
Pengaruh Baterai Air Laut Bersirkulasi Terbuka Terhadap Nilai Tegangan Dibandingkan Waktu Menggunakan Sistem Terkontrol Data Tersimpan

Rafael Bryan Goenardi, Agus Dharma, I Gusti Agung Putu Raka Agung, I Made Mataram, I Putu Ardana

Universitas Udayana, Indonesia

Email: rafaelbryanpro@gmail.com, agus_dharma@unud.ac.id

Abstrak

Air laut adalah sumber daya alam yang punya potensi besar tapi belum sepenuhnya dimanfaatkan, terutama sebagai energi terbarukan. Salah satu cara memanfaatkan potensi tersebut adalah dengan membuat baterai aluminium-karbon yang menggunakan elektrolit berupa air laut. Baterai aluminium-karbon dapat ditingkatkan kinerjanya dalam hal menjaga stabilitas tegangan saat tidak ada beban. Penelitian ini membahas pengaruh interval waktu sirkulasi elektrolit secara terbuka terhadap kestabilan tegangan pada baterai aluminium-karbon dengan sistem pemantauan berbasis mikrokontroler. Sistem terdiri dari satu sel baterai yang menggunakan aluminium sebagai anode, campuran karbon aktif dan MnO_2 sebagai katode, serta air laut sebagai elektrolit. Sirkulasi dilakukan menggunakan pompa air DC yang dikendalikan oleh ESP32 dan Arduino Uno dengan interval waktu 5, 7, dan 10 menit. Tegangan baterai dibaca melalui pin ADC dan ditampilkan pada LCD 16x2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode sirkulasi 5 menit menghasilkan kestabilan tegangan terbaik dengan peningkatan sebesar 3,4%, sedangkan metode 7 menit dan 10 menit menunjukkan penurunan tegangan masing-masing sebesar 8,5% dan 13,9%. Dengan demikian, interval sirkulasi yang lebih pendek terbukti lebih efektif dalam menjaga kestabilan tegangan baterai aluminium-karbon.

Kata Kunci: Baterai aluminium-karbon; sirkulasi elektrolit; air laut; Arduino Uno; ESP32

Abstract

Seawater is a natural resource that has great potential but has not been fully utilized, especially as renewable energy. One way to harness this potential is to make an aluminum-carbon battery that uses electrolytes in the form of seawater. Aluminum-carbon batteries can be improved in performance in terms of maintaining voltage stability when there is no load. This study discusses the effect of the time interval of open electrolyte circulation on voltage stability in aluminum-carbon batteries with a microcontroller-based monitoring system. The system consists of a single battery cell that uses aluminum as the anode, a mixture of activated carbon and MnO_2 as the cathode, as well as seawater as the electrolyte. Circulation is carried out using a DC water pump controlled by ESP32 and Arduino Uno with time intervals of 5, 7, and 10 minutes. The battery voltage is read through the ADC pin and displayed on a 16x2 LCD. The test results showed that the 5-minute circulation method produced the best voltage stability with an increase of 3.4%, while the 7-minute and 10-minute methods showed a voltage decrease of 8.5% and 13.9%, respectively. Thus, shorter circulation intervals have been shown to be more effective in maintaining the voltage stability of aluminum-carbon batteries.

Keywords: *Baterai aluminium-karbon; sirkulasi elektrolit; air laut; Arduino Uno; ESP32*

PENDAHULUAN

Air laut adalah sumber daya alam yang punya potensi besar tapi belum sepenuhnya dimanfaatkan, terutama sebagai energi terbarukan. Di Indonesia, wilayah perairan mencapai 6,4 juta km², termasuk laut teritorial sebesar 290.000 km² (Badan Nasional Pengelola Perbatasan Republik Indonesia, 2023). Memanfaatkan sumber daya air laut ini bisa membantu memenuhi kebutuhan energi nasional dan mendukung energi bersih yang berkelanjutan. Isu

energi berkelanjutan ini penting bagi bangsa Indonesia, dan memerlukan kerja sama antara pemerintah pusat dan daerah agar tujuan tersebut tercapai.

Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah baterai menggunakan air laut sebagai elektrolit. Baterai ini lebih mudah digunakan, tahan terhadap kondisi ekstrem, dan kinerja yang stabil meski pada berbagai kedalaman. Prinsip kerjanya adalah mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi reduksi dan oksidasi (Aklan & Rustana, 2020; Meutia et al., 2021; Saputra et al., 2020; Siagian et al., 2023). Komponen utama baterai ini adalah elektrolit, anode, katode, wadah, dan kabel yang memanfaatkan reaksi kimia dari elektrolit air laut sebagai sumber energi berkelanjutan. Meski punya banyak keunggulan, penggunaan baterai air laut sebagai energi masa depan masih perlu dikembangkan lebih lanjut (Herry Setiyawan, 2021; Irfan & Prasetya, 2022; Masrufaiyah, 2016; Santoso & Mulyadi, 2020; Susanto et al., 2018; Yudi et al., 2019).

Penelitian Masrufaiyah (2016) menemukan bahwa laju aliran elektrolit air laut dalam sel baterai sangat memengaruhi keluaran energi. Sel baterai dengan elektrolit tidak bergerak (stasioner) menunjukkan penurunan tegangan secara signifikan seiring waktu, sedangkan sel dengan elektrolit yang diputar (sirkulasi) mempertahankan tegangan yang lebih stabil. Sirkulasi elektrolit ini membantu membersihkan lapisan oksida dan produk korosi di permukaan elektroda, serta menyuplai oksigen baru yang diperlukan untuk reaksi elektrokimia, sehingga meningkatkan daya tahan baterai. Kandungan oksigen terlarut dalam elektrolit sangat memengaruhi laju reaksi di katode. Selain itu, penelitian oleh Yudi et al. (2020) membandingkan performa baterai air laut dengan elektrolit larutan garam dan air laut alami. Hasilnya menunjukkan bahwa air laut alami memberikan performa yang lebih stabil dan efisien dalam menghasilkan energi listrik, terutama ketika dikombinasikan dengan sistem sirkulasi yang tepat. Hal ini semakin mendukung potensi pemanfaatan air laut sebagai elektrolit dalam baterai aluminium-karbon.

