

PEMODELAN BATERAI AIR GARAM DAN PENGUJIAN SALINITAS ELEKTROLIT BERBASIS PLC

Mohammad Noor Hidayat¹⁾, Fahriza Mayrullah^{*1,2)}, Sapto Wibowo¹⁾

¹⁾Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia

²⁾ Teknik Elektro, Politeknik Negeri Banjarmasin, Banjarmasin, Indonesia

e-mail: moh.noor@polinema.ac.id, mayrullah73@gmail.com, sapto.wibowo@polinema.ac.id

Diterima: 7 Juni 2022 – Direvisi: 28 Juni 2022 – Disetujui: 30 Juni 2022

ABSTRACT

One of the technologies of this power source is a brine battery. In this study, testing the effect of electrolyte salinity levels on the performance of brine batteries with two different types of electrodes was carried out, namely using magnesium anodes and aluminum anodes. In its cathode part used inert metal or carbon. Variations are carried out on the electrolyte solution used in the form of brine containing Na and Cl ions as electron conductors as well as reductors. Because the reaction of the brine battery system is relatively complex, a study was conducted in this study to see the effect of electrolyte salinity levels (27, 37, and 47 ppt) on the dc voltage produced. The measured parameters include the value of the dc voltage and the resulting current as well as the change in the salinity level after operating for a certain period of time. Tests were performed on batteries to drain the 0.47Ω resistor load operating for 24 hours non-stop where the parameter measurement setup was performed automatically using a PLC. The values of such parameters are monitored and recorded during 24-hour operation. Based on the results of measurements, the average energy capacity that can be used in Mg electrode cells is 17.6% of the total energy generated from the reaction of battery cells, then the average usable battery capacity on the Al electrode cell is 2.6% of the total energy produced.

Keywords: battery, energy, energy capacity, oxidation, salinity, salt.

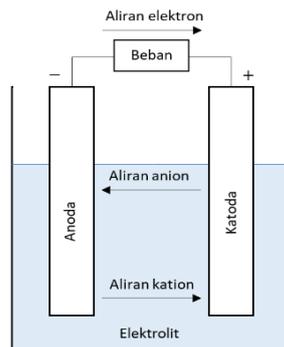
ABSTRAK

Salah satu teknologi sumber tenaga ini adalah baterai air garam. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian pengaruh tingkat salinitas elektrolit terhadap performa baterai air garam yang dengan dua jenis elektroda yang berbeda yaitu menggunakan anoda magnesium dan anoda aluminium. Pada bagian katodanya digunakan logam inert atau karbon. Variasi dilakukan pada larutan elektrolit yang digunakan berupa air garam yang mengandung ion Na dan Cl sebagai penghantar elektron sekaligus sebagai reduktor. Karena reaksi sistem baterai air garam ini relatif kompleks, maka dalam penelitian ini dilakukan studi untuk melihat pengaruh tingkat salinitas elektrolit (27, 37, dan 47 ppt) terhadap tegangan dc yang dihasilkan. Parameter yang diukur meliputi nilai tegangan dc dan arus yang dihasilkan serta perubahan tingkat salinitas setelah beroperasi dalam kurun waktu tertentu. Pengujian dilakukan pada baterai untuk mengaliri beban resistor 0.47Ω yang beroperasi selama 24 jam nonstop dimana setup pengukuran parameter tersebut dilakukan secara otomatis menggunakan PLC. Nilai-nilai parameter tersebut dimonitor dan dicatat selama pengoperasian 24 jam. Berdasarkan hasil pengukuran, rata-rata kapasitas energi yang dapat dipakai pada sel elektroda Mg adalah 17.6% dari total energi yang dihasilkan dari reaksi sel baterai, kemudian rata-rata kapasitas baterai yang bisa digunakan pada sel elektroda Al sebesar 2.6% dari total energi yang dihasilkan.

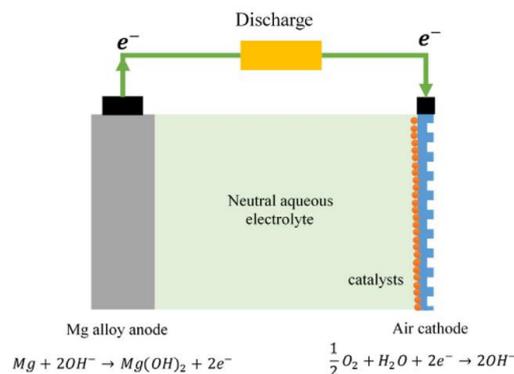
Kata Kunci: baterai, energi, garam, oksidasi, kapasitas energi, salinitas.

I. PENDAHULUAN

ENERGI terbarukan merupakan energi yang dihasilkan melalui proses pembangkitan yang sumbernya berasal dari alam yang tidak akan pernah habis dan selalu dapat diperbaharui. Contohnya seperti matahari, angin, biomassa, tenaga air, panas bumi, dan pasang surut [1],[2]. Baterai sebagai salah satu sumber energi listrik hingga kini penelitiannya masih terus dikembangkan, khususnya dalam usaha meningkatkan efisiensi dan kapasitas, memperkecil ukuran, menurunkan biaya



Gambar 1. Cara kerja *discharge* sel elektrokimia [13]



Gambar 2. Struktur dan prinsip kerja baterai *Mg-Udara* [15]

produksi [3],[4], pengoptimalan kinerja baterai [5],[6],[9] maupun meningkatkan tegangan sel [8],[9]. Penelitian tentang baterai air garam hingga saat ini cukup menarik disebabkan oleh faktor bahan elektrolitnya yang ramah lingkungan [10],[11], memiliki biaya moderat, karakteristik keamanan yang sangat baik, serta memiliki umur simpan tak terbatas dalam kondisi kering. Selain dari itu, tingkat salinitas air garam/laut pada elektrolit baterai air garam apabila terjadi peningkatan konsentrasi garam maka akan menghasilkan peningkatan interaksi antara kation dan anion/pelarut serta penurunan kandungan molekul pelarut keadaan bebas [12].

Dalam studi literatur sebelumnya terkait penelitian baterai air laut/garam terdapat hubungan bahwa tingkat salinitas mempunyai pengaruh terhadap tegangan keluaran [1],[2]. Sebagai contoh kombinasi antara elektroda *Fe* dan *Al* dengan salinitas 17% akan menghasilkan tegangan (V_{oc}) 0.32-0.434 V, sebaliknya dengan salinitas 8.5% pada logam yang sama akan diperoleh V_{oc} sebesar 0.216-0.28 V. Peneliti lain yang dilakukan oleh Masrufaiyah et.al [8] menunjukkan bahwa kombinasi antara *Al-Cu* dengan menggunakan variasi jarak antar elektroda dan variasi tingkat salinitas elektrolit (3%, 4%, dan 5%) maka diperoleh hasil yang mengindikasikan hal yang sama, yaitu semakin tinggi tingkat salinitas elektrolit menghasilkan tegangan yang lebih tinggi pula.

