

Kinerja Baterai Elektrolit Air Tawar dan Laut Sebagai Sumber Energi Aplikatif

Masrufaiyah, Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: hantoro@ep.its.ac.id

Abstrak— Material anode adalah salah satu unsur penting yang dapat meningkatkan tegangan dan kapasitas arus pada baterai air laut. Aluminium dan paduan seng/aluminium adalah material yang digunakan sebagai anode pada baterai air laut. Polarisasi potensiodinamik, *galvanostatic discharge* dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) dari aluminium dianalisis dan dibandingkan dengan paduan seng/aluminium. Pengukuran tegangan, arus dan temperatur dilakukan pada salinitas elektrolit, laju elektrolit, jarak antar elektroda yang berbeda. Material katoda yang digunakan adalah tembaga. Hasil polarisasi potensiodinamik menunjukkan bahwa potensial korosi lempeng paduan seng-aluminium jauh lebih negatif jika dibandingkan lempeng aluminium dengan nilai potensial korosi sebesar $-944,630$ mV dan kerapatan arus korosi sebesar $16,7800 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, tetapi resistansi polarisasi paduan seng/aluminium jauh lebih kecil jika dibanding aluminium yaitu paduan seng/aluminium $535,390 \Omega$ dan aluminium $23,4620 \text{ k}\Omega$. Performa sel terbaik selama tiga jam discharge ditunjukkan oleh sel Zn/Al-Cu pada kombinasi keadaan salinitas elektrolit 5%, laju elektrolit 0,5 liter/jam dan jarak antar elektroda 2 cm dengan tegangan rata-rata sebesar 73,56 mV dan arus rata-rata 717,79 μA . Hasil uji EIS menunjukkan bahwa proses elektrokimia *interface* paduan Zn/Al dan Al sama-sama ditentukan oleh reaksi aktivasi terkontrol.

Kata Kunci— aluminium, paduan seng/aluminium, tembaga, baterai air laut.

I. PENDAHULUAN

Baterai air laut merupakan sumber energi yang penting pada peralatan bawah laut termasuk peralatan militer dan peralatan komersial. Baterai yang menggunakan air laut sebagai elektrolit sangat menarik karena memiliki beberapa keunggulan diantaranya yaitu mudah dioperasikan, biaya pembuatannya tidak mahal, portable, relatif tidak bergantung pada kondisi eksternal, memiliki waktu hidup lama selama air laut masih tersedia dan operasi baterai relatif tidak terpengaruh pada kedalaman (Wagner, 1971). Salah satu material penting pada baterai adalah material anoda. Tegangan keluaran baterai sangat dipengaruhi oleh karakteristik anoda. Aluminium merupakan anoda pengganti magnesium yang banyak digunakan pada baterai air laut. Aluminium memiliki potensial standart $-1,66$ volt (SHE) dan magnesium memiliki potensial standart $-2,38$ volt (SHE) (Linden and Reddy,

2002). Meskipun aluminium memiliki potensial standar lebih rendah dibandingkan magnesium, tetapi aluminium memiliki beberapa karakteristik yang dapat dipertimbangkan sebagai material anoda pengganti magnesium. Aluminium memiliki laju *self discharge* lebih lambat dan memiliki kapasitas yang lebih besar dibanding magnesium (Shen & Tseung, 1994). Aluminium memiliki kapasitas 2,980 Ah/g dan magnesium memiliki kapasitas 2,205 Ah/g (Wang et al., 2014). Selain itu, jika di lihat dari segi harga, harga aluminium lebih murah dibandingkan dengan magnesium (Good fellow).

Tembaga memiliki potensial standar 0,34 volt (SHE) (Linden and Reddy, 2002) dan memiliki konduktifitas termal kedua tertinggi setelah perak. Perak adalah logam yang banyak dipakai sebagai katoda pada baterai air laut sebagai pasangan magnesium. Tembaga memiliki konduktifitas termal 401 W/m.K dan perak 429 W/m.K. Sedangkan jika dilihat dari konduktifitas listriknnya, tembaga memiliki konduktivitas listrik yang tidak jauh berbeda dari perak. Konduktivitas listrik tembaga adalah $6,0 \times 10^7$ ohm. m sedangkan perak adalah $6,8 \times 10^7$ ohm. M. Tembaga memiliki harga yang lebih murah dibandingkan perak (Linden and Reddy, 2002). Tembaga dapat menggantikan perak sebagai katoda baterai air laut karena beberapa sifat yang dimilikinya. Unsur seng pada aluminium sebagai anoda baterai air laut menunjukkan profil potensial standar yang bertambah tinggi dengan meningkatnya kandungan seng (Wales P C dkk, 1974). Paduan aluminium dan seng juga terbukti dapat melindungi logam kapal dari korosifitas (May P T dkk, 1949).

Kinerja baterai air laut dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya yaitu jenis elektroda, salinitas elektrolit, jarak antar elektroda dan luas elektroda. Berbeda dengan baterai konvensional pada umumnya yaitu baterai dipenuhi oleh elektrolitnya. Elektrolit baterai air laut dapat dialirkan melewati elektroda secara kontinyu, Normalnya tegangan keluaran sel baterai meningkat dengan meningkatnya laju aliran elektrolit, tetapi kerja hidrodinamik juga meningkat dengan meningkatnya laju aliran, sehingga terdapat kecepatan aliran optimal untuk mencapai nilai tegangan maksimal (Wang et al., 2014).

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji dan menganalisis lebih rinci kinerja baterai air laut. Aluminium, paduan seng/aluminium dan tembaga digunakan sebagai elektrodan dan air laut sintesis digunakan sebagai elektrolit.

dipasang secara paralel untuk mengukur tegangan keluaran sel. Pengukuran dilakukan selama rata-rata tiga jam.