Berdasarkan tinjauan pustaka, penelitian terdahulu telah membuktikan keunggulan sistem sirkulasi elektrolit air laut dibandingkan dengan sistem statis dalam menjaga stabilitas tegangan pada baterai aluminium-karbon (Masyuraifah & Ridho, 2016), serta mengonfirmasi performa unggul air laut alami sebagai elektrolit (Yudi dkk., 2020). Namun, celah penelitian (research gap) utama yang diidentifikasi adalah belum adanya eksplorasi mendalam mengenai pengaruh spesifik variasi interval waktu sirkulasi terhadap laju degradasi tegangan dan efektivitas pencegahan pasivasi elektroda. Penelitian-penelitian sebelumnya belum menjawab pertanyaan kritis tentang seberapa sering dan berapa lama sirkulasi harus dilakukan untuk mencapai kinerja optimal, serta belum memberikan analisis kuantitatif yang rinci tentang hubungan antara durasi interval, ketebalan lapisan pasivasi, dan penurunan tegangan. Selain itu, implementasi sistem kontrol otomatis berbasis mikrokontroler untuk mengatur sirkulasi secara presisi sekaligus memantau tegangan secara real-time dalam satu sistem terintegrasi masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan menyelidiki pengaruh tiga interval waktu sirkulasi yang berbeda (5, 7, dan 10 menit), mengkuantifikasi dampaknya terhadap stabilitas tegangan, dan mengimplementasikan sistem monitoring terkontrol yang mampu memberikan data yang akurat dan andal untuk analisis yang lebih komprehensif.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh sirkulasi bertahap secara terbuka terhadap tegangan yang dihasilkan oleh baterai aluminium-karbon. Penelitian ini menguji

pengaruh interval waktu sirkulasi dimana pompa air *DC* dihidupkan dan dimatikan setiap 5, 7, dan 10 menit. Pengaturan tersebut dikontrol oleh ESP 32 dan Arduino Uno, yang membaca nilai tegangan melalui pin *ADC* dan menampilkan hasilnya di *LCD* 16x2. Dengan cara ini, pengukuran bisa dilakukan lebih mudah dan hasilnya tercatat secara detail.

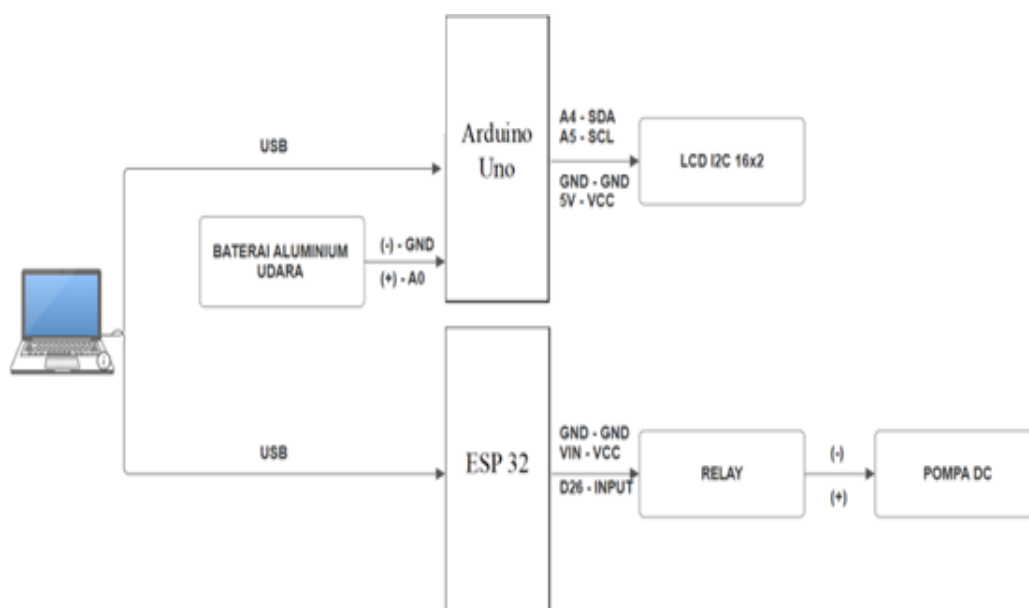
Manfaat penelitian ini adalah memberikan panduan praktis untuk optimalisasi interval sirkulasi elektrolit guna meningkatkan stabilitas tegangan pada baterai aluminium-karbon berbahan dasar air laut. Temuan ini dapat diaplikasikan dalam pengembangan sistem penyimpanan energi terbarukan yang lebih efisien dan stabil, khususnya di daerah pesisir yang melimpah akan sumber daya air laut. Selain itu, penelitian ini juga mengembangkan prototipe sistem pemantauan berbasis mikrokontroler yang terintegrasi, yang tidak hanya dapat diaplikasikan pada konteks baterai laut tetapi juga dapat diadaptasi untuk berbagai penelitian energi dan elektrokimia lainnya yang memerlukan kontrol dan akuisisi data yang presisi. Secara keseluruhan, penelitian ini mendukung upaya transisi energi bersih dengan memanfaatkan sumber daya lokal yang berkelanjutan serta memberikan kontribusi metodologis dalam bidang instrumentasi dan kontrol untuk penelitian energi terbarukan.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Labo-ratorium Teknik Digital dan Mikroprosesor PSTE FT, Kampus Bukit Jimbaran, Kab. Badung, Bali. Waktu pelaksanaan dimulai dari bulan Januari sampai Juni 2025.

1. Diagram Blok

Sistem yang dibuat adalah sistem baterai aluminium-karbon yang menggunakan elektrolit air laut dengan sirkulasi terbuka dengan tegangan hasilnya diukur oleh Arduino Uno dan ditampilkan di layar *LCD* 16x2. Proses pemasangan sistem dilakukan dengan menggabungkan kompo-nen *hardware* dan *software*. Dapat dilihat pada Gambar 7 merupakan diagram blok pengujian output tegangan baterai alu-minium-karbon tanpa beban dengan sistem sirkulasi bertahap terhadap waktu.



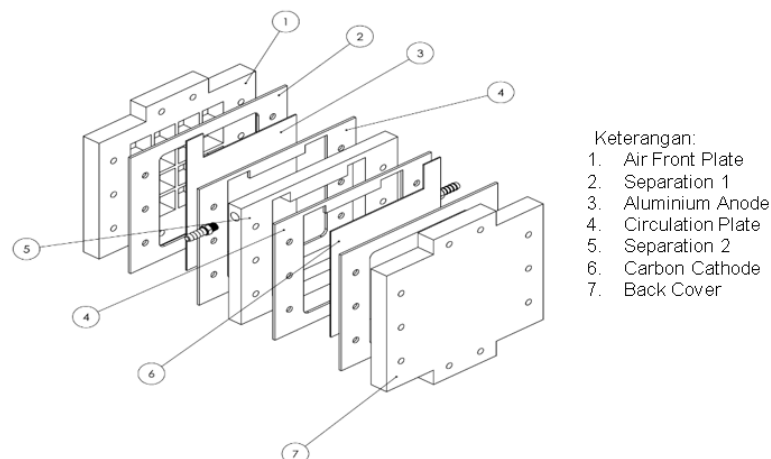
Gambar 1. Diagram blok pengujian output tegangan baterai aluminium-karbon tanpa beban dengan sistem sirkulasi bertahap terhadap waktu

