

PENGARUH LAJU ALIR LARUTAN ASAM SITRAT TERHADAP KOROSI ALUMINIUM

THE EFFECT OF CITRIC ACID FLOWRATE ON ALUMINUM CORROSION

Isdiriyani Nurdin*, Pramujo Widiatmoko, Hary Devianto,
Ferdyan Ihza Akbar, Tiara Calista Shandy

Program Studi Teknik Kimia - Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
Bandung 40132, Indonesia

*Email: isdi@che.itb.ac.id

Diterima: 14 Agustus 2018

Direvisi: 24 September 2018

Disetujui: 2 Oktober 2018

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku korosi aluminium dalam larutan asam sitrat pada kondisi fluida dinamis. Pengujian laju korosi dilakukan dengan menggunakan *Rotating Disk Electrode* (RDE) dan potensiostat. Konsentrasi asam sitrat divariasikan 2%, 3,5% dan 5%–w/v pada rejim aliran transisi dan turbulen. Hasil penelitian menunjukkan laju korosi aluminium yang ganas, dalam rentang 2,12–24,86 mm/tahun. Konsentrasi asam sitrat 5%–w/v memberikan laju korosi aluminium yang lebih rendah akibat pembentukan lapisan pasif. Reaksi korosi yang terjadi bersifat *irreversible* satu tahap dengan produk korosi berupa Al_2O_3 yang tidak stabil.

Kata kunci: korosi parah, asam sitrat, fluida dinamis, *rotating disk electrode*

ABSTRACT

Corrosion behaviour of alumina in a citric acid solution has been investigated under a dynamic condition of fluid. The corrosion test was conducted using the Rotating Disk Electrode and potentiostat. The citric acid concentration were 2, 3.5 and 5% w/v. The corrosion rates were found to be severe, within the rate of 2.12 – 24.86 mm/year. The corrosion rate under the citric acid concentration of 5% was found lowest due to the formation of passive layer. The corrosion was of a one step irreversible reaction, and the corossion product of Al_2O_3 was unstable.

Keywords: *severe corrosion, citric acid, dynamic corrosion, rotating disk electrode*

PENDAHULUAN

Aluminium banyak digunakan pada peralatan industri maupun kemasan pangan karena sifatnya yang ringan, relatif murah, dan kuat. Aluminium murni memiliki *tensile strength* 34 MPa dan *yield strength* 90 MPa [1]. Garam aluminium tidak merusak lingkungan dan tidak beracun [2] sehingga dapat digunakan sebagai material kemasan makanan. Selain itu, aluminium juga memiliki konduktivitas panas tinggi yaitu $247 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [1] sehingga cocok digunakan sebagai bahan konstruksi peralatan proses pengolahan bahan pangan. Namun, kontak antara aluminium dengan fluida proses atau bahan pangan berpotensi menimbulkan korosi.

Asam sitrat banyak digunakan di dalam produk minuman rasa buah. Selain itu, asam sitrat juga difungsikan sebagai bahan pengawet, anti-oksidan, penstabil, dan agen *chelating* pada produk-produk makanan. Di dalam larutan asam sitrat 5%–w/w, korosi aluminium akan mengakibatkan pengurangan ketebalan aluminium sekitar 10 μm /tahun pada temperatur ruang dan 0,1 mm/tahun pada temperatur 50°C [3]. Laju korosi dipengaruhi oleh tingkat keasaman fluida, oksigen terlarut, temperatur, lama waktu kontak, dan cara kontak fluida proses. Fluida dapat berkontak dengan aluminium pada kondisi diam (statik) atau bergerak (dinamis). Penelitian terkait ketahanan korosi aluminium di dalam larutan asam sitrat pada kondisi diam telah banyak dilakukan

