaliknya ketika pH lingkungan alkali, kecenderungan terjadinya *scale* meningkat [8].

1.4. Alkalinitas

Nilai pH di atas 7 menandakan alkalinitas air. Pada nilai pH kurang dari 8,3, sebagian besar alkalinitas dalam air dalam bentuk

bikarbonat, dan biasanya tidak terjadi pembentukan *scale*. Namun ketika pH naik di atas 8,3, alkalinitas berubah dari bikarbonat menjadi karbonat dan *scale* akan mulai terbentuk [11].

1.5. Kesadahan

Jumlah kalsium dan magnesium terlarut dalam air menentukan “kesadahan” air. Total kesadahan terdiri dari kesadahan karbonat (*temporary hardness*) dan kesadahan non-karbonat (*permanent hardness*). *Temporary hardness* biasanya paling umum untuk endapan *scale* kalsium karbonat dalam pipa dan peralatan.

1.6. Indeks Kejenuhan

Indeks saturasi air atau LSI (*langlier saturation index*) adalah ukuran stabilitas air sehubungan dengan tingkat korosivitas dan pembentukan *scale*. Ketika pembacaan LSI positif, maka cenderung terbentuk *scale*, dan ketika nilai LSI negatif, maka cenderung korosif.

Penelitian-penelitian pada unit penukar panas dan sistem pendingin air telah banyak dilakukan [3]-[5], [11]-[13]. Analisa dan optimasi sirkulasi terbuka pada air pendingin telah di teliti untuk tujuan penghematan penggunaan air [3]. Peningkatan siklus konsentrasi (rasio konsentrasi konstituen terlarut tertentu dalam air pendingin resirkulasi dengan konsentrasi konstituen yang sama dalam *makeup water*) dapat menurunkan penggunaan air dari *makeup water*. Laju korosi beberapa baja karbon dalam *feed water* pada sistem pendingin air bervariasi tergantung pada struktur mikro baja dan temperatur lingkungan [15]. Baja karbon dengan fasa perlit lebih banyak memiliki laju korosi yang lebih tinggi dibandingkan dengan baja karbon dengan fasa perlit sedikit [15]. Peningkatan temperatur lingkungan juga dapat meningkatkan laju korosi pada baja karbon [8]. Pada penelitian ini dilakukan simulasi uji korosi baja karbon menggunakan alat simulasi korosi pipa dengan sistem resirkulasi terbuka pada temperatur 37 °C dan kecepatan fluida 0,07 m/s. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai laju korosi baja karbon pada sistem resirkulasi air terbuka.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Material/bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa baja karbon yang ada di pasaran dengan komposisi kimia ditunjukkan

dalam Tabel 1. Larutan yang digunakan dalam penelitian ini berupa larutan sintesis untuk *feed water* dengan komposisi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi kimia spesimen baja

Unsur	C	Mn	Si	S	P	Fe
%	0,448	1,323	0,246	0,024	0,002	Sisa
Berat						

Tabel 2. Komposisi larutan sintesis air pendingin

Parameter	Unit	Komposisi
pH	-	7,4
Turbidity	NTU	0,38
Colour (Pt/Co)	-	0
Conductivity	µmhos	211,4
Dissolved solid	ppm	100,1
Calcium Hardness	ppm, CaCO ₃	1,3
Total Hardness	ppm, CaCO ₃	24,48
Total Alkalinity	ppm, CaCO ₃	28
Bicarbonate	ppm	93,99
Total Chlorine, Cl ₂	ppm	0,00
Chloride, Cl ⁻	ppm	13,35
Hydroxide, OH ⁻	ppm	0,00
Free CO ₂	ppm	0,00
Nitrate, NO ₃ ⁻	ppm	0,00
Sulphate, SO ₄ ²⁻	ppm	26,98
Sodium, Na	ppm	77,84
Potassium, K	ppm	18,46
Total Iron, Fe	ppm	0,21
Silica, SiO ₂	ppm	14,10

2.1. Preparasi Spesimen

Plat baja karbon dipotong dengan ukuran 70 mm x 40mm x 2 mm dan diberi kode. Sebelum uji simulasi, permukaan spesimen dibersihkan berdasarkan standar ASTM G-95. Setelah dibersihkan, spesimen ditimbang menggunakan timbangan analitik dan kemudian disimpan dalam desikator.