Sumber: Data Primer, 2025

Diagram blok ini menjelaskan sistem pengujian *output* tegangan baterai aluminium-karbon tanpa beban dengan sirkulasi yang dilakukan secara bertahap seiring berjalannya waktu. Selama proses mengolah *input* ke *output*, Arduino Uno dan ESP32 mendapatkan pasokan daya melalui koneksi *USB* dari laptop yang berfungsi sebagai sumber daya. Tegangan yang dihasilkan baterai tersebut terhubung ke pin analog A0 pada Arduino Uno untuk dipantau. Arduino Uno kemudian mem-proses data *input* itu. Nilai tegangan dari baterai tampil di layar *LCD I2C* berukuran 16x2. ESP32 yang bertugas sebagai pengontrol pompa air *DC* digunakan untuk mengalirkan elektrolit dalam sistem baterai. ESP32 memberi sinyal ke modul *relay* untuk menghidupkan atau mematikan pompa. Jika *relay* aktif, maka kontak *NO* akan tertutup sehingga pompa akan menyala dan elektrolit akan mengalir, sedangkan jika *relay* tidak aktif, maka kontak *NO* akan terbuka dan pompa akan berhenti bekerja. Dalam pengujian ini, sistem sirkulasi dilakukan secara bertahap dengan tiga interval waktu berbeda, yaitu 5 menit, 7 menit, dan 10 menit. Setiap metode pengujian terdiri dari 5 fase secara berurutan, yaitu fase sirkulasi pertama, fase statis pertama, fase sirkulasi kedua, fase statis kedua, dan fase sirkulasi ketiga.

2. Metode Perancangan

Baterai aluminium-karbon dengan sirkulasi terbuka menggunakan air laut sebagai elektrolit, terdiri dari beberapa lapisan utama. Komponen utama baterai tersebut mencakup anode yang terbuat dari aluminium 6061, katode yang merupakan campuran karbon aktif dan MnO_2 , serta air laut sebagai elektrolit. Di antara anode dan katode terdapat lapisan aerogel yang berfungsi sebagai penghalang, dan di-pisahkan oleh wadah akrilik berbentuk volume yang bertugas menampung air laut sebagai elektrolit yang berputar. Di bagian luar anode dan katode terdapat lapisan akrilik yang berfungsi sebagai penutup utama atau cover untuk setiap sel. Setiap sel baterai dipisahkan oleh sekat akrilik untuk mencegah kontak langsung di antara sel. Selain itu, di bagian atas setiap sel terdapat penampang penghubung yang dirancang untuk menghubungkan anode dan katode antar sel, membentuk rangkaian yang terintegrasi. Beberapa komponen penyusun yang digunakan pada satu unit sel baterai dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 2.



Gambar 2. Komponen penyusun pada unit sel baterai aluminium-karbon

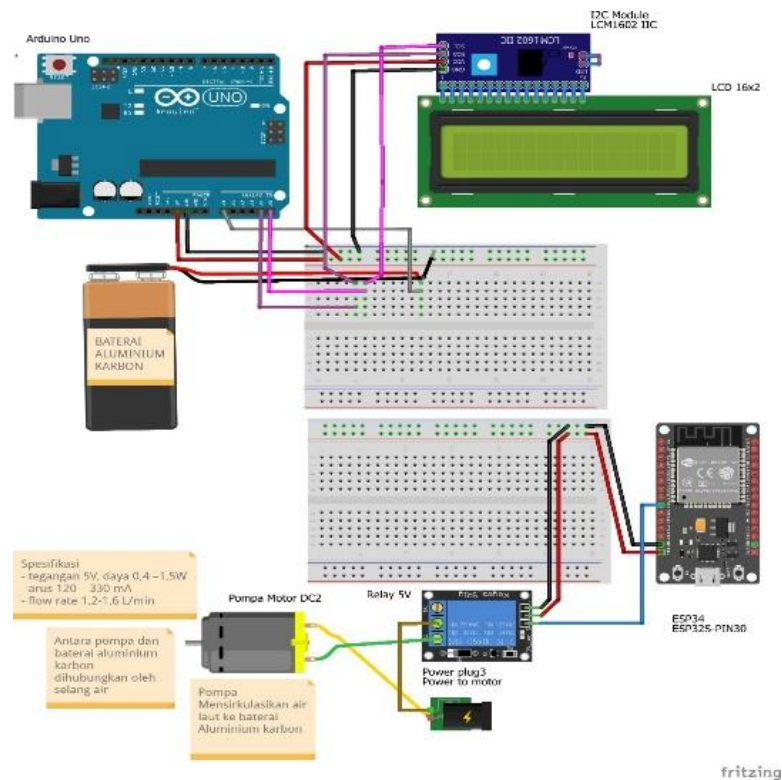
Tabel 1. Komponen penyusun pada satu unit sel baterai aluminium-karbon

No	Nama	Jumlah	Bahan	Fungsi
1	<i>Air Front Plate</i>	1 buah	<i>Acrylic</i>	Material transparan untuk melindungi komponen
2	<i>Separation 1</i>	2 buah	<i>Rubber</i>	Sebagai pemisah antara anode dan katode
3	<i>Aluminium Anode</i>	1 buah	<i>Aluminium 6061</i>	Sebagai Anode (elektroda -)
4	<i>Circulation Plate</i>	1 buah	<i>Acrylic</i>	Tempat elektrolit bersirkulasi
5	<i>Separation 2</i>	2 buah	<i>Rubber</i>	Sebagai pemisah antara anode dan katode
6	<i>Carbon Cathode</i>	1 buah	<i>Carbon</i>	Sebagai Anode (elektroda +)
7	<i>Back Cover</i>	1 buah	<i>Acrylic</i>	Material transparan untuk melindungi komponen

Sumber: Data Primer, 2025

Penelitian pengaruh interval waktu sirkulasi juga dilengkapi dengan rangkaian pembaca tegangan. Sistem ini menggunakan Arduino sebagai pengontrol yang mengukur tegangan baterai dengan bantuan modul *ADC* internal. ESP 32 mengatur pompa air *DC* melalui modul relay. Hasil pengukuran tegangan akan ditampilkan di layar *LCD* 16x2 agar lebih mudah dipantau. Rangkaian ini bertujuan untuk mengatur sirkulasi elektrolit di dalam baterai dengan bantuan pompa air *DC*, yang dioperasikan oleh modul *relay*. *Relay* berfungsi sebagai saklar elektronik yang memungkinkan ESP 32 untuk menghidupkan atau mematikan pompa berdasarkan kebutuhan sistem. Layar *LCD* 16x2 yang dilengkapi modul *I2C* digunakan untuk menampilkan nilai tegangan baterai. Baterai aluminium-karbon menghasilkan listrik melalui reaksi elektro-kimia dengan air laut sebagai elektrolit. Informasi seperti tegangan baterai ditampilkan di layar *LCD* 16x2. Desain serta hubungan pin pada rangkaian pembaca tegangan baterai aluminium-karbon dapat dilihat pada Gambar 9 dan Tabel 2.