II. METODE PENELITIAN

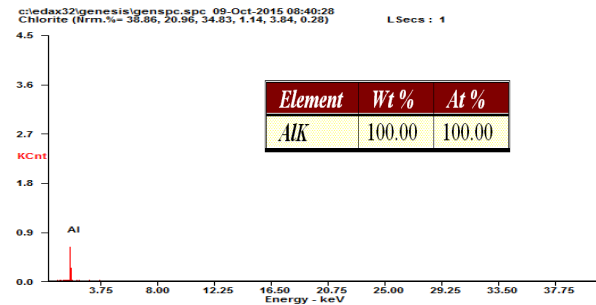
Elektroda yang digunakan adalah lempeng aluminium, paduan seng/aluminium dan tembaga. Untuk mengetahui komposisi penyusun elektroda dilakukan uji *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) dan *Inductively Coupled Plasma* (ICP). Uji polarisasi potensiodinamik Elektroda terhadap lempeng dilakukan untuk menentukan perilaku korosi logam didalam larutan yang bersifat korosif berdasarkan hubungan potensial dan arus anodik atau katodik. Selain itu, uji *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) juga dilakukan untuk untuk menentukan parameter kinetika elektrokimia yang berkaitan dengan unsur-unsur listrik seperti resistansi (R), kapasitansi (C) dan induktansi (L).

Sel baterai air laut tersusun atas anoda, katoda dan elektrolit. Kotak sel berbentuk balok dengan dimensi panjang 4,7 cm, lebar 2,9 cm dan tinggi 7 cm. Elektroda yang digunakan adalah aluminium dengan tebal 0,15 mm, tembaga dengan tebal 0,20 mm dan paduan seng/aluminium dengan tebal 0,33 mm. Luas elektroda yaitu 2 cm x 3 cm. Pada dua sisi dinding kotak sel menempel karet yang berdimensi panjang 2 cm, lebar 0,5 cm dan tinggi 3 cm untuk mengapit elektroda agar jarak anoda dan katoda tetap. Pada dinding atas dan bawah diberi lubang dengan diameter 0,5 cm, lubang bagian atas sebagai tempat masuknya elektrolit dan lubang bagian bawah tempat keluarnya elektrolit. Elektrolit dialirkan melewati lubang-lubang tersebut dengan laju 0,5 l/jam. Pompa sederhana digunakan untuk mendorong elektrolit memasuki sel. Kotak sel ditutup rapat agar elektrolit tidak keluar dari sel ketika pompa mendorong elektrolit. Pada lubang bagian bawah dipasang kran untuk mengatur laju elektrolit. Elektrolit yang telah keluar dari lubang bagian bawah kotak sel akan dialirkan ulang memasuki sel oleh pompa. Elektrolit yang digunakan adalah air laut buatan dengan melarutkan sodium klorida ke dalam aquades. Untuk mendapatkan elektrolit dengan salinitas 3 %, 3 gram sodium klorida dilarutkan kedalam 100 ml aquades (Abdulrehman T. et al, 2014).

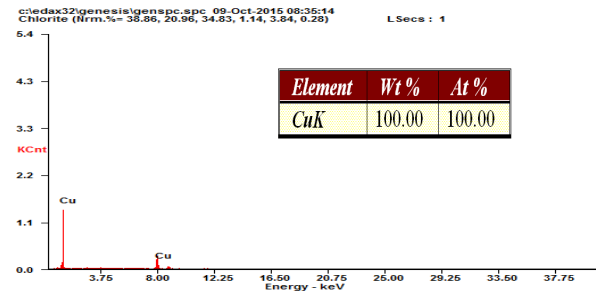
Pengukuran dilakukan pada 24 keadaan dengan variasi jarak anoda-katoda, variasi salinitas elektrolit, variasi laju elektrolit yang melewati sel dan variasi jenis anoda. Jarak anoda-katoda divariasikan sebanyak dua yaitu 0,5 cm dan 2 cm. Salinitas elektrolit divariasikan sebanyak tiga yaitu 3%, 4% dan 5%. Laju elektrolit divariasikan sebanyak dua yaitu 0 liter/jam dan 0,5 liter/jam. Jenis anoda divariasikan sebanyak dua yaitu aluminium dan paduan seng/aluminium. Beban yang akan dialiri arus adalah resistor dengan nilai hambatan 1 ohm. Penjepit buaya digunakan untuk menghubungkan kabel ke elektroda dan kabel ke beban. Sambungan antara kabel dan penjepit buaya disolder agar keduanya benar-benar terhubung. Dua buah multimeter dipasang secara simultan untuk mengukur tegangan dan arus yang melewati beban. Multimeter pertama dipasang secara seri dengan kabel untuk mengukur arus yang melewati beban, sedangkan multimeter kedua

III. HASIL DAN DISKUSI

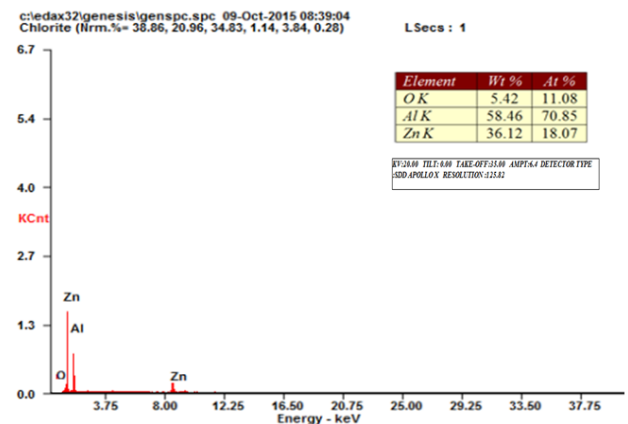
A. Hasil uji *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) dan *Inductively Coupled Plasma* (ICP). Uji *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)



(a)



(b)



(c)

Gambar. 1. Hasil uji EDS pada elektroda. (a) Aluminium, (b) Tembaga dan (c) Paduan seng-aluminium

Gambar 1 menunjukkan bahwa penyusun permukaan lempeng aluminium adalah 100% unsur Al. Penyusun permukaan paduan seng-aluminium adalah karbon, oksigen, aluminium dan seng, dengan persentase berat paling besar adalah unsur karbon 49,61%. Penyusun permukaan lempeng

tembaga adalah 100% unsur Cu. Untuk mendukung data hasil uji EDS dilakukan uji ICP-OES terhadap lempeng-lempeng elektroda. Pada uji ICP-OES terhadap lempeng-lempeng elektroda, unsur yang diidentifikasi adalah aluminium, tembaga dan seng.

