



Karakteristik Performa *Discharge* Anoda Magnesium Teranodisasi yang Teraktivasi oleh Air Laut

Supriyono ^{1*)}, Luh Putu Maharini Intan Wulaningfitri²⁾, Joshia Christa Pradana²⁾, Indah Feliana²⁾ dan Amelia Nurlita Putri²⁾

¹⁾ Staff Pengajar Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

²⁾ Mahasiswa Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

Jl. MT. Haryono No. 167, Malang, 6541, Telp : (0341) 587710 ext : 1333, Fax: (0341)574140

*) Penulis korespondensi : supriyono16@ub.ac.id

Abstract

Magnesium is a material that can be developed as a battery anode. Anodization is performed on magnesium to expand the surface thus improving the performance of battery discharge in seawater as electrolyte. Anodization was performed in 0.1 M oxalic acid solution with magnesium as anode and graphite as cathode. The electric potential used in the anodization is varied from 1.5 to 6.0 V. After the anodizing stage, magnesium was washed with aquadest then dried in an oven at 105° C to a constant weight. Discharge performance characteristics of magnesium as a battery anode in 3.5% NaCl solution have been studied. The highest potential value ($E_{corr} = -1.74$ V vs Ag / AgCl), the smallest resistance transfer (R_p) value (R_p 1708 Ω) and the greatest conductivity value ($Y_0 = 687$ μ Mho) of the magnesium anode inside Oxalic acid is achieved in magnesium anodized in 0.1 M oxalic acid with voltage of 1.5 V. Discharge performance which includes the highest voltage, current density, capacity, and discharge energy at constant discharge current (0.05 mA) in 3.5% NaCl electrolyte solution was achieved on anodized magnesium in oxalic acid with a voltage of 1.5 V.

Keywords: anodization, battery, discharge, magnesium, sea water

Abstrak

Magnesium merupakan bahan yang dapat dikembangkan sebagai anoda baterai. Anodisasi dilakukan pada magnesium untuk memperluas permukaannya sehingga memperbaiki performa discharge baterai di dalam elektrolit berupa air laut. Anodisasi dilakukan di dalam larutan asam oksalat 0,1 M dengan magnesium sebagai anoda dan grafit sebagai katoda. Potensial listrik yang digunakan pada anodisasi divariasikan dari 1,5 hingga 6,0 V. Setelah tahap anodisasi, magnesium dicuci dengan aquadest kemudian dikeringkan di dalam oven pada suhu 105°C sampai berat konstan. Karakteristik discharge magnesium sebagai anoda baterai di dalam larutan NaCl 3,5% telah dipelajari. Nilai potensial yang paling tinggi ($E_{corr} = -1,74$ V vs Ag/AgCl), nilai charge transfer resistance (R_p) paling kecil ($R_p = 1708$ Ω) dan nilai konduktivitas paling besar ($Y_0 = 687$ μ Mho) dari anoda magnesium di dalam asam oksalat dicapai pada magnesium yang teranodisasi di dalam asam oksalat 0,1 M dengan potensial 1,5 V. Performa discharge yang meliputi potensial, kerapatan arus, kapasitas, dan energi discharge paling besar pada arus discharge konstan (0,05 mA) di dalam larutan elektrolit NaCl 3,50% dicapai pada magnesium yang teranodisasi di dalam asam oksalat dengan potensial 1,5 V.

Kata kunci: air laut, anodisasi, baterai, discharge, magnesium

PENDAHULUAN

Baterai air laut merupakan topik yang sedang hangat dibahas akhir-akhir ini di sejumlah negara berkaitan dengan semakin meningkatnya kebutuhan

energi (Petter dkk, 2012). Baterai air laut adalah baterai yang elektrolitnya berasal dari air laut. Air laut sendiri dapat digunakan sebagai elektrolit baterai karena mengandung NaCl yang bersifat elektrolit

Diterima 19 Mei 2017, Direvisi 14 September 2017, Diterbitkan online 30 Oktober 2017

©2017. Universitas Brawijaya, e-ISSN: 2548-2181, p-ISSN: 2548-2300

apabila terlarut di dalam air. NaCl di dalam air terurai menjadi ion Na^+ dan Cl^- . Adanya ion-ion tersebut menyebabkan air laut bersifat elektrolit. Jumlah air laut yang melimpah menjadi keunggulan dari penggunaan air laut sebagai elektrolit. Selain itu, penggunaan air laut sebagai elektrolit memudahkan pemakainya bila berada di laut karena tidak perlu mengangkut elektrolit dan menyimpannya.

