

RANCANG BANGUN PERBANDINGAN LUAS BATERAI BERBAHAN ALUMINIUM MENGGUNAKAN ELEKTROLIT AIR LAUT BERSIRKULASI TERBUKA DENGAN SISTEM KONTROL DATA TERSIMPAN

Gilbert Mario Sembiring¹, Juan Evan Soaduon Tampubolon¹, Agus Dharma², I Gusti Agung Putu Raka Agung.² I Made Mataram.²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

²Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Jl. Raya Kampus Unud Jimbaran, Kec. Kuta Selatan, Kabupaten Badung,
Bali 80361 gilbertmario344@gmail.com¹, juanevan2003@gmail.com¹,
agus_dharma@unud.ac.id², rakaagung@unud.ac.id²,
made_mmataram@yahoo.com³

ABSTRAK

Pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia masih belum maksimal walaupun meskipun memiliki potensi yang sangat besar. Salah satu bentuk pemanfaatan potensi tersebut adalah baterai aluminium-karbon menggunakan elektrolit air laut, yang menawarkan tingkat keamanan dan keberlanjutan lebih baik dibandingkan dengan baterai konvensional. Namun, performa baterai aluminium-karbon masih dapat ditingkatkan, khususnya dalam hal ketebalan nilai tegangan tanpa beban. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai tegangan yang dihasilkan oleh dua jenis metode rancang bangun dengan luas elektroda yang sama dari baterai aluminium-karbon (empat sel berukuran $5 \times 5 \times 0,2 \text{ cm}$ dan satu sel berukuran $10 \times 10 \times 0,2 \text{ cm}$ yang menggunakan sistem sirkulasi terbuka. Untuk pengujian, kedua jenis rancang bangun ini dikendalikan oleh Arduino sebagai pembaca tegangan, yang meliputi pembacaan nilai tegangan yang dihasilkan oleh masing-masing baterai. *Output* tegangan yang dihasilkan pada baterai aluminium-karbon akan dibaca oleh Arduino melalui pin ADC dan ditampilkan pada layar LCD I2C 16x2 dengan sirkulasi air laut dibantu oleh pompa DC sebagai media penggerak aliran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode rancang bangun baterai aluminium-karbon empat sel berukuran $5 \times 5 \times 0,2 \text{ cm}$ yang disusun secara seri menghasilkan kenaikan nilai tegangan maksimal sebesar 255,7%, dengan nilai 4,34 V, dibandingkan dengan metode rancang bangun baterai satu sel berukuran $10 \times 10 \times 0,2 \text{ cm}$ yang hanya menghasilkan 1,22 V.

Kata Kunci: Arduino Uno, Baterai aluminium-karbon, Bersirkulasi terbuka, Elektrolit air laut

ABSTRACT

The utilization of renewable energy in Indonesia remains suboptimal, despite its substantial potential. One promising approach to harness this potential is through aluminum-air batteries using seawater as an electrolyte, offering greater safety and sustainability compared to conventional batteries. However, the performance of aluminum-air batteries can still be improved, particularly in terms of stabilizing the no-load voltage. This study aims to determine the voltage output generated by two battery design methods with identical electrode surface areas: one configuration using four cells measuring $5 \times 5 \times 0.2$ cm arranged in series, and the other using a single cell measuring $10 \times 10 \times 0.2$ cm. Both designs operate with an open circulation system. For testing, both battery configurations were monitored using an Arduino microcontroller as a voltage reader, which captured the voltage output from each battery. The voltage output from the aluminum-air batteries was read by the Arduino through the ADC pin and displayed in real time on a 16x2 I2C LCD screen, with the seawater circulation driven by a DC pump acting as the flow medium. The experimental results showed that the aluminum-air battery with four cells of $5 \times 5 \times 0.2$ cm arranged in series achieved a maximum voltage increase of 255.7%, reaching 4.34 V, compared to the single-cell configuration of $10 \times 10 \times 0.2$ cm, which produced only 1.22 V.

Key Words: Aluminum-Air Battery, Arduino Uno, Open Circulation, Seawater Electrolyte

1. PENDAHULUAN

Air laut adalah sumber daya alam yang memiliki potensi besar namun masih belum sepenuhnya dimanfaatkan, terutama sebagai sumber energi terbarukan. Di Indonesia, dengan wilayah perairan seluas 6,4 juta km^2 , yang terdiri dari lautan territorial seluas 290.000 km^2 . Wilayah berdaulat Indonesia meliputi zona tambahan seluas 270.000 km^2 , zona ekonomi eksklusif seluas 3.000.000 km^2 , dan landas kontinen sebesar 2.800.000 km^2 [1].

Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah baterai air laut yang menggunakan air laut sebagai elektrolit. Baterai air laut dapat mengurangi penggunaan baterai konvensional seperti lithium-ion yang memiliki beberapa kelemahan. Beberapa kelemahan baterai konvensional lithium-ion yaitu kandungan bahan beracun yang sulit didaur ulang dan risiko kebakaran karena sifat elektrolit baterai konvensional lithium-ion yang mudah terbakar. Baterai air laut juga lebih mudah dioperasikan, ketahanan yang baik terhadap kondisi eksternal, dan kinerja yang stabil meski pada berbagai kedalaman.

Penggunaan baterai air laut sebagai

solusi energi masa depan, tentu masih memiliki beberapa cara untuk dikembangkan. Salah satu cara pengembangan baterai air laut terdapat pada komponen penting dalam baterai yaitu pada anode yang memengaruhi tegangan *output* baterai air laut. Pada baterai air laut, ada beberapa bahan penyusun yang dapat digunakan sebagai anode seperti aluminium dan magnesium. Aluminium memiliki potensi standar -1,66 Volt (SHE), sedikit lebih rendah dari magnesium yang memiliki

potensi -2,38 Volt (SHE) [2].

Meskipun potensi standar aluminium lebih rendah, aluminium memiliki laju self-discharge yang lebih lambat dan kapasitas lebih tinggi, yaitu 2.980 Ah/g dibandingkan magnesium yang memiliki kapasitas 2.205 Ah/g [3].

Baterai air laut aluminium karbon membuktikan bahwa baterai aluminium – karbon dapat menghasilkan tegangan yang berjumlah 7,814 Volt, 1,043 milliampere, dan 8,148 mili watt dari 10 sel baterai aluminium-karbon dimana satu sel tersebut terdiri dari aluminium foil berukuran 10 cm x 10 cm dan karbon aktif [4].

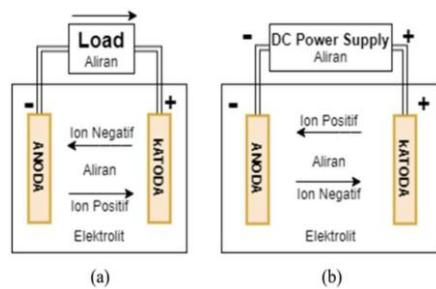
Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan energi

bersih yang bersumber dari air laut yang disirkulasikan sebagai elektrolit pada baterai aluminium-karbon. Penelitian ini menguji beberapa rancangan baterai dengan elektrolit air laut yang bersirkulasi dimana air laut digantikan secara berkala dari sumber baru dan dibuang setelah pemakaian dengan menggunakan pompa air DC dan Arduino Uno yang akan membaca hasil *output* tegangan baterai aluminium-karbon melalui pin ADC dan ditampilkan pada LCD 16x2, sehingga proses pengukuran menjadi lebih cepat dan mudah.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Prinsip Kerja Baterai

Sistem operasional baterai secara fundamental mencakup dua mekanisme utama, yaitu pelepasan energi (discharge) dan akumulasi energi (charge). Ketika baterai disambungkan ke rangkaian beban listrik, terjadi proses pelepasan energi dimana aliran elektron bergerak dari kutub negatif menuju kutub positif untuk menyediakan daya listrik. Sebaliknya, saat baterai terhubung dengan sumber daya eksternal, berlangsung proses akumulasi energi dengan perpindahan elektron dari kutub positif ke kutub negatif, sehingga energi kimia dalam baterai dapat terakumulasi kembali. Kedua proses ini merepresentasikan konversi timbal balik antara energi kimia dan energi listrik yang menjadi karakteristik fundamental dari sistem penyimpanan energi elektrokimia [5]. Dapat dilihat pada Gambar 1 merupakan proses *discharging* dan *charging*.



Gambar 1. (a) Proses *discharging* (b)
Proses *charging*

2.2 Sejarah dan Perkembangan Air Laut

Teknologi baterai berbasis air laut telah menjadi solusi energi primer untuk keperluan aplikasi kelautan dalam, terutama untuk sistem penggerak, sejak dekade 1950-an. Penelitian yang dipublikasikan *HasVold* beserta tim pada 1997 mendemonstrasikan implementasi sistem baterai air laut dalam instalasi sumur bawah air untuk kendali sistem otonom. Perkembangan signifikan terjadi ketika Kongsberg Simrad asal Norwegia memperkenalkan Varian baterai air laut seri 600/1200 pada tahun 2000, yang kemudian diimplementasikan pertama kali di dasar Samudra Pasifik bagian barat laut pada kedalaman 5577 meter. Spesifikasi teknis menunjukkan *output* tegangan sekitar 1,6 V dengan kerapatan energi mencapai 318 Wh/kg.[6] Meskipun kerapatan energi tersebut lebih rendah dibandingkan baterai litium konvensional yang mencapai 585 Wh/kg, namun pada kedalaman ekstrem yang sama, performa baterai litium akan mengalami degradasi akibat efek tekanan hidrostatik tinggi, sehingga baterai air laut tetap memiliki keunggulan operasional.