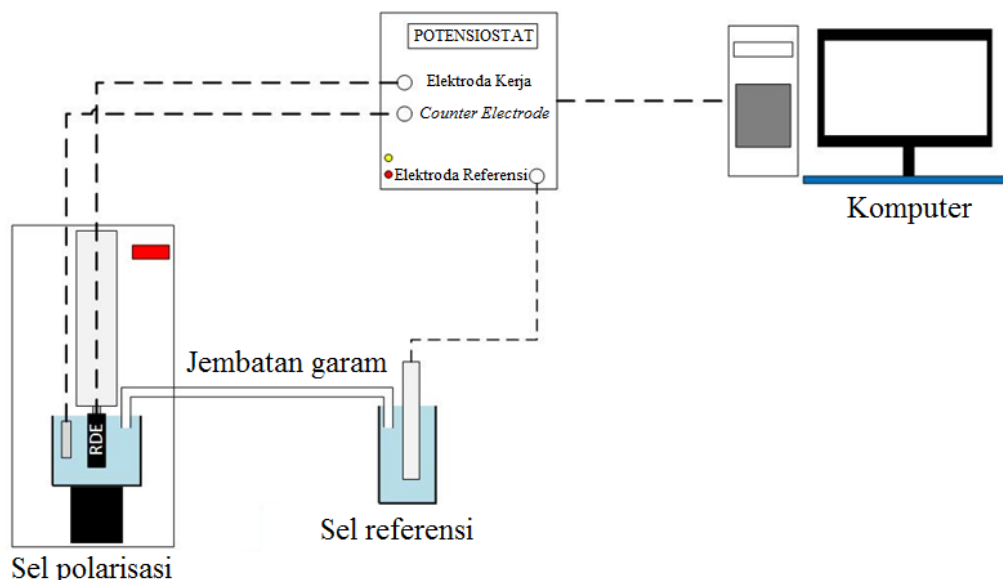
[4,5,6,7]. Sementara itu, data kuantitatif mengenai ketahanan korosi aluminium di dalam aliran asam sitrat masih terbatas. Sejauh ini, hanya Seruga, dan Hasenay [4] yang menunjukkan hasil uji korosi menggunakan *Rotating Disk Electrode* (RDE) di larutan asam sitrat. Fluida bergerak akan menipiskan lapisan difusi Nernst sehingga transfer massa ion-ion yang terlibat aktif dalam korosi meningkat. Rapat arus limit korosi meningkat seiring peningkatan turbulensi fluida. Oleh karena itu, tingkat korosi diprediksi meningkat bila dibandingkan operasi pada kondisi statik. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini ditujukan untuk menentukan karakteristik dan laju korosi aluminium di dalam larutan asam sitrat pada kondisi fluida bergerak. Percobaan dilakukan dengan menggunakan *Rotating Disk Electrode* (RDE) dengan variasi kecepatan aliran dan konsentrasi asam sitrat. Penelitian ini bertujuan untuk memberi pertimbangan pada pemilihan aluminium sebagai bahan konstruksi peralatan proses atau kemasan bahan pangan yang berkontak dengan asam sitrat.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilakukan dengan menggunakan logam aluminium seri 6000 (Al-Mg-Si) [8]. Spesimen uji disiapkan dari batang aluminium tersebut dengan diameter 3 mm. Pengukuran laju

korosi dilakukan menggunakan sistem *Rotating Disc Electrode* (BASi RDE-2) yang terhubung ke Potensiostat (*Gamry 3000*). Laju putar *Rotating Disc Electrode* (RDE) divariasikan 400, 900 dan 2000 rpm. Konsentrasi asam sitrat divariasikan 2, 3,5 dan 5 %- (massa/volume). *Saturated Calomel Electrode* (SCE) digunakan sebagai sel referensi, terhubung dengan jembatan garam berisi KCl jenuh dalam agar-agar. Kawat Pt-Ir dengan diameter 8 mm digunakan sebagai elektroda bantu. Percobaan dilakukan di Teknik Kimia, ITB, Bandung dengan kondisi tekanan ruang 700 mmHg dan temperatur berkisar antara 22 – 28°C. Rangkaian alat yang digunakan disajikan pada Gambar 1.

Analisis produk korosi dilakukan melalui percobaan perendaman pelat aluminium berukuran 2 cm x 3 cm x 0,2 cm dalam larutan asam sitrat 5%- (massa/volume) selama tujuh hari. Setelah perendaman, pelat aluminium dibilas dengan *aqua d.m.*, kemudian dengan etanol teknis untuk membersihkan pengotor. Sampel aluminium dan produk korosi yang telah dikeringkan kemudian dianalisis menggunakan XRD. Analisis morfologi logam terkorosi dilakukan menggunakan SEM. Mekanisme korosi dipelajari dari hasil *voltammogram* siklik dan analisis produk korosi.



Gambar 1. Rangkaian Alat Percobaan

Arus limit dan laju korosi diamati berdasarkan kurva polarisasi aluminium dalam larutan asam sitrat dengan RDE. Variasi laju putar RDE 400, 900 dan 2000 rpm mewakili rejim aliran transisi dan turbulen. Rejim laminar tidak diamati karena RDE tidak stabil pada laju putaran yang rendah. Laju korosi maksimum pada masing-masing variasi kecepatan dihitung berdasarkan nilai arus limit terukur mengikuti persamaan (1).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Arus Limit dan Laju Korosi