Berdasarkan dari beberapa hasil studi literatur tersebut, maka penelitian ini ditujukan untuk menguji (a) hipotesis bahwa tegangan yang dihasilkan oleh sel elektroda tanpa beban (V_{oc}) adalah berbanding lurus dengan tingkat salinitas elektrolit. Tahapan selanjutnya, diberikan beban tetap dan dioperasikan selama 24 jam akan terjadi penurunan tegangan sel (E) sebagaimana sifat baterai pada umumnya. Dari asumsi ini dilakukan pengujian lanjutan (b) apakah penurunan tegangan (E) sel baterai tersebut diiringi dengan penurunan tingkat salinitas elektrolitnya. Selanjutnya pengujian bagian (c) perbandingan performa baterai air garam yang menggunakan elektroda anoda *magnesium* dengan anoda *aluminium*. Pengukuran tegangan (E) dan arus (I dan I_{sc}) pada pengujian ini menggunakan PLC agar hasil yang didapatkan bisa tersimpan secara otomatis ke dalam memori komputer dengan tujuan memperkecil kesalahan pembacaan. Kontribusi dari penelitian ini adalah menguji hubungan antara tingkat salinitas elektrolit, tegangan (E) dan arus (I). Kemudian membuat analisa dan pembahasan perbandingan performa terhadap baterai dengan jenis logam anodanya berbeda. Pengujian dilakukan terhadap pemodelan baterai air garam dengan anoda *magnesium* dan katoda udara (*Mg-Udara*) dengan tingkat

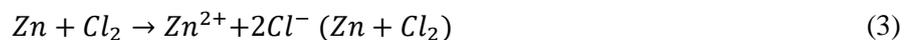
salinitas elektrolit 27 ppt, 37 ppt dan 47 ppt. Tingkatan ini dimaksudkan mewakili 3 kondisi salinitas elektrolit yaitu: rendah (27 ppt), sedang (37 ppt) dan tinggi (47 ppt). Masing-masing pengujian dilakukan selama 24 jam dengan periodik pengambilan data per 1 jam. Kemudian pengujian diulang kembali dengan anoda yang berbeda (*aluminium*) dan katoda udara (*Al-Udara*). Pengujian masing-masing untuk tingkat salinitas elektrolit 27 ppt, 37 ppt, dan 47 ppt. Dari hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik untuk dianalisa sehingga didapatkan perbandingannya.

II. METODE PENELITIAN

A. Baterai

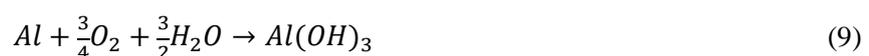
Baterai adalah sebuah perangkat yang terdiri dari satu atau lebih sel elektrokimia yang dapat mengkonversi energi kimia akibat adanya reaksi redoks sehingga menghasilkan energi listrik arus searah DC [13]. Ada dua jenis sel baterai, yaitu baterai primer dan baterai sekunder dimana sel baterai ini berturut-turut merupakan sel baterai sekali pakai (*disposable battery*) dan sel baterai yang dapat diisi kembali (*rechargeable*) [3],[6]. Bagian penting dari sel baterai ini adalah (a) elektroda, (b) elektrolit (rangkaiannya dalam), (c) terminal, (d) separator dan (e) wadah atau tabung reaksi. Elektroda ini sendiri terdiri dari anoda (berpotensi negatif) dan katoda (berpotensi positif). Sebagaimana diberikan pada Gambar 1, adanya beda potensial antara kedua elektroda ini apabila dihubungkan melalui sebuah beban (rangkaiannya luar) akan menyebabkan elektronnya mengalir dari anoda ke katoda melalui elektrolit dan sebaliknya arus akan mengalir dari katoda ke anoda melalui beban. Bentuk reaksi kimia yang berbeda terjadi pada kedua elektroda ini yaitu reaksi oksidasi (pada anoda) dan reaksi reduksi (pada katoda) [8].

Reaksi *discharge* pada Gambar 1 ini dapat dituliskan dimana asumsi yang digunakan adalah material anoda adalah logam *Zn* (seng) sedangkan untuk material katoda adalah Cl_2 (klorin). Berdasarkan skema tersebut maka reaksi yang terjadi pada anoda (oksidasi), katoda (reduksi), dan reaksi keseluruhan (*discharge*) berturut-turut diberikan oleh Persamaan 1-3.



Pada Gambar 2 diberikan skema baterai *Mg-Udara* dimana bagian anodanya adalah logam magnesium (*Mg*) sedangkan katodanya adalah karbon (*C*). Penerapan karbon ini akan menyebabkan terjadinya proses korosi magnesium [14] akibat karbon (sebagai golongan elektroda inert) tidak akan bereaksi jika digunakan sebagai anoda ataupun katoda [3]. Pada gambar tersebut proses *discharge* pada anoda terjadi oksidasi dengan melepaskan 2 elektron, sedangkan pada katoda udara O_2 terjadi reduksi dengan reaksi dengan H_2O sehingga menghasilkan OH^- dan elektron. Adapun reaksi anoda, katoda, dan reaksi keseluruhan ini berturut-turut diberikan pada persamaan (4), (5) dan (6) [15].

Gambar 3 secara skematis digambarkan struktur dasar baterai primer *Al-Udara* yang terdiri dari anoda aluminium, katoda udara, dan elektrolit yang bahannya bisa berupa natrium hidroksida (*NaOH*), kalium larutan hidroksida (*KOH*), maupun natrium klorida (*NaCl*). Reaksi elektrokimia pada elektroda untuk anoda, katoda, dan reaksi keseluruhan berturut-turut diberikan pada Persamaan 7-9 [16].



Elektrolit merupakan zat yang larut dan terurai ke dalam bentuk ion-ion bermuatan listrik dimana larutan atau endapan ini selanjutnya akan menjadi konduktor listrik [17]. Garam *NaCl* merupakan elektrolit kuat yang mampu menghantarkan arus listrik dengan baik. Pada setiap variasi konsentrasi *NaCl* menghasilkan kuat arus yang berbeda, hal ini dikarenakan besarnya hantaran listrik bergantung pada konsentrasi larutan [17]. *NaCl* merupakan garam yang tidak dapat memecah molekul air H_2O . Apabila garam ini dilarutkan dalam air, maka hanya akan terjadi reaksi ionisasi sehingga terbentuk ion Na^+ dan Cl^- . Secara ringkas reaksi tersebut dapat dituliskan sebagai Persamaan 10 [16],[18]:



Selain elektrolit, faktor lain yang juga berpengaruh terhadap kinerja sel adalah impedansi internal dimana impedansi ini akan berdampak pada tegangan yang turun (*drop*) saat beroperasi. Impedansi internal total sel merupakan jumlah dari resistansi ionik elektrolit, resistansi elektronik saat aktif, tegangan listrik kedua elektroda, resistansi sambungan, serta pengumpul arus. Disamping energi yang terbuang sebagai efek dari panas yang ditimbulkan oleh reaksi, tegangan jatuh (polarisasi ohmik atau *drop IR*) ini akan sebanding dengan arus yang didapatkan dari sistem. Seluruh resistansi tersebut akan sesuai dengan hukum Ohm dimana terdapat hubungan arus dan tegangan jatuh yang linear [13]. Tegangan sel baterai E yang terhubung dengan beban eksternal R dapat digambarkan dengan Persamaan 11.

$$E = E_0 - [(\eta_{ct})_a + (\eta_c)_a] - [(\eta_{ct})_c + (\eta_c)_c] - iR_i = iR \quad (11)$$

dimana,

E_0 : Gaya gerak listrik atau tegangan open-circuit sel

$(\eta_{ct})_a, (\eta_{ct})_c$: Aktifasi polarisasi *charge-transfer overvoltage* pada anoda dan katoda

