
INHIBISI KOROSI BAJA DALAM AIR KONDENSAT TERKONTAMINASI CuCl_2 MENGUNAKAN NATRIUM FOSFAT

Isdiriyani Nurdin, Ismail Marzuki, Larisa Deviyani, M. Irfan S,
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Labtek X, Bandung 40132
E-mail: isdi@che.itb.ac.id

Abstrak

Korosi pada sistem kondensor dan boiler atau jalur kondensat diakibatkan oleh reaksi antara permukaan dalam pipa dan tube dengan air boiler atau air kondensat yang terkontaminasi ion tembaga (Cu^{2+}), yang berasal dari produk korosi alat-alat penukar panas. Untuk mengendalikan korosi tersebut ditambahkan natrium fosfat dalam bentuk Trisodium Phosphate (TSP) dan Disodium Phosphate (DSP) sebagai inhibitor korosi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kontaminan CuCl_2 terhadap korosi baja dalam air kondensat, dan efektivitas inhibisi korosi DSP dan TSP. Pada penelitian ini, pengukuran laju korosi baja dalam air kondensat buatan yang ditambah dengan CuCl_2 dan variasi konsentrasi inhibitor dilakukan dengan metode Tafel. Mekanisme inhibisi diprediksi berdasarkan metoda voltametri siklik. Hasil percobaan menunjukkan bahwa laju korosi baja dalam air kondensat tiruan meningkat dengan kehadiran kontaminan CuCl_2 . Kombinasi DSP-TSP efektif sebagai inhibitor korosi baja dalam air kondensat terkontaminasi CuCl_2 , dengan keefektifan inhibisi korosi tertinggi didapat pada nisbah DSP:TSP 35:65. Reaksi korosi baja dalam air kondensat tiruan terkontaminasi CuCl_2 dengan penambahan inhibitor adalah oksidasi besi (Fe) menjadi besi (II) yang irreversibel dan berlangsung dalam satu tahap.

Kata kunci: Air Kondensat, CuCl_2 , Korosi Baja, Natrium Fosfat

Abstract

Corrosion in condenser system, boiler or condensate line caused by reaction between inside surface of pipe and tube with condensate water contaminated by copper ion (Cu^{2+}) as corrosion product of heat exchanger. Addition of sodium phosphate in Trisodium Phosphate (TSP) and Disodium Phosphate (DSP) form as corrosion inhibitor for controlling this corrosion. This research is aim to find out the influence of CuCl_2 contaminant to steel corrosion rate in condensate water, and the effectiveness of TSP and DSP as corrosion inhibitor in such system. In this research, the corrosion rate measurement in artificial condensate water with tafel method, The corrosion inhibitions mechanism was studied using cyclic voltametry method. The experimental result shows that corrosion rate is increases in artificial condensate water had contaminated by CuCl_2 . DSP-TSP combination is effective as a steel corrosion inhibitor in condensate water contaminated by CuCl_2 . The highest effectiveness achieved in ratio DSP: TSP 35:65. Corrosion reaction of steel in artificial condensate water contaminated by CuCl_2 with inhibitor addition is an irreversible reaction and occurs in one-step reaction.

Keywords: Condensate Water, CuCl_2 , Sodium Phosphates, Steels Corrosion

1. Pendahuluan

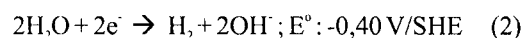
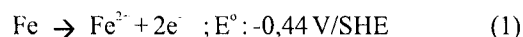
Korosi dianggap proses yang merugikan karena menimbulkan kenaikan biaya pemeliharaan peralatan proses, hambatan pada jalannya proses, serta gangguan keselamatan kerja. Salah satu peralatan proses yang sering mengalami korosi adalah sistem kondensor dan boiler atau jalur kondensat. Korosi dalam jalur kondensat diakibatkan oleh reaksi antara permukaan dalam pipa dan tube yang terbuat dari baja dengan air boiler atau air kondensat, terutama yang terkontaminasi. Kontaminan yang mungkin terbawa dalam air kondensat adalah ion tembaga (Cu^{2+}), yang berasal dari produk korosi alat-alat penukar panas yang terbuat dari paduan tembaga dan dilalui air kondensat.