Laju korosi ditentukan oleh tiga tahap perpindahan yaitu perpindahan massa spesi aktif, adsorpsi spesi aktif ke permukaan elektroda (katoda atau anoda), dan perpindahan muatan di elektroda. Perpindahan massa spesi-aktif dapat terjadi melalui difusi maupun konveksi. Jika perpindahan massa lebih cepat daripada perpindahan muatan, laju korosi akan terkendali oleh perpindahan muatan. Dengan mengasumsikan terjadi korosi merata di permukaan logam, maka laju korosi (r) yang terkendali oleh perpindahan muatan akan sebanding dengan rapat arus (i), sesuai dengan persamaan (1) [9].

$$r = \frac{m}{t.A} = \frac{i.Mr}{n.F} \quad (1)$$

dengan:

- r = laju reaksi korosi, mm/y
- m = perubahan massa spesi akibat korosi, g
- i = rapat arus, A/cm²
- t = waktu reaksi, s
- Mr = berat atom spesi yang bereaksi
- A = luas permukaan elektroda, m²
- n = jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi
- F = konstanta Faraday, 96.500 Coulomb/mol

Jika perpindahan elektron (muatan) lebih cepat daripada perpindahan massa, tahap penentu laju reaksi korosi adalah laju perpindahan massa. Laju perpindahan massa dari fasa ruah ke permukaan elektroda atau sebaliknya dipengaruhi oleh difusi maupun konveksi spesi aktif. Pada kondisi fluida statik, peristiwa difusi lebih dominan. Laju difusi (J) dipengaruhi oleh difusivitas spesi aktif dalam larutan (D) dan gradien konsentrasi di daerah lapisan difusi

Nernst ($\partial C/\partial x$), dinyatakan dengan hukum Ficks seperti disajikan pada persamaan (2).

$$J = -D.(\partial C/\partial x) \quad (2)$$

Laju difusi maksimum akan tercapai pada saat gradien konsentrasi maksimum, yaitu ketika spesi aktif di permukaan logam selalu habis terkonversi oleh reaksi. Peningkatan laju reaksi korosi terbatas oleh perpindahan spesi aktif dari larutan ruah ke permukaan elektroda. Pada umumnya, spesi aktif yang lebih lambat perpindahannya dalam reaksi korosi adalah oksigen di sisi katoda. Oleh karena itu, laju reaksi korosi sebanding dengan arus limit sisi katodik, seperti disajikan dalam persamaan (3) dan Persamaan (4) [10].

$$i_c = i_L = -n.F.D. \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{\max} = -n.F.D. \frac{C_B - C_s (=0)}{\delta} \quad (3)$$

$$i_L = \frac{-n.F.D.C_B}{\delta} \quad (4)$$

dengan:

- i_c = rapat arus katodik
- i_L = rapat arus limit, A/m²
- n = jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi
- F = konstanta Faraday, 96.500 Coulomb/mol
- D = koefisien difusi, m²/s
- δ = tebal lapisan difusi Nernst, mm
- C_B = konsentrasi spesi dalam fasa curah (*bulk*), mol/L
- C_s = konsentrasi spesi pada permukaan elektroda, mol/L

Pada kondisi dinamik, pengadukan atau pengaliran fluida kerja menyebabkan konveksi spesi aktif. Konveksi tersebut menipiskan lapisan difusi Nernst (δ) sehingga rapat arus limit sekaligus laju korosi meningkat.

Arus limit ditentukan dengan mengukur kurva polarisasi katodik dengan variasi konsentrasi asam sitrat. Berdasarkan hasil percobaan, polarisasi katodik aluminium di dalam larutan asam sitrat 2% tidak terbentuk arus limit dalam rentang laju putar RDE yang diuji. Hal ini mengindikasikan bahwa laju korosi pada kondisi tersebut terkendali oleh perpindahan muatan.