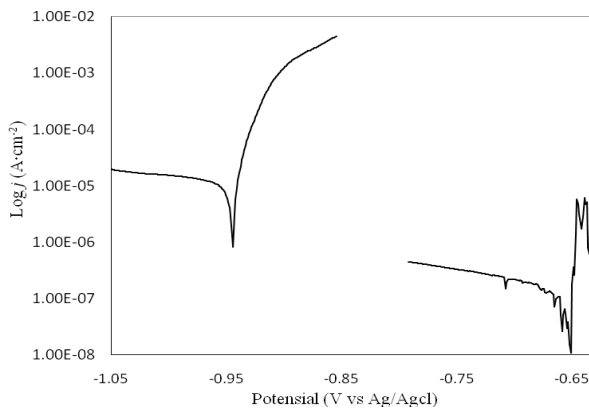
Tabel 1.

Hasil uji *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer* dari lempeng aluminium, lempeng paduan seng/aluminium dan lempeng tembaga.

No.	Nama lempeng	Jenis Uji	Hasil (ppm)	Assay
1	Tembaga	Kandungan Cu	51702,3	
2	Aluminium	Kandungan Al	36847	≥ 99 %
3	Paduan seng-aluminium	Kandungan Al	850,6	
		Kandungan Zn	1008,6	

Tabel 1 menunjukkan bahwa unsur aluminium yang terdapat pada lempeng aluminium sangat tinggi yaitu 36847 ppm. Unsur tembaga yang terdapat pada lempeng tembaga juga sangat tinggi yaitu 51702,3 ppm. Jika dibandingkan pada lempeng aluminium, unsur aluminium pada paduan seng-aluminium sangat kecil yaitu 850,6 ppm, sedangkan unsur seng sebesar 1008,6 ppm.

B. Polarisasi Potensiodinamik Elektroda



Gambar 2. Kurva polarisasi potensiodinamik pada lempeng aluminium dan lempeng paduan seng-aluminium dalam elektrolit dengan salinitas 3%

Tabel 2.

Parameter korosi yang diperoleh dari kurva polarisasi potensiodinamik

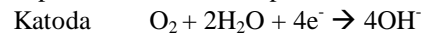
Lempeng anoda	Corrosion current density J_{corr}	Corrosion potential E_{corr} (vs Ag/AgCl)	Corrosion rate (mm/tahun)	Polarization resistance
Aluminium	29,0090 nA·cm ⁻²	-660,130 mV	0,00094615	23,4620 (kΩ)
Seng-aluminium	16,7800 μA·cm ⁻²	-944,630 mV	0,50254	535,390 (Ω)

Kurva polarisasi potensiodinamik dari kedua lempeng

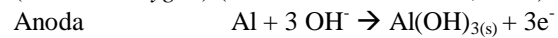
anoda ditunjukkan pada Gambar 4.2. Parameter polarisasi terukur pada kurva polarisasi yaitu kerapatan arus korosi dan potensial korosi ditunjukkan pada Tabel 4.2. Potensial korosi lempeng paduan seng-aluminium jauh lebih negatif jika dibandingkan lempeng aluminium. Jika lempeng aluminium dibandingkan dengan lempeng paduan seng-aluminium, potensialnya bergeser secara negatif sebesar 284,5 mV, sementara kerapatan arus korosinya meningkat sebesar 16,770991 μA·cm⁻². Nilai potensial korosi yang semakin negatif dengan kerapatan arus korosi yang lebih besar sangat diperlukan sebagai karakteristik material anoda pada baterai air laut (Kun Yu dkk, 2015). Dari Tabel 4.2 diperoleh bahwa lempeng paduan seng aluminium lebih baik sebagai anoda jika dibanding lempeng aluminium. Tetapi paduan seng-aluminium juga memiliki kekurangan yaitu laju korosinya lebih besar jika dibanding lempeng aluminium.

C. Reaksi Elektrokimia Sel

Reaksi yang terjadi didalam sel sebenarnya kompleks, tetapi dapat disederhanakan seperti berikut :



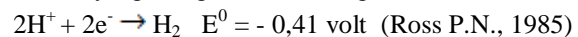
(*Dissolve Oxygen*) (Wilcock dan Kauffman, 1997)



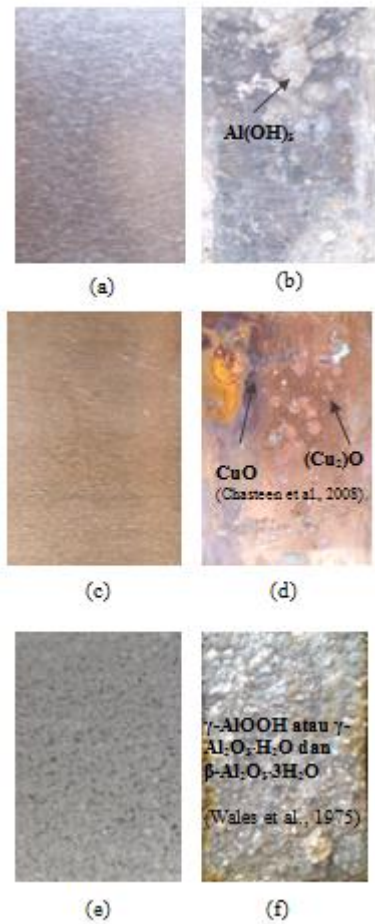
Reaksi keseluruhan $\text{Al} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al(OH)}_{3(s)}$ (Shen dan Tseung, 1994)