2.2. Uji Simulasi Laju Korosi Pipa

Spesimen dimasukkan pada alat uji simulasi korosi pipa (Gambar 1) dengan cara memasang spesimen pada *holder* disertai gasket sehingga tidak kontak langsung dengan *holder* (Gambar 2). *Holder* dikencangkan dan dipastikan posisi spesimen searah dengan aliran fluida. Alat simulasi dihidupkan dengan memutar tombol *power* ke posisi ON. Kecepatan fluida diatur dan parameter fluida proses diukur dengan *probe sensor* (Multi-Meter HQ40d) yang telah dipasang pada alat monitoring dan dibiarkan selama waktu tertentu sehingga kondisi parameter tercapai. Jika kondisi telah tercapai, *probe* diambil dari alat simulasi kemudian ditutup kembali dan dibiarkan selama waktu pemaparan tertentu. Metode yang digunakan pada simulasi uji laju korosi ini menggunakan

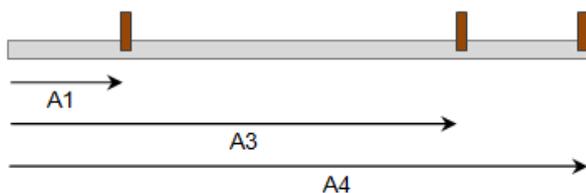
metode *interval test*. Skema *interval test* diilustrasikan pada Gambar 3 dan dijelaskan dalam Tabel 3.



Gambar 1. Alat simulasi uji laju korosi pipa



Gambar 2. Pemasangan spesimen pada holder



Gambar 3. Skematik percobaan *interval test*

Tabel 3. Interval waktu uji spesimen

No	Kode	Ekspos (Hari ke-)		Lama Ekspos (Jam)
		Awal	Akhir	
1	A1	0	7	168
2	A3	0	21	504
3	A4	0	28	672

2.3. Analisa Kehilangan Berat

Setelah uji simulasi laju korosi, spesimen dibersihkan sesuai prosedur pada standar ASTM G-1. Analisa kehilangan berat dilakukan dengan menimbang spesimen sebelum dan sesudah ekspos. Metode untuk menentukan laju korosi berdasarkan kehilangan berat mengikuti persamaan berikut:

$$\text{Laju Korosi} = K \left(\frac{W}{D A T} \right) \dots\dots\dots (1)$$

dengan:

K: konstanta; W: berat yang hilang (gram); D: densitas (g/cm³); A: luas area (cm²) dan T: waktu ekspos (jam).

2.4. Analisa Parameter Air

Parameter kualitas air simulasi diukur menggunakan alat portabel meter multi Hach (HQ40d). Alat ini merupakan alat sistem genggam untuk pengukuran oksigen terlarut (DO), salinitas, konduktivitas, suhu, total padatan terlarut (TDS) dan pH. Pengukuran kualitas air dilakukan pada awal pemasangan dan setiap pengambilan spesimen uji.

2.5. Analisa Produk Korosi

Morfologi produk korosi yang menempel pada permukaan spesimen diamati dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM JEOL JSM-6390A) yang dilengkapi dengan *energy dispersive spectrometer* (EDS). Digunakan jarak kerja 10 mm dan tegangan akselerasi 20 kV. Senyawa kimiawi dari produk korosi ditentukan menggunakan difraktometer sinar-X (Shimadzu XRD 7000).

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Indeks Kejenuhan Air

Indeks saturasi air atau LSI (*langlier saturation index*) dihitung menggunakan data pada Tabel 1. Berdasarkan data komposisi kimia pada Tabel 1, indeks LSI pada 37 °C yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pHs} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{pHs} = (9,3 + A + B) - (C + D) \dots\dots\dots (3)$$

dimana:

$$A = [\log(100,1) - 1]/10 = 0,1$$

$$B = -13,12 \times \log(37^\circ\text{C} + 273) + 34,55 = 1,863$$

$$C = \log(1,3) - 0,4 = -0,286$$

$$D = \log(28) = 1,447$$

Sehingga LSI pada 37 °C adalah:

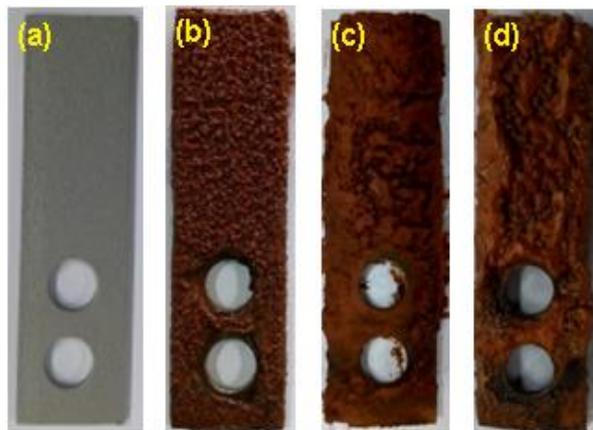
$$\text{pHs} = (9,3 + 0,1 + 1,863) - (-0,286 + 1,447) = 10,102$$

$$\text{LSI} = 7,4 - 10,102 = -2,702 \text{ (negatif)}$$

Hasil indeks LSI bernilai negatif, menunjukkan kecenderungan air yang digunakan dalam percobaan bersifat korosif.