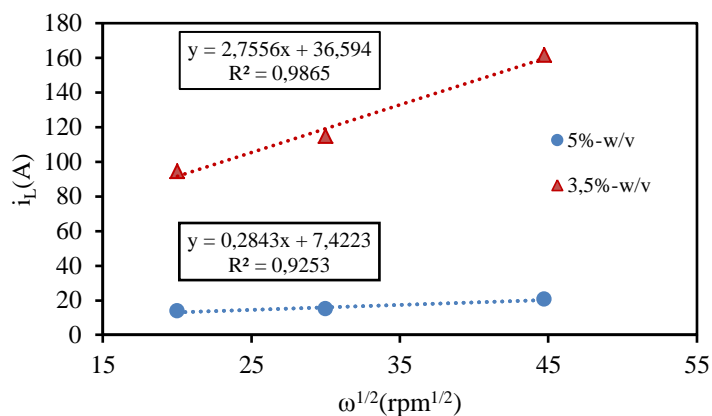
Pada konsentrasi asam sitrat 3,5%, peningkatan kecepatan putar menyebabkan peningkatan arus limit (lihat Gambar 2). Hal ini mengindikasikan penipisan lapisan difusi Nernst. Spesi korosif H⁺ akan lebih mudah mencapai permukaan logam dengan menipisnya lapisan tersebut. Namun, ketika konsentrasi larutan asam sitrat ditingkatkan menjadi 5%, pengaruh kecepatan putar menjadi kurang berarti. Penurunan nilai arus limit pada larutan 5% bila dibandingkan larutan 3% mengindikasikan terbentuknya lapisan pasif. Konsentrasi asam sitrat yang lebih tinggi meningkatkan laju pembentukan lapisan tersebut. Pembentukan lapisan pasif mengurangi luas kontak logam dengan larutan sehingga membatasi transfer massa spesi aktif. Dengan keterbatasan kontak tersebut, penipisan lapisan difusi Nernst tidak berpengaruh berarti pada peningkatan laju korosi.

Arus perpindahan massa pada RDE dengan permukaan elektroda yang halus dapat dimodelkan dengan persamaan Levich yang disajikan dalam persamaan (5) [8]. Persamaan empiris tersebut menggambarkan hubungan arus limit dengan laju putar RDE, yang berpengaruh pada konsentrasi dan tebal lapisan difusi Nernst seperti disajikan sebelumnya pada persamaan (4).

$$i_L = 0,62 n F A D^{2/3} \nu^{1/6} \omega^{1/2} C_0 \tag{5}$$

dengan:

- D = koefisien difusi (cm²/s)
- ν = viskositas kinematik (cm²/s)
- A = luas permukaan elektroda (cm²)
- C_0 = konsentrasi spesi aktif (mol/cm³)
- ω = laju putar sudut (rad/s)



Gambar 2. Pengaruh Laju Putar Sudut *Rotating Disk Electrode* terhadap Arus Limit

Hubungan linier antara kuat arus limit (i_L) dengan akar kecepatan putar $\omega^{1/2}$ dapat dilihat pada persamaan di Gambar 2. Pada kondisi tanpa putaran ($\omega = 0$), hasil percobaan menunjukkan nilai intersep berturut-turut 7,4 dan 36,6 untuk larutan 3,5% dan 5%. Intersep tersebut merupakan suku matematis dari kendali perpindahan muatan [11]. Adanya nilai intersep juga menunjukkan perpindahan massa yang terjadi berlangsung cepat sehingga mampu menjaga konsentrasi di permukaan elektroda selalu mendekati konsentrasi di fasa curah [8]. Kondisi tersebut menunjukkan pengaruh perpindahan muatan masih berarti. Hal ini juga diperkuat dengan bukti pengukuran laju korosi aluminium di dalam larutan asam sitrat 2%-w/v yang tidak diperoleh arus limit. Koutecky–Levich

merangkum pengaruh perpindahan massa dan muatan tersebut dalam persamaan (6). Dengan memasukkan persamaan Levich sebagai suku perpindahan massa, persamaan tersebut menjadi persamaan (7) [8].

$$\frac{1}{i_M} = \frac{1}{i_K} + \frac{1}{i_{MT}} \tag{6}$$

$$\frac{1}{i_M} = \frac{1}{i_K} + \frac{1}{B_L \omega^{0,5}} \tag{7}$$

dengan:

- i_M = arus terukur (A)
- i_K = arus kinetik dari reaksi elektrokimia (A)
- i_{MT} = arus perpindahan massa (A)
- B_L = suku konstan dari persamaan Levich

Hasil serupa dilaporkan oleh [4] namun dengan laju putaran sudut RDE yang lebih rendah ($\omega^{1/2}$ hingga 17). Kenaikan pH mula-mula menurunkan laju korosi kemudian naik kembali di pH tinggi. Berdasarkan termodinamika dari diagram Pourbaix untuk aluminium, lapisan pasif Al_2O_3 ataupun $Al(OH)_3$ akan stabil pada rentang pH 4 – 9.

Pembentukan lapisan pasif diindikasikan dengan penurunan nilai laju korosi aluminium yang signifikan dalam larutan asam sitrat 5%-w/v dibandingkan dalam larutan 3,5% (lihat Tabel 1). Pasivasi terbentuk dari produk korosi Al_2O_3 yang menempel dengan baik di permukaan aluminium (dari kestabilan produk korosi yang mendekati 1 di Tabel 2). Peningkatan konsentrasi spesi katodik menyebabkan pergeseran kurva polarisasi reaksi setengah sel katodik ke kanan (lihat Gambar 6). Potensial korosi aluminium di

dalam larutan asam sitrat 3,5% berada pada daerah aktif, sementara di dalam larutan 5% bergeser ke daerah pasif.