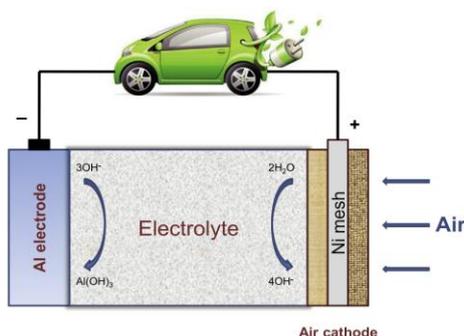
$(\eta_c)_a, (\eta_c)_c$: Konsentrasi polarisasi pada anoda dan katoda

i : Arus operasi sel ketika ada beban

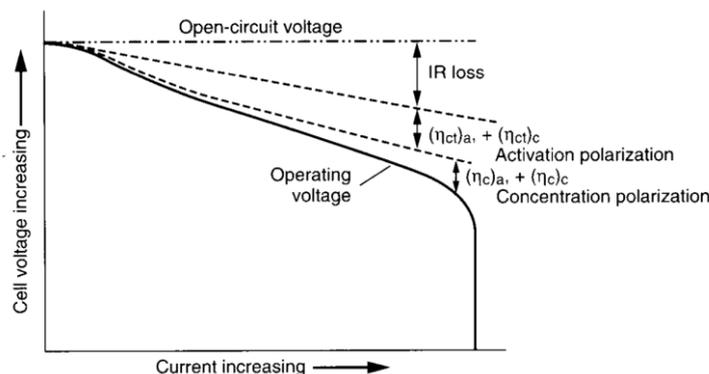
R_i : Resistansi internal sel

Berdasarkan Persamaan 11 ditunjukkan bahwa berkurangnya tegangan sel disebabkan oleh polarisasi dan *drop* pada iR sehingga saat arus operasi sangat rendah dengan tegangan *drop IR* kecil, maka tegangan sel bisa saja mendekati tegangan *output-circuit* dan menghantarkan hampir semua energi sesuai perhitungannya [13].

Berdasarkan Persamaan 11 tegangan sel berkurang disebabkan oleh polarisasi dan *drop* iR . Pada saat arus operasi sangat rendah dengan polarisasi dan *drop* iR kecil, tegangan sel bisa mendekati tegangan open-circuit dan menghantarkan hampir semua energi [13]. Pada Gambar 4 ditunjukkan hubungan antara polarisasi sel dan arus *discharge* dimana semakin besar arus operasi maka akan semakin besar pula penurunan (*drop*) tegangan sel operasi dari tegangan *open-circuit*. Hal ini terjadi akibat adanya kerugian iR yang semakin besar, nilai polarisasi aktif, serta polarisasi konsentrasi yang meningkat [13].



Gambar 3. Ilustrasi dan struktur baterai *Al-Udara* dengan 3 lapis katoda udara [15]



Gambar 4. Polarisasi sel sebagai fungsi arus operasi [13]

B. Parameter Baterai

1) *Tegangan Keluaran Baterai*

Secara teori, potensial standar sel elektrokimia dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 12 [15].

$$E_{sel}^o = E_{reduksi}^o - E_{oksidasi}^o \quad (12)$$

Namun secara praktis, potensial sel elektrokimia dapat menggunakan Persamaan 13.

$$E = E^o - \frac{RT}{\eta F} \ln K \quad (13)$$

dimana:

R = Konstanta gas 8.314472 J/mol K)

T = Suhu dalam satuan mutlak (Kelvin)

η = Jumlah elektron yang dipindahkan dari reaksi sel

F = Konstanta Faraday atau jumlah coulomb per mol elektron (9.6485×10^4 C/mol)

K = Hasil bagi reaksi sel

2) *Kapasitas Baterai*

Untuk mengetahui banyaknya muatan listrik di dalam suatu baterai bisa dihitung kapasitas baterai C_{Ah} (dalam Ah) dengan menggunakan Persamaan 14 [13].

$$C_{Ah} = \int_0^t I(t) dt \quad (14)$$

3) *Muatan Energi Baterai*

Pada umumnya energi (Wh) yang dihasilkan dari baterai ditentukan dengan Persamaan 15 [13]

$$E = \int_0^t U(t).I(t) dt \quad (15)$$

dimana:

U = Tegangan (V)

I = Arus discharge (A)

t = Waktu discharge (detik)

4) *Resistansi Internal Baterai*

Cara yang sering dipakai untuk menghitung resistansi internal adalah dengan metode *direct-current*, caranya membandingkan tegangan terminal pada dua beban yang berbeda. Baterai dibebani dengan arus i_1 selama beberapa detik dan didapat tegangan U_1 . Kemudian arus akan naik menjadi i_2 dan tegangan akan turun menjadi U_2 . Persamaan 16 sebagai berikut [13].

$$R_i = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (16)$$

5) *Pelepasan Muatan Baterai Sendiri (Self Discharge)*

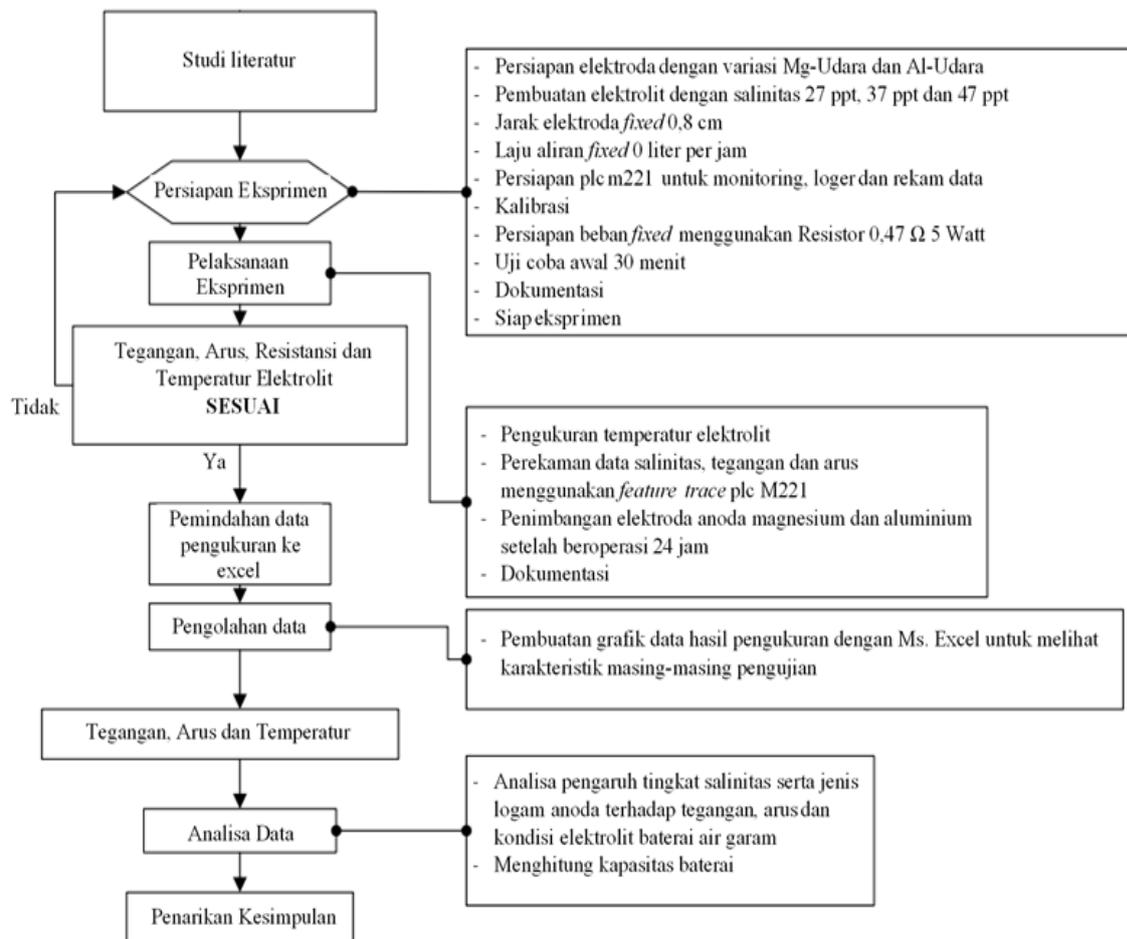
Hilangnya muatan secara perlahan pada elektroda positif dan negatif disebut sebagai *self discharge* dimana reaksi ini berpengaruh terhadap baterai berupa [13]:

- Efisiensi baterai akan berkurang
- Peningkatan gas hidrogen
- Panas yang ditimbulkan dari *self discharge* akan menyebabkan kinerja baterai menjadi rendah.