2.3 Elektroda Baterai Air Laut

Konfigurasi elektroda dalam teknologi baterai air laut melibatkan dua komponen utama yaitu anoda berbahan aluminium dan katoda karbon yang berperan krusial dalam proses elektrokimia. Aluminium dipilih sebagai material anoda karena memiliki karakteristik superior dengan potensial elektroda standar -2,31 V, kapasitas spesifik 2,98 Ah/g, densitas 2,70 g/cm³, serta energi spesifik teoritis 8,1 kWh/kg dengan rentang tegangan operasional 1,1–1,4 V, sehingga menjadi alternatif unggul dibandingkan magnesium konvensional yang memiliki spesifikasi potensial standar -2,37 V (SHE), kapasitas 2,205 Ah/g, densitas 1,74

g/cm^3 , dan energi spesifik teoritis 6,8 kWh/kg dengan tegangan operasional 1,2–1,4 V.

Katoda karbon berfungsi melalui mekanisme absorpsi oksigen atmosferik atau oksigen terlarut dalam medium air laut, yang selanjutnya mengalami reaksi dengan elektrolit pada interface katoda untuk menghasilkan aliran listrik. Struktur katoda dikomposisikan dari material karbon berpori, pengikat, kolektor arus, dan katalis yang dioptimalkan untuk memaksimalkan kemampuan absorpsi oksigen. Transfer massa oksigen yang efisien menjadi parameter kritis dalam menentukan performa baterai, sehingga desain katoda berpori dikembangkan secara khusus untuk meningkatkan kapasitas absorpsi oksigen dalam lingkungan maritim, menciptakan sistem penyimpanan energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk aplikasi kelautan [7].

2.4 Arduino UNO

Mikrokontroler Arduino UNO merupakan sistem berbasis prosesor ATmega328 yang menyediakan infrastruktur pengembangan elektronik yang komprehensif. Konfigurasi perangkat ini mencakup 14 terminal input/output digital dengan kemampuan enam terminal untuk menghasilkan sinyal PWM, ditambah dengan enam kanal input analog untuk pembacaan sensor. Spesifikasi teknis meliputi osilator kristal berkecepatan 16 MHz, antarmuka koneksi USB, soket catu daya, header pemrograman ICSP, serta fungsi reset manual. Setiap terminal digital dapat dikonfigurasi secara fleksibel sebagai masukan atau keluaran melalui implementasi fungsi pemrograman `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()` yang beroperasi pada level tegangan standar 5 V [8]. Dapat dilihat pada Gambar 2

merupakan arduino uno.



Gambar 2. Arduino UNO

2.5 LCD I2C 16x2

Display elektronik merupakan salah satu komponen elektronika yang digunakan untuk menampilkan data dalam bentuk karakter, huruf, atau grafik. LCD (*Liquid Crystal Display*) adalah salah satu jenis display elektronik yang dibuat dengan teknologi CMOS logic. LCD ini tidak menghasilkan cahaya sendiri, melainkan memantulkan cahaya dari lingkungan sekitarnya (*front-lit*) atau mentransmisikan cahaya dari sumber belakang (*back-lit*). LCD berfungsi untuk menampilkan data berupa karakter, huruf, angka, atau grafik. Prinsip kerja LCD 16x2 adalah menggunakan lapisan film berisi kristal cair yang ditempatkan di antara dua lempeng kaca dengan elektroda logam transparan [9]. Dapat dilihat pada Gambar 3 merupakan LCD I2C 16x2.



Gambar 3. LCD I2C 16x2

2.6 Pompa Air DC

Pompa air DC adalah pompa berukuran kecil yang beroperasi pada tegangan rendah, yaitu 5V DC, dan umum digunakan dalam berbagai aplikasi elektronik berskala kecil. Pompa ini memanfaatkan prinsip elektromekanis untuk mengon Versi

energi listrik menjadi energi kinetik guna memindahkan cairan. Pompa air DC ini cocok diaplikasikan pada akuarium, kolam ikan, sistem hidroponik, robotika, atau proyek berbasis mikrokontroler [10]. Menggunakan motor DC brushless, pompa ini beroperasi pada tegangan DC 5V. Dapat dilihat pada Gambar 4 merupakan pompa air DC.