Hasil pengukuran laju korosi menggunakan *RDE Potensiostat* menunjukkan bahwa nilai laju korosi untuk seluruh variasi yang diuji tergolong korosi ganas karena lebih dari 0,25 mm/tahun (NACE, 1984). Batasan korosi yang aman menurut *the National Association of Corrosion Engineers* [12] adalah kurang dari 0,0254 mm/tahun. Tingkat korosi yang tinggi tersebut juga berpotensi mengurangi kualitas bahan pangan yang diproses akibat kontaminasi logam aluminium. Sebagai catatan, *World Health Organization* (WHO) memberikan batas toleransi asupan mingguan (Provisional Tolerable Weekly Intake, PTWI) sebesar 2 mg/kg berat badan untuk semua senyawa aluminium dalam bahan makanan.

Tabel 1. Laju Korosi Aluminium di dalam Larutan Asam Sitrat

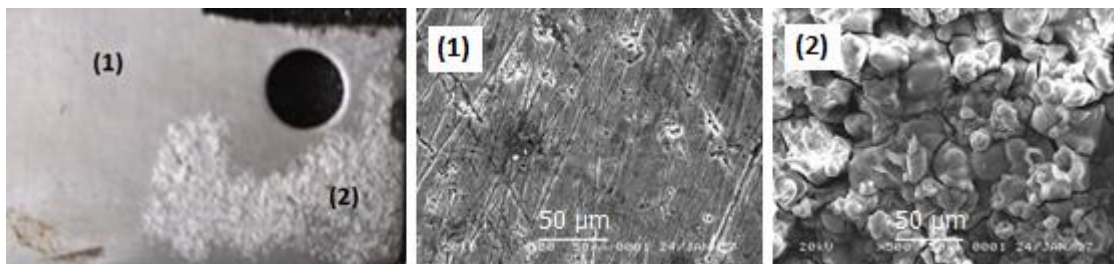
Laju Putar (rpm)	Konsentrasi 3,5%-w/v		Konsentrasi 5%-w/v	
	Arus limit (μA)	Laju Korosi (mm/tahun)	Arus limit (μA)	Laju Korosi (mm/tahun)
2000	161,69	24,86	20,60	3,17
900	114,66	17,63	14,80	2,27
400	94,44	14,52	13,79	2,12

Berdasarkan hal tersebut, paduan aluminium seri 6000 tidak disarankan sebagai material peralatan pemroses bahan pangan yang menangani larutan asam sitrat dalam rejim aliran transisi dan turbulen.

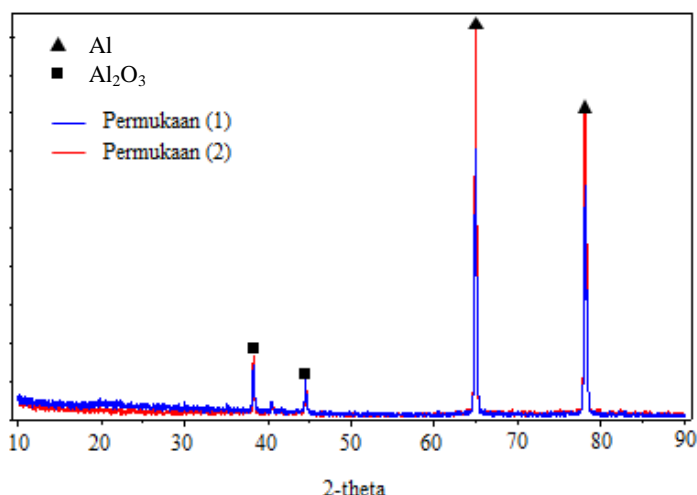
Produk Korosi

Produk korosi hasil perendaman aluminium tujuh hari di dalam larutan asam sitrat

5%-w/v disajikan pada Gambar 3. Difraktogram hasil analisis XRD produk perendaman bagian yang halus (1) dan bagian kasar (2) yang disajikan pada Gambar 4 menunjukkan keberadaan produk korosi berupa aluminium oksida (Al_2O_3).



Gambar 3. Foto dan Hasil SEM Pelat Aluminium Setelah 7 Hari Perendaman dalam Larutan 5%, Pelat dengan Bagian Produk Korosi (1) Halus dan (2) Kasar

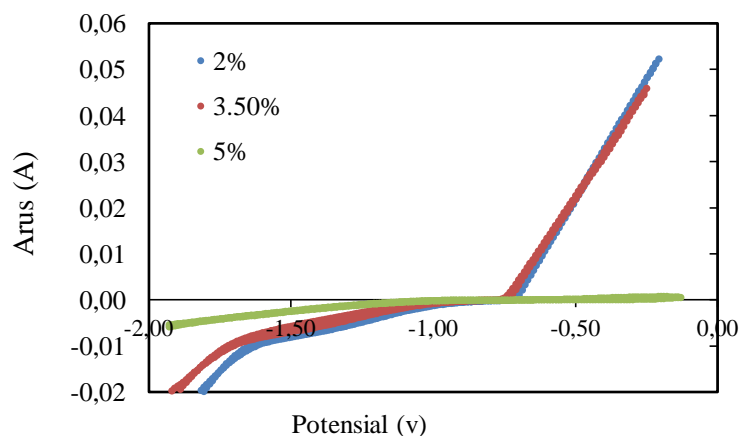


Gambar 4. Difraktogram Analisis XRD Produk Korosi Aluminium dalam Larutan Asam Sitrat 5%-w/v. Permukaan (1) dan Permukaan (2) Merujuk ke Gambar 3.

Hasil analisis SEM juga menunjukkan bahwa permukaan sampel logam aluminium yang telah direndam dengan larutan asam sitrat 5% dipenuhi oleh lapisan Al_2O_3 baik di permukaan halus maupun kasar dengan bentuk yang berbeda (Gambar 3). Secara makroskopis, perbedaan bentuk lapisan tersebut dapat dilihat secara sekilas. Namun, secara mikroskopis, lapisan Al_2O_3 pada permukaan kasar memiliki bentuk yang tidak beraturan. Pembentukan lapisan pasif Al_2O_3 yang tidak sempurna di permukaan logam mengakibatkan korosi sumuran (*pitting*).

Mekanisme Korosi

Mekanisme korosi aluminium dipelajari dari kurva voltammogram di Gambar 5. Reaksi korosi bersifat *reversible* apabila selisih potensial puncak anodik dan katodik ($E_{pa} - E_{pc}$) $\leq 0,118/n \approx 0,039$ volt. Produk korosi dikategorikan stabil apabila nisbah antara arus puncak anodik dan katodik (i_{pa}/i_{pc}) ≈ 1 . Jumlah tahap reaksi ditunjukkan dengan jumlah puncak yang terbentuk.



Gambar 5. Voltammogram aluminium dalam larutan asam sitrat 2; 3,5; dan 5%

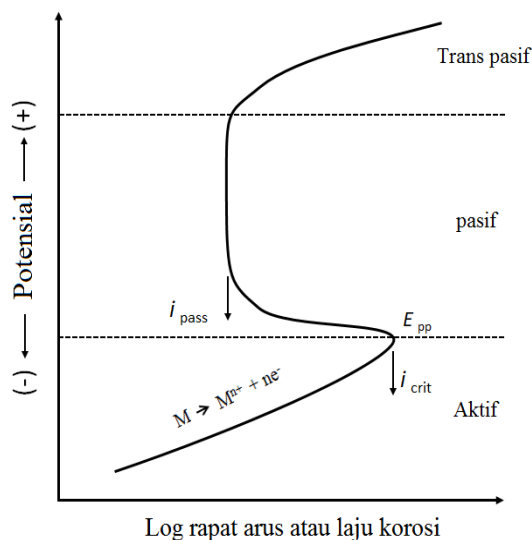
Berdasarkan Gambar 5, voltammogram aluminium dalam larutan asam sitrat 2%-w/v serupa dengan dalam larutan 3,5%, yaitu terdapat kenaikan arus yang tajam pada potensial sekitar $-0,75$ V/SCE. Sementara itu, voltammogram larutan 5% menunjukkan kurva yang relatif landai. Hal ini disebabkan pembentukan lapisan

pasif Al_2O_3 yang lebih intens pada konsentrasi asam sitrat 5% sehingga tidak terjadi peningkatan laju reaksi, yang sebanding dengan peningkatan arus listrik.

Puncak anodik dan katodik dari voltammogram tidak dapat diamati dengan jelas sehingga dianggap memiliki satu puncak

voltammogram untuk masing-masing reaksi katodik dan anodik. Nilai potensial pada puncak didekati dengan melihat potensial pada saat kurva tepat akan berubah arah yaitu naik untuk anodik dan turun untuk katodik. Sementara itu, nilai arus pada puncak didekati dengan melihat nilai arus pada titik potensial 200 mV dari potensial puncak masing-masing kurva (lihat Gambar 5). Hasil analisis selisih potensial dan perbandingan arus antara puncak anodik dan katodik disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan hasil analisis tersebut, reaksi korosi aluminium di dalam larutan asam sitrat merupakan reaksi *irreversible* satu tahap. Produk korosi yang dihasilkan bersifat tidak stabil kecuali pada konsentrasi 5%, ditunjukkan oleh perbandingan i_{pa}/i_{pc} yang mendekati 1 (0,8).