Pengaruh Baterai Air Laut Bersirkulasi Terbuka Terhadap Nilai Tegangan Dibandingkan Waktu Menggunakan Sistem Terkontrol Data Tersimpan



Gambar 3. Perancangan rangkaian pembaca tegangan baterai aluminium-karbon

Sumber: Data Primer, 2025

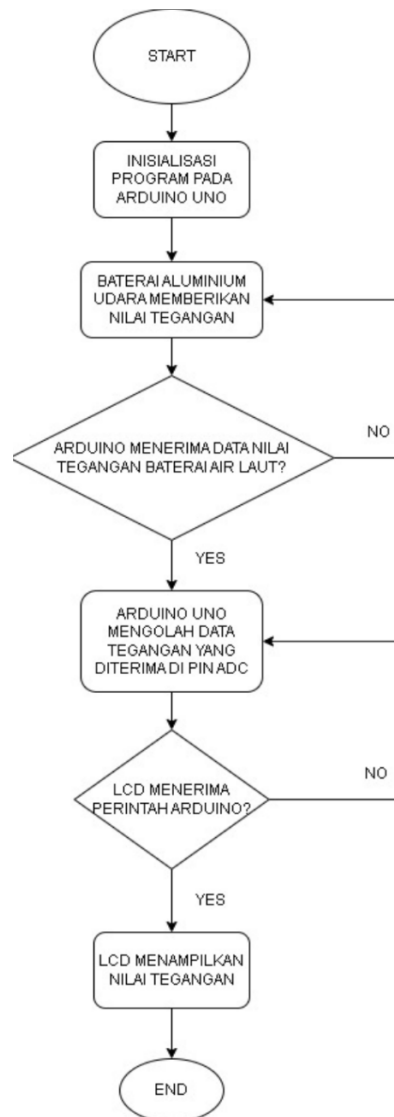
Tabel 2. Hubungan pin rangkaian pembaca tegangan baterai aluminium-karbon

No	ESP 32	Arduino UNO	LCD I2C 16x2	Relay	Baterai Aluminium-udara
1	GND	GND	GND	GND	Terminal -
2	VIN	5V	VCC	VCC	
3		A4	SDA		
4		A5	SCL		
5		A0			Terminal +
6	D26			Input	

Sumber: Data Primer, 2025

Perancangan sistem pembaca tegangan baterai aluminium-karbon dimulai dengan dengan inialisasi Arduino Uno untuk mengatur perangkat keras dan variabel yang diperlukan. Setelah itu, sistem menunggu input nilai tegangan dari baterai air laut. Jika baterai memberikan nilai tegangan, Arduino akan menerima data tersebut dan memrosesnya. Data tegangan yang telah diproses kemudian dikirim ke LCD melalui perintah dari Arduino. LCD akan menampilkan tulisan yang merepresentasikan data tegangan tersebut. Jika semua langkah berhasil, sistem selesai dan kembali ke kondisi awal. *Flowchart* perancangan sistem pembaca tegangan baterai aluminium udara dapat dilihat pada Gambar 4.

Pengaruh Baterai Air Laut Bersirkulasi Terbuka Terhadap Nilai Tegangan Dibandingkan Waktu Menggunakan Sistem Terkontrol Data Tersimpan