3.2. Analisa Visual

Perbandingan hasil visualisasi spesimen sebelum dan sesudah ekspos terlihat pada Gambar 4. Terlihat jelas perbedaan visualisasi spesimen sebelum ekspos (a) dengan spesimen setelah diekspos selama (b) 7 hari, (c) 21 hari dan (d) 28 hari. Produk korosi terjadi pada seluruh permukaan spesimen yang mengindikasikan bahwa korosi yang terbentuk secara visual adalah jenis korosi merata. Lapisan yang terbentuk berupa lapisan tebal dan poros sehingga tidak membentuk lapisan protektif.



Gambar 4. Penampakan visual baja karbon sebelum dan sesudah diekspos

3.3. Kehilangan Berat

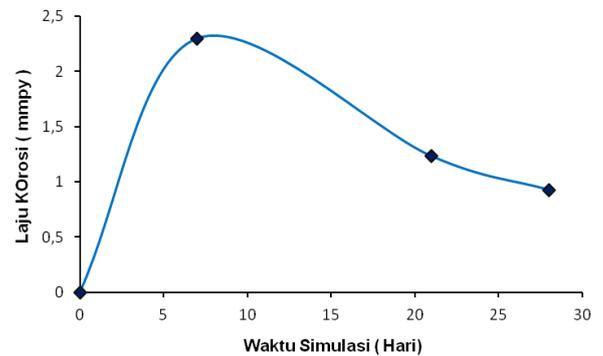
Penentuan laju korosi setelah periode ekspos tertentu dilakukan dengan metode kehilangan berat. Hasil laju korosi baja karbon menggunakan alat simulasi disajikan dalam Gambar 5.

Tabel 4. Klasifikasi laju korosi baja karbon

Laju korosi (mpy)	Keterangan
≤ 1	Istimewa (<i>Excellent</i>)
1 – 3	Sangat baik (<i>Very good</i>)
3 – 5	Baik (<i>Good</i>)
5 – 8	Sedang (<i>Moderate</i>)
8 – 10	Buruk (<i>Poor</i>)
> 10	Buruk sekali (<i>Very poor</i>)

Laju korosi baja karbon hasil pemaparan selama 7 hari, 21 hari dan 28 hari masing-masing sebesar 2,29 *mmpy*; 1,23 *mmpy* dan 0,93 *mmpy*. Laju korosi yang dihasilkan termasuk ke dalam kategori sangat tinggi untuk sistem resirkulasi terbuka. Klasifikasi laju korosi baja karbon untuk sistem air pendingin resirkulasi terbuka disajikan dalam Tabel 4 [16]. Salah satu faktor penyebab tingginya laju korosi karena kecepatan aliran fluida yang digunakan sangat rendah yakni 0,07 m/s, sehingga dimungkinkan terjadi korosi *under*

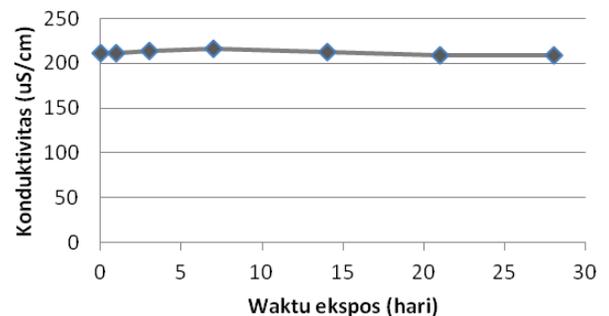
deposit yang mengakibatkan perbedaan aerasi oksigen. Dalam industri migas, kecepatan aliran fluida umumnya berkisar antara 1 m/s sampai dengan 4 m/s [17].



Gambar 5. Hubungan laju korosi dengan waktu ekspos

3.4. Pengaruh parameter air terhadap laju korosi

Laju korosi baja tergantung pada beberapa parameter seperti komposisi kimia baja, kekasaran permukaan dan lingkungan [8], [18]. Parameter lingkungan air meliputi konduktivitas, total padatan terlarut (TDS), salinitas, oksigen terlarut (DO), suhu dan pH.