Tembaga bekerja sebagai sumber elektron didalam sel. Elektron melewati tembaga setelah mengalir dari beban. Selanjutnya, elektron pada tembaga akan mereduksi oksigen terlarut didalam elektrolit yang disebut dengan reaksi *dissolve Oxygen*. Pada anoda, aluminium teroksidasi menghasilkan elektron. Aluminium dan hidroksida bereaksi menghasilkan aluminium hidroksida $\text{Al(OH)}_{3(s)}$ yang berupa endapan putih. Tembaga tidak ikut bereaksi. Elektron hanya melewati tembaga untuk dapat mereduksi oksigen. Tembaga dan aluminium dapat teroksidasi oleh oksigen terlarut didalam elektrolit. Hasil reaksi oksidasi tembaga oleh oksigen adalah *cuprous okside* (Cu_2O) dan CuO .

Reaksi korosif tersebut tidak menghasilkan elektron meskipun jumlah aluminium berkurang. Berikut adalah reaksi korosif yang menghasilkan hidrogen :

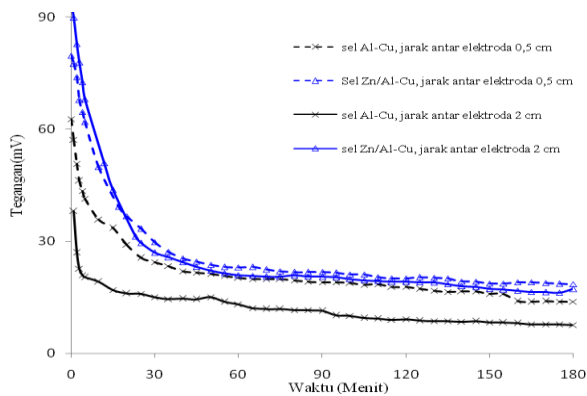


Pada proses *discharge*, sel Zn/Al-Cu diperkirakan menghasilkan oksida hidrat. Mulai dengan Al(OH)_3 yang diendapkan sebagai $\gamma\text{-AlOOH}$ atau $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dan berikutnya $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Sedangkan, Zn teroksidasi menjadi Zn^+ (Wales et al., 1975). Material gelatin yang gelap terbentuk selama *discharge*, sepertinya berasal dari logam Zn yang terpisah. Beberapa senyawa Zn dapat direduksi oleh hidrogen pada *Hydrogen evolving corrosion*.

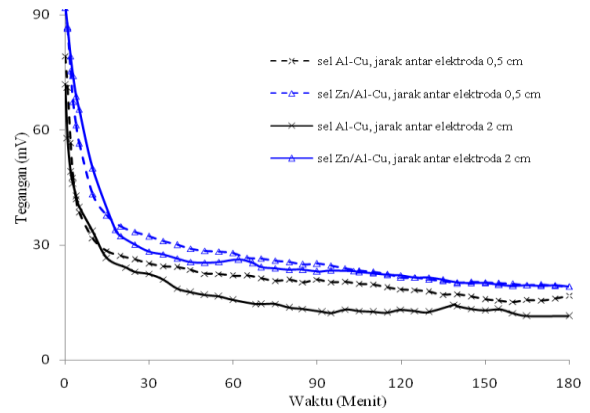


Gambar 3 Elektroda sebelum dan setelah discharge : (a) Aluminium sebelum discharge, (b) Aluminium setelah discharge dengan endapan $\text{Al}(\text{OH})_3$ pada permukaan, (c) Tembaga sebelum discharge (d) Tembaga setelah discharge dengan endapan Cu_2O dan CuO yang menempel pada permukaan, (e) Paduan seng-aluminium sebelum discharge dan (f) Paduan Seng-aluminium setelah discharge .

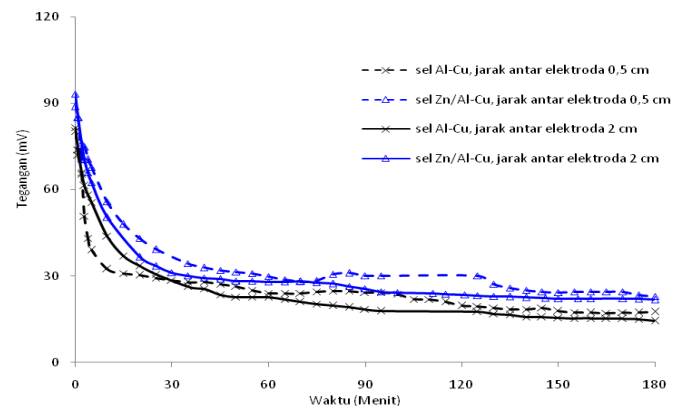
D. Karakteristik Discharge Sel Pengaruh Jarak Antar Elektroda



(a)

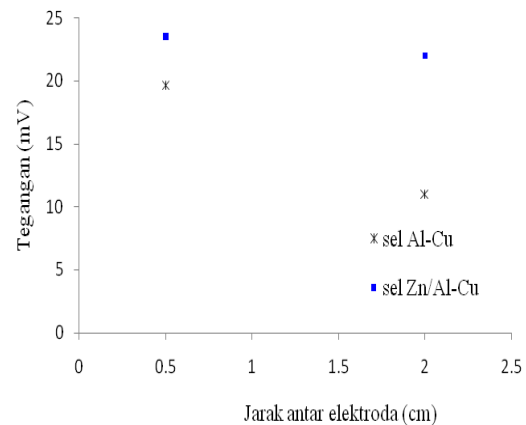


(b)



(c)

Gambar 4. Kurva *discharge* tegangan-waktu pada anoda dan jarak antar elektroda yang berbeda, . Laju elektrolit 0 liter/jam. Salinitas elektrolit (1) 3%, (2) 4% dan (3) 5%.