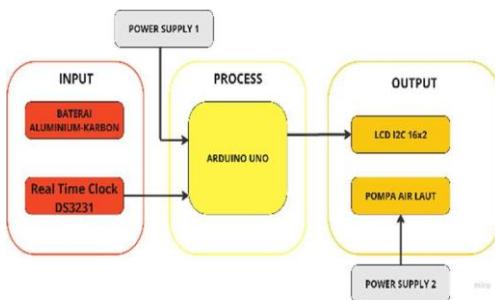
Gambar 4. Pompa Air DC

3 METODOLOGI PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian rancang bangun baterai aluminium karbon dilaksanakan di Laboratorium Teknik Digital dan Mikroprosesor Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Kampus Bukit Jimbaran, Kab. Badung, Bali.

3.1 Diagram Blok

Implementasi sistem dilakukan dengan mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak yang digambarkan dalam diagram blok seperti Gambar 5.



Gambar 5. Diagram blok baterai aluminium-karbon secara umum

Sistem yang dirancang merupakan

sistem baterai aluminium-karbon berbasis elektrolit air laut dengan sirkulasi terbuka. Sistem ini dirancang untuk memastikan aliran elektrolit yang optimal dimana tegangan yang keluar akan diukur oleh pengontrol Arduino Uno dan ditampilkan pada layar LCD 16x2 dengan sirkulasi air laut dibantu oleh pompa DC sebagai media penggerak aliran.

Diagram blok menjelaskan rancangan sistem baterai aluminium-karbon dengan elektrolit air laut bersirkulasi terbuka yang terdiri dari tiga bagian utama yaitu *input*, *process*, dan *output*. Pada bagian *input*, baterai aluminium-karbon berfungsi sebagai sumber daya utama dengan memanfaatkan reaksi elektrokimia antara aluminium dan air laut untuk menghasilkan tegangan listrik. Tegangan ini kemudian dibaca oleh Arduino melalui pin ADC untuk dianalisis. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan modul *Real Time Clock* (RTC) DS3231 yang memberikan informasi waktu secara akurat yang akan digunakan untuk menampilkan jam atau mencatat waktu saat bersirkulasi.

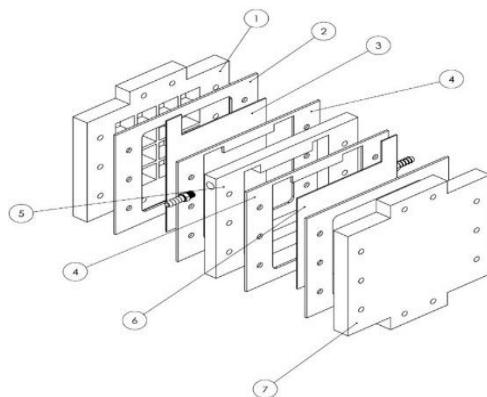
Di bagian *process*, Arduino Uno berperan sebagai pusat kendali yang memproses data tegangan dari baterai dan informasi waktu dari RTC. Arduino membaca data ini dan menentukan tindakan selanjutnya berdasarkan kondisi yang telah diprogram. Hasil dari pemrosesan ini kemudian dikirim ke bagian *output*. Pada bagian ini, terdapat LCD I2C 16x2 yang digunakan untuk menampilkan informasi seperti tegangan baterai. Selain itu, terdapat pompa air DC yang berfungsi untuk memastikan sirkulasi air laut berjalan sesuai kebutuhan. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan dari air laut.

3.2 Metode Perancangan

Baterai aluminium-karbon dengan sirkulasi terbuka menggunakan elektrolit air laut terdiri dari beberapa lapisan utama yang dirancang untuk mendukung kinerja optimal. Komponen utama baterai ini meliputi anode yang terbuat dari aluminium dengan dimensi yang menjadi parameter pengujian. Pada percobaan pertama, digunakan anode dengan dimensi 5 cm x 5 cm pada konfigurasi empat sel, sedangkan pada rancangan lainnya digunakan anode berdimensi 10

cm x 10 cm pada konfigurasi satu sel. Di antara anode dan katode, terdapat lapisan aerogel yang berfungsi sebagai sekat, dipisahkan oleh wadah akrilik berVolume yang berfungsi untuk menampung air laut sebagai elektrolit sirkulasi.

Pada bagian luar anode dan katode, terdapat akrilik yang menjadi penutup utama atau cover untuk setiap sel. Setiap sel baterai dipisahkan oleh sekat akrilik untuk mencegah kontak langsung antar sel. Selain itu, pada bagian atas setiap sel terdapat penampang penghubung yang dirancang untuk menghubungkan anode dan katode antar sel, membentuk rangkaian yang terintegrasi. Desain ini tidak hanya memastikan aliran elektrolit yang efisien di antara anode dan katode, tetapi juga mendukung kestabilan dan performa sistem baterai secara keseluruhan. Komponen penyusun pada satu unit sel baterai aluminium-karbon dapat dilihat pada Gambar 6 dan Tabel 1.