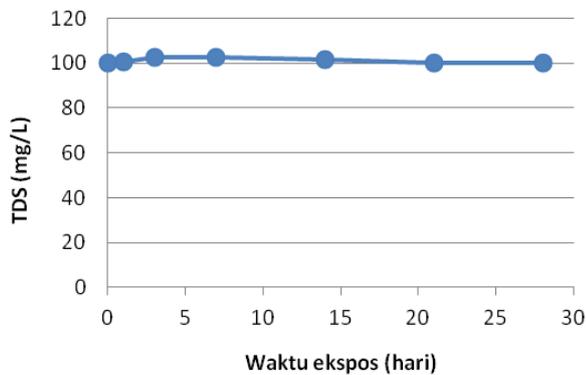


Gambar 6. Hasil pengukuran konduktivitas air versus waktu

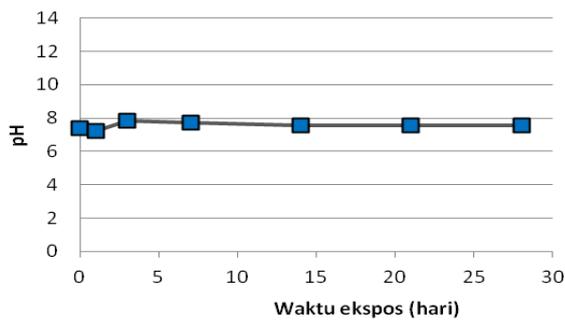
Laju korosi baja di lingkungan air dengan konduktivitas yang tinggi cenderung lebih besar dibandingkan pada lingkungan air yang memiliki konduktivitas rendah [8]. Hasil pengukuran konduktivitas dan TDS air simulasi pada berbagai waktu pemaparan memiliki nilai yang relatif sama (Gambar 6 dan Gambar 7). Pada permukaan logam (anoda), sebagian besar besi menjadi Fe_2O_3 (Gambar 15) dan menempel pada permukaan baja karbon, sehingga ion Fe terlarut sangat kecil. Hal ini dibuktikan dengan produk korosi yang tebal pada permukaan baja karbon seperti pada Gambar 4.

Oleh karena itu, parameter konduktivitas dan total padatan terlarut dalam penelitian ini tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap laju korosi baja. Namun, secara teori

total padatan terlarut dan konduktivitas yang tinggi dapat meningkatkan laju korosi [8]. Hal ini berkaitan dengan daya hantar pertukaran ion-ion pada katoda dan anoda. Lingkungan air dengan total padatan terlarut yang tinggi cenderung memiliki konduktivitas yang tinggi sehingga laju perpindahan massa ion-ion semakin cepat.



Gambar 7. Hasil pengukuran TDS air versus waktu pada baja karbon



Gambar 8. Hasil pengukuran pH larutan uji versus waktu pada baja karbon

Pengaruh pH terhadap kelarutan produk korosi yang terbentuk selama proses korosi sering kali merupakan kunci untuk memahami konsentrasi logam pada lingkungan air. Kelarutan produk korosi umumnya menurun dalam larutan *aqueous* dengan pH yang lebih tinggi.

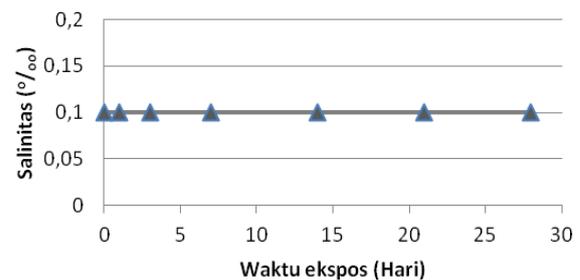
Hasil pengukuran pH air simulasi versus waktu disajikan pada Gambar 8. Hasil pengukuran pH air simulasi menunjukkan harga pH larutan yang tidak mengalami perubahan yang signifikan, dimana pH terukur antara pH 7 dan 8. Berdasarkan hasil pengukuran pH ini, air simulasi termasuk dalam lingkungan netral yang memiliki pengaruh kecil terhadap laju korosi. Namun, pada dasarnya penurunan pH dapat membuat lingkungan lebih asam dan akibatnya lingkungan menjadi lebih korosif [2].

Agresivitas korosi air tidak hanya merupakan fungsi dari resistivitas air dan

derajat keasaman, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor-faktor tambahan yang saling melengkapi seperti suhu, kandungan gas terlarut dan salinitas [9].