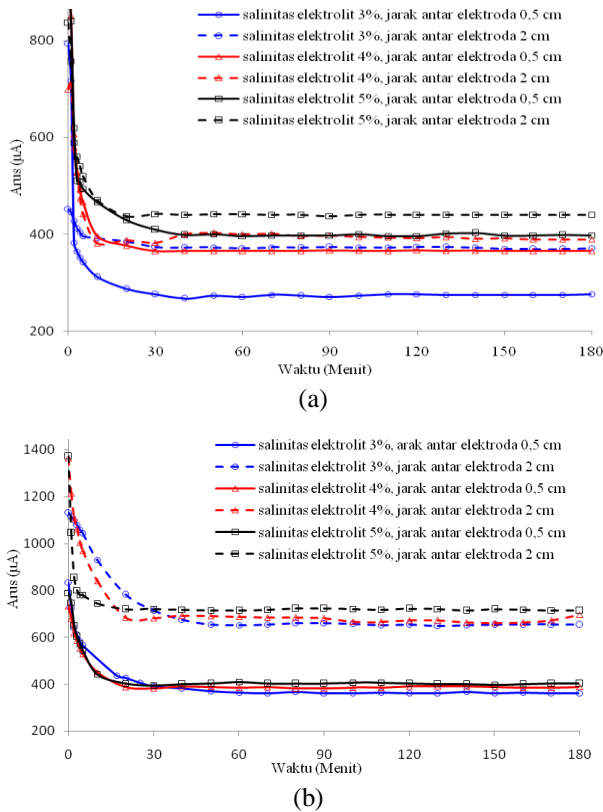


Gambar 5. Kurva tegangan rata-rata sel baterai air laut sebagai fungsi jarak antar elektroda pada sel dengan salinitas elektrolit 3% dan laju elektrolit 0 liter/jam.

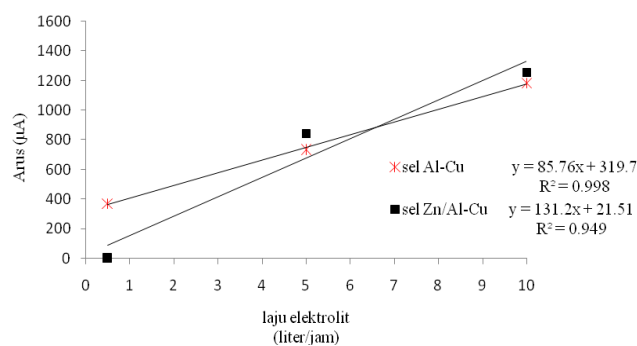
Gambar 5 menunjukkan tegangan *discharge* sel pada jarak anoda-katoda 2 cm lebih rendah dibanding pada jarak 0,5 cm,

hal tersebut disebabkan resistansi pada jarak 2 cm lebih besar jika dibandingkan jarak 0,5 cm. Selain jarak anoda-katoda, tegangan *discharge* sel juga dipengaruhi oleh reaksi *dissolve oksigen*. Reaksi *dissolve oksigen* bergantung pada kandungan oksigen terlarut didalam elektrolit (Wang N dkk, 2013). Gambar 4.7 juga menunjukkan potensial *discharge* sel Zn/Al-Cu lebih besar dibandingkan dengan sel Al-Cu. Hal tersebut disebabkan potensial korosi lempeng Zn/Al-Cu lebih negatif dibandingkan lempeng Al.

Pengaruh Laju Elektrolit



Gambar 6. Kurva *discharge* arus-waktu pada laju elektrolit sama 0,5 liter/jam, salinitas elektrolit dan jarak antar elektroda berbeda. (1) sel Al-Cu dan (2) sel Zn/Al-Cu



Gambar 7. Kurva arus rata-rata sel sebagai fungsi laju elektrolit pada salinitas 3% dan jarak antar elektroda 2 cm

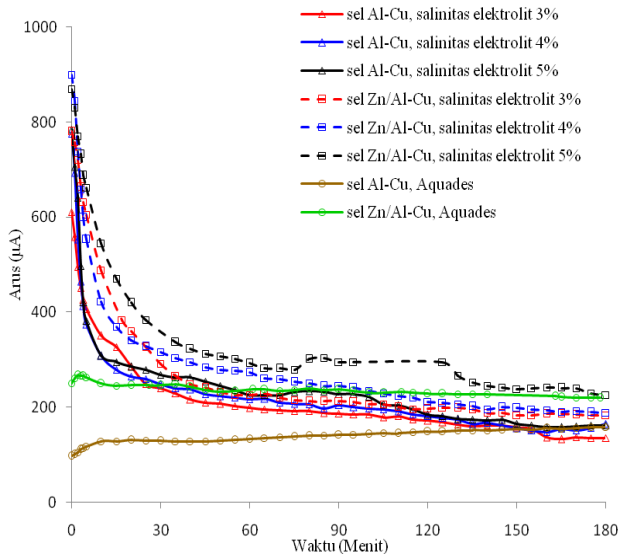
Gambar 7. menunjukkan bahwa laju elektrolit yang melewati sel memiliki pengaruh signifikan terhadap arus

keluaran sel. Sel dengan elektrolit yang diam didalam kotak sel memiliki profil tegangan yang semakin menurun terhadap waktu, sedangkan pada sel dengan elektrolit yang dialirkan pada laju 0,5 l/jam memiliki kurva tegangan datar rata-rata setelah menit ke-30. Aliran elektrolit dapat menyapu oksida dan hasil rekasi korosif lain yang menempel pada permukaan elektroda. Aliran elektrolit juga membawa oksigen segar memasuki sel sehingga sel dapat aktif kembali. Laju reaksi elektrokimia pada katoda bergantung pada jumlah oksigen terlarut didalam elektrolit (Hasvold dan Storkersen N, 2001). Reaksi *dissolve oxygen* pada katoda menghasilkan hidroksida (OH) di daerah dekat elektroda, sehingga sel dengan elektrolit yang diam didalam kotak sel lama-lama akan kehabisan oksigen didaerah dekat tembaga yang membuat arus keluaran menurun terhadap waktu. Performa sel menurun terhadap waktu juga disebabkan karena logam telapisi oksida-oksida dan hasil samping reaksi korosif lainnya.