Salah satu bahan yang digunakan sebagai anoda baterai air laut adalah magnesium. Alasan digunakan magnesium sebagai anoda untuk baterai air laut antara lain: (1) Nilai potensial tereduksi standarnya relatif negatif besar yaitu $-2,367 \text{ V}$ vs *standart hydrogen electrode* (SHE) sehingga memungkinkan dihasilkan nilai potensial elektroda baterai yang relatif besar; (2) Nilai *gravimetric charge density* teoritis yang cukup tinggi yaitu $2,233 \text{ mAh/gram}$ sehingga memungkinkan magnesium dapat menyimpan arus listrik yang besar; (3) Nilai *volumetric charge density* teoritis yang lumayan tinggi yaitu $3,881 \text{ mAh/cm}^3$ sehingga memungkinkan magnesium dalam volume yang kecil sudah dapat menyimpan arus listrik yang besar; (4) Jumlahnya melimpah di alam. *Alloy* magnesium berhasil digunakan sebagai anoda baterai air laut (YU, dkk 2012). *Alloy* magnesium dihasilkan dengan mencairkan logam-logam magnesium, galium, aluminium, zinc, timbal yang masing-masing memiliki kemurnian 99% pada suhu 973 K dengan kondisi atmosfer $\text{Ar}_2 + \text{SF}_6$ untuk mencegah terbakarnya magnesium. *Alloy* yang terdiri dari Mg, 3% wt Ga, 2% wt Hg yang didapat mempunyai *discharge current density* yang lebih besar daripada AZ31 (Mg, 2,94% wt Al, 0,93% wt Zn) dan AP65 (Mg, 6,11% wt Al, 5,08% wt Pb). Wang, dkk (2012) juga berhasil menggunakan *alloy* magnesium sebagai anoda baterai air laut. *Alloy* magnesium dihasilkan dengan cara mencairkan logam-logam magnesium, aluminium, zinc, timbal yang masing-masing memiliki kemurnian 99% pada suhu 750°C dengan kondisi atmosfer Ar untuk mencegah terbakarnya magnesium. Wang, dkk (2012) menyimpulkan bahwa mikrostruktur AP65 sangat berpengaruh terhadap *performance discharge*. Semakin homogen mikrostruktur *alloy* maka semakin bagus performa *discharge*-nya. Yu, dkk (2011) juga mengungkapkan hal yang sama dengan Wang, dkk (2012). Mikrostruktur dari anoda magnesium berpengaruh terhadap performa *discharge*-nya.

Anodisasi adalah proses elektrokimia yang dilakukan dengan bantuan arus listrik sehingga terbentuk pori-pori pada permukaan logam. Logam yang akan dianodisasi dihubungkan pada arus listrik positif (anoda) dari sumber listrik, sedangkan untuk katoda digunakan elektroda inert. Proses anodisasi ini menyebabkan logam pada anoda berubah menjadi oksidanya sehingga permukaan dari anoda ini akan terkikis dan akan habis pada waktu tertentu. Oleh karena itu, anodisasi ini dapat menyebabkan terjadinya pori-pori pada permukaan logam. Feiyue Li, dkk

(1998) berhasil membuat aluminium berpori dengan metode anodisasi di dalam larutan asam lemah.

Berdasarkan uraian di atas, Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi anoda baterai magnesium dengan elektrolit air laut. Pada penelitian ini digunakan metode anodisasi pada magnesium. Dengan metode anodisasi, diharapkan terbentuk pori-pori pada permukaan magnesium. Terbentuknya pori-pori menjadikan luas permukaan magnesium semakin tinggi sehingga meningkatkan performa *discharge*-nya sebagai anoda baterai yang teraktivasi air laut. Karakteristik performa *discharge* anoda magnesium dipelajari secara sistematis.

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan habis pakai antara lain (1) Magnesium *foil* dengan kemurnian 99,95% berat, dimensi ketebalan $0,15 - 3,0 \text{ mm}$, lebar 3 mm dari *supplier* Merck yang berfungsi sebagai bahan anoda; (2) *Demineralize water* yang berfungsi sebagai pengencer larutan dan pencuci hasil anodisasi; (3) Asam oksalat dengan kemurnian 99% dari *supplier* Sigma-Aldrich yang berfungsi sebagai larutan elektrolit pada anodisasi; (4) Larutan NaCl 3,5% berat yang berfungsi sebagai larutan elektrolit untuk uji performa baterai; (5) Grafit dengan dimensi panjang 5 cm , lebar 1 cm , ketebalan $0,5 \text{ cm}$ yang berfungsi sebagai katoda pada anodisasi.

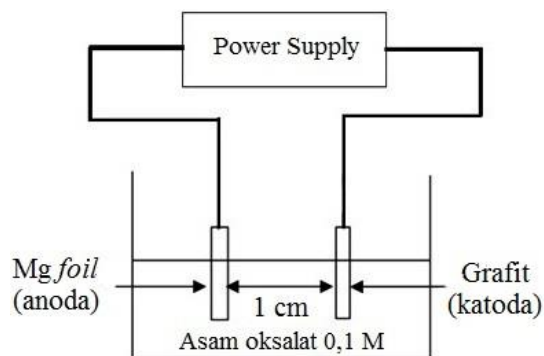
Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: (1) Bejana elektrolisis sebagai reaktor anodisasi; (2) *Power supply* dengan arus *discharge* konstan sebesar 1200 mA sebagai sumber energi listrik ketika melakukan anodisasi; (3) Oven dari *supplier* Redline Brand Binder, dengan tipe RI53 sebagai alat pengering anoda magnesium.