Salinitas merupakan representasi dari banyaknya kandungan klorida dalam air. Oleh karena itu, salinitas dievaluasi dengan menentukan konsentrasi ion Cl^- dalam air. Hubungan empiris antara salinitas dan kandungan ion Cl^- dirumuskan dalam Persamaan 4 [14]:

$$1,80655 \times [Cl^-] \dots\dots\dots (4)$$

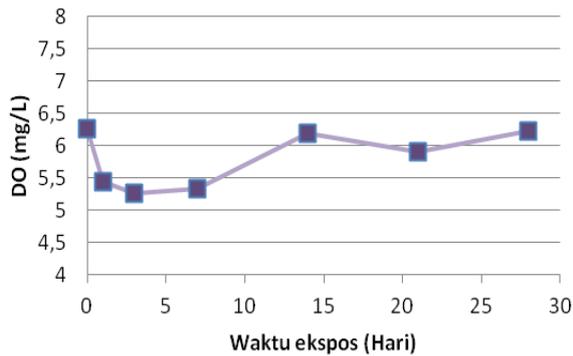


Gambar 9. Hasil pengukuran salinitas air versus waktu pada baja karbon

Hasil pengukuran salinitas dari uji simulasi dialirkan dalam Gambar 9. Salinitas yang dihasilkan relatif sama dan nilainya sangat kecil yaitu sebesar 0,1 ppt. Hasil ini mengindikasikan bahwa fluida atau air yang digunakan dalam proses simulasi termasuk ke dalam kategori air segar (*fresh water*), karena kandungan ion kloridanya di bawah 1000 ppm [14].

Korosifitas air alami (*natural water*) meningkat secara proporsional, jika nilai salinitas meningkat. Jika salinitas melebihi 3%, korosifitas air akan menurun [9]. Fenomena ini disebabkan oleh fakta bahwa laju korosi cenderung meningkat ketika konduktivitas air meningkat. Semakin tinggi salinitasnya, semakin rendah kelarutan oksigennya [1]. Dengan demikian, salinitas di atas 3%, laju korosi di dalam air berkurang. Begitupun jika salinitas sangat kecil sekali, maka pengaruhnya sangat kecil terhadap laju korosi.

Parameter lain yang mempengaruhi laju korosi dalam lingkungan air adalah kandungan gas terlarut. Gas terlarut dalam air dan yang paling penting dari sudut pandang korosi adalah oksigen dan karbon dioksida. Kelarutan oksigen dan karbon dioksida berkurang dengan meningkatnya suhu dan salinitas [1]. Gas karbon dioksida mempengaruhi pH air, adanya gas CO_2 membuat air menjadi lebih asam [8]. Oksigen bertindak sebagai depolarizer dalam katoda dan meningkatkan terjadinya proses korosi [1].



Gambar 10. Hasil pengukuran DO air versus waktu pada baja karbon

Hasil pengukuran oksigen terlarut pada berbagai waktu ekspos menggunakan alat portabel meter *Multi Hach HQ40d* ditunjukkan dalam Gambar 10.

Pada hari-hari minggu awal ekspos, nilai DO menurun dan terjadi peningkatan laju korosi. Pada tahap inisiasi ini mulai terjadi korosi pada daerah anodik sehingga konsumsi oksigen pada daerah katodik meningkat. Sebagai akibat dari peristiwa ini, oksigen yang terlarut dalam air menurun. Mekanisme reaksi kimia terjadinya korosi di dalam lingkungan air netral sesuai persamaan reaksi berikut:

Pada anoda terjadi pelarutan besi (Fe) menjadi ion Fe^{2+} :



sedangkan pada katoda terjadi reaksi reduksi oksigen terlarut :



Reaksi di atas terjadi secara simultan dan sebenarnya terjadi juga berbagai reaksi lanjutan dalam larutan. Pada peristiwa korosi, ion besi (Fe^{2+}) yang terbentuk di anoda akan teroksidasi membentuk besi oksida berbentuk lapisan sangat tipis pada permukaan logam dan mencegah terlarutnya besi lebih lanjut:



Demikian juga pada katoda, oksigen harus mencapai permukaan logam agar reaksi (6) terjadi. Ion hidroksil (OH^-) yang terbentuk juga dapat terserap pada permukaan membentuk lapisan yang menghalangi penyerapan oksigen. Pada keadaan ini terjadi polarisasi katoda dan proses korosi berjalan lambat. Pada peristiwa korosi yang cepat, lapisan penghambat

(pelindung) tersebut tidak sempat terbentuk, ion Fe bereaksi dengan ion hidroksil :