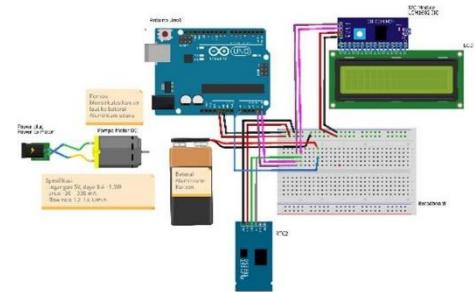
Gambar 6. Komponen Penyusun pada satu unit sel baterai aluminium-karbon

Tabel 1. Komponen Penyusun pada satu unit sel baterai aluminium-karbon

No	Nama	Jumlah	Bahan
1	Air Front Plate	1 buah	Acrylic
2	Separation 1	2 buah	Rubber

3	Aluminium Anode	1 buah	Aluminium 6061
4	Sirculation Plate	1 buah	Acrylic
5	Separation 2	2 buah	Rubber
6	Carbon Cathode	1 buah	Carbon
7	Back CoVer	1 buah	Acrylic

Penelitian rancang bangun baterai aluminium-karbon juga dilengkapi dengan rangkaian pembaca tegangan yang bertujuan untuk menampilkan nilai keluaran tegangan analog dari baterai dalam bentuk angka desimal pada LCD 16x2 dengan modul I2C. Tegangan dari baterai aluminium-karbon dialirkan ke pin A0 pada Arduino Uno, yang berfungsi sebagai antarmuka untuk membaca data analog tersebut. Arduino kemudian mengolah dan mengonversi data analog tersebut menjadi nilai tegangan digital yang sesuai. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan modul *Real Time Clock* (RTC) DS3231 yang menampilkan waktu pada LCD 16x2 I2C melalui koneksi antara pin kontrol Arduino. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya menampilkan tegangan keluaran baterai, tetapi juga waktu pengukurnya. Perancangan dan hubungan pin pada rangkaian pembaca tegangan baterai aluminium-karbon dapat dilihat pada Gambar 7 dan Tabel 2.



Gambar 7. Perancangan rangkaian pembaca tegangan baterai aluminium-karbon

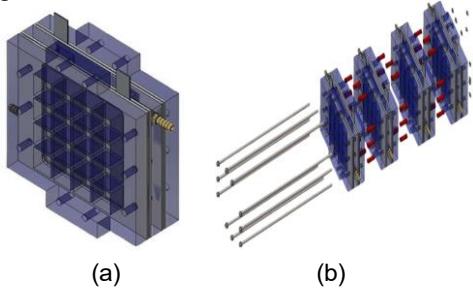
Tabel 2. Hubungan pin rangkaian pembaca tegangan baterai aluminium-karbon

No	Arduino UNO	LCD I2C	RTC DS3231	Baterai aluminium-

		16x2		karbon
1	GND	GND	GND	terminal (-)
2	5V	VCC	VCC	
3	A4	SDA	SDA	
4	A5	SCL	SCL	
5	A0			terminal (+)

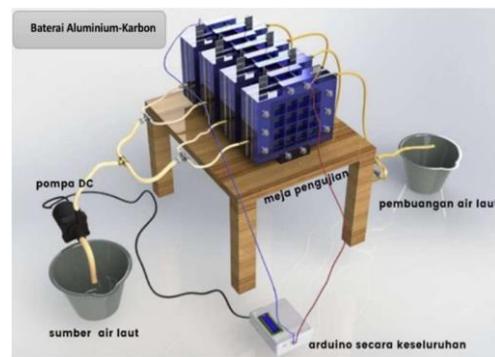
3.3 Pengujian Variasi Rancangan

Pengujian ini dilakukan dengan cara menyiapkan 2 desain baterai aluminium-karbon yaitu baterai dengan ukuran penampang katode dan anode sebesar $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ sebanyak satu sel serta baterai aluminium-karbon dengan ukuran penampang katode dan anode sebesar $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ sebanyak empat sel. Rancangan untuk baterai 1 sel dan 4 sel dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. (a) Rancangan baterai $10 \times 10 \times 0,2\text{ cm}$ sebanyak 1 sel. (b) Rancangan baterai $5 \times 5 \times 0,2\text{ cm}$ sebanyak 4 sel

Kedua Variabel di atas dilakukan pengujian dengan skema proses dan penyusunan alat uji dapat dilihat pada gambar 9.