Prosedur Penelitian

Magnesium *foil* dengan kadar 99,95% berat dibersihkan dengan cara dipoles dengan kertas gosok Si-C grit 1000 kemudian dibilas menggunakan *demineralize water* untuk membersihkan kotoran yang menempel pada permukaan. Selanjutnya, magnesium *foil* dikeringkan di dalam oven sampai berat konstan. Anodisasi dilakukan di dalam larutan asam oksalat $0,10 \text{ M}$ dengan menggunakan magnesium *foil* sebagai anoda dan grafit sebagai katoda. Jarak antara anoda dan katoda adalah 1 cm . Potensial yang digunakan ketika anodisasi divariasikan antara $1,50 - 6,00 \text{ V}$ selama 7 menit. Setelah anodisasi, magnesium dibersihkan dengan cara dibilas menggunakan *demineralize water* kemudian dioven pada suhu 105°C sampai berat konstan. Setelah dioven, dilakukan uji kinerja elektrokimia dan uji performa *discharge*. Uji kinerja elektrokimia terdiri dari (1) polarisasi linier, (2) *Electro Impedance Spectroscopy* (EIS).

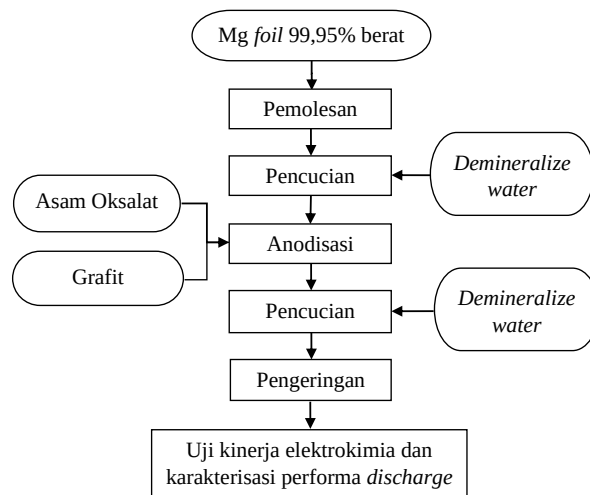
Pada uji EIS, amplitudo yang digunakan sebesar 10 mV, sedangkan frekuensi yang digunakan sebesar 0,01 - 20000 Hz. Uji karakteristik performa *discharge* dilakukan dengan metode *galvanostatic discharge*. Uji *galvanostatic discharge* dilakukan dengan baterai *analyzer* BST8 Series. Katoda yang digunakan adalah grafit. Larutan elektrolit yang digunakan adalah NaCl dengan kadar 3,50% berat. Skema susunan alat untuk anodisasi disajikan pada gambar 1. Algoritma penelitian disajikan pada gambar 2.



Gambar 1. Skema susunan alat untuk anodisasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode anodisasi digunakan untuk mengembangkan magnesium sebagai anoda baterai dengan harapan memperbesar luas permukaan dari anoda magnesium. Semakin pula luas permukaan anoda magnesium maka semakin tinggi performa *discharge* dalam fungsinya sebagai baterai. Magnesium termasuk logam lunak yang mana sifat kerekatan oksidanya yang terbentuk pada permukaan cenderung mudah lepas dari logam murninya. Sifat ini menguntungkan dalam proses pembentukan pori pada permukaan anoda magnesium. Pada anodisasi terbentuk Magnesium oksida yang mana memiliki sifat kerekatan yang rendah dengan magnesium murni di bawahnya. Magnesium oksida segera lepas dari magnesium murni di bawahnya sehingga meninggalkan bentuk pori pada permukaan anoda magnesium. Terbentuknya pori pada permukaan magnesium akan memperbaiki performa *discharge* anoda magnesium dalam fungsinya sebagai baterai. Anodisasi dilakukan pada potensial listrik yang relatif rendah ($V = 1,5 - 6,0$ V) untuk menghindari laju pembentukan korosi yang terlalu besar yang akan merusak anoda magnesium dengan cepat tanpa pembentukan pori. Anodisasi dilakukan selama 7 menit. Uji performa elektrokimia dilakukan dengan metode Polarisasi Linier (PL) untuk mengetahui potensial dan arus korosi. Metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) digunakan untuk mengetahui fenomena korosi. Uji *Galvanostatic discharge* untuk mengetahui performa *discharge* baterai magnesium di dalam larutan NaCl 3,5%.