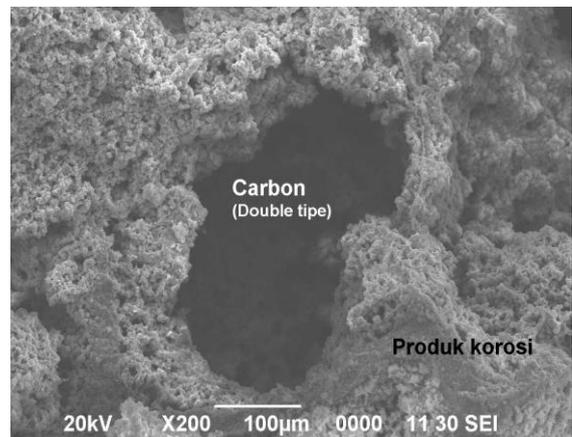


Dari hasil eksperimental (Gambar 10) dan sesuai dengan reaksi-reaksi di atas, dapat dikatakan bahwa DO adalah parameter paling dominan dalam proses korosi baja. Bahkan dilaporkan bahwa korosi internal pipa air dapat dicegah secara efektif dengan mengurangi konsentrasi DO [1].

Hubungan parameter-parameter air di atas bukan saja mempengaruhi laju korosi, namun, parameter air seperti total padatan terlarut dan kandungan gas dalam air juga mempengaruhi karakteristik dari produk korosi.



Gambar 11. Hasil foto metalografi serbuk produk korosi pada permukaan baja karbon



Gambar 12. Hasil foto SEM serbuk produk korosi pada permukaan baja karbon

3.5. Produk Korosi

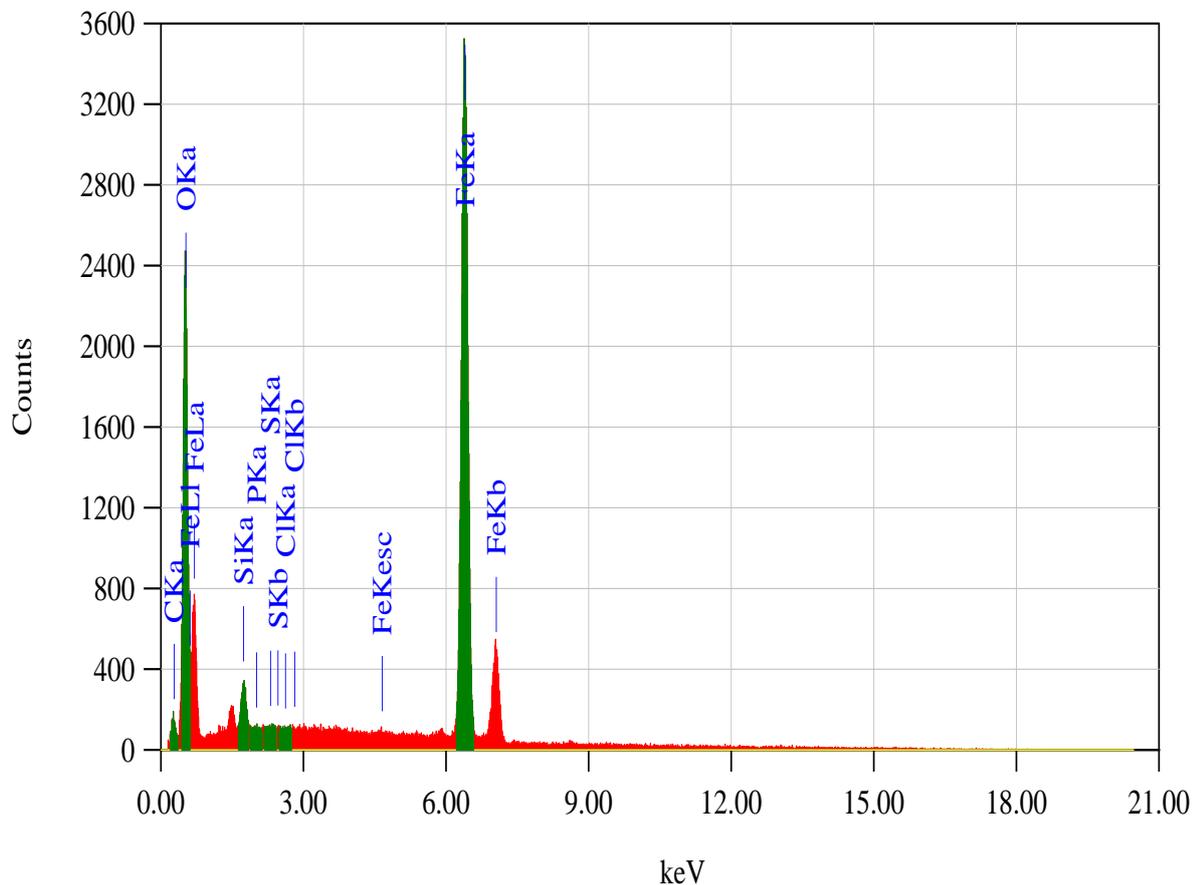
Bentuk umum produk korosi baik besi ataupun baja berupa *Goethite* (α - $FeOOH$), *Akaganeit* (β - $FeOOH$), *Hematit* (Fe_2O_3) dan *Maghemite* terhidrasi (γ - $Fe_2O_3 \cdot H_2O$). Dalam banyak spesimen, *Magnetit* (Fe_3O_4) atau *Maghemit* (γ - Fe_2O_3) juga sering terdeteksi [14].