Untuk boiler bertekanan tinggi, inhibitor korosi yang umum digunakan adalah natrium fosfat dalam bentuk campuran *disodium phosphate* (DSP, Na_2HPO_4) dan *trisodium phosphate* (TSP, Na_3PO_4) (Nathan, 1994). Di dalam air boiler, DSP akan bereaksi dengan kelebihan NaOH sehingga dapat menjadi buffer pH dan meningkatkan kadar fosfat. Sedangkan TSP akan terhidrolisis dan menghasilkan NaOH sehingga menaikkan pH di samping meningkatkan kadar fosfat. Dengan demikian, kedua senyawa tersebut harus dikombinasikan dan ditentukan dosisnya secara tepat agar dapat menghasilkan inhibisi yang maksimal. Natrium fosfat juga dikenal sebagai inhibitor pasivator untuk air pendingin. Karena kondisi air kondensat tidak jauh berbeda dengan air pendingin, maka diharapkan natrium fosfat juga akan mampu menginhibisi korosi pada jalur kondensat.

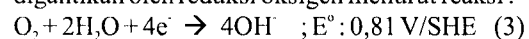
Dengan pertimbangan bahwa natrium fosfat mampu menginhibisi korosi baik pada boiler maupun pada jalur kondensat, maka penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh kontaminan CuCl_2 terhadap korosi baja dalam air kondensat, dan efektivitas inhibisi korosi DSP dan TSP.

2. Fundamental

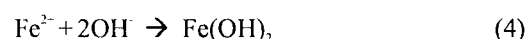
Dalam lingkungan akuatik netral, korosi baja dapat dituliskan sebagai rangkaian reaksi-reaksi berikut (Jones, 1992):



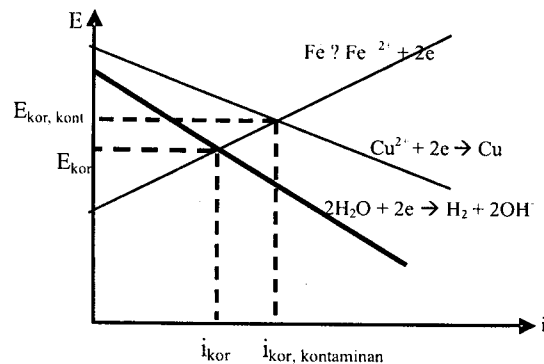
Jika ada oksigen terlarut, maka reaksi kedua akan digantikan oleh reduksi oksigen menurut reaksi:



Kedua proses korosi tersebut menghasilkan $\text{Fe}(\text{OH})_2$ menurut reaksi:

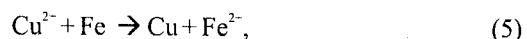


Produk reaksi tersebut merupakan salah satu komponen lapisan pasif yang dapat melindungi baja dari serangan korosi oleh lingkungan agresif.