Gambar 2. Algoritma penelitian

Uji Performa Elektrokimia

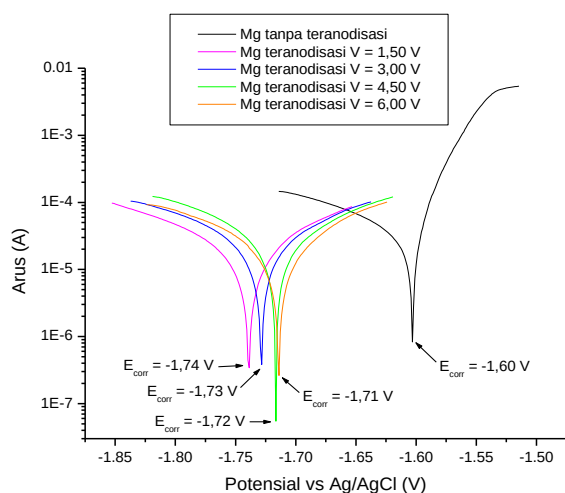
Hasil Uji Performa Elektrokimia Polarisasi Linier Anoda Magnesium

Metode pengujian polarisasi linier digunakan untuk mengetahui potensial dan arus korosi anoda magnesium di dalam larutan NaCl 3,5%. Grafik polarisasi potensial dinamik dari anoda magnesium ditunjukkan pada gambar 3. Cabang anodik mewakili proses oksidasi dari anoda magnesium yang mana proses *discharge* selama polarisasi anoda. Cabang katodik mewakili proses reduksi dari hidrasi proton-proton. Arus korosi dievaluasi dari grafik polarisasi linier menggunakan ekstrapolasi cabang katodik yang kembali menuju potensial korosi. Parameter-parameter yang terukur dari grafik polarisasi potensial dinamik ditunjukkan pada tabel 1. Parameter-parameter tersebut yaitu potensial korosi (E_{corr}) dan densitas arus korosi (I_{corr}) untuk anoda magnesium di dalam larutan NaCl 3,5%. Standar potensial korosi untuk magnesium adalah -2,57 V vs Ag/AgCl. Hasil pengukuran potensial korosi magnesium yang tidak teranodisasi sebagai *working electrode* pada kondisi *steady state* menunjukkan nilai -1,60 V vs Ag/AgCl. Selisih ini terjadi karena terbentuk $\text{Mg}(\text{OH})_2$ yang memiliki nilai konduktivitas rendah pada permukaan magnesium. Menurut nilai potensial korosi magnesium yang telah dianodisasi lebih negatif daripada magnesium yang tidak dianodisasi. Magnesium yang telah dianodisasi pada potensial 1,50 V menunjukkan nilai potensial korosi paling negatif ($E_{\text{corr}} = -1,74$ V vs Ag/AgCl) daripada magnesium yang telah dianodisasi pada potensial 3,00 - 6,00 V. Parameter-parameter yang didapat dari gambar 3 dapat dilihat pada tabel 1. Magnesium yang teranodisasi pada potensial 1,5 V memiliki nilai densitas arus korosi lebih besar daripada magnesium yang tidak teranodisasi maupun magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,0 - 6,0 V. Dari dua parameter ini (potensial dan arus korosi) menunjukkan magnesium yang teranodisasi pada potensial 1,5 V paling tinggi aktivasinya di dalam larutan NaCl 3,50% sebagai anoda baterai daripada

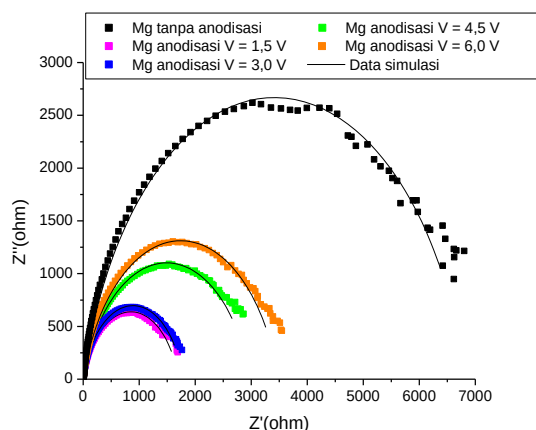
magnesium yang tidak dianodisasi maupun yang telah dianodisasi pada potensial 3,0 V - 6,0 V.

Hasil Uji Performa Elektrokimia Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Anoda Magnesium

Metode pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) digunakan untuk mempelajari mekanisme korosi dari magnesium di dalam larutan NaCl 3,5%. Gambar 4 menunjukkan grafik nyquist dari anoda magnesium yang tidak teranodisasi dan yang teranodisasi dengan larutan elektrolit NaCl 3,5%. Grafik nyquist menunjukkan bahwa magnesium yang tidak teranodisasi dan yang teranodisasi memiliki bentuk *single capacitive loop*. Diameter semicircle menunjukkan *charge transfer resistance* (R_p) pada permukaan anoda magnesium di dalam larutan elektrolit NaCl 3,5%. Intercept diatas x-axis pada frekuensi tinggi menunjukkan tahanan elektrik dari larutan. Model sirkuit ekivalen dari grafik EIS didapatkan dengan melakukan fitting data.