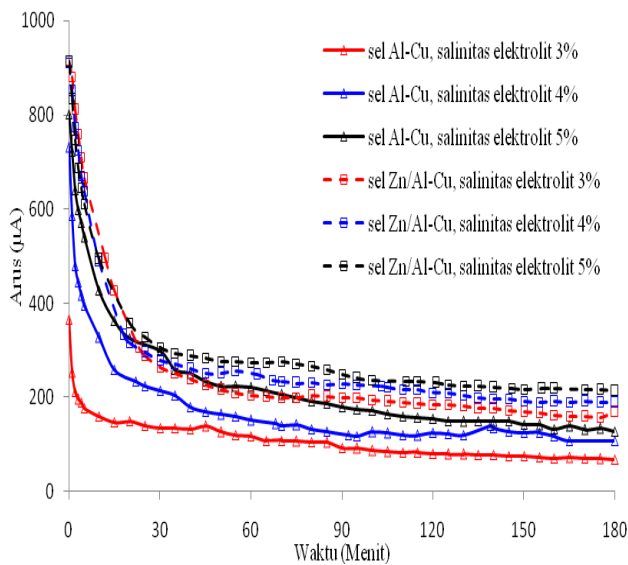
Gambar 6. menunjukkan kurva *discharge* arus terhadap waktu sel Al-Cu dan Sel Zn/Al-Cu pada salinitas elektrolit dan jarak antar elektroda yang berbeda, namun pada laju elektrolit yang sama. Terdapat pola yang sama antara sel Al-Cu dan sel Zn/Al-Cu yaitu arus keluaran yang lebih besar diperoleh dari salinitas elektrolit yang lebih besar, tetapi pada jarak antar elektroda yang lebih kecil. Hal tersebut disebabkan kandungan oksigen daerah antara anoda dan katoda pada jarak 2 cm lebih banyak dibandingkan pada jarak 0,5 cm, sehingga reaksi *dissolve oxygen* yang berlangsung lebih banyak. Pada keadaan salinitas elektrolit yang sama, sel Zn/Al-Cu memiliki arus yang lebih besar dibandingkan sel Al-Cu karena lempeng Zn/Al memiliki kerapatan arus korosi yang lebih besar dibanding lempeng Al.

Gambar 7 menunjukkan nilai arus rata-rata sel semakin besar dengan meningkatnya laju elektrolit yang melewati sel. Laju aliran elektrolit yang semakin cepat, maka dapat menyapu endapan yang menghalangi rekasi elektrokimia lebih cepat pula. Suplai oksigen baru yang di bawa oleh aliran elektrolit juga semakin banyak dengan meningkatnya laju aliran elektrolit. Normalnya arus keluaran sel baterai meningkat dengan meningkatnya laju aliran elektrolit, tetapi kerja hidrodinamik juga meningkat dengan meningkatnya laju aliran, sehingga terdapat kecepatan aliran optimal untuk mencapai nilai tegangan maksimal (Wang et al., 2014).

Pengaruh Salinitas



(a)



(b)

Gambar 8. Kurva *discharge* arus- waktu. Laju elektrolit 0 liter/jam dan pada jarak antar elektroda : (a) 0,5 cm (b) 2 cm.

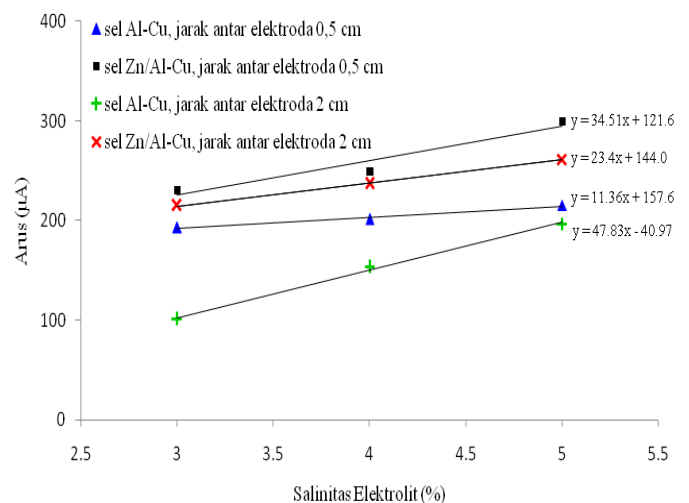
Gambar 8. menunjukkan pola *discharge* yang sama terdapat pada jarak anoda-katoda 2 cm dan 0,5 cm sel Al-Cu maupun sel Zn/Al-Cu. Arus yang lebih besar diperoleh pada salinitas elektrolit yang lebih besar karena semakin banyak NaCl yang terlarut dalam aquades maka semakin NaCl yang terionisasi. Apabila semakin banyak muatan-muatan dalam larutan maka semakin banyak arus listrik yang dihantarkan, hal tersebut akan menyebabkan nilai konduktifitas suatu larutan akan semakin besar. Pada satu jam pertama, nilai arus pada elektrolit aquades jauh lebih rendah jika dibandingkan pada elektrolit yang

mengandung sodium klorida. Pada aliran elektron didalam larutan elektrolit, garam sangat berperan penting. Reaksi reduksi pada katoda menghasilkan ion hidroksida. Ion sodium (Na^+) akan mengalir ke arah kiri untuk menetralkan ion OH^- yang dihasilkan tembaga. Selanjutnya, ion klorin (Cl^-) akan bergerak ke kanan menggantikan OH^- yang digunakan pada reaksi oksidasi. Hasilnya adalah elektron bergerak ke kanan yaitu dari tembaga ke aluminium dan reaksi tersebut hanya terjadi pada garam