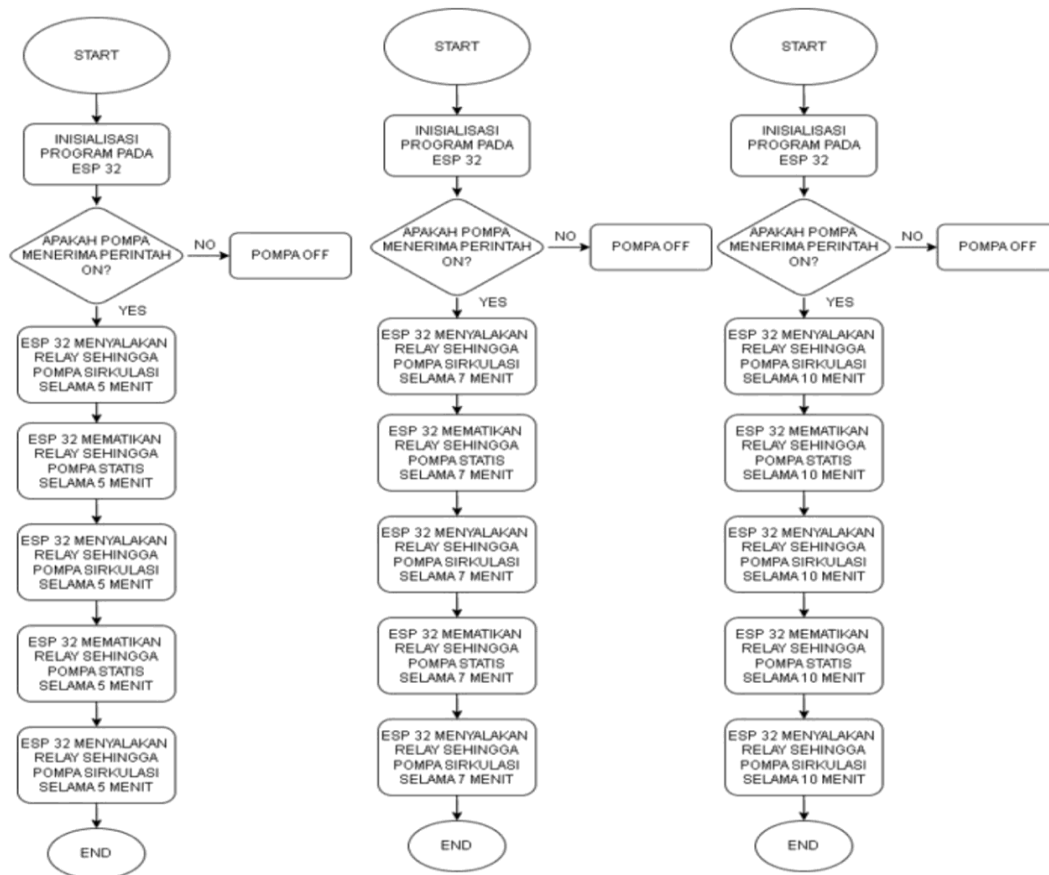


Gambar 4. Flowchart perancangan sistem pembaca tegangan baterai aluminium-karbon

Sumber: Data Primer, 2025

Perancangan sistem sirkulasi bertahap dimulai dengan inialisasi sistem untuk memastikan perangkat keras dan variabel siap digunakan. Selanjutnya, program memeriksa apakah pompa menerima perintah untuk me-nyala dan bersirkulasi berdasarkan salah satu interval waktu pengujian yaitu 5 menit, 7 menit dan 10 menit . Jika perintah diterima, ESP32 akan me-ngaktifkan *relay* untuk menyalakan pom-pa dan menjalankan sirkulasi selama waktu yang ditentukan. Setelah itu, ESP32 akan menonaktifkan *relay* sehingga pompa berhenti (statis) untuk waktu yang sama. Siklus ini diulang sebanyak tiga kali secara bergantian antara kondisi aktif dan statis, guna mensimulasikan pengaruh durasi sirku-lasi terhadap performa sistem. Alur ini berakhir setelah siklus terakhir sirkulasi selesai dilakukan Flowchart perancangan sistem sirsirkulasi bertahap dapat dilihat pada Gambar 11.

Pengaruh Baterai Air Laut Bersirkulasi Terbuka Terhadap Nilai Tegangan Dibandingkan Waktu Menggunakan Sistem Terkontrol Data Tersimpan

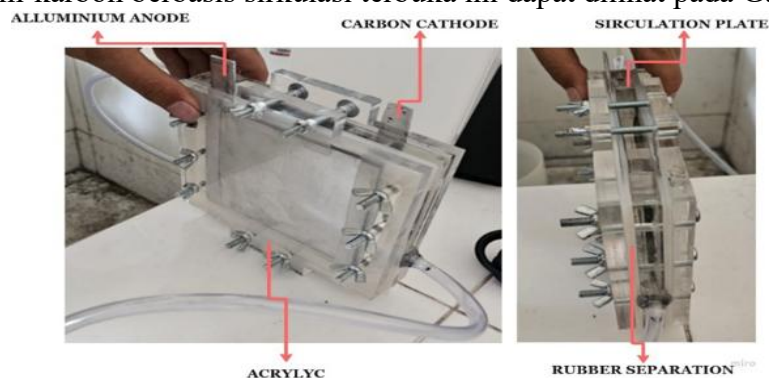


Gambar 5. Flowchart perancangan sistem sirkulasi bertaha
Sumber: Data Primer, 2025

Hasil Dan Pembahasan

Realisasi Baterai aluminium-karbon bersirkulasi terbuka

Baterai aluminium-karbon diran-cang menggunakan satu sel dengan ukuran elektroda sebesar $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0,2\text{ cm}$. Baterai ini menggunakan aluminium 6061 sebagai anode, campuran karbon aktif dan MnO_2 sebagai katode, serta air laut sebagai elektrolit. Hasil dari baterai aluminium-karbon berbasis sirkulasi terbuka ini dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Realisasi baterai aluminium-karbon satu sel($10 \times 10 \times 0,2\text{ cm}$)
Sumber: Data Primer, 2025

Metode pengujian sirkulasi 5 menit

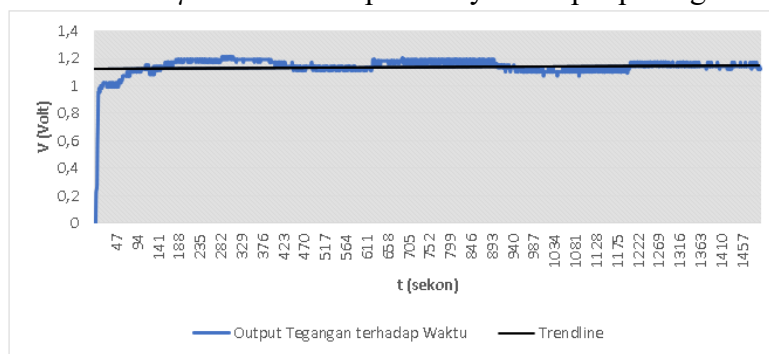
Pada metode pengujian sirkulasi ini, pompa akan mensirkulasikan air laut selama 5 menit secara bertahap sesuai dengan fase yang akan dilakukan (Sirkulasi Pertama, Statis Pertama, Sirkulasi Kedua, Statis Kedua, dan Sirkulasi Ketiga). Hasil metode pengujian sirkulasi 5 menit dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. metode pengujian sirkulasi 5 menit

Fase	Nilai Tegangan Terendah	Nilai Paling Sering Muncul	Nilai Tegangan Tertinggi
Sirkulasi Pertama	0 V	1,19 V	1,21 V
Statis Pertama	1,11 V	1,14 V	1,21 V
Sirkulasi Kedua	1,11 V	1,19 V	1,20 V
Statis Kedua	1,07 V	1,1 V	1,16 V
Sirkulasi Ketiga	1,12 V	1,14 V	1,17 V

Sumber: Data Primer, 2025

Pada Tabel 3 ditunjukkan bahwa pada metode sirkulasi selama 5 menit, hasil tegangan output dari kondisi sirkulasi dan statis menunjukkan stabilitas yang sangat baik sepanjang lima fase pengujian. Tegangan rata-rata selama fase sirkulasi pertama mencapai 1,108 V dan mempertahankan nilai yang relatif konsisten hingga sirkulasi ketiga (1,146 V), hanya mengalami peningkatan sebesar 3,4%. Fenomena ini mengindikasikan bahwa interval sirkulasi yang lebih singkat mampu mempertahankan kondisi antarmuka elek-troda-elektrolit yang optimal, mencegah pembentukan lapisan pasivasi yang signi-fikan pada permukaan anode aluminium. Penelitian Yudi dkk. [16] menegaskan bahwa sirkulasi elektrolit dengan frekuensi yang tepat dapat menghambat akumulasi $Al(OH)_3$ yang cenderung menutupi situs aktif pada permukaan anode. Selama fase statis, baterai hanya mengalami sedikit penurunan tegangan, yaitu dari 1,151 V pada statis pertama menjadi 1,115 V pada statis kedua atau setara dengan degradasi sebesar 3,13 %. Hal ini menunjukkan bahwa sirkulasi yang singkat cukup efektif dalam meredam efek pasivasi pada permukaan elektroda. Berdasarkan data grafik tegangan terhadap waktu Gambar 13, terlihat bahwa penggunaan rancangan dengan pengujian sirkulasi bertahap selama 5 menit meng-hasilkan fluktuasi nilai tegangan dengan *trendline* naik dengan kemiringan positif sebesar $20 \mu V/s$ atau setiap detiknya terdapat peningkatan sebesar $20 \mu V$.