Gambar 1 Grafik arus ternap overpotensial

Ion Cu^{2+} dalam larutan akuatik dapat mengoksidasi besi (Fe) menurut reaksi



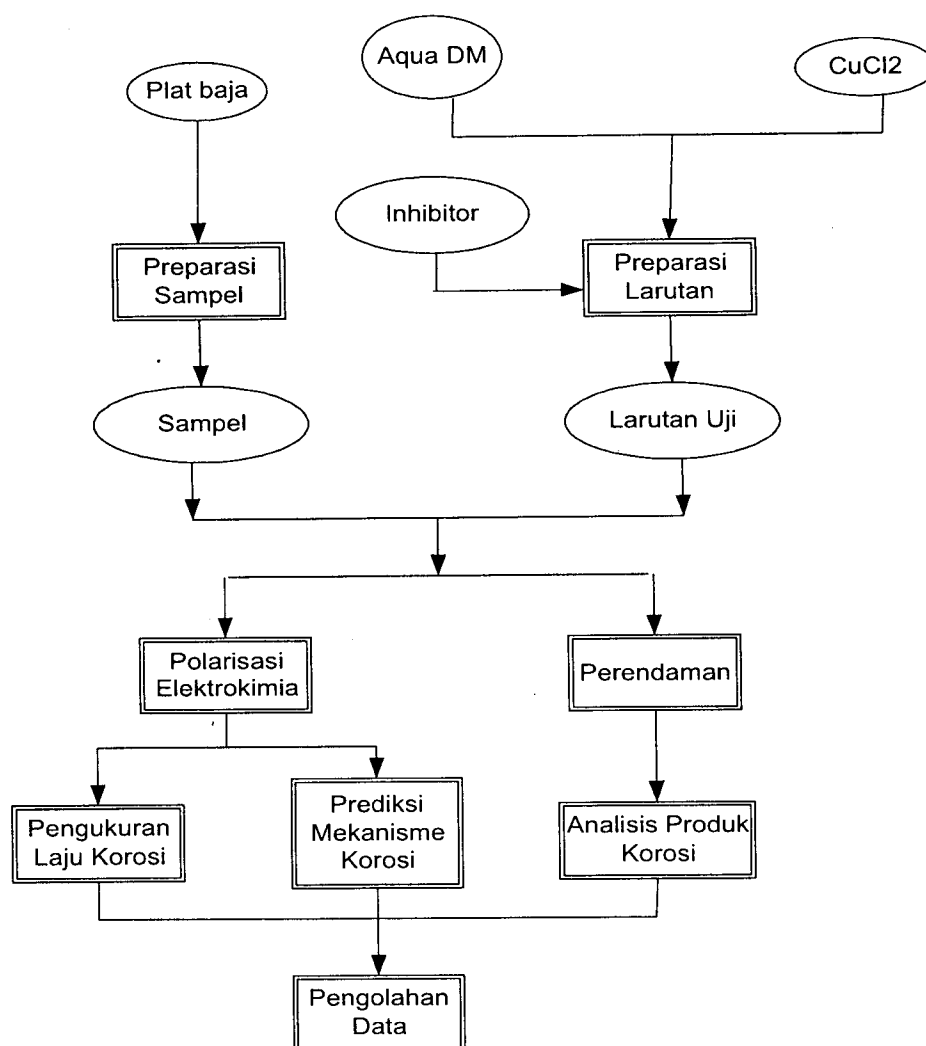
karena potensial kesetimbangan tembaga ($E^\circ_{\text{Cu}} : 0,34 \text{ V/SHE}$) lebih tinggi daripada potensial kesetimbangan besi ($E^\circ_{\text{Fe}} : -0,44 \text{ V/SHE}$). Peningkatan laju korosi baja oleh ion Cu^{2+} dapat digambarkan dalam diagram $E - \log i$ seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Natrium fosfat menghambat korosi dengan membentuk lapisan pasif (inhibitor pasivator). Selain itu, natrium fosfat juga berfungsi untuk mencegah terbentuknya kerak dengan cara bereaksi dengan zat yang menyebabkan kesadahan (Ca^{2+} , Mg^{2+}) dalam air dan membentuk senyawa kompleks $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]_3\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang dikenal sebagai *hydroxyapatite*, zat yang tersuspensi, serta menjaga pH sistem pada rentang pH yang dapat meminimalkan terjadinya korosi (Betz, 1991).

Penambahan natrium fosfat dapat mencegah terjadinya *caustic corrosion* pada boiler, dengan membentuk film pelindung besi-fosfat. Nisbah $\text{Na}^+/\text{PO}_4^{3-}$ yang disarankan untuk pengendalian korosi boiler adalah 2,2 - 3,0 (Betz, 1991). Tetapi senyawa ortofosfat kurang efektif digunakan sebagai inhibitor pada air demineralisasi karena tidak mengandung ion logam bivalen seperti Ca^{2+} atau Zn^{2+} yang digunakan pada pembentukan film protektif (Kurita, 1985).

3. Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahap percobaan yang meliputi penyiapan spesimen, penyiapan medium, pengukuran laju korosi, prediksi mekanisme korosi, perhitungan efisiensi inhibisi, seperti ditunjukkan pada diagram alir percobaan Gambar 2.



Gambar 2 Diagram alir percobaan

Spesimen yang digunakan adalah pelat baja karbon rendah tipe AISI 1010 (komposisi kimia dapat dilihat pada tabel 1) berukuran 1 x 1 cm dengan ketebalan 2 mm. Untuk memperoleh permukaan spesimen yang seragam, semua spesimen dipoles dengan kertas abrasif hingga grit 1200.

Tabel 1. Komposisi Spesimen Baja Karbon Rendah

Unsur	% Berat
C	0,130
Si	0,078
P	0,018
S	0,006
Mn	0,321
Cu	0,414
Fe	balance

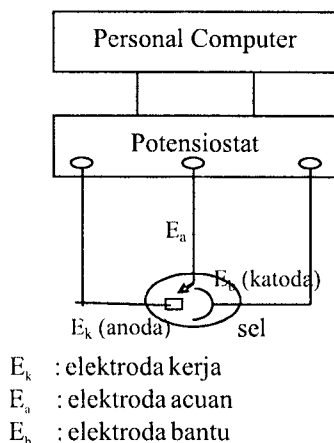
Air kondensat adalah kukus (*steam*) yang telah terkondensasi dalam penggunaan maupun dalam kondensor. Steam berasal dari air boiler yang dipanaskan pada temperatur dan tekanan tinggi di dalam sistem boiler. Sedangkan air boiler adalah air demineralisasi dan deaerasi yang telah ditambah inhibitor. Dengan demikian air kondensat yang tidak terkontaminasi dapat diwakili dengan air demineralisasi. Kandungan oksigen terlarut dalam air demineralisasi dapat dianggap sama dengan oksigen yang terserap selama pemanfaatan dan pengembunan kukus.

Percobaan dilakukan pada kondisi ruangan yaitu pada temperatur 24-28 °C dan tekanan 698-700 mmHg, dengan menggunakan variabel kontaminan CuCl₂ sebesar 10 mg/L dan nisbah konsentrasi inhibitor DSP : TSP yang ditambahkan, seperti tertera pada Tabel 2.

Tabel 2 Variasi Penambahan Inhibitor ke Dalam Larutan CuCl₂

Larutan	DSP (mg/L)	TSP (mg/L)
Air kondensat	-	-
CuCl ₂ (10mg/L)	-	-
	100	-
	-	100
	20	80
	35	65
	50	50
	65	35
	80	20

Skema rangkaian alat yang digunakan dalam percobaan pengukuran laju korosi baja dalam air kondensat mengandung CuCl₂ dan natrium fosfat ditampilkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Skema Rangkaian Alat Percobaan

Pengukuran laju korosi dilakukan secara elektrokimia menurut metoda Tafel (Jones, 1992), sedangkan prediksi mekanisme inhibisi korosi dilakukan dengan metoda voltametri siklik (Bard, 2001). Kedua metoda dilaksanakan dengan bantuan potensiostat yang terhubung dengan komputer pribadi yang menghasilkan aluran arus I terhadap potensial E.

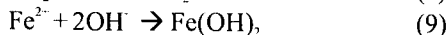
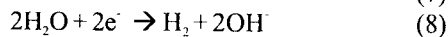
Selanjutnya laju korosi dihitung berdasarkan rumus Faraday:

$$r = \frac{i_{cor}}{nF} \quad (6)$$

Dari puncak-puncak pada aluran I terhadap E (voltamogram) dapat diketahui reversibilitas reaksi, jumlah tahapan reaksi, dan kestabilan produk reaksi. Komposisi produk korosi dianalisis menggunakan spektrometri difraksi sinar X (XRD/X-Ray Diffraction).