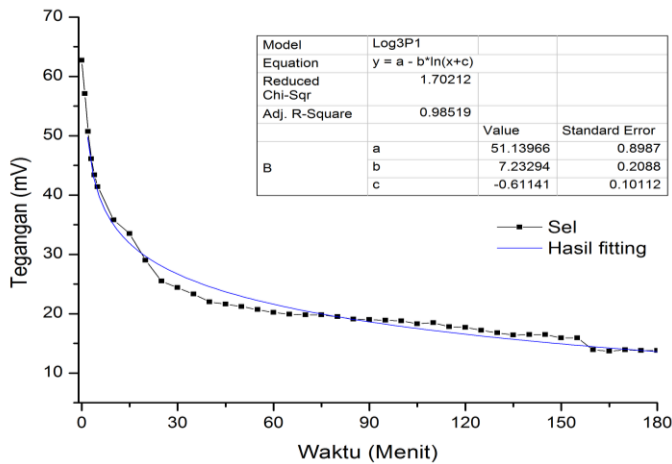
Tabel 4. Nilai konduktifitas larutan NaCl

Salinitas larutan NaCl	Konduktifitas (miliSiemen)	Temperatur larutan NaCl ($^{\circ}\text{C}$)
3%	44,7	31
4%	59,3	31,3
5%	73,9	31,4

Arus yang terukur pada sel dengan elektrolit aquades menunjukkan bahwa didalam aquades masih terkandung garam dalam jumlah sedikit, sehingga masih dapat terjadi reaksi elektrokimia yang mengasilkan arus. Nilai arus sel Zn/Al-Cu dengan elektrolit sodium klorida terlihat sama dengan elektrolit aquades setelah satu jam, hal tersebut disebabkan adanya endapan hasil reaksi korosi sel yang menghalangi keberlangsungan reaksi elektrokimia. Pada sel dengan elektrolit aquades, sel Zn/Al-Cu memiliki arus keluaran yang lebih besar jika dibandingkan sel Al-Cu. Hal tersebut disebabkan anoda Zn/Al memiliki kerapatan arus korosi lebih besar dibandingkan anoda Al.



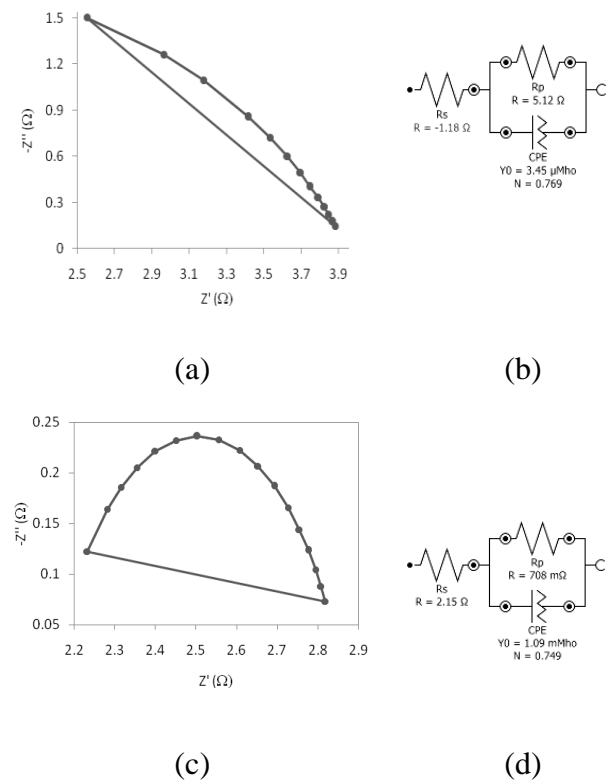
Gambar 9. Persamaan linear arus sel pada laju elektrolit 0 liter/jam sebagai fungsi salinitas elektrolit



Gambar 10. Fiting grafik discharge sel Al-Cu pada salinitas elektrolit 3%, jarak antar elektroda 0,5 cm dan laju elektrolit 0 liter/jam.

Gambar 10 adalah persamaan tegangan sel Al-Cu dengan pendekatan logaritmik. Persamaan logaritmik sel tersebut sesuai dengan persamaan tegangan sel yang terhubung ke sebuah beban yang diberikan oleh Ners yaitu $E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln K$.

E. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Elektroda



Gambar 11. Hasil uji EIS lempeng Al dan lempeng Zn/Al didalam larutan NaCl 3%. (a) Plot Nyquizr lempeng Al, (b) *Equivalent circuit model* lempeng Al (c) Plot Nyquizr lempeng Zn/Al dan (d) *Equivalent circuit model* lempeng Zn/Al.

Grafik setengah lingkaran mengindikasikan bahwa *interface* lempeng Al/larutan NaCl dan *interface* lempeng Zn/Al/larutan NaCl pada penelitian ini kontrol oleh proses aktivasi terkontrol (*activation-controlled mode*). Diameter setengah lingkaran memberikan informasi nilai resistansi *charge-transfer* (R_{ct} atau R_p) pada *interface* elektroda/larutan NaCl yang berhubungan dengan laju korosi. Semakin besar nilai R_p , maka semakin kecil laju korosinya karena laju korosi berbanding terbalik dengan R_p (Kun Yu dkk, 2012). Perpotongan pada sumbu x pada frekuensi yang lebih tinggi memberikan informasi nilai resistansi larutan (R_s). Nilai R_p lempeng Al dari plot Nyquizr adalah $5,12 \Omega$, sedangkan nilai R_p lempeng Al/Zn adalah $708 \text{ m}\Omega$. Nilai R_p lempeng Zn/Al yang lebih kecil dari lempeng Al mengindikasikan bahwa resistansi korosi paduan tersebut lebih rendah, tetapi sebaliknya laju korosinya lebih tinggi. C_{dl} atau CPE adalah kapasitansi *double layer*. CPE mencakup dua parameter yaitu Y_0 dan N . Dimensi Y_0 adalah $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^N$, sedangkan N adalah pangkat tanpa dimensi. Parameter Y_0 dapat dikonversi menjadi kapasitansi menggunakan persamaan berikut :