Morfologi produk korosi yang terbentuk pada permukaan baja karbon ditampilkan dalam Gambar 11 dan 12. Baja karbon sangat mudah bereaksi dengan O_2 dalam air yang larut dari udara. Reaksi tersebut menjadi oksida *hydrate* yang merupakan produk korosi. Secara berangsur-angsur produk korosi ini mengakibatkan permukaan logam menjadi tidak rata, hal ini dapat menimbulkan terlepasnya lapisan film pada permukaan sehingga akan terjadi korosi pada daerah yang bersifat anodik yang menjadikan logam menjadi higroskopik. Bila dilihat dari morfologi dan bentuk korosi yang teridentifikasi, maka serangan korosi yang terbentuk terjadi secara lokal yang sebarannya merata seperti ditunjukkan pada Gambar 11.

Hasil SEM dan EDS serbuk produk korosi pada permukaan baja karbon ditunjukkan pada Gambar 12 dan 13. Hasil SEM dan EDS

menunjukkan dominasi kandungan besi dan oksigen. Berdasarkan hasil SEM pada Gambar 12 menunjukkan terjadinya pembentukan oksida-oksida besi. Hal ini pula yang menyebabkan penambahan berat yang terjadi pada logam yang terkorosi. Produk korosi yang berupa oksida ini akan terus berkembang hingga pada saat tertentu akan terkikis oleh aliran fluida.

Berdasarkan Gambar 13, dapat diketahui bahwa produk korosi baja karbon mengandung unsur besi, karbon dan oksigen. Adapun perbandingan persentase komposisi kimia unsur penyusunnya, yaitu 74,35 % Fe, 5,31 % C, dan 19,12 % O_2 . Sebaran unsur dominan besi dan oksigen terdapat pada seluruh permukaan baja karbon sebagaimana diperlihatkan dalam foto hasil pemetaan sinar x pada Gambar 14.



Gambar 13. Hasil analisa EDS (*area scan*) pada produk korosi dengan perbesaran 200x

Hasil morfologi dan kandungan unsur yang ada belum dapat memprediksi bentuk senyawa produk korosi. Oleh karena itu, untuk menentukan bentuk senyawa dari produk korosi tersebut, maka dilakukan analisis menggunakan XRD (difraksi sinar-x). Hasil analisis XRD pada produk korosi ditampilkan dalam Gambar 15.

Data yang diperoleh dari hasil XRD berupa spektrum yang menyatakan intensitas sebagai fungsi dari 2θ sebagai sudut difraksi. Difraktogram XRD hasil eksperimen dicocokkan dengan difraktogram data standar. Setelah dilakukan pencocokan diperoleh oksida-oksida yang terbentuk pada permukaan baja karbon berupa oksida Fe_3O_4 , $FeOOH$ dan Fe_2O_3 .

4. KESIMPULAN

Perilaku korosi baja karbon pada uji simulasi pipa untuk unit penukar panas tergantung banyak faktor. Hasil sementara nilai laju korosi spesimen baja karbon pada uji simulasi sistem resirkulasi air terbuka selama 1, 3 dan 4 minggu masing-masing sebesar 2,29 *mmpy*; 1,23 *mmpy*; dan 0,93 *mmpy*. Terjadi penurunan laju korosi jika waktu simulasi diperpanjang akibat terbentuknya lapisan oksida pada permukaan baja. Sementara itu, parameter air yang paling signifikan dalam menentukan laju korosi baja adalah DO (*dissolved oxygen*). Perubahan DO sangat mempengaruhi kecepatan terbentuknya produk korosi. Berdasarkan morfologi produk korosi, serangan korosi terjadi secara lokal yang sebarannya merata. Produk korosi berupa senyawa oksida dalam bentuk Fe_3O_4 , $FeOOH$ dan Fe_2O_3 .