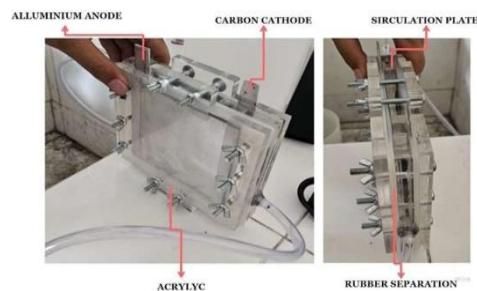
Gambar 9. Skema proses pengujian

Pengujian ini bertujuan untuk menghasilkan tegangan dari kedua jenis rancangan baterai dan membandingkan *output* tegangan baterai aluminium-karbon tanpa beban menggunakan air laut bersirkulasi terbuka. *Output* tegangan baterai akan diukur secara berkala terhadap waktu untuk melihat konsistensi tegangan.

4 HASILDAN PEMBAHASAN

4.1 Realisasi Baterai aluminium-karbon bersirkulasi terbuka

Realisasi baterai aluminium-karbon bersirkulasi terbuka ini dibuat dalam dua konfigurasi yang berbeda sebagai bahan perbandingannya, yaitu satu sel dengan ukuran elektroda $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ dan empat sel berukuran $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ yang disusun secara seri. Baterai menggunakan aluminium 6061 sebagai anode, campuran karbon aktif dengan MnO_2 sebagai katode dan air laut sebagai elektrolit. Realisasi baterai aluminium-karbon empat sel ($10 \times 10 \times 0,2\text{ cm}$) dan empat sel ($5 \times 5 \times 0,2\text{ cm}$) dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Realisasi baterai aluminium- karbon satu sel



Gambar 11. Realisasi baterai aluminium- karbon empat sel ($5 \times 5 \times 0,2 \text{ cm}$)

Kemudian dilakukan pengukuran untuk mengetahui dimensi dari baterai aluminium karbon di masing-masing Variabel sebagai berikut. Dimensi baterai aluminium-karbon dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Dimensi baterai aluminium-karbon

Spesifikasi (Baterai Aluminium Karbon)	Pengukuran (1 sel)	Pengukuran (4 sel)
Berat (Kg)	0,75	1,5
Tinggi (cm)	15	8
Panjang (cm)	15	8
Lebar (cm)	4	17
Ukuran Anode (cm)	$10 \times 10 \times 0,2$	$5 \times 5 \times 0,2$
Ukuran Katode (cm)	$10 \times 10 \times 0,2$	$5 \times 5 \times 0,2$

4.2 Pembacaan Nilai Tegangan

Tabel hasil nilai tegangan *output* pada kedua jenis baterai aluminium-karbon dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai tegangan baterai aluminium- karbon

Waktu	Ukuran penampang elektroda $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ satu sel	Ukuran penampang elektroda $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ empat sel

1 menit	1,08 V	4,01 V
2 menit	1,14 V	3,74 V
3 menit	1,19 V	3,55 V
4 menit	1,19 V	3,42 V
5 menit	1,19 V	3,36 V
6 menit	1,22 V	3,35 V
7 menit	1,22 V	3,32 V
8 menit	1,22 V	3,27 V
9 menit	1,22 V	3,25 V
10 menit	1,22 V	3,21 V

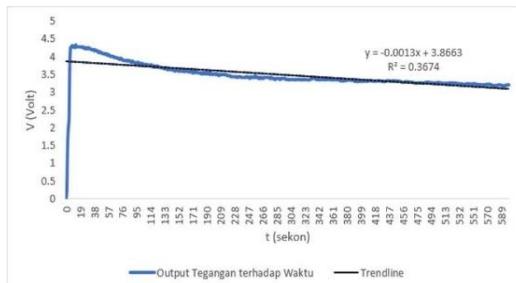
Pada Tabel 4, menunjukkan bahwa pada satu sel terjadi peningkatan nilai tegangan yang bertahap pada 4 menit awal dan mencapai nilai tegangan maksimal pada interval menit berikutnya. Berbeda dengan 4 sel, tegangan menurun drastis setelah menit ke-2. Dari kedua jenis baterai, dapat diketahui bahwasannya terdapat perbedaan waktu dalam tercapainya tegangan maksimal. Berdasarkan data tegangan pada berbagai interal waktu, terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan oleh baterai dengan konfigurasi empat sel (ukuran penampang elektroda $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$) secara konsisten lebih tinggi dibandingkan dengan baterai satu sel (ukuran penampang $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$). Perbandingan kedua baterai ini menunjukkan bahwa walaupun konfigurasi empat sel mengalami penurunan tegangan secara bertahap, tegangan totalnya tetap jauh di atas tegangan dari satu sel pada semua waktu pengujian. Perbandingan *output* tegangan tanpa beban berdasarkan ukuran penampang elektroda dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan *output* tegangan tanpa beban berdasarkan ukuran penampang elektroda