Gambar 3. Grafik polarisasi dinamik potensial dari anoda magnesium dengan elektrolit NaCl 3,5%



Gambar 4. Grafik Nyquist magnesium yang tidak teranodisasi dan teranodisasi dengan larutan elektrolit NaCl 3,5%

Model sirkuit ekivalen yang didapat dari fitting hasil uji EIS ditunjukkan pada gambar 5. Parameter-parameter yang didapat dari fitting hasil uji EIS ditunjukkan pada tabel 2. Grafik nyquist dari magnesium yang tidak teranodisasi dan yang teranodisasi mempunyai kesamaan bentuk kecuali dalam diameter semicircle, menunjukkan bahwa mekanisme korosi sama tetapi berbeda laju korosinya. Laju korosi berhubungan dengan *charge transfer resistance* (R_p). Nilai *charge transfer resistance* (R_p) yang tinggi menunjukkan laju korosi yang rendah. Diameter semicircle yang diberikan oleh magnesium yang teranodisasi lebih sempit jika dibandingkan dengan magnesium yang tidak teranodisasi (Chen dkk, 2013; Zhao dkk, 2011; Yu dkk, 2011; Yu dkk, 2012). Hal ini menunjukkan bahwa magnesium yang teranodisasi memiliki nilai *charge transfer resistance* (R_p) yang lebih rendah ($R_p = 6830 \Omega$) dibandingkan dengan magnesium yang tidak teranodisasi ($R_p = 1708 - 3640 \Omega$).

Tabel 1. Parameter-parameter magnesium teranodisasi yang didapat dari grafik polarisasi dinamik potensial

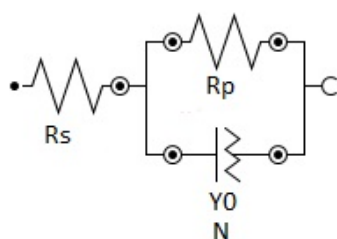
Jenis material	Potensial korosi vs Ag/AgCl (V)	Arus korosi ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Mg anodisasi V = 0 V	-1.60	36.08
Mg anodisasi V = 1,5 V	-1.74	172.25
Mg anodisasi V = 3,0 V	-1.73	114.79
Mg anodisasi V = 4,5 V	-1.72	34.93
Mg anodisasi V = 6,0 V	-1.71	47.87

Tabel 2. Parameter-parameter magnesium teranodisasi yang didapat dari fitting hasil uji EIS

Jenis material	R_s (Ω)	R_p (Ω)	Y_0 (μMho)
Mg anodisasi V = 0 V	3,00	6830	106
Mg anodisasi V = 1,5 V	3,00	1708	687
Mg anodisasi V = 3,0 V	3,00	1832	495
Mg anodisasi V = 4,5 V	3,00	2923	181
Mg anodisasi V = 6,0 V	3,00	3640	243

Diameter semicircle yang diberikan magnesium yang teranodisasi pada potensial 1,50 V lebih sempit daripada magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,00 V – 6,00 V. Hal ini menunjukkan bahwa magnesium yang teranodisasi pada potensial

1,50 V ($R_p = 1708 \Omega$) memiliki nilai *charge transfer resistance* (R_p) yang lebih rendah dibandingkan dengan magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,00 V ($R_p = 1832 \text{ k}\Omega$), 4,50 V ($R_p = 2923 \text{ k}\Omega$), dan 6,00 V ($R_p = 3640 \text{ k}\Omega$). Kenaikan nilai *charge transfer resistance* (R_p) berbanding lurus dengan kenaikan potensial yang digunakan untuk anodisasi. Nilai konduktivitas berbanding terbalik dengan nilai *charge transfer resistance* (R_p). Nilai konduktivitas (Y_0) yang rendah mengindikasikan bahwa pembentukan *film* yang relatif tebal pada permukaan anoda magnesium. Nilai konduktivitas (Y_0) dari anoda magnesium yang teranodisasi ($Y_0 = 181 - 687 \mu\text{Mho}$) lebih besar daripada anoda magnesium yang tidak teranodisasi ($Y_0 = 106 \mu\text{Mho}$).



Gambar 5. Model ekivalen sirkuit

Hal ini menunjukkan bahwa *film* yang terbentuk pada permukaan anoda magnesium yang teranodisasi lebih tipis daripada pada permukaan anoda magnesium yang tidak teranodisasi. Nilai konduktivitas (Y_0) dari anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 1,50 V ($Y_0 = 687 \mu\text{Mho}$) memiliki nilai yang paling besar daripada anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,00 V ($Y_0 = 495 \mu\text{Mho}$), 4,50 V ($Y_0 = 181 \mu\text{Mho}$), dan 6,00 V ($Y_0 = 243 \mu\text{Mho}$). Hal ini menunjukkan bahwa *film* yang terbentuk pada permukaan anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 1,50 V lebih tipis daripada pada anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,00 V – 6,00 V. Nilai *charge transfer resistance* (R_p) dan konduktivitas (Y_0) merupakan 2 faktor yang menentukan pola perilaku korosi dari anoda magnesium. Selama proses korosi, *film* yang terbentuk memungkinkan untuk menghambat aktivasi magnesium di dalam larutan elektrolit NaCl 3,5%.