Supaya dapat menghasilkan data yang lebih representatif dalam penelitian selanjutnya, disarankan melakukan simulasi *long term* (penambahan waktu ekspos) dan variasi kecepatan aliran fluida.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI yang telah mendanai penelitian ini melalui Anggaran Kompetensi Inti tahun 2019. Terimakasih juga diberikan kepada staf teknisi dan analis kimia laboratorium Pusat Penelitian Metalurgi dan Material - LIPI khususnya kepada Bapak Heri Nugraha dan Ibu Sugiarti.

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. Jung, U. Kim, G. Seo, H. Lee dan C. Lee, "Effect of dissolved oxygen (DO) on internal corrosion of water pipes," *Environ.*

- Eng. Res.*, vol. 14, no. 3, pp.195-199, 2009.
- [2] J. Paul Guyer, *An Introduction to cooling tower water treatment*. Course No: C05-019, California, USA: Continuing Education and Development, Inc, pp.1-72, 2014.
- [3] L. Ziqiang, C. Jiuju, S. Wenqiang, dan L. Wang, "Analysis and optimization of open circulating cooling water system," *Water*, vol.10, 2018. Doi:10.3390/w10111592.
- [4] M. Kameli, E. Naser, dan R. M. Hossein, "Diagnosis of heat exchanger scales in cooling water systems," *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 1, pp. 65-71, 2008.
- [5] N. Farhami, dan A. Bozorgian, "Factors affecting selection of tubes of heat exchanger," *Int. Conf. on Chem. and Chem. Process IPCBEE*, vol.10, pp. 223-228, 2011.
- [6] D. Gandy, *Carbon steel handbook*. Final Report, California, USA: Electric Power Research Institute, 2007.
- [7] H. Li, M. K. Hsieh, S. H. Chien, J. D. Monnell, D. A. Dzombak, dan R. D. Vidic, "Control of mineral scale deposition in cooling systems using secondary-treated municipal wastewater," *Water Research*, vol. 45, pp. 748-760, 2011.
- [8] P.B. Bennett, *Control of Environmental Variables in Water. Resirculating System*. Metal Handbook Ninth Edition, New York, USA: Calgon Corporation, pp.487-497, 1992.
- [9] K. Zakowski, M. Narozny, M. Szocinski, dan K. Darowicki, "Influence of watersalinity on corrosion risk—the case of the southern Baltic Sea coast," *Environ Monit Assess*, vol. 186, pp. 4871–4879, 2014. Doi 10.1007/s10661-014-3744-3.
- [10] N. Qingwei, L. Zili, C. Gan, dan W. Bingying, "Effect of flow rate on the corrosion behavior of N80 steel in simulated oil field environment containing CO_2 and HAc," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 12, pp. 10279 – 10290, 2017. Doi: 10.20964/2017.11.23.
- [11] J. Z. Sadiq, C. W. Blair, dan M. Chris, "Silica scaling in geothermal heat exchangers and its impact on pressure drop and performance: Wairakei binary plant-New Zealand," *Geothermics*, vol. 51, pp. 445–459, 2014.
- [12] S. M. A. Shibli, dan V. S. Saji, "Corrosion inhibitors in cooling towers," *Proc. Chemical Industry Digest*, pp.74-80, 2002.

- [13] S. Katerina, G. Alexander, dan S. Bohumil, "Monitoring of the corrosion of pipes used for the drinking water treatment and supply," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 1, no. (3), pp. 61-65, 2013. Doi: 10.13189/cea.2013.010302.
- [14] P. R. Roberge, "Corrosion *Engineering: Principles and Practice*," New York, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [15] A. Royani, L. Nuraini, S. Prifiharni, G. Priyotomo, dan Sundjono, "Corrosion rate of various carbon steels in raw water for water cooling system at ammonia plant," *Int. J. of Eng. Trends and Tech. (IJETT)*, vol. 59, no. (1), pp. 51-58, 2018.
- [16] P. B. Bennett, "Standards for Corrosion Rates," *AWT Analyst*, Spring, 2000.
- [17] A. C. Tobon, M. D. Cruz, M. A. Aguilar, dan J. L. Gonzalez, "Effect of flow rate on the corrosion products formed on traditional and new generation API 5L X-70 in a sour brine environment," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 10, pp. 2904 – 2920, 2015.
- [18] A. Royani, S. Prifiharni, L. Nuraini, G. Priyotomo, Sundjono, I. Purawiardi, dan H. Gunawan, "Corrosion of carbon steel after exposure in the river of Sukabumi, West Java," *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 541, pp. 012031, 2019.