6) *Uji korosi (Corrosion test)*

Korosi atau peluruhan logam anoda pada sel baterai dapat dihitung menggunakan Persamaan 17.

$$v = \frac{\Delta m}{s \times t} \quad (17)$$



Gambar 5. Diagram alir langkah-langkah penelitian

Dimana v adalah rata-rata korosi ($mg \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$); Δm adalah total berat peluruhan (mg); s adalah luas penampang anoda (cm^{-2}) dan t adalah waktu perendaman (h^{-1}) [19].

C. Langkah-Langkah Penelitian

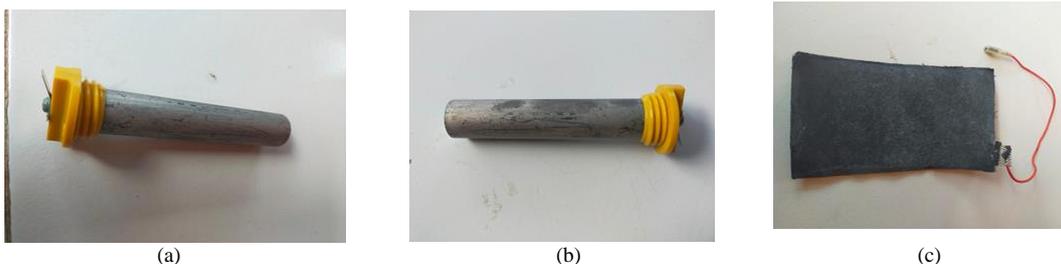
Langkah-langkah dalam penelitian ini dapat diberikan sebagaimana Gambar 5. Selain penelusuran dan studi literatur, langkah-langkah lainnya telah dituliskan secara komprehensif. Parameter dari objek pengukuran dalam penelitian baterai ini adalah tegangan sel baterai, arus baterai, sifat-sifat dan kuantitas fisis dari sistem baterai air garam. Dalam penelitian ini digunakan alat dan bahan sebagai berikut.

1) Alat Pengujian

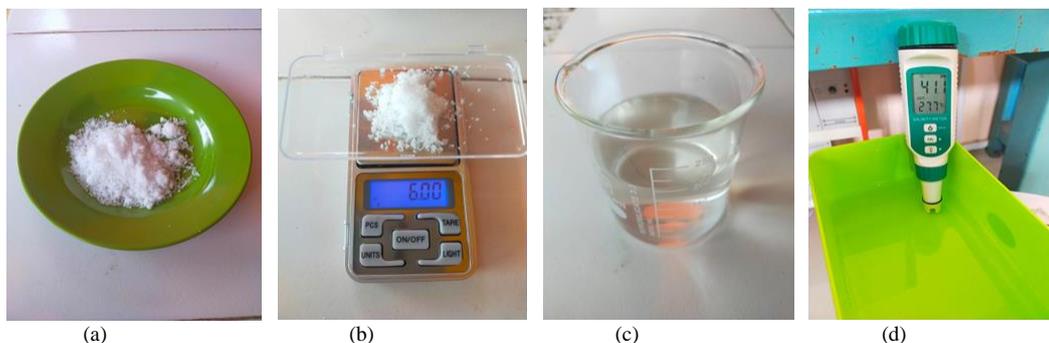
- PLC M221 sebagai perangkat antarmuka untuk memonitor dan membaca sensor dan mengirimkan datanya ke komputer dalam format ms excel.
- Komputer sebagai perekam data atau penyimpan hasil *data logger*.
- Sensor salinitas untuk mengukur nilai salinitas dari elektrolit yang digunakan pada baterai.
- Multimeter digital untuk melakukan pengukuran manual dimana ini hanya digunakan sebagai pengecekan silang untuk memvalidasi hasil pengukuran yang dilakukan secara otomatis.
- *Thermometer gun* untuk mengukur suhu sel elektrokimia.
- Timbangan digital untuk mengukur garam dapur sebagai bahan elektrolit.
- Gelas ukur yang berguna untuk mengukur takaran aquades sebelum dicampur rata dengan garam dapur.
- Salinitas meter digital digunakan untuk mengukur nilai salinitas elektrolit yang dibuat dari campuran aquades dan garam dapur.



Gambar 6. Tabung reaktor untuk sel baterai air garam



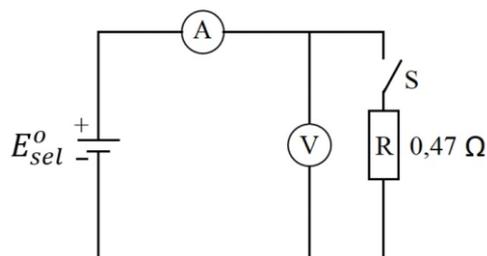
Gambar 7. Elektroda anoda berbahan (a) aluminium dan (b) magnesium, serta (c) katoda berbahan *graphite* (karbon).



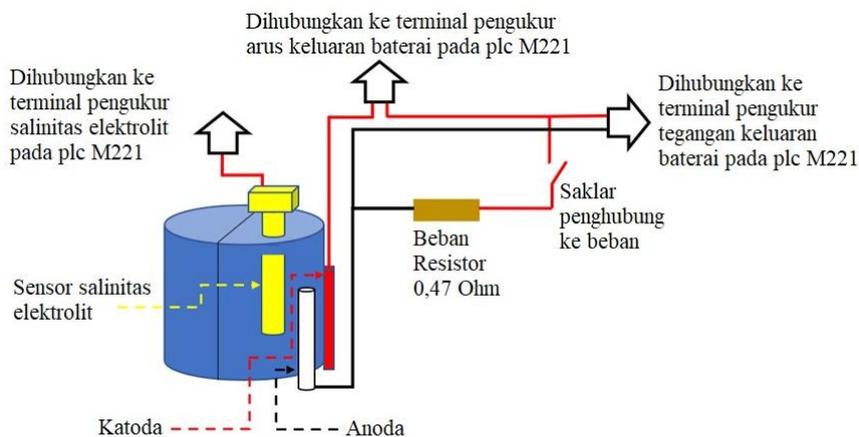
Gambar 8. Proses pembuatan elektrolit: (a) garam dapur, (b) pengukuran massa garam, (c) aquades, dan pengukuran nilai salinitas larutan elektrolit secara manual.