Proses *discharge* dari anoda magnesium akan terhambat. Pada anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 1,50 V, proses aktivasi ion Mg^{2+} lebih mudah dan cepat daripada pada anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,00 – 6,00 V dan magnesium yang tidak teranodisasi karena *film* yang terbentuk paling tipis dan nilai *charge transfer resistance* (R_p) paling rendah.

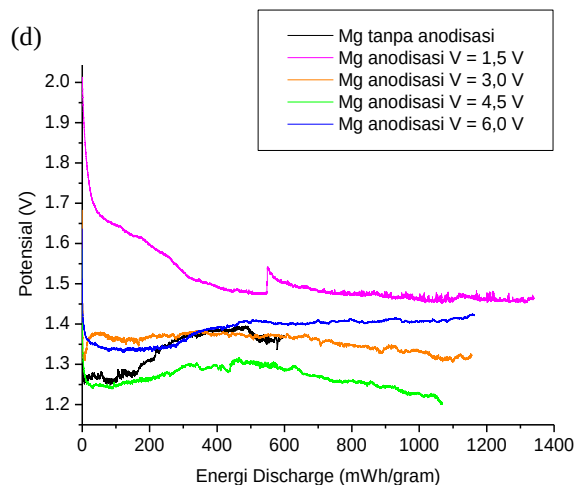
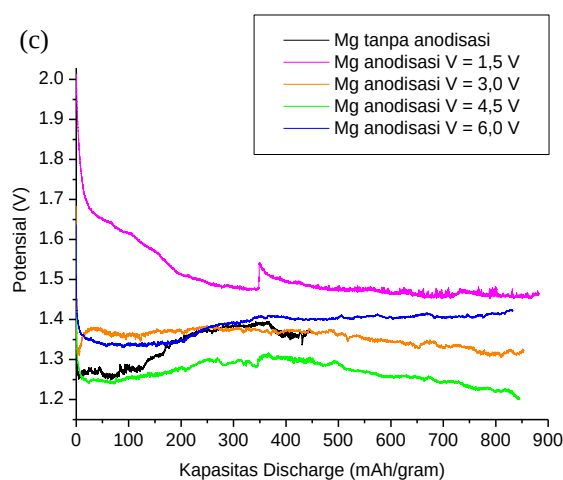
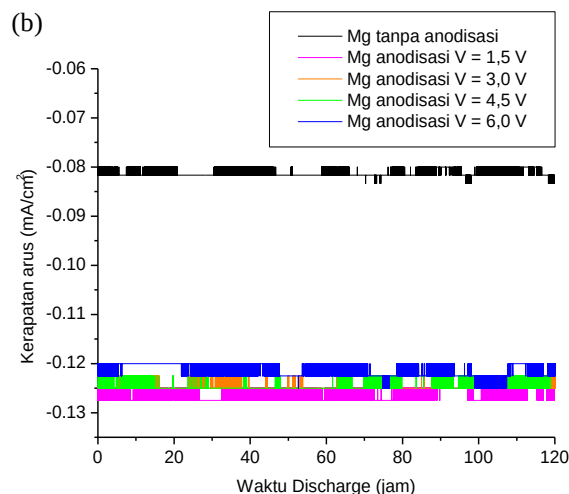
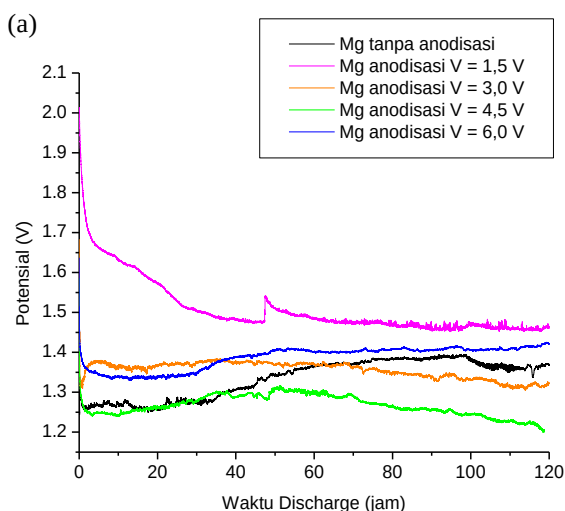
Uji Kinerja Elektrokimia Galvanostatic Discharge Anoda Magnesium