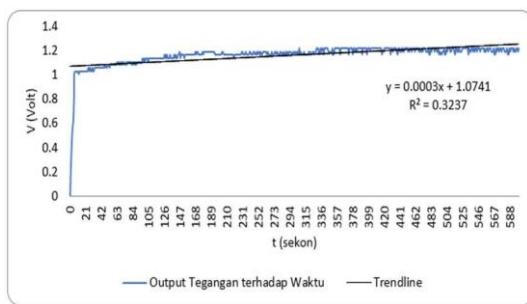
Ukuran Penampang Elektroda	Tegangan Maksimal (V)	Tegangan rata rata (V)
$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 1 sel	1,22	1,16
$5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 4 sel	4,34	3,47

Dari perbandingan nilai tegangan kedua

baterai, didapatkan kenaikan sebesar 255,7% untuk nilai tegangan maksimal dan 199% untuk nilai tegangan rata rata dari baterai 1 sel ke baterai 4 sel. Didapatkan pula persentase untuk tinjauan nilai tegangan di hasil data awal yaitu menit kedua dan menit terakhir atau menit ke-10 berturut-turut atau 7,02% untuk baterai 1 sel dan 14,2% untuk baterai 4 sel. Tegangan maksimal merupakan parameter penting dalam menilai efisiensi awal dari reaksi elektrokimia, karena mencerminkan potensi *output* tertinggi yang dapat dicapai oleh baterai sebelum efek degradasi mulai memengaruhi performa [12]. Relevansi penggunaan tegangan maksimum dapat digunakan pada sistem baterai aluminium-karbon terhadap pembentukan lapisan pasivasi seperti Al(OH)_3 . Grafik data *output* tegangan tanpa beban karbon satu sel ($10 \times 10 \times 0,2 \text{ cm}$) dan empat sel ($5 \times 5 \times 0,2 \text{ cm}$) dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12. Grafik data *output* tegangan tanpa beban terhadap waktu pada baterai aluminium-karbon empat sel



Gambar 13. Grafik data *output* tegangan tanpa beban terhadap waktu pada baterai aluminium-karbon satu sel

Berdasarkan data grafik tegangan terhadap waktu di atas, terlihat bahwa penggunaan rancangan satu sel pada Gambar 13 menghasilkan fluktuasi nilai tegangan dengan trendline naik dengan kemiringan sebesar $0,0003 \text{ V/s}$ atau setiap detiknya terdapat peningkatan sebesar $0,0003\text{V}$. Sedangkan pada rancangan empat sel pada Gambar 12 menghasilkan trendline menurun dengan sudut kemiringan $-0,0013\text{V/s}$ atau terdapat penurunan sebesar $0,0013\text{V}$ setiap detiknya dalam 10 menit sirkulasi secara terus menerus.

Dari data yang sudah didapatkan, terdapat perbedaan dari perolehan *Voltase* kedua jenis baterai $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ satu sel dengan $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ empat sel yang keduanya memiliki luas total yang sama yaitu 100 cm^2 . Perbedaan nilai tegangan hasil penelitian terletak pada perbedaan dalam distribusi fisik yang memengaruhi dinamika reaksi elektrokimia yaitu terkait dengan jalur transportasi ion pada permukaan dan rangkaian. Pada baterai 4 sel $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ yang disusun seri memiliki kelebihan yaitu meningkatkan kerapatan reaksi total karena elektrolit (air laut) bersirkulasi lebih efektif di area yang lebih kecil dan rasio luas permukaan terhadap Volume elektrolit lebih tinggi yang mempercepat reaksi reduksi-oksidasi sehingga dapat menghasilkan tegangan yang tinggi dibanding rangkaian 1 sel karena keempat sel melakukan penjumlahan nilai tegangan. Penyusunan sel secara seri ini sejalan dengan konsep pada sistem baterai dalam bentuk battery pack dengan banyak sel yang terhubung secara seri untuk memenuhi kebutuhan tegangan dan kapasitas energi sistem. Penelitian tersebut juga menegaskan bahwa kapasitas dari sel-sel dalam susunan seri secara langsung memengaruhi performa keseluruhan battery pack [13].