2) Bahan Pengujian:

- Tabung sel baterai (seperti Gambar 6) yang terdiri dari sebuah tabung reaktor berbentuk setengah tabung dengan diameter atas/bawah 100 mm dan tinggi 100 mm dengan total volume 380 mm³.
- Elektroda yang digunakan dalam pengujian (seperti Gambar 7) adalah elektroda anoda dan katoda. Elektroda anoda berbentuk silinder dengan diameter 20 mm dan tinggi 100 mm dengan volume $31,41 \times 10^3$ mm³. Selain itu untuk berat anoda magnesium dan aluminium berturut-turut adalah 72,94 gram dan 94,06 gram. Sebaliknya elektroda katoda yang digunakan berbentuk persegi panjang dengan dimensi luas 80 mm \times 140 mm. Bahan katoda relatif fleksibel, tidak tembus air, dan bersifat konduktor yang baik dengan 3 lapis dengan susunan *graphite*-tembaga-*graphite*. Jarak antara elektroda anoda dan katoda adalah 0.8 mm.
- Gambar 8 menunjukkan bahwa untuk mendapatkan ion *NaCl* didapatkan dari garam dapur, ditimbang beratnya sesuai perhitungan. Aquades diukur menggunakan gelas ukur, dicampurkan, diaduk supaya merata. Gambar paling kanan proses pengecekan salinitas elektrolit menggunakan salinitas manual.
- Elektrolit yang dibuat menggunakan *NaCl* dan aquades dimana proses pembuatan larutan elektrolit ditunjukkan pada Gambar 8. Dalam pengujian digunakan elektrolit dengan beberapa tingkat salinitas berbeda (yaitu 27, 37, dan 47 ppt). Satuan ppt atau *part per thousand* merupakan ukuran kandungan molekul bahan tertentu dalam 1000 molekul cairan atau air. Dalam hal ini, elektrolit 27 ppt menunjukkan adanya kandungan 27 molekul garam dalam 1000 molekul air. Hubungan antara massa garam



Gambar 9. Skema rangkaian listrik untuk pengujian arus dan tegangan pada baterai.



Gambar 10. Diagram pengujian baterai air garam.

yang dicampurkan agar menghasilkan tingkat salinitas tertentu dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 18.

$$m_g = x V \quad (18)$$

dimana m_g adalah massa garam yang diperlukan, x adalah tingkat salinitas (dalam ppt) yang diinginkan sedangkan V adalah volume larutan yang akan digunakan. Untuk mendapatkan larutan elektrolit dengan tingkat salinitas 27 ppt yang akan digunakan dalam 380 mm^3 volume sel baterai, maka diperlukan:

$$m_g = \frac{27}{1000} \times 380 = 10.26 \text{ gram} \quad (19)$$

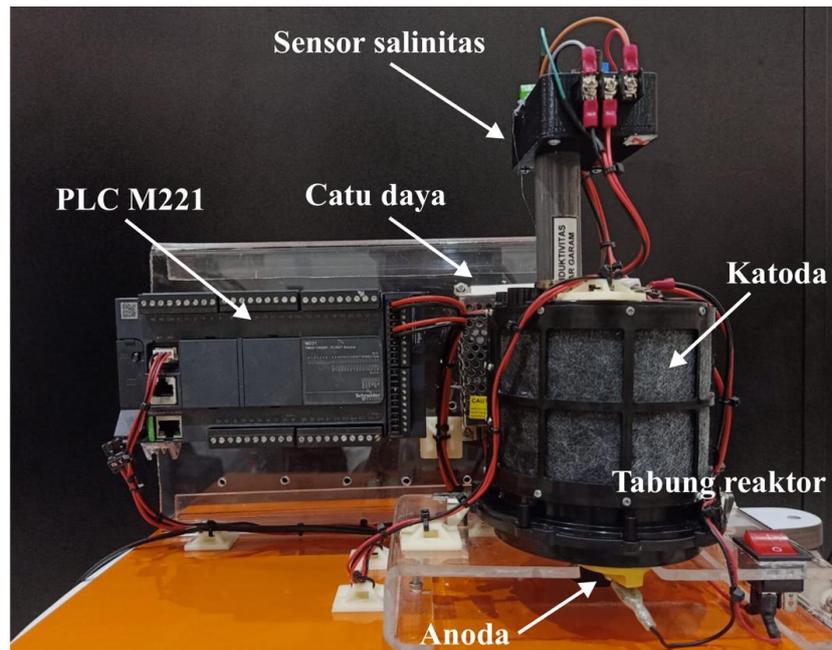
Dengan menggunakan rumusan yang sama maka untuk mendapatkan larutan elektrolit dengan tingkat salinitas 37 dan 47 ppt berturut-turut adalah 14.06 dan 17.86 gram.

D. Sistem Pengujian

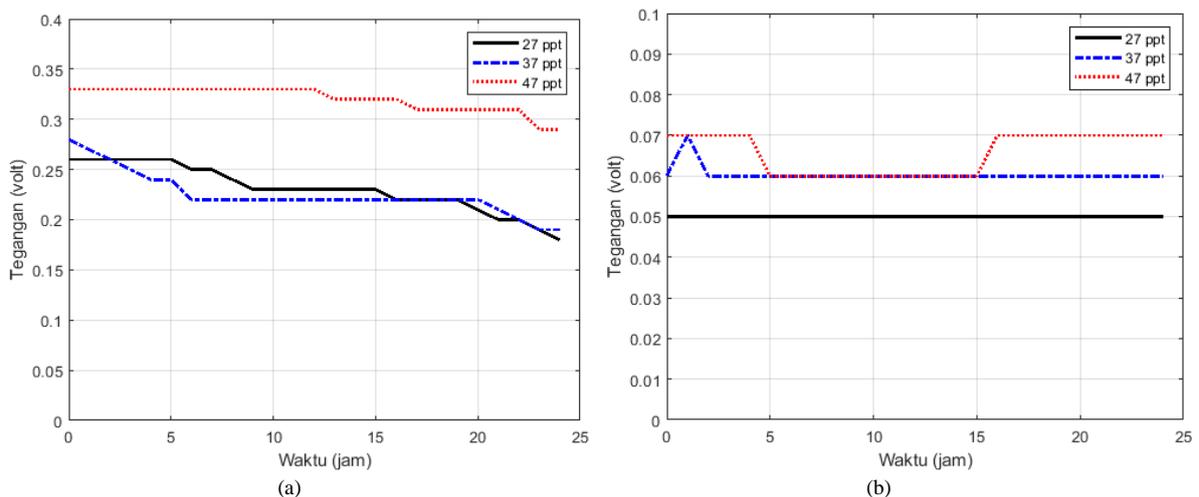
Rangkaian pengujian dari pemodelan baterai air garam dibuat sebagaimana diberikan pada Gambar 9. Nilai arus listrik dapat diperoleh melalui hubungan seri sedangkan pengukuran tegangan diperoleh melalui hubungan secara paralel. Pada Gambar 8, apabila beban resistor R dihubungkan melalui hubungan singkat sakelar S , maka arus listrik akan mengalir melewati beban R sehingga arus yang keluar dari sumber sel baterai dan tegangannya R dapat diperoleh. Nilai beban resistor 0.47Ω digunakan untuk mengetahui penurunan tegangan sel baterai saat sakelar dihubungkan. Dengan variasi tingkat salinitas elektrolit yang digunakan maka akan diketahui pengaruh tingkat salinitas ini dengan nilai tegangan dan arus sel baterai. Diagram pemodelan baterai air garam beserta rangkaian pengujiannya secara lebih detail dapat ditunjukkan pada Gambar 10.

E. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian dalam eksperimen yang dilakukan mengikuti tahapan yang ada pada diagram alir pengujian sebagaimana Gambar 11. Pengujian dilakukan pada 2 jenis elektroda anoda berbeda (magnesium dan aluminium) untuk larutan elektrolit dengan nilai tingkat salinitas berbeda (27, 37, dan 47 ppt). Setiap pengujian dilakukan selama 24 jam waktu operasi baterai, sehingga total lama pengujian minimal 6×24 jam. Setelah satu kegiatan pengujian selesai maka sel baterai dibersihkan dan dikeringkan untuk



Gambar 11. Pemodelan baterai air garam.