Gambar 7. Data grafik output tegangan terhadap waktu pada baterai aluminium-karbon tanpa beban metode pengujian sirkulasi 5 menit

Sumber: Data Primer, 2025

Dari data yang sudah didapatkan, metode pengujian sirkulasi 5 menit menghasilkan tegangan yang relatif stabil di semua fase dengan peningkatan kecil pada sirkulasi ketiga. Hal

ini menunjukkan bahwa sirkulasi yang lebih sering dan singkat mampu menjaga distribusi ion yang merata dan mencegah akumulasi produk reaksi seperti $\text{Al}(\text{OH})_3$. Temuan ini sejalan dengan penelitian Li et al. (2019), yang menyatakan bahwa sirkulasi elektrolit dengan frekuensi tinggi dapat memperbaiki transfer massa ion OH^- dan Al^{3+} , sehingga meningkatkan efisiensi reaksi reduksi oksigen di katode dan mencegah terbentuknya resistansi tambahan akibat lapisan pasivasi.

Metode pengujian sirkulasi 7 menit

Pada metode pengujian sirkulasi ini, pompa akan mensirkulasi kan air laut selama 7 menit secara bertahap sesuai dengan fase yang akan dilakukan (Sirkulasi Pertama, Statis Pertama, Sirkulasi Kedua, Statis Kedua, dan Sirkulasi Ketiga). Hasil metode pengujian sirkulasi 7 menit dapat dilihat pada Tabel 4.

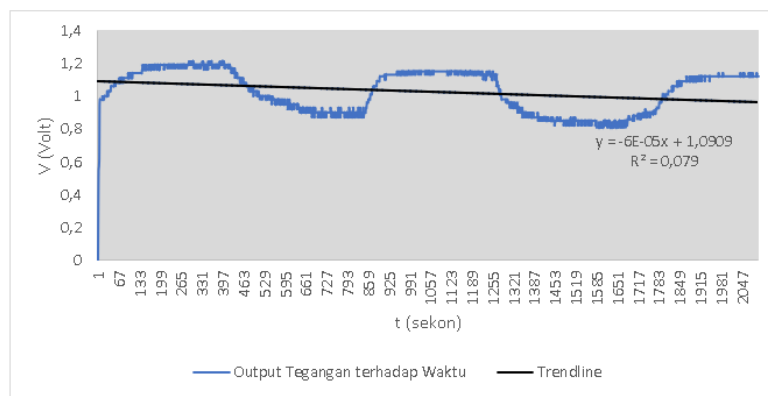
Tabel 4. Metode pengujian sirkulasi 7 menit

Fase	Nilai Tegangan Terendah	Nilai Paling Sering Muncul	Nilai Tegangan Tertinggi
Sirkulasi Pertama	0 V	1,19 V	1,21 V
Statis Pertama	0,87 V	0,9 V	1,17 V
Sirkulasi Kedua	0,87 V	1,15 V	1,15 V
Statis Kedua	0,81 V	0,85 V	1,13 V
Sirkulasi Ketiga	0,82 V	1,12 V	1,14 V

Sumber: Data Primer, 2025

Pada Tabel 4 menunjukkan bahwa pada sirkulasi 7 menit, hasil tegangan dari sirkulasi dan statis memberikan penurunan tegangan yang dibandingkan metode sirkulasi 5 menit, dikarenakan lebih panjangnya dalam waktu terjadinya sirkulasi dan statis. Tegangan rata-rata mengalami penurunan dari 1,141 V pada fase sirkulasi pertama menjadi 1,044 V pada sirkulasi ketiga, setara dengan degradasi sebesar 8,5%. Observasi ini mengindikasikan adanya proses pasivasi yang lebih progresif pada permukaan elektroda aluminium. Penurunan tegangan yang terjadi pada fase statis pertama dan statis kedua menunjukkan penurunan yang signifikan dari nilai 0,958 V menjadi 0,875 V atau setara dengan degradasi sebesar 8,66 % yang mengkonfirmasi hipotesis bahwa kondisi statis mempercepat proses pasivasi melalui akumulasi produk reaksi pada permukaan elektroda. Berdasarkan data grafik tegangan terhadap waktu gambar 14, grafik memperlihatkan tren penurunan yang lebih signifikan seiring waktu. terlihat bahwa penggunaan rancangan dengan pengujian sirkulasi bertahap selama 7 menit menghasilkan fluktuasi nilai tegangan dengan trendline menurun dengan kemiringan sebesar $-60 \mu\text{V/s}$ atau setiap detiknya terdapat penurunan sebesar $60 \mu\text{V}$.

Pengaruh Baterai Air Laut Bersirkulasi Terbuka Terhadap Nilai Tegangan Dibandingkan Waktu Menggunakan Sistem Terkontrol Data Tersimpan



Gambar 8. Data grafik output tegangan terhadap waktu pada baterai aluminium-karbon tanpa beban metode pengujian sirkulasi 7 menit

Sumber: Data Primer, 2025

Dari data hasil pengujian yang sudah didapatkan, metode pengujian sirkulasi 7 menit menghasilkan tegangan menurun secara signifikan selama pengujian, khususnya selama fase statis. Hal ini menunjukkan bahwa durasi sirkulasi yang lebih panjang memungkinkan akumulasi produk reaksi (seperti $Al(OH)_3$) sebelum elektrolit disirkulasikan kembali, sebagaimana dijelaskan oleh Zhang et al. (2021) bahwa interval sirkulasi yang lebih panjang menyebabkan pengendapan $Al(OH)_3$ yang lebih ekstensif pada permukaan elektroda, menciptakan resistansi tambahan terhadap perpindahan muatan. Interval sirkulasi yang lebih panjang juga meningkatkan resistansi internal dan mempercepat degradasi tegangan. Fenomena ini menggaris bawahi pentingnya menjaga perpindahan massa yang kontinu dalam sistem baterai aluminium-karbon yang sejalan dengan penelitian Wang dan Li (2022) yang menyimpulkan bahwa lapisan pasivasi tebal meningkatkan resistansi transfer muatan, sehingga menurunkan performa baterai.