Kecepatan reaksi pada ion juga mempercepat terjadinya pembentukan Al_2O_3 (aluminum oksida) 40% lebih cepat yang dapat mempercepat terjadinya pasivasi pada anode dalam bereaksi. Karena pengaruh pasivasi, penampang tempat ion-ion mengalami reaksi mengalami penyempitan dimana setiap sel tambahan dalam seri meningkatkan resistansi internal total 2 kali lebih tinggi daripada sel tunggal. Selain itu,

adanya hidroksida yang ada pada elektrolit dapat menyebabkan korosi internal lebih cepat karena memiliki efek tepi yang dominan pada katode yang terbuat dari logam mesh. Hal tersebut menyebabkan penurunan tegangan terjadi lebih cepat karena akumulasi elektroda yang disambungkan dalam susunan seri. Hal ini sesuai dengan hasil data dimana baterai 4 sel lebih cepat mengalami penurunan tegangan dibanding 1 sel. Namun, ukuran luas penampang yang lebih besar yaitu $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ pada rangkaian satu sel mengakibatkan reaksi yang kurang cepat. Hal tersebut dikarenakan sirkulasi air laut pada penampang yang lebih besar cenderung mempertahankan komposisi elektrolit sehingga menghasilkan data Voltase yang cenderung konstan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian rancang bangun baterai aluminium-karbon menggunakan elektrolit air laut bersirkulasi terbuka, dapat disimpulkan bahwa sistem baterai berhasil direalisasikan dengan memanfaatkan aluminium 6061 sebagai anoda dan campuran karbon aktif dengan MnO_2 sebagai katoda, serta dikendalikan menggunakan Arduino Uno. Sistem ini menggunakan elektrolit air laut dengan sirkulasi terbuka yang didukung oleh pompa DC. Dari dua konfigurasi yang diuji, konfigurasi empat sel ($5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 0,2\text{ cm}$) menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan satu sel ($10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0,2\text{ cm}$), dengan tegangan maksimum sebesar 4,34 V yang tercapai pada detik ke-13, sedangkan satu sel hanya menghasilkan 1,22 V setelah 4 menit (detik ke-306). Selain itu, tegangan rata-rata empat sel yang disusun secara seri mencapai 3,47 V, jauh lebih tinggi dibandingkan tegangan rata-rata satu sel sebesar 1,16 V, yang menunjukkan bahwa konfigurasi multi-sel secara signifikan meningkatkan efisiensi keluaran tegangan pada sistem baterai aluminium-karbon ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] BNPP RI. 2023. Akhiri Kerumitan

Data Kewilayah, Indonesia Siap Menuju Poros Maritim Dunia. Badan Nasional Pengelola Perbatasan Republik Indonesia, 29 November 2023. <https://www.bnpp.go.id>

- [2] Canete, L. A. 2024. *A Comparison of the Performance of Saltwater Electrolytic Cell Battery With Zinc-Copper and Aluminium-copper Electrodes*. International Research Journal of Pure Applied Vol 25, 1-21.
- [3] Wang, F., & Li, Q. 2022. *Mechanisms of passivation and its influence on aluminum-air battery performance*. Electrochemical Energy Reviews, Vol 5(3), 367-389.
- [4] Mardiwanta, B. 2017. Pembangkit Energi Listrik pada Baterai Udara dengan Bahan Karbon Aktif dan Elektrolit Air Laut. Prosiding SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta, Vol 3, 144–149
- [5] Yang, C.-Z., Lou, Y.-W., Zhang, J., Xie, X., & Xia, B. 202). *Mechanism Research of Charge – Discharge Process for Graphite/LiFePO₄ Battery*. In *Materials and Working Mechanisms of Secondary Batteries*, Vol 75, 275–296
- [6] HasVold, Ø., Henriksen, H., MelVær, E., Citi, G., Johansen. 2015. *Sea-water battery for subsea control systems*. Journal of Power Sources, Vol 65(2–3), 253–259
- [7] Sangeetha, R., & Sivasenthil, E. 2025. *A Review on Metal-air Batteries with an Emphasis on the Electrochemical Performance of Aluminum-air Batteries*. Journal of Environmental Nanotechnology, Vol 14(2), 300–318.
- [8] Mindasari, S., & Meilantika, D. (Desember 2022). Sistem Keamanan Kotak Amal di Musala Sabilul Khasanah Berbasis Arduino Uno. JTIM, Vol. 5(2), 7- 13.
- [9] Nashrudin, N., & Zaini, H. (2018). Perancangan Alat Monitoring Suhu Menggunakan Sensor LM35 dan LCD 16x2 pada Arduino Uno. Jurnal

Teknologi dan Sistem Komputer,
Vol 6(4), 144–149.

- [10]Ali, M., Rauf, M., & Ahmad, S. 2022. *Design and Development of Low Voltage DC Water Pump System for Smart Hydroponics*. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management* (IJSREM), Vol 6(5), 112–118
- [11]Edge, J. S., O'Kane, S. O., Prosser, R., Kirkaldy, N. D., et al. 2021. *Lithium-ion battery degradation: what you need to know*. *Physical Chemistry Chemical Physics (PCCP)*, Vol 23, 8200–8221.
- [12]Junwei Z., Weige Z., & Yanru Z. (2024). *Capacity estimation for series-connected battery pack based on partial charging Voltage curve segment*. *Journal of energy Storage*, Vol 95, 23-27.