$$C = Y_0 (\omega_m)^{N-1}$$

Dengan C adalah kapasitansi dalam $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^N$, ω_m adalah frekuensi angular yang merupakan bagian imajiner dari impedansi ($-Z''$) yang bernilai maksimum (wang N dkk, 2014). Lempeng Al memiliki nilai Y_0 3,45 μMho dan N 0,769, sedangkan lempeng Zn/Zl memiliki nilai Y_0 1,09 mMho dan N 0,749. Berdasarkan nilai Y_0 dan N pada plot Nyquizr, nilai CPE lempeng Al lebih kecil dari lempeng Zn/Al. Kecilnya nilai CPE pada lempeng Al menunjukkan adalah lapisan pelindung yang padat dan relatif tipis pada permukaan lempeng didalam lingkungan klorida saat proses korosi (Kun Yu, 2015). Selama proses korosi, lapisan pelindung yang semakin menumpuk pada permukaan lempeng menghalangi Al larut dalam elektrolit (Kun Yu dkk, 2012).

IV. KESIMPULAN

Performa sel terbaik pada sel Al-Cu dan sel Zn/Al-Cu didapatkan pada keadaan salinitas elektrolit 5%, jarak antar elektroda 2 cm dan laju elektrolit 0,5 liter/jam dengan nilai tegangan dan arus rata-rata masing-masing sel sebesar 45,02 mV 440,19 μA dan 73,56 mV 717,79 μA . Sel Zn/Al-Cu memiliki performa *discharge* lebih baik jika dibanding sel Al-Cu dengan ditunjukkan tegangan dan arus yang lebih besar, tetapi anoda paduan Zn/Al memiliki laju korosi lebih besar jika dibandingkan anoda Al. laju korosi paduan Zn/Al sebesar 0,50254 mm/tahun, sedangkan Al sebesar 0,00094615 mm/tahun . Proses *interface* elektrokimia lempeng Al/larutan NaCl dan lempeng Zn/Al/larutan NaCl pada penelitian kontrol oleh proses aktivasi terkontrol (*activation-controlled mode*) dengan nilai R_s -1,18 Ω dan R_p 5,12 Ω untuk lempeng Al dan R_s 2,15 Ω dan R_p 708 $\text{m}\Omega$ untuk lempeng Zn/Al.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdulrehman, T., Yousif, Z. A., Al-Ameri, S., Abdulkareem, I., Abdulla, A. M., & Haik, Y. (2015). Enhancing the performance of Mg-Al brine water batteries using conductive polymer-PEDOT: PSS. *Renewable Energy*, 82, 125–130.
- [2] Aoki, Y. & Hiroi, M., (1968), Cupric Oxalate, A New Cathode Material for Reserve Batteries, Vol. 13, hal. 1563-1568.
- [3] Al-Qasem, O. S. W., (2012), Modeling and Simulation of Lead-Acid Storage Batteries within Photovoltaic Power Systems, Thesis Ph.D., Universitas Nasional An-Najah, Nablus, Palestina.
- [4] Chasteen, S. V, Chasteen, N. D., & Doherty, P. (2008). The Salty Science of the Aluminium Air Battery. *The Physics Teacher*, 46, 544–547.
- [5] Chang, J. & Ye, L. W., (2014), Thermoelectric Performances of Seawater and Al₂O₃ Nanofluids Using Battery Facility, Vol. 3, hal. 35-40.
- [6] Hasvold, Ø., Henriksen, H., Melvø, E., Citi, G., Johansen, B. Ø., Kjøningsen, T., & Galetti, R. (1997). Sea-water battery for subsea control systems. *Journal of Power Sources*, 65(1-2), 253–261.
- [7] Hongyang, Z., Pei, B. & Dongying, J., (2009), Electrochemical Performance of Magnesium Alloy and its Application on The Sea Water Battery, S88-S91.
- [8] Kiehne, H. A. (2003). *Battery Technology Handbook*.
- [9] Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). *HANDBOOK OF BATTERIES*. (D. L. & T. B. Reddy, Ed.) (3rd ed.). united stated of america: McGraw-hill Companies.
- [10] May, T. P., Schuldiner, S. & Burbank, J., (1948), *Anodic Behavior of Aluminium and Zinc Alloys in Sea Water*, NLR Report C-3277, Naval Research Laboratory, Washington.
- [11] Mayilvel Dinesh, M., Saminathan, K., Selvam, M., Srither, S. R., Rajendran, V., & Kaler, K. V. I. S. (2015). Water soluble graphene as electrolyte additive in magnesium-air battery system. *Journal of Power Sources*, 276, 32–38.
- [12] Medeiros, M. G. & Dow, G., (1998), Magnesium-Solution Phase Catholyte Seawater Electrochemical System, Vol. 80, hal. 78-82.
- [13] Mohandas, K. S., Sanil, N., Noel, M. & Rodrigues, P., (2002), Electrochemical Intercalation of Aluminium Chloride in Graphite in The Molten Sodium Chloroaluminate Medium, Vol. 41, hal. 927-932.
- [14] Ramakanth, S. (2012). Cheaper Electrodes Having Higher Efficiency Using Salt Water and Salt Vinegar Electrolytes. *International Journal of Innovative Research & Development*, 1(8), 310–322.
- [15] Rao, K. V., (2001), Performance Evaluation of Mg-AgCl Batteries for Underwater Propulsion, Vol. 51, No. 6, hal. 161-170.