Metode pengujian sirkulasi 10 menit

Pada metode pengujian sirkulasi ini, pompa akan mensirkulasikan air laut selama 10 menit secara bertahap sesuai dengan fase yang akan dilakukan (Sirkulasi Pertama, Statis Pertama, Sirkulasi Kedua, Statis Kedua, dan Sirkulasi Ketiga). Hasil metode pengujian sirkulasi 10 menit dapat dilihat pada Tabel 5

Tabel 5. metode pengujian sirkulasi 10 menit

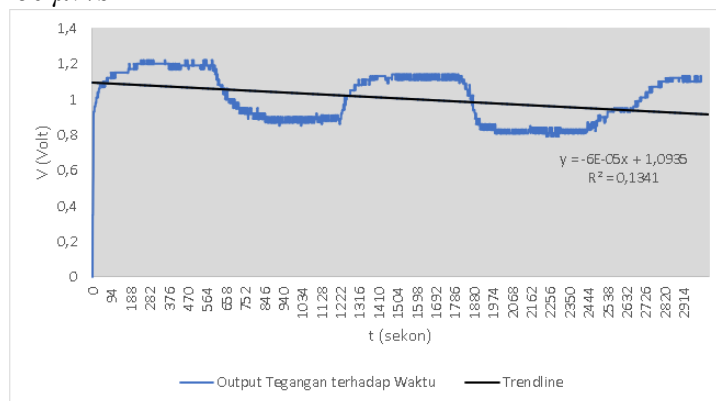
Fase	Nilai Tegangan Terendah	Nilai Paling Sering Muncul	Nilai Tegangan Tertinggi
Sirkulasi Pertama	0 V	1.2 V	1.22 V
Statis Pertama	0.85 V	0.87 V	1.19 V
Sirkulasi Kedua	0.86 V	1.11 V	1.14 V
Statis Kedua	0.79 V	0.81 V	1.14 V
Sirkulasi Ketiga	0.81 V	1.1 V	1.13 V

Sumber: Data Primer, 2025

Pada Tabel 5 menunjukkan bahwa pada metode sirkulasi 10 menit hasil tegangan dari sirkulasi dan statis memberikan penurunan tegangan yang paling signifikan diantara metode sirkulasi 5 menit dan 7 menit. Tegangan rata-rata yang dihasilkan mengalami penurunan dari 1,158 V pada fase sirkulasi pertama menjadi 0,997 V pada sirkulasi ketiga, setara dengan

Pengaruh Baterai Air Laut Bersirkulasi Terbuka Terhadap Nilai Tegangan Dibandingkan Waktu Menggunakan Sistem Terkontrol Data Tersimpan

degradasi sebesar 13,9 %. Penurunan tegangan juga terjadi pada fase statis pertama dan statis kedua menunjukkan penurunan yang signifikan dari nilai 0,920 V menjadi 0,857 V atau setara dengan degradasi sebesar 6,85 % Penurunan ini menggambarkan efek kombinasi dari durasi sirkulasi yang panjang dan kondisi non-sirkulasi yang mempercepat pembentukan lapisan pasivasi. Berdasarkan data grafik tegangan terhadap waktu Gambar 9, grafik memperlihatkan tren penurunan yang signifikan seiring waktu terlihat bahwa penggunaan rancangan dengan pengujian sirkulasi bertahap selama 10 menit menghasilkan fluktuasi nilai tegangan dengan trendline menurun dengan kemiringan sebesar $-60 \mu V/s$ atau setiap detiknya terdapat penurunan sebesar $60 \mu V/s$.

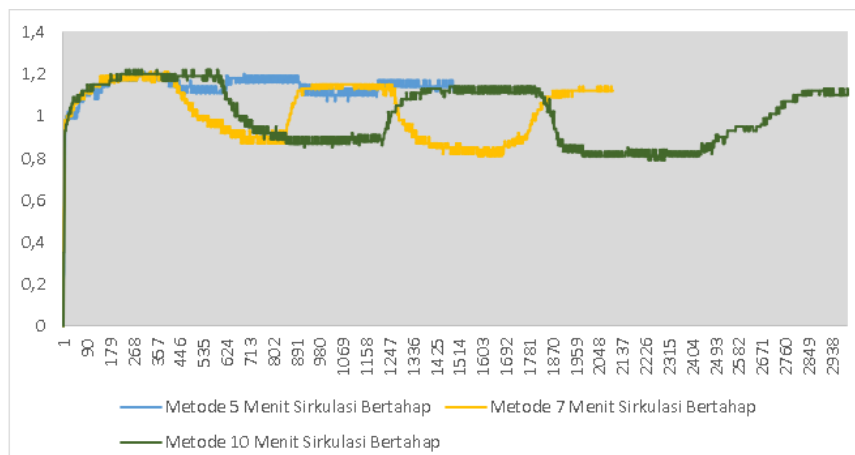


Gambar 9. Data grafik output tegangan terhadap waktu pada baterai aluminium-karbon tanpa beban metode pengujian sirkulasi 10 menit
Sumber: Data Primer, 2025

Dari data hasil pengujian yang sudah didapatkan, metode pengujian sirkulasi 10 menit menunjukkan degradasi kinerja yang paling signifikan di antara ketiga metode. Penurunan tegangan yang drastis ini mengindikasikan bahwa durasi sirkulasi yang terlalu panjang dan kondisi statis memperburuk efek akumulasi produk reaksi pada permukaan elektroda. Tanpa sirkulasi yang lebih sering, lapisan $Al(OH)_3$ yang terbentuk menjadi lebih tebal dan sulit dihilangkan, yang pada akhirnya meningkatkan resistansi transfer muatan. Hal ini diperkuat oleh penelitian Wang dan Li (2022) bahwa lapisan pasivasi tebal meningkatkan resistansi transfer muatan, sehingga menurunkan performa baterai dan penelitian Chen et al. (2023), yang menunjukkan bahwa interval sirkulasi yang terlalu panjang menyebabkan peningkatan resistansi internal akibat lapisan pasivasi yang tebal pada permukaan anode.

Metode pengujian sirkulasi bertahap gabungan

Perbandingan kinerja antara ketiga metode pengujian sirkulasi yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Data grafik output tegangan terhadap waktu pada baterai aluminium-karbon tanpa beban metode pengujian sirkulasi gabungan

Sumber: Data Primer, 2025

Perbandingan komprehensif antara ketiga metode mengungkapkan korelasi yang jelas antara interval sirkulasi elektrolit dengan stabilitas tegangan baterai. Metode 5 menit mempertahankan rata-rata tegangan tertinggi sepanjang siklus operasi (1,138 V), diikuti oleh metode 7 menit (1,028 V) dan 10 menit (1,006 V). Data ini mengkonfirmasi bahwa interval sirkulasi yang lebih pendek secara signifikan memperbaiki stabilitas tegangan baterai aluminium-karbon dengan mengurangi akumulasi produk reaksi pada antarmuka elektroda.

Secara keseluruhan, fase sirkulasi menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan fase statis untuk semua metode, dengan nilai tegangan rata-rata selama sirkulasi 9-15% lebih tinggi dibandingkan fase statis. Fenomena ini berkorelasi dengan temuan Xu et al. (2022) yang menyimpulkan bahwa sirkulasi elektrolit meningkatkan transfer massa dan mengurangi polarisasi konsentrasi pada elektroda, menghasilkan kinerja elektrokimia yang lebih baik.