Performa *discharge* anoda magnesium dapat dijelaskan dengan grafik waktu vs potensial dan arus *discharge*, kapasitas dan energi vs potensial

discharge, yang mana terukur dari *discharge* galvanostatik pada beban arus konstan. Potensial anoda magnesium selama proses *discharge* sangat penting karena perbedaan potensial diantara anoda dan katoda ditentukan oleh jumlah elektron yang dilepaskan oleh anoda. Performa *discharge* anoda magnesium yang baik ditunjukkan dengan nilai potensial, kerapatan arus, kapasitas, dan energi *discharge* yang besar. Dengan demikian, anoda magnesium memiliki kemampuan yang baik untuk mentransfer elektron untuk menghasilkan energi listrik. Pola perilaku *discharge* galvanostatik dari magnesium yang tidak teranodisasi dan yang teranodisasi di dalam larutan asam oksalat 0,1 M pada potensial 1,50 - 6,00 V dengan katoda grafit dan larutan elektrolit untuk pengujian baterai berupa NaCl 3,50% ditunjukkan pada gambar 6 (a), (b), (c), dan (d). Pengujian performa *discharge* galvanostatik digunakan arus *discharge* 0,05 mA. Pada gambar 6 (a) menggambarkan magnesium yang teranodisasi menunjukkan kenaikan potensial *discharge* dibandingkan magnesium yang tidak teranodisasi dari sekitar 1,30 V menjadi 1,50 V. Nilai potensial *discharge* paling besar dicapai anoda magnesium yang dianodisasi di dalam asam oksalat 0,10 M pada potensial 1,50 V. Sedangkan nilai potensial yang dicapai untuk anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,00 - 6,00 V sebesar 1,2 - 1,4 V. Pada gambar 6 (a) menunjukkan bahwa setelah kenaikan potensial, magnesium yang teranodisasi mengalami penurunan potensial sampai stabil pada sekitar 1,20 - 1,50 V. Magnesium teranodisasi memiliki nilai kerapatan arus *discharge* yang lebih besar daripada magnesium yang tidak teranodisasi. Pada gambar 6 (b) menyajikan nilai kerapatan arus *discharge* paling besar dicapai anoda magnesium yang dianodisasi di dalam asam oksalat 0,10 M pada potensial 1,50 V ($I = -0,128 \text{ mA/cm}^2$). Arus bernilai negatif menunjukkan bahwa sistem menghasilkan listrik yang disebut dengan istilah *discharge*. Pada gambar 6 (c) menyajikan nilai kerapatan arus *discharge* yang dicapai untuk anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,00 - 6,00 V sebesar -0,120 hingga -0,125 mA/cm^2 , dan magnesium yang tidak dianodisasi sebesar -0,082 mA/cm^2 . Magnesium teranodisasi memiliki nilai kapasitas *discharge* yang lebih besar daripada magnesium yang tidak teranodisasi. Kapasitas *discharge* paling besar dicapai anoda magnesium yang dianodisasi di dalam asam oksalat 0,1 M pada potensial 1,50 V ($Q = 882,12 \text{ mAh/gram}$). Sedangkan nilai kapasitas *discharge* yang dicapai untuk anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,00 - 6,00 V sebesar 832,51 - 853,69 mAh/gram , dan magnesium yang tidak dianodisasi sebesar 446,68 mAh/gram . Magnesium teranodisasi memiliki nilai kapasitas *discharge* yang lebih besar daripada magnesium yang tidak teranodisasi. Hal ini dikarenakan perbedaan kerapatan arus *discharge* pada semua anoda magnesium yang diuji. Gambar 6 (d) menyajikan nilai energi *discharge* paling besar dicapai

anoda magnesium yang dianodisasi di dalam asam oksalat 0,1 M pada potensial 1,50 V ($W = 1363,52$ mWh/gram). Sedangkan nilai energi *discharge* yang dicapai untuk anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 3,00 - 6,00 V sebesar 1077,21 - 1168,43 mWh/gram, dan magnesium yang tidak dianodisasi sebesar 599,98 mAh/gram. Magnesium teranodisasi pada memiliki nilai energi *discharge* yang lebih besar daripada magnesium yang tidak teranodisasi. Hal ini juga dikarenakan perbedaan potensial dan kerapatan arus *discharge* pada semua anoda magnesium yang diuji.

Fenomena performa *discharge* anoda magnesium yang baik dapat dijelaskan dengan semakin banyaknya Mg yang teroksidasi menjadi Mg^{2+} selama proses *discharge*. Anoda Mg akan mengalami reaksi oksidasi, sedangkan pada katoda terjadi reaksi reduksi pada elektrolitnya yang juga berperan sebagai media transfer ion antara anoda dan katoda dalam sel. Jika kedua elektroda dihubungkan dengan sebuah konduktor elektronik, aliran elektron dimulai dari elektroda negatif (dengan densitas elektron tinggi) ke elektroda positif. Elektron dilepaskan oleh anoda (teroksidasi) dan pada saat yang sama katoda menerima elektron. Setiap elektron yang mengalir dalam sirkuit luar dari negatif ke elektroda positif, sehingga listrik dapat terbentuk. Ion negatif dalam elektrolit berdifusi ke elektroda negatif dan ion positif berdifusi ke elektroda positif. Rangkaian listrik berhenti beroperasi jika tidak ada pergerakan ion kembali, sehingga tidak ada arus yang terbentuk lagi. Pada anoda magnesium yang teranodisasi pada potensial 1,50 V terlihat performa *discharge*-nya yang paling tinggi daripada yang teranodisasi pada potensial 3,00 - 6,00.