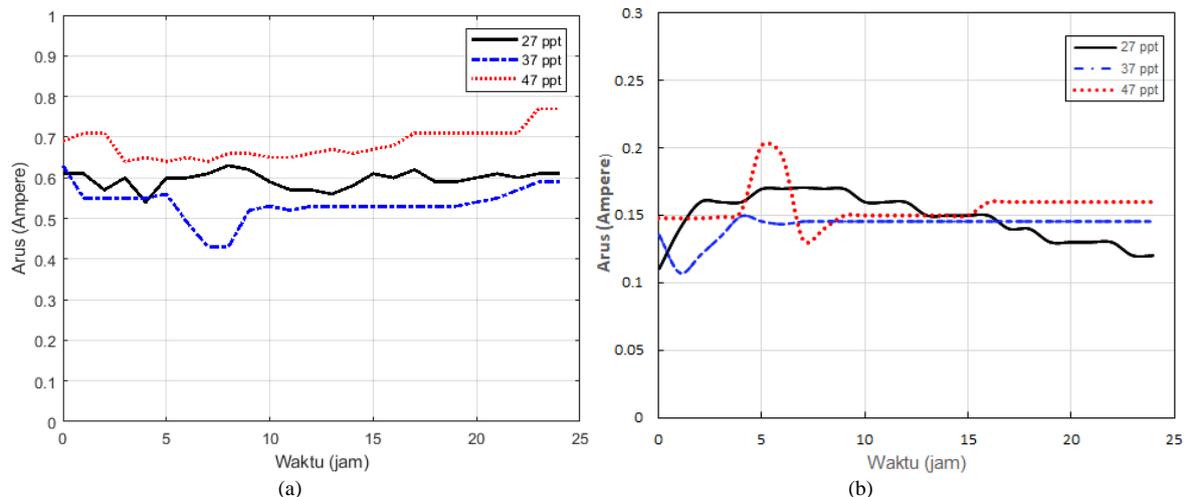
Gambar 12. Pengukuran tegangan sel baterai untuk anoda (a) *Magnesium* dan (b) *Aluminium* untuk tingkat salinitas berbeda.

menghindari adanya residu yang dapat mempengaruhi hasil pada kegiatan pengujian berikutnya. Tampilan fisik elektroda khususnya anoda yang akan kembali digunakan untuk diuji pada tingkat salinitas berbeda perlu dicermati dengan seksama karena reaksi oksidasi pada elektroda tersebut akan menyebabkan korosi. Untuk menjamin keakuratan dalam pengujian maka pemeriksaan terhadap kemungkinan kebocoran maupun gangguan kelistrikan perlu diantisipasi dengan baik.

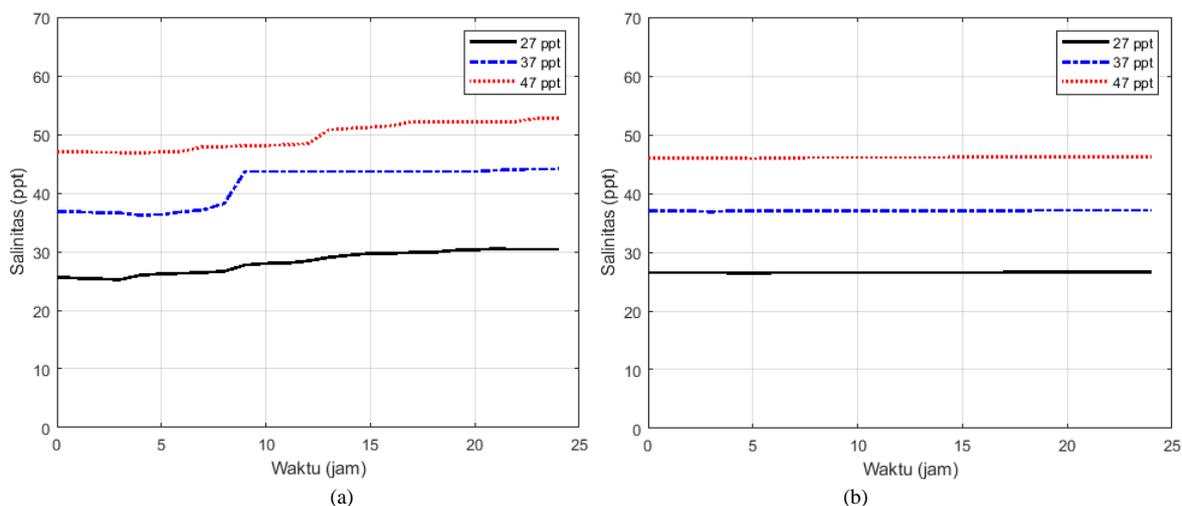
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi sistem keseluruhan dapat ditunjukkan pada Gambar 11. Sistem tersebut terdiri dari *PLC Schneider Electric Modicon M221* sebagai perangkat untuk memonitor parameter yang diukur pada model baterai air garam, sejumlah sensor untuk membaca arus, tegangan, dan tingkat salinitas elektrolit. Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh hasil pengukuran parameter-parameter tersebut sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12-14. Pengujian dilakukan pada dua anoda berbeda dilakukan untuk melihat hubungan antara tegangan dan tingkat salinitas (Gambar 12), hubungan antara arus dan tingkat salinitas (Gambar 13), serta perubahan tingkat salinitas setelah beroperasi 24 jam (Gambar 14).

Berdasarkan hasil pengukuran sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12 diperoleh tegangan elektroda anoda *Mg* (a) lebih tinggi dibanding *Al* (b). Nilai tegangan pada anoda *Mg* tersebut sebanding dengan tingkat salinitas yang digunakan dimana tingkat salinitas 47 ppt menghasilkan tegangan anoda



Gambar 13. Pengukuran arus baterai dengan bahan (a) *Mg*–udara dan (b) *Al*–udara untuk tingkat salinitas berbeda.



Gambar 14. Pengukuran perubahan tingkat salinitas elektrolit dalam pengujian baterai untuk bahan (a) *Mg*–udara dan (b) *Al*–udara dengan beberapa tingkat salinitas elektrolit.

lebih tinggi dibandingkan dengan tingkat salinitas yang lain. Tegangan awal yang terukur pada sel baterai untuk anoda *magnesium* (a) adalah 0.33 V, 0.28 V, dan 0.26 V berturut-turut untuk tingkat salinitas 47 ppt, 37 ppt, dan 27 ppt. Nilai rerata tegangan untuk masing-masing tingkat salinitas dari tinggi ke rendah adalah 0.32 V, 0.23 V, dan 0.23 V. Nilai rerata tegangan tersebut dihitung saat awal pengoperasian hingga selesai (selama 24 jam). Sebaliknya untuk sel baterai elektroda anoda *Al* diperoleh hasil tegangan yang relatif kecil yaitu antara 0.05 V hingga 0.07 V untuk ketiga tingkat salinitas elektrolit. Berdasarkan Gambar 12, penurunan tegangan pada anoda *Al* tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan anoda *Mg*. Bahkan tren tegangan pada elektroda anoda *Al* lebih cenderung konstan untuk dua tingkat salinitas elektrolit kecuali pada tingkat salinitas 47 ppt. Penurunan tegangan elektroda anoda *Mg* diperoleh 0.04 V, 0.09 V, dan 0.08 V untuk tingkat salinitas dari tinggi ke rendah. Berdasarkan hasil pengamatan fisik elektroda anoda pada Tabel 2 diperoleh bahwa tingkat kekorosian elektroda anoda pada *Mg* lebih tinggi dibandingkan *Al* sehingga ini menunjukkan bahwa anoda *Al* lebih tahan korosi dibanding *Mg*.