Pola degradasi kinerja yang berbeda metode juga memberikan wawasan penting mengenai mekanisme pasivasi pada baterai aluminium-karbon. Pola penurunan tegangan rata-rata yang didapatkan menunjukkan bahwa metode 5 menit mengalami degradasi tegangan sebesar 3,4%, jauh lebih rendah dibandingkan metode 7 menit (8,5%) dan 10 menit (13,9%). Perbedaan signifikan ini mengkonfirmasi hipotesis bahwa frekuensi sirkulasi yang lebih tinggi secara efektif menghambat pembentukan lapisan pasivasi yang permanen pada permukaan elektroda aluminium.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh sirkulasi terbuka dengan interval waktu terhadap pengaruh nilai tegangan pada baterai aluminium-karbon, Sirkulasi elektrolit pada baterai aluminium-karbon berpengaruh terhadap stabilitas tegangan yang dihasilkannya. Metode sirkulasi bertahap 5 menit menunjukkan kinerja paling optimal dengan stabilitas tegangan terbaik dan degradasi minimal, dengan peningkatan rata-rata 3,4% dari sirkulasi pertama ke ketiga. Hal ini disebabkan oleh kemampuan interval sirkulasi yang lebih pendek untuk mempertahankan kondisi antarmuka elektroda-elektrolit yang optimal dan mencegah pembentukan lapisan pasivasi yang signifikan. Sebaliknya, durasi sirkulasi yang lebih panjang (7 menit dan 10 menit) menghasilkan penurunan tegangan yang lebih signifikan, dengan degradasi sebesar 8,5% untuk 7 menit dan 13,9% untuk 10 menit. Berdasarkan temuan

penelitian ini, disarankan untuk penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem sirkulasi dengan interval waktu yang lebih variatif, seperti 1, 3, dan 5 menit, untuk mengidentifikasi titik optimal sirkulasi elektrolit. Selain itu, disarankan untuk meneliti pengaruh penambahan katalis atau aditif pada elektrolit untuk mengurangi laju pasivasi anode. Penelitian juga dapat diperluas dengan menguji baterai under load conditions untuk mensimulasikan kondisi aplikasi nyata serta melakukan analisis ekonomi untuk menilai kelayakan implementasi sistem ini dalam skala yang lebih besar. Pengembangan sistem monitoring yang terintegrasi dengan IoT untuk pemantauan real-time juga dapat menjadi inovasi yang berharga untuk penelitian di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhan, I. N. S., & Rustana, C. E. (2020). Studi potensi hidrogen air laut melalui proses elektrolisis sebagai energi terbarukan. <https://doi.org/10.21009/03.snf2020.01.fa.03>
- Badan Nasional Pengelola Perbatasan Republik Indonesia. (2023). *Akhiri kerumitan data kewilayahan, Indonesia siap menuju poros maritim dunia*. <https://www.bnpp.go.id>
- Chen, M., Wang, L., & Li, J. (2023). Electrochemical impedance analysis of aluminum-air batteries under different operating conditions. *Energy Storage Materials*, *45*, 312–329.
- Herry Setiyawan, A. N. K. S. (2021). Studi pengaruh salinitas air laut sintetis terhadap daya baterai sebagai energi alternatif terbarukan. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, *3*.
- Irfan, I., & Prasetya, A. M. (2022). Peningkatan performa baterai air laut menggunakan Cu-Zn berdasarkan luas penampang elektroda. *Elektrika Borneo*, *8(1)*. <https://doi.org/10.35334/jeb.v8i1.2653>
- Li, X., Zhang, Y., & Wang, H. (2019). The effect of electrolyte circulation on aluminum-air batteries. *Electrochimica Acta*, *302*, 119–128.
- Masrufaiyah. (2016). *Kinerja baterai elektrolit air tawar dan air laut sebagai sumber energi aplikatif* [Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh November].
- Meutia, E., Nurbaiti, U., & Fianti, F. (2021). Pengaruh radiasi matahari pada air laut terhadap daya yang dihasilkan sebagai sumber energi alternatif. *EnviroScienteeae*, *17(1)*. <https://doi.org/10.20527/es.v17i1.11350>
- Santoso, E. B., & Mulyadi, M. (2020). Baterai air laut sebagai sumber energi listrik untuk pemukiman pesisir dan budidaya perikanan. *Elektrika Borneo*, *6(1)*. <https://doi.org/10.35334/jeb.v6i1.1504>
- Saputra, N. H., Wisudo, S. H., Riyanto, M., & Susanto, A. (2020). Penggunaan elektroda tembaga dan seng dengan elektrolit air laut untuk sumber energi lampu LED-DIP. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, *10(2)*, 135–147. <https://doi.org/10.24319/jtpk.10.135-147>
- Siagian, P., Suleman, N., Asrim, J. S. P., Tambi, Prihatini, S. E. W. W. O. Z., Budirohmi, A., & Armus, R. (2023). *Energi baru terbarukan sebagai energi alternatif*. Yayasan Kita Menulis.
- Susanto, A., Baskoro, M., Wisudo, S. H., Riyanto, M., & Purwangka, F. (2018). Ujicoba DC converter dengan baterai air laut Cu-Zn sebagai sumber energi lampu untuk perikanan bagan tancap. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, *8(1)*. <https://doi.org/10.33512/jpk.v8i1.3680>
- Wang, F., & Li, Q. (2022). Mechanisms of passivation and its influence on aluminum-air battery performance. *Electrochemical Energy Reviews*, *5(3)*, 367–389.

Pengaruh Baterai Air Laut Bersirkulasi Terbuka Terhadap Nilai Tegangan Dibandingkan Waktu Menggunakan Sistem Terkontrol Data Tersimpan

- Xu, W., Ma, H., & Zhou, Y. (2022). Mitigating passivation in aluminum-air batteries through optimized electrolyte management. *Journal of Electrochemical Science*, *18*, 567–580.
- Yudi, R. N., Yusuf, I., & Hiendro, A. (2019). Studi performa baterai air laut dengan membandingkan elektrolit larutan garam dan air laut untuk menghasilkan energi listrik. *Teknik Elektro*, *1*(1).
- Yudi, R. N., Yusuf, I., & Hiendro, A. (2020). Studi performa baterai air laut dengan membandingkan elektrolit larutan garam dan air laut untuk menghasilkan energi listrik. *Teknik Elektro*, *13*, 1–10.
- Zhang, Z., Chen, J., & Wang, X. (2021). Impact of electrolyte flow rate on aluminum-air battery performance. *Journal of Power Sources*, *481*, 228237.