Gambar 6. Pola perilaku *discharge* galvanostatic: (a) waktu *discharge* vs potensial (b) waktu *discharge* vs kerapatan arus (c) kapasitas *discharge* vs potensial (d) energi *discharge* vs potensial dari anoda magnesium pada arus *discharge* 0,05 mA di dalam larutan NaCl 3,5% vs elektroda grafit.

KESIMPULAN

Dari percobaan dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai potensial korosi anoda di dalam larutan NaCl 3,5% yang paling tinggi ($E_{\text{corr}} = -1,74 \text{ V}$ vs Ag/AgCl) dicapai pada magnesium yang teranodisasi di dalam asam oksalat 0,1 M dengan potensial 1,5 V.
2. Nilai *charge transfer resistance* (R_p) paling kecil ($R_p = 1708 \Omega$) dan nilai konduktivitas paling besar ($Y_0 = 687 \mu\text{Mho}$) anoda di dalam larutan NaCl 3,5% dicapai pada magnesium yang teranodisasi di dalam asam oksalat dengan potensial 1,5 V.
3. Performa *discharge* yang meliputi potensial, kerapatan arus, kapasitas, dan energi *discharge* paling besar pada arus *discharge* konstan (0,05 mA) dicapai pada magnesium yang teranodisasi di dalam asam oksalat dengan potensial 1,5 V.

DAFTAR NOTASI

R	= Resistansi, ohm
I	= Kuat Arus, Amphere
I_{corr}	= Arus korosi, Amphere
E^0	= Potensial elektrode standart, Volt
E_{corr}	= Potensial korosi, Volt
Z'	= Impedansi <i>real</i> , ohm
Z''	= Impedansi imajiner, ohm
R_p	= Tahanan transfer muatan, ohm
R_s	= Tahanan larutan, ohm
Q	= Kapasitas <i>discharge</i> , mA/cm^2
W	= Energi <i>discharge</i> , mWh/gram
Y_0	= Konduktivitas, Mho

DAFTAR PUSTAKA

Bard Allen J., Faulkner Larry R. (2001). *Electrochemical Method*. United States of America: John Wiley & Sons inc.

Bin CHEN, Ri-chu WANG, Chao-qun PENG, Yan FENG, Nai-guang WANG. (2013). Influence of Al-Mn master alloys on microstructures and electrochemical properties of Mg-Al-Pb-Mn alloys. *Transaction of Nonferrous Metals Society of Cina*, 24, 423-430.

Feiyue Li, Lan Zhang, Robert M. Metzger. (1998). On the Growth of Highly Ordered Pores in Anodized Aluminum Oxide. *Chem. Mater*, 10, 2470-2480.

Gang Ning, Bala Haran, Branko N. Popov. (2002). Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates. *Journal of Power Sources*, 117, 160-169.

Jun Zhao, Kun Yu, Yanan Hu, Shaojun Li, Xin Tan, Fuwen Chen, Zhiming Yu. (2011). Discharge behavior of Mg-4 wt%Ga-2 wt%Hg alloy as anode for seawater activated battery. *Electrochimica Acta*, 56, 8224-8231.

Koontz Ralph F., Lucero R. David. (2002). *Water Activated Batteries*. United States of America: McGraw-Hill inc.

Kun YU, Han-qing XIONG, Li WEN, Yi-long DAI, Shi-hai YANG, Su-feng FAN, Fei TENG, Xue-yan QIAO. (2015). Discharge behavior and electrochemical properties of Mg-Al-Sn alloy anode for seawater activated battery. *Nonferrous Met*, 25, 1234-1240.

Kun Yu, Xin Tan, Yanan Hu, Fuwen Chen, Shaojun Li. (2011). Microstructure effects on the electrochemical corrosion properties of Mg - 4.1% Ga - 2.2% Hg alloy as the anode for seawater-activated batteries. *Corrosion Science*, 53, 2035-2040.

Naiguang Wang, Richu Wang, Chaoqun Peng, Yan Feng, Bin Chen. (2012). Effect of hot rolling and subsequent annealing on electrochemical discharge behavior of AP65 magnesium alloy as anode for seawater activated battery. *Corrosion science*, 64, 17-27.

Syvertsen A. Petter, Vullum Fride. (2012). Alloys as Anode Materials in Magnesium Ion Batteries. *Thesis*, Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering.

YU Kun, HUANG Qiao, ZHAO Jun, DAI Yu-long. (2012). Electrochemical properties of magnesium alloy anodes discharged in seawater. *Transaction of Nonferrous Metals Society of Cina*, 22, 2184-2190.