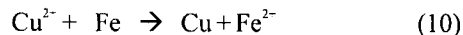
4. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran menggunakan metoda Tafel pada baja dalam air kondensat tiruan menghasilkan laju korosi sebesar 1.843.10⁻⁶ mpy dan potensial sebesar -0.592V/SCE. Berdasarkan diagram Pourbaix, pada potensial tersebut besi berada dalam daerah kestabilan Fe(OH)₂ yang merupakan salah satu komponen lapisan pasif. Dengan demikian, diperkirakan bahwa baja terkorosi dalam air kondensat mengikuti reaksi sebagai berikut.



Lapisan pasif adalah lapisan pelindung yang menempel di permukaan logam dan terdiri dari senyawa-senyawa produk korosi. Lapisan pasif melindungi logam dari serangan korosi dengan cara menghalangi kontak antara logam dengan lingkungan korosif. Pasivasi baja dalam air kondensat juga ditunjukkan pada kurva E – log i (Gambar 4) sebagai bagian kurva dengan rapat arus yang sangat kecil dan ± konstan dengan kenaikan potensial.

Penambahan CuCl₂ sebanyak 10 mg/L dapat meningkatkan laju korosi baja menjadi 0,058 mm/tahun seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Hal ini disebabkan karena ion Cu²⁺ dapat mengoksidasi Fe menurut reaksi



Potensial korosi yang terukur dengan alat potensiostat menunjukkan peningkatan dari -0,596 V untuk korosi baja dalam air kondensat tiruan, menjadi -0,523 V untuk korosi baja dalam air kondensat terkontaminasi CuCl₂. Hal ini sesuai dengan Gambar 1 dimana potensial korosi yang ditimbulkan oleh Cu²⁺ lebih tinggi dibandingkan dengan potensial korosi oleh air (H₂O).

Hasil pengukuran laju korosi baja dalam air kondensat mengandung CuCl₂ dengan penambahan DSP-TSP ditampilkan pada Tabel 3 berikut.

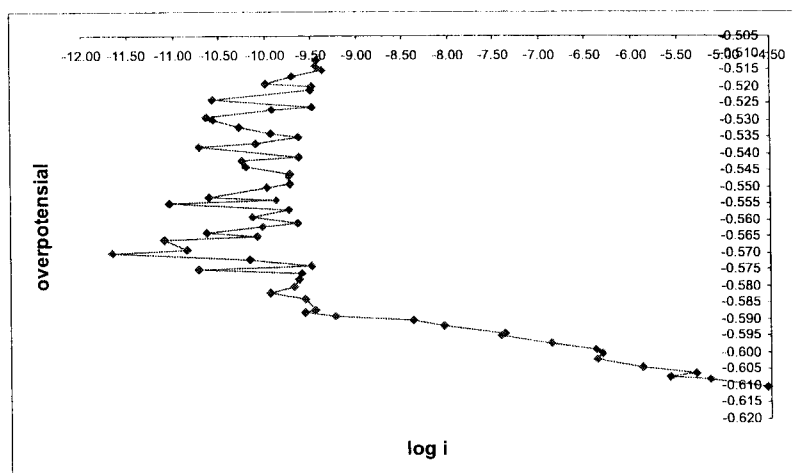
Tabel 3. Data Laju Korosi Baja dalam Air Kondensat Tiruan Terkontaminasi CuCl₂

DSP (ppm)	TSP (ppm)	laju korosi (mm/thn)	Efisiensi inhibisi (%)
0	0	0.058	0.00
100	0	-0.096	-9.648
80	20	0.041	29.21
65	35	0.029	49.88
50	50	0.007	87.41
35	65	0.005	90.45
20	80	0.046	20.57
0	100	0.114	-94.984