Produk korosi Al_2O_3 yang teridentifikasi dari analisis XRD (Gambar 4) bersifat pasif terhadap korosi. Fenomena pasivasi ini diilustrasikan dalam kurva polarisasi (Gambar 6). Pada potensial rendah, laju korosi meningkat sejalan dengan kenaikan potensial. Namun setelah mencapai potensial pasivasi primer (E_{PP}), laju korosi menurun drastis hingga rapat arus pasivasi (I_{pass}) karena terbentuk lapisan pasif yang menghalangi reaksi korosi. Apabila lapisan pasif tersebut rusak akibat kenaikan potensial, logam kembali terpapar lingkungan korosif dan rawan terkorosi sumuran (*pitting*).



Gambar 6. Kurva Polarisasi pada Reaksi Anodik

Fenomena korosi sumuran ini terlihat dari detail *voltammogram* aluminium di dalam larutan asam sitrat 5%-w/v yang disajikan pada Gambar 7. Terbentuknya histeresis di ujung kurva anodik menunjukkan kenaikan arus listrik pada potensial yang sama. Histeresis yang terjadi menggambarkan fenomena korosi sumuran pada aluminium [13] sebagai akibat pembentukan lapisan pasif yang tidak sempurna. Hasil analisis voltametri siklik juga menunjukkan bahwa produk korosi yang terbentuk bersifat tidak stabil.

Tabel 2. Karakteristik Reaksi dan Produk Korosi Berdasarkan Selisih Potensial dan Perbandingan Arus Antara Puncak Anodik dan Katodik

Konsentrasi Asam Sitrat (%-w/v)	ΔE_p (volt)	i_{pa}/i_{pc} (A)
2	0,1554	4,63
3,5	0,2199	12,45
5	0,5097	0,80

Berdasarkan hasil pengujian mekanisme korosi dengan voltametri siklik maupun analisis produk korosi dengan metode XRD dan SEM, mekanisme korosi aluminium di dalam larutan asam sitrat diduga mengikuti persamaan (8) dan (9).

Reaksi katodik :

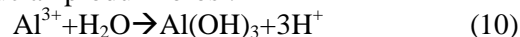


Reaksi anodik :

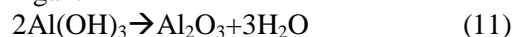


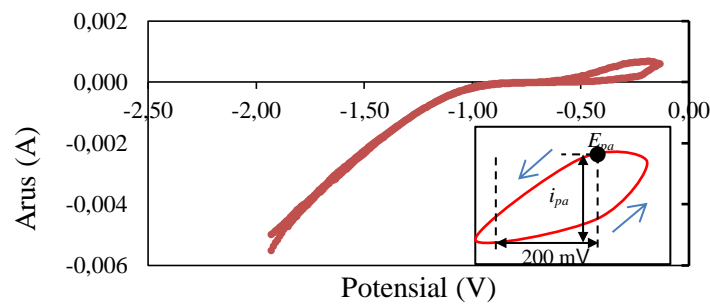
Hasil reaksi anodik ion Al^{3+} membentuk produk korosi $Al(OH)_3$. Ketika logam aluminium yang telah mengalami reaksi korosi dicuci dan dikeringkan, $Al(OH)_3$ mengalami dehidrasi sehingga membentuk lapisan Al_2O_3 , seperti ditunjukkan pada persamaan (10) dan (11).

Pencucian produk korosi:



Pengeringan:





Gambar 7. Voltammogram Pengujian Mekanisme Korosi Aluminium dalam Larutan Asam Sitrat 5% dengan Inset Ilustrasi Penentuan E_{pa} dan I_{pa}

Proses inhibisi korosi akibat pembentukan lapisan pasif juga dipelajari oleh Wysocka, dkk. (2017) pada kondisi fluida diam [14]. Pembentukan lapisan pasif pada aluminium kelas AA5754 akan efektif pada konsentrasi asam sitrat 20 mM. Konsentrasi asam sitrat yang lebih tinggi meningkatkan kembali laju korosi akibat lapisan pasif yang tidak stabil dan korosi sumuran. Sementara itu, [14] melaporkan kenaikan pH menurunkan laju korosi aluminium tipe 6063 di larutan asam sitrat hingga pH 6, sebelum naik kembali dan mencapai maksimum di pH 9 [6]. Berdasarkan Tabel 1, konsentrasi asam sitrat 5% w/v (setara dengan 260 mM) ternyata dapat menurunkan laju korosi aluminium di dalam kondisi fluida bergerak, meskipun belum mencapai nilai yang aman.