Gambar 13 menunjukkan hubungan antara arus yang dihasilkan oleh sel baterai dengan tingkat salinitas elektrolit yang digunakan untuk mengalirkan arus melewati beban yang sama. Pada elektroda anoda *Mg* diperoleh besaran arus cenderung sebanding dengan tingkat salinitasnya. Meski demikian, pada Gambar 13 (a) diperoleh bahwa arus yang dihasilkan untuk tingkat salinitas 27 ppt lebih tinggi dibandingkan anoda 37 ppt. Nilai arus yang terukur diawal pada sel baterai air garam untuk anoda *Mg* (a) adalah sebanding dengan tingkat salinitasnya dari tinggi ke rendah, yaitu 0.69 A, 0.63 A, dan 0.61

TABEL 1
 PARAMETER BATERAI UNTUK BEBERAPA JENIS LOGAM-UDARA [16]

Batteries	Theoretical Voltage (V)	Theoretical specific capacity (Ah/Kg)	Theoretical energy density (kWh/kg)	Practical operating voltage (V)
Li-udara	3.4	1170	13.0	2.4
Zn-udara	1.6	658	1.2	1.0–1.2
Mg-udara	3.1	920	6.8	1.2–1.4
Na-udara	2.3	687	1.6	2.3
Al-udara	2.7	1030	8.1	1.2–1.6

TABEL 2
 HASIL PENGUKURAN DAN PENGAMATAN TERHADAP PERUBAHAN FISIS SISTEM BATERAI AIR GARAM*

Jenis Pengukuran	Elektrolit (ppt)	Mg-Udara		Al-Udara	
		Isc (A)	Voc (v)	Isc (A)	Voc (v)
Pengukuran arus hubung singkat (Isc) dan tegangan rangkaian terbuka (Voc)	27	0.625	1.433	0.155	0.684
	37	0.702	1.454	0.184	0.798
	47	1.524	1.495	0.197	0.898
Pengukuran perubahan berat logam anoda sebelum dan setelah digunakan selama 24 jam	27	Massa awal (g)	Massa akhir (g)	Massa awal (g)	Massa akhir (g)
	37	72.71	54.12	94.06	92.78
	47	72.71	47.52	94.06	92.45
Pengukuran perubahan volume elektrolit sebelum dan setelah digunakan selama 24 jam	27	Volume awal (ml)	Volume akhir (ml)	Volume awal (ml)	Volume akhir (ml)
	37	380	240	380	360
	47	380	200	380	345
Pengamatan terhadap visualisasi perubahan elektrolit sebelum dan setelah digunakan selama 24 jam	27	Visualisasi awal	Visualisasi akhir	Visualisasi awal	Visualisasi akhir
	37	Larutan air garam bening	Larutan putih ce-rah kental, banyak endapan pada katoda	Larutan air garam bening	Larutan putih re-dup kecoklatan agak kental, sedi-kit endapan pada katoda
	47				

*Beban resistor yang digunakan 0.47 Ohm.

TABEL 3
 PERFORMA BATERAI SELAMA OPERASI

Salinitas	Mg-Udara				Al-Udara			
	Kapasitas	Energi			Kapasitas	Energi		
		Polarisasi	Ri	RL		Polarisasi	Ri	RL
(Ah)	(Wh)	(Wh)	(Wh)	(Ah)	(Wh)	(Wh)	(Wh)	
47	18.48	16.80	5.47	5.36	3.84	2.02	7.26	0.27
37	14.16	3.73	14.17	2.69	3.60	1.70	6.35	0.22
27	10.08	7.88	4.75	1.81	2.88	1.33	4.11	0.14

A. Sebaliknya untuk elektroda anoda *Al* diperoleh besar arus lebih tinggi untuk tingkat salinitas 47 ppt dibandingkan arus pada dua tingkat salinitas yang lain. Hasil ini memiliki kecenderungan yang sama dimana arus yang dihasilkan pada Gambar 13 (b) khususnya untuk tingkat salinitas 37 dan 47 ppt terlihat berhimpitan. Nilai arus untuk kedua tingkat salinitas ini sesuai dengan hasil yang diperoleh pada hasil tegangan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12 (b). Namun demikian, pada Gambar 13(b) hasil yang diperoleh untuk tingkat salinitas yang terendah (27 ppt) diperoleh arusnya sempat lebih tinggi (terlihat dari jam ke-2 sampai dengan jam ke-16) dibandingkan dengan tegangan yang dihasilkan untuk tingkat salinitas yang sama sebagaimana Gambar 12(b). Hasil ini tidak seperti yang diprediksi karena seharusnya nilai arus pada salinitas 27 ppt lebih rendah dibanding arus untuk dua tingkat salinitas lainnya. Peningkatan arus ini disebabkan penurunan nilai impedansi polarisasi elektrolit dan tahanan dalam.

Pada saat pengukuran tegangan dan arus pada Gambar 12 dan 13, pengukuran lain juga dilakukan terhadap perubahan tingkat salinitas elektrolit yang digunakan. Hasil pengukuran perubahan tingkat salinitas ini diberikan pada Gambar 14 (a) untuk anoda *Mg* dan (b) untuk anoda *Al*. Secara umum diperoleh bahwa tingkat salinitas elektrolit yang beroperasi selama 24 jam untuk semua tingkat salinitas elektrolit akan mengalami kenaikan. Perubahan tingkat salinitas ini tampak jelas terlihat pada sel baterai dengan anoda *Mg* dibandingkan anoda *Al*. Perubahan tingkat salinitas pada *Mg* ini berturut-turut 47 ppt adalah 5.79 ppt, 7.24 ppt dan 4.76 untuk salinitas 47 ppt, 37 ppt, 27 ppt. Perubahan tingkat salinitas untuk anoda *Al* tidak terlihat jelas misalnya untuk tingkat salinitas yang digunakan dari tinggi ke rendah diperoleh

berturut-turut adalah 0.165 ppt, 0.1 ppt, 0.02 ppt. Hasil ini menunjukkan adanya konsistensi bahwa besarnya tegangan dan arus yang dihasilkan pada jenis elektroda *Mg* dibandingkan elektroda *Al* adalah bahwa nilai tingkat salinitas elektrolit yang digunakan akan ikut naik secara signifikan.

Berdasarkan Tabel 2 ditunjukkan hasil pengukuran dan pengamatan terhadap V_{oc} antar tingkat salinitas yang digunakan dimana diperoleh perbedaan hasilnya tidak terlalu jauh. Nilai tertinggi untuk elektroda anoda *Mg* adalah untuk elektrolit dengan tingkat salinitas 47 ppt yaitu sebesar 1.495 V. Namun demikian jika nilai ini dibandingkan dengan literatur seharusnya V_{oc} adalah sama dengan E_0 yaitu 3.1 V [16]. Sebaliknya untuk elektroda anoda *Al* terdapat nilai V_{oc} tertinggi yaitu pada elektrolit dengan salinitas 47 ppt sebesar 0.898 V namun dalam literatur seharusnya nilai ini adalah 2.7 V [16]. Acuan nilai-nilai ini dapat dilihat pada Tabel 1. Meski demikian, perbedaan hasil pengujian ini dengan nilai pembandingan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa perbedaan bentuk geometri elektroda anoda, tingkat salinitas, ataupun volume elektrolit yang digunakan berbeda dapat menghasilkan pengukuran parameter-parameter diatas yang juga berbeda. Untuk membuktikan hal tersebut maka digunakan contoh hasil pengamatan terhadap elektroda *Mg* sebagaimana Gambar 12 dan 13. Pada kedua gambar tersebut diperoleh tegangan dan arus yang terukur lebih tinggi dibanding *Al* dengan tingkat korosi yang rendah. Tingkat korosi ini dapat dilihat melalui selisih berat logam anoda sebelum dan setelah digunakan. Semakin besar selisihnya maka semakin besar korosinya. Namun karena korosi yang terjadi juga berkaitan dengan luas penampang yang tercelup dalam larutan maka bentuk geometri dari elektroda ini juga akan mempengaruhi hasil arus dan tegangannya. Faktor lain yang mempengaruhi adalah tingkat salinitas yang digunakan.