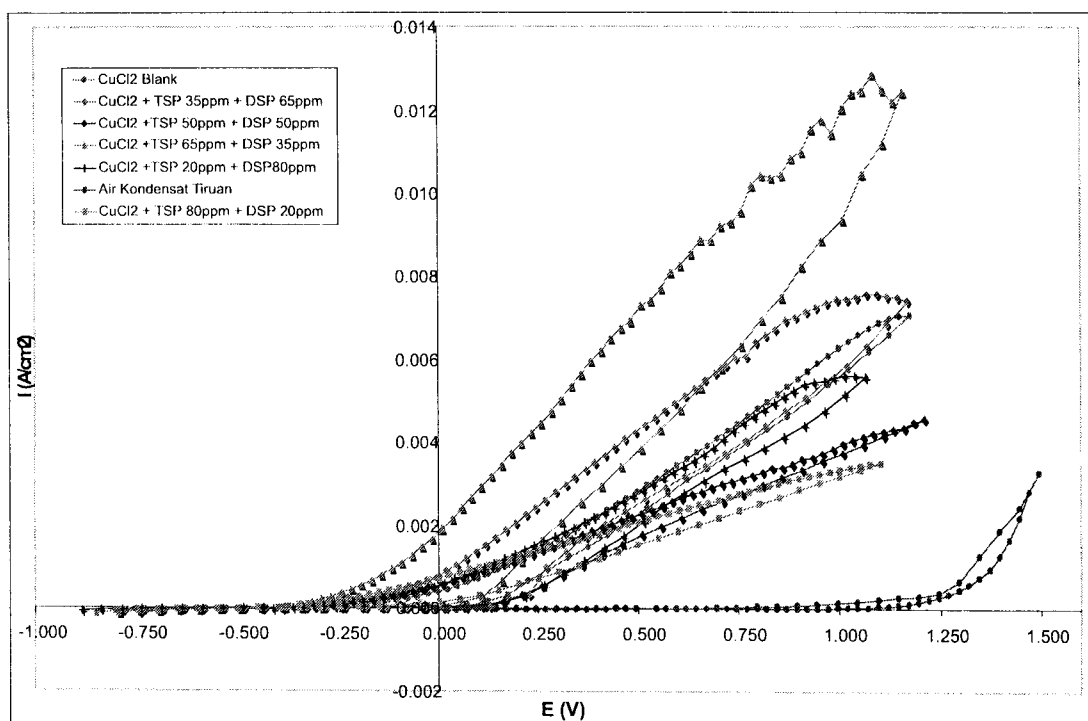
Pada penambahan kombinasi DSP-TSP, terdapat kecenderungan peningkatan keefektifan inhibisi korosi seiring dengan peningkatan konsentrasi TSP hingga nisbah DSP:TSP 35:65, penambahan selanjutnya justru menurunkan keefektifan inhibitor. Keefektifan inhibisi tertinggi didapat pada nisbah DSP-TSP 35:65 yaitu sebesar 90,45%, dengan laju korosi 0.0055 mm/tahun. Penambahan TSP sebanyak 100 ppm tanpa DSP ternyata meningkatkan laju korosi baja dalam air kondensat mengandung CuCl_2 . Hal ini dapat dijelaskan dengan teori Kurita bahwa pembentukan film protektif besi-fosfat

membutuhkan ion logam bivalen, termasuk Cu^{2+} (Kurita, 1985). Namun Cu^{2+} juga dapat mengoksidasi Fe, sehingga mempercepat korosi baja. Penambahan TSP dengan konsentrasi lebih besar dari 65 ppm cenderung meningkatkan laju korosi karena menghasilkan nisbah Na^+/PO_4 dalam larutan yang lebih besar dari nilai optimum untuk menghasilkan lapisan pasif pelindung (Betz, 1991).

Hasil pemindaian potensial melalui percoba-an voltametri siklik untuk reaksi dalam air kondensat tiruan terkontaminasi CuCl_2 ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Kurva Logaritma Rapat Arus Terhadap Overpotensial Baja dalam Air Kondensat Tiruan



Gambar 5 Voltammogram Reaksi Air Kondensat Terkontaminasi CuCl_2

Pada Gambar 5, terlihat bahwa voltammogram untuk masing-masing sistem hanya mempunyai satu puncak, di sisi anodik. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa korosi baja dalam air kondensat mengandung CuCl_2 dengan dan tanpa inhibitor, merupakan reaksi oksidasi yang berlangsung hanya dalam satu tahap. Reaksi oksidasi yang mungkin berlangsung adalah besi (Fe) menjadi ion besi (II) (Fe^{2+}).