KESIMPULAN

Hasil percobaan menunjukkan bahwa aluminium seri 6000 dalam larutan asam sitrat pada rejim aliran transisi dan turbulen mengalami serangan korosi ganas (2,12 – 24,86 mm/tahun). Peningkatan konsentrasi larutan asam sitrat 2% ke 3,5% akan meningkatkan laju korosi. Namun, peningkatan laju korosi akibat kenaikan laju alir menurun signifikan (85,4 – 87,2%) pada larutan 5% karena peningkatan kestabilan produk korosi. Karakteristik korosi yang terjadi adalah *irreversible* satu tahap, baik reaksi anodik maupun katodik, dengan produk korosi Al_2O_3 yang tidak stabil. Berdasarkan hal tersebut, disimpulkan bahwa aluminium seri 6000 tidak cocok untuk menangani asam sitrat hingga konsentrasi 5% pada kondisi rejim aliran transisi dan turbulen. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengetahui tingkat ketahanan korosi aluminium di asam sitrat pada kondisi rejim aliran laminar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Callister, W. D.; Rethwisch, D. G., "Materials Science and Engineering: An Introduction", 9th Ed., Wiley, Hoboken, 2014.
- [2] Ghali, E., "Aluminium and Aluminium Alloys", R. W. Revie, Uhlig's Corrosion Handbook (hal. 715-744). John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2011.
- [3] Craig, B. D., & Anderson, D. B., "Handbook of Corrosion Data". ASM International, United States of America, 2002.
- [4] Seruga, M. and D. Hasenay, "Electrochemical and Surface Properties of Aluminium in Citric Acid Solutions", *Journal of Applied Electrochemistry* 31: 961-967, 2001
- [5] Prasetya, A. Y.; Nurdin, I., "Korosi Aluminium dalam Larutan Asam Sitrat", *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 11, 116-123, 2012.
- [6] Al Mayouf, A., L. Al Juhaiman and A. Suhaybani, "Corrosion of Aluminum in Ascorbic, Citric and Tartaric Acids with and Without Chloride Ions", *Anti-Corrosion Methods and Materials* 79-85, 55/2, 2008.
- [7] Shahidi, M., M.R. Gholamhosseinzadeh, "Electrochemical Evaluation of AA6061 Aluminum Alloy Corrosion in Citric Acid Solution Without and with Chloride Ions", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 757, 8-17, 2015.
- [8] Bard, A. J., & Faulkner, L. R., "Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications", John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.

- [9] Jone, D. A ., "Principle and Prevention of Corrosion", *Prentice-Hall Intenational (UK)*, London, 1996.
- [10] Roberge, P. R., "Handbook of Corrosion Engineering", *Mc Graw Hill, Hightstoon*, 2000.
- [11] Treimer, S., Tang, A., & Johnson, D. C., A "Consideration of the Application of Koutecky-Levich Plots in the Diagnoses of Charge-Transfer Mechanisms at Rotated Disk Electrode", *Wiley-VCH, Ames*, 2001.
- [12] National Centre for Biotechnology Information, "Citric Acid", diunduh 4 Maret 2016, dari Pubchem open Chemistry Database:<http://Pubchem.ncbi.nlm.gov/compound/3//>
- [13] Deyab, M. A., & Keera, S. T., "Cyclic Voltammetric Studies of Carbon Steel Corrosion in Chloride-Formation Water Solution and Effect of Some Inorganic Salts", *Egyptian Journal of Petroleum*, 21, 31-36, 2012.
- [14] Wysocka, J., S. Krakowiak, J. Ryl, "Evaluation of Citric Acid Corrosion Inhibition Efficiency and Passivation Kinetics for Aluminium Alloys in Alkaline Media by Means of Dynamic Impedance Monitoring", *Electrochimica acta*, 258, 1463-1475, 2017.
- [15] Ashurst, P. R., "Chemistry and Technology of Soft Drinks and Fruit Juices", 2nd Ed., *Blackwell Publishing Ltd.*, Great Britain, 2005.
- [16] Solmaz, R. dkk., "Citric Acid as Natural Corrosion Inhibitor for Aluminium Protection", *Maney*, 190, 43, 2007.
- [17] Vargel, C., "Le Comportement De L'aluminium Et De Ses Alliages", *Dunod*, Paris, 1979.