Tabel 3 menunjukkan performa dari pengujian dari sistem sel baterai untuk dua jenis elektroda yang digunakan. Berdasarkan hasil tersebut diperoleh bahwa kapasitas energi yang dihasilkan oleh sel baterai anoda *Mg* rata-rata 323% lebih tinggi dibandingkan dengan kapasitas energi yang dihasilkan oleh anoda *Al*. Hal ini dikarenakan nilai peluruhan akibat oksidasi (Tabel 2) pada anoda *Mg* (18.59 gr, 25.19 gr, 32.6 gr) lebih besar dibandingkan peluruhan anoda *Al* (1.28 gr, 1.61 gr, 2.19 gr). Besarnya kapasitas energi yang dihasilkan dan energi yang digunakan ditunjukkan pada kolom pertama dan terakhir dari masing-masing kolom jenis anoda. Berdasarkan pada Tabel tersebut diperoleh bahwa rata-rata kapasitas energi yang bisa dipakai pada sel baterai dengan elektroda anoda *Mg* sekitar 17.6 % dari total energi yang ditimbulkan dari reaksi sel baterai, sedangkan pada sel baterai dengan anoda *Al* kapasitas energi yang dapat dipakai sekitar 2.6 %.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh tingkat salinitas elektrolit terhadap kinerja baterai air garam pada dua sel elektroda berbahan *magnesium* dan *aluminium*. Pertama, berdasarkan dari hasil pengujian terdapat pengaruh antara tingkat salinitas terhadap nilai tegangan dan arus sel baterai. Pada pengukuran sel baterai untuk *Mg* untuk tingkat salinitas (dalam ppt) yaitu (47, 37, 27) diperoleh nilai V_{oc} (1.5V, 1.454V, 1.433V) sedangkan untuk I_{sc} adalah (1.52A, 0.702A, 0.635A). Sebaliknya pada sel elektroda *Al* diperoleh nilai V_{oc} adalah (0.898V, 0.798V, 0.68V) sedangkan I_{sc} adalah (0.197A, 0.184A, 0.125A). Berdasarkan hasil yang diperoleh maka pengujian bagian (a) didapatkan tingkat salinitas elektrolit berbanding lurus dengan tegangan sel elektroda (E_0), untuk V_{oc} adalah benar. Kedua, dalam pengujian performa baterai air garam selama 24 jam bagian (b) dengan beban Resistor 0.47 Ω diperoleh bahwa elektroda *Mg-Udara* nilai E turun, sedangkan nilai salinitas elektrolit naik. Untuk elektroda *Al-Udara* nilai E tetap dan nilai salinitas elektrolit naik. Pada sel baterai *Mg* jauh lebih tinggi nilai tegangan dan arusnya dibandingkan *Al*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Bani *et al.*, "Feasibility study of a low cost saltwater lamp for rural area," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 10, no. 7, pp. 167–176, 2018, doi: 10.30880/ijie.2018.10.07.016.
- [2] N. A. Bani *et al.*, "Harvesting Sustainable Energy from Salt Water: Part i - Effect of Types of Electrodes," *2018 2nd Int. Conf. Smart Sensors Appl. ICSSA 2018*, pp. 84–87, 2018, doi: 10.1109/ICSSA.2018.8535751.
- [3] F. Rahmawati, *ELEKTROKIMIA: Transformasi Energi Kimia-Listrik*, Pertama. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [4] C. S. Li, Y. Sun, F. Gebert, and S. L. Chou, "Current Progress on Rechargeable Magnesium–Air Battery," *Adv. Energy Mater.*, vol. 7, no. 24, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1002/aenm.201700869.
- [5] A. Susanto, M. S. Baskoro, S. H. Wisudo, M. Riyanto, and F. Purwangka, "Performance of Zn-Cu and Al-Cu electrodes in seawater battery at different distance and surface area," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 298–303, 2017, doi: 10.20508/ijrer.v7i1.5506.g7018.
- [6] I. A. Jumare, "Energy storage with salt water battery: A preliminary design and economic assessment," *J. Energy Storage*, vol. 27, no. December 2019, p. 101130, 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101130.

- [7] M. Zhang, X. Song, X. Ou, and Y. Tang, "Rechargeable batteries based on anion intercalation graphite cathodes," *Energy Storage Mater.*, vol. 16, pp. 65–84, 2019, doi: 10.1016/j.ensm.2018.04.023.
- [8] M. Masrufaiyah, R. Hantoro, G. Nugroho, T. R. Biyanto, and N. L. Hamidah, "Performance of Seawater Activated Battery as Alternative Energy Resources," *IPTEK J. Eng.*, vol. 3, no. 1, p. 11, 2017, doi: 10.12962/joe.v3i1.2266.
- [9] A. Susanto, M. S. Baskoro, S. H. Wisudo, M. Riyanto, and F. Purwangka, "Seawater battery with Al-Cu, Zn-Cu, Gal-Cu electrodes for fishing lamp," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 7, no. 4, pp. 1857–1868, 2017, doi: 10.20508/ijrer.v7i4.6291.g7229.
- [10] Y. Shen *et al.*, "Water-in-salt electrolyte for safe and high-energy aqueous battery," *Energy Storage Mater.*, vol. 34, pp. 461–474, 2021, doi: 10.1016/j.ensm.2020.10.011.
- [11] S. Park, B. Senthilkumar, K. Kim, S. M. Hwang, and Y. Kim, "Saltwater as the energy source for low-cost, safe rechargeable batteries," *J. Mater. Chem. A*, vol. 4, no. 19, pp. 7207–7213, 2016, doi: 10.1039/c6ta01274d.
- [12] Y. Yamada, J. Wang, S. Ko, E. Watanabe, and A. Yamada, "Advances and issues in developing salt-concentrated battery electrolytes," *Nat. Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 269–280, 2019, doi: 10.1038/s41560-019-0336-z.
- [13] L. Redy, *Basics Concepts*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Inc., 2011. doi: 10.1002/9780470933886.ch1.
- [14] T. Zhang, Z. Tao, and J. Chen, "Magnesium-air batteries: From principle to application," *Materials Horizons*, vol. 1, no. 2, pp. 196–206, 2014. doi: 10.1039/c3mh00059a.
- [15] F. Tong, S. Wei, X. Chen, and W. Gao, "Magnesium alloys as anodes for neutral aqueous magnesium-air batteries," *J. Magnes. Alloy.*, vol. 9, no. 6, pp. 1861–1883, 2021, doi: 10.1016/j.jma.2021.04.011.
- [16] Y. Liu, Q. Sun, W. Li, K. R. Adair, J. Li, and X. Sun, "A comprehensive review on recent progress in aluminum–air batteries," *Green Energy Environ.*, vol. 2, no. 3, pp. 246–277, 2017, doi: 10.1016/j.gee.2017.06.006.
- [17] V. L. Martins and R. M. Torresi, "Water-in-salt electrolytes for high voltage aqueous electrochemical energy storage devices," *Curr. Opin. Electrochem.*, vol. 21, pp. 62–68, 2020, doi: 10.1016/j.coelec.2020.01.006.
- [18] J. Yang *et al.*, "Corrosion inhibition of pure Mg containing a high level of iron impurity in pH neutral NaCl solution," *Corros. Sci.*, vol. 142, pp. 222–237, 2018, doi: 10.1016/j.corsci.2018.07.027.
- [19] J. Ma, Y. Zhang, M. Ma, and C. Qin, "Jo ur na l P re of," *Corros. Sci.*, p. 108695, 2020, doi: 10.1016/j.corsci.2020.108695.