Voltammogram korosi baja dalam larutan yang ditambah inhibitor campuran TSP dan DSP dengan nisbah TSP:DSP sebesar 65:35 membentuk histeresis dengan arus pada *scanning* balik yang lebih besar dibandingkan dengan arus *scanning* maju pada potensial yang sama. Fenomena ini menggambarkan laju reaksi pada saat *scanning* balik lebih besar daripada saat *scanning* maju, sebagai akibat dari penambahan luas permukaan aktif karena rusaknya lapisan pasif. Hasil berbeda diperoleh dari air kondensat tiruan yang menghasilkan kurva tanpa histeresis dengan nilai arus maju sama dengan arus balik. Hal ini menyatakan bahwa kondisi permukaan baja dalam air kondensat tiruan tidak berubah dari saat pemindaian maju hingga pemindaian balik, berarti lapisan pasif yang terbentuk sempurna dan tidak rusak dengan kenaikan potensial.

Berdasarkan kriteria reversibilitas reaksi, maka oksidasi $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ adalah reaksi irreversibel, karena beda potensial puncak anodik-katodik (ΔE_p) memberikan nilai yang sangat besar, jauh lebih besar dari kriteria reversibilitas sebesar 59/n mV. Selain itu, produk hasil korosi tidak stabil, karena harga i_{pa}/i_{pc} yang mendekati tak hingga, terlalu jauh dari kriteria kestabilan produk $i_{pa}/i_{pc} = 1$.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan, dapat disimpulkan bahwa kontaminan CuCl_2 meningkatkan laju korosi baja dalam air kondensat. Kombinasi DSP-TSP efektif sebagai inhibitor korosi baja dalam air kondensat terkontaminasi CuCl_2 dengan keefektifan tertinggi didapat pada nisbah DSP/TSP 35:65.

Secara umum, reaksi korosi baja dalam air kondensat tiruan terkontaminasi CuCl_2 merupakan reaksi oksidasi besi (Fe) menjadi besi (II) yang irreversibel dan berlangsung dalam satu tahap reaksi.

Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada LPPM ITB yang telah membantu pembiayaan penelitian ini melalui program Dana Riset ITB tahun 2005.

Daftar Notasi

E [Volt]	: Potensial elektroda
E° [Volt]	: Potensial elektroda standar
E_{pa} [Volt]	: Potensial puncak anodik
E_{pc} [Volt]	: Potensial puncak katodik
ΔE_p [Volt]	: Jarak antar potensial puncak
I [Ampere]	: Kuat arus
i [Ampere/cm ²]	: Rapat arus
i_{cor} [Ampere/cm ²]	: Rapat arus korosi
i_{pa} [Ampere/cm ²]	: Rapat arus puncak anodik
i_{pc} [Ampere/cm ²]	: Rapat arus puncak katodik

Daftar Pustaka

- [1]. Bard, A.J., Faulkner, L.R., (2001), "Electrochemical Methods, Fundamental and Application", 2nd edition, John Wiley and Sons, hal 254 - 263
- [2]. Betz Laboratories, (1991), "Betz Handbook of Industrial Water Conditioning", Betz Laboratories, Inc, hal 82 - 83
- [3]. Iwata, Osamu, et al., (1985), "Kurita Handbook of Water Treatment", Kurita Water Industries Ltd, hal 70 - 80
- [4]. Jones, D.A., (1992), "Principle and Prevention of Corrosion", MacMillan Publishing Co, hal 79 - 97
- [5]. Nathan, C.C. (editor), (1994), "Corrosion Inhibitors", National Association of Corrosion Engineers (NACE), hal 7 - 27
- [6]. Sutanto, M.I., Marzuki, I., (2005), "Inhibisi Korosi Baja Dalam Air Kondensat Terkontaminasi Menggunakan Natrium Fosfat", Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung.