

PURWARUPA BATERAI ALUMINIUM ZINC DENGAN ELEKTROLIT HASIL ELEKTROLISIS BERBASIS TENAGA SURYA DAN SISTEM MONITORING BERBASIS IOT

1st Muhammad Firza Adrien

Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

firzadrn@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Dr. Ekki Kurniawan, S.T, M.T

Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

ekkikurniawan@telkomuniversity.ac.id

3rd Ir. Uke Kurniawan Usman, M.T

Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

ukeusman@telkomuniversity.ac.id

Kebutuhan akan perealisasiian energi terbarukan yang efisien yang diinisiasi oleh pemerintah negara Indonesia sejak terbitnya Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 mendorong penelitian ini untuk merancang dan menganalisis purwarupa baterai Aluminium-Zinc (Al-Zn). Tujuannya untuk membangun sistem terintegrasi dengan elektrolisis bertenaga surya 20 Wp dan monitoring IoT, serta membandingkan efektivitas elektrolit NaOH dan KOH. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada kinerja purwarupa dalam kondisi paparan cahaya matahari yang fluktuatif. Metodologi penelitian meliputi studi komparatif evolusi pH elektrolit, perakitan tumpukan 12 sel baterai, dan pengujian karakteristik *discharge* di bawah beban untuk menentukan performa serta kapasitas praktis. Pengukuran baterai ditandai menggunakan implementasi sistem monitoring *real-time* menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke platform ThingSpeak untuk visualisasi data. Hasil pengukuran membuktikan superioritas elektrolit KOH yang mencapai pH 12.6. Purwarupa baterai menunjukkan profil tegangan *discharge* yang stabil, namun dengan kelemahan kritis berupa kapasitas terukur yang sangat rendah, yaitu hanya 0.040 mAh. Keterbatasan performa ini disimpulkan akibat tingginya resistansi internal sel. Tantangan pada kurang cocoknya material housing sebagai kelemahan dalam implementasi.

Kata Kunci: baterai aluminium-zinc, elektrolisis, tenaga surya, IoT, sistem monitoring, energi terbarukan.

I. PENDAHULUAN

Transisi penggunaan energi terbarukan merupakan hal yang menjadi salah satu kekhawatiran utama pemerintah, hal ini ditandai dengan peningkatan kebutuhan energi terbarukan dan keberlanjutan lingkungan untuk mendapatkan hasil yang efisien dalam menghasilkan dan menyimpan energi. Penggunaan energi terbarukan telah diinisiasi oleh pemerintah negara Indonesia sejak terbitnya Undang-Undang

Nomor 30 Tahun 2007 tentang energi hingga saat ini yang mulai terlihat urgensinya.

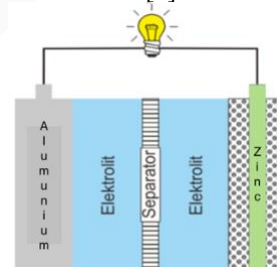
Melalui teknologi Panel Surya (PV) yang dapat dikembangkan menjadi berbagai macam kegunaan contohnya dalam metode elektrolisis[1]. Elektrolisis dapat dikombinasikan dengan energi terbarukan seperti panel surya. Metode seperti elektrolisis dapat dimanfaatkan untuk penerapan seperti pembuatan baterai yang merupakan sebuah perangkat penyimpanan energi. Salah satu jenis baterai yang memiliki keunggulan dibanding jenis baterai lainnya adalah baterai logam seperti baterai Aluminium-zinc[2].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun prototipe baterai aluminium-zinc yang *compact* dan dapat digunakan dengan leluasa berbasis tenaga surya sebagai daya utama proses elektrolisis.

II. KAJIAN TEORI

A. Baterai Aluminium-Zinc (Al-Zn)

Baterai Aluminium-Zinc merupakan jenis baterai logam-seng yang menggunakan aluminium sebagai anode dan zinc (Zn) sebagai katode dari baterai[3].



Gambar 2. 1 Arsitektur Baterai Aluminium Zinc [4]

Paduan aluminium-zinc memiliki kelebihan dalam menghasilkan tegangan dan arus stabil dengan resistansi korosi yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan baterai konvensional lainnya[4]. Baterai aluminium-zinc

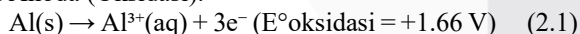
memanfaatkan reaksi oksidasi dan reduksi antara logam aluminium dan zinc untuk menghasilkan listrik, kombinasi Al-Zn sebagai pasangan elektrode dapat menghasilkan beda potensial yang cukup signifikan untuk diaplikasikan sebagai sumber energi alternatif [5].

Tabel 2. 1 Tabel Reaksi Kimia Baterai Aluminium[6]

Reaksi reduksi	E°_{sel}
$\text{Li}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}(\text{s})$	-3,04
$\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Na}(\text{s})$	-2,71
$\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mg}(\text{s})$	-2,38
$\text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Al}(\text{s})$	-1,66
$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$	-0,83
$\text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}(\text{s})$	-0,76
$\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cr}(\text{s})$	-0,74
$\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{s})$	-0,41
$\text{Cd}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{s})$	-0,40
$\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni}(\text{s})$	-0,23
$\text{Sn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Sn}(\text{s})$	-0,14
$\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{s})$	-0,13
$\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{s})$	-0,04
$2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g})$	0,00
$\text{Sn}^{4+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Sn}^{2+}(\text{aq})$	0,15
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}^+(\text{aq})$	0,16
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{s})$	0,34
$\text{Cu}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{s})$	0,52
$\text{I}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{I}^-(\text{aq})$	0,54
$\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}(\text{aq})$	0,77
$\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s})$	0,80
$\text{Hg}_2^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Hg}(\text{l})$	0,85
$2\text{Hg}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Hg}_2(\text{aq})$	0,90
$\text{Br}_2(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Br}^-(\text{aq})$	1,07
$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1,23
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-(\text{aq})$	1,36
$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1,78
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$	2,01
$\text{F}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{F}^-(\text{aq})$	2,87

Tabel 2.1 menyajikan data kecenderungan setiap logam untuk mengalami reduksi (menerima elektron), yang diukur dalam Potensial Reduksi Standar (E°). Dengan membandingkan nilai E° untuk Aluminium ($E^\circ = -1.66 \text{ V}$) dan Seng ($E^\circ = -0.76 \text{ V}$). Berdasarkan penetapan tersebut, reaksi redoks yang terjadi di dalam satu sel baterai Al-Zn beserta perhitungan potensial sel teoretisnya

Reaksi Anoda (Oksidasi):



Reaksi Katoda (Reduksi):



Perhitungan Potensial Sel Teoretis (E°_{sel}):

$$E^\circ_{\text{sel}} = E^\circ_{\text{oksidasi}} + E^\circ_{\text{reduksi}} \quad (2.3)$$

$$E^\circ_{\text{sel}} = (+1.66 \text{ V}) + (-0.76 \text{ V}) = +0.90 \text{ V} \quad (2.4)$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa satu sel baterai Al-Zn secara teoretis mampu menghasilkan tegangan maksimum sebesar 0.90 V dalam kondisi standar. Nilai inilah yang akan digunakan sebagai dasar perbandingan untuk menganalisis efisiensi dan performa tegangan dari purwarupa baterai yang diukur secara eksperimental[6].

Untuk mengetahui kapasitas baterai yang dirancang secara spesifik haruslah dilakukan pengujian pengosongan kapasitas baterai dengan rumus :

$$mAh = mA \times \text{Waktu} \quad (2.5)$$

Keterangan :

mAh : nilai kapasitas baterai (*mili ampere hour*)

A : Arus rata-rata (mA)

Waktu : durasi pengosongan (Jam)

B. Panel Surya

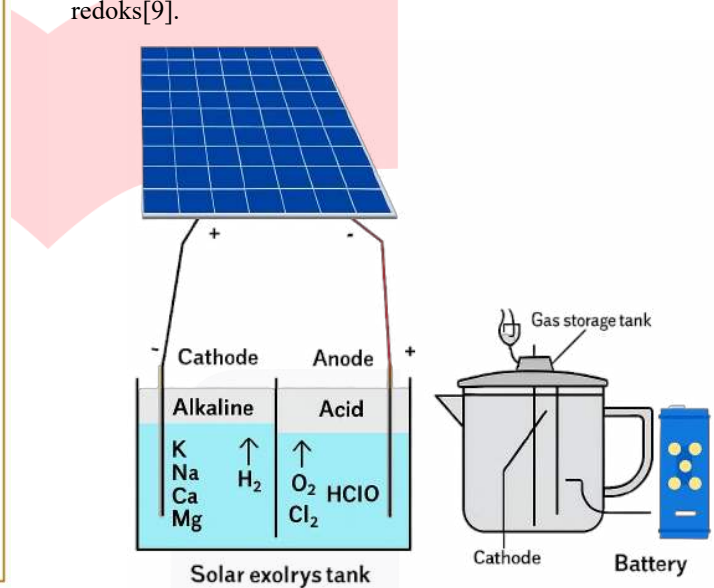
Panel Surya (*solar panel*) merupakan sebuah media atau alat yang memiliki kemampuan mengubah cahaya matahari menjadi energi Listrik secara langsung[6].

Perhitungan kapasitas modul surya yang dapat dihitung dengan rumus[7], [8]:

$$Wp = \frac{E}{H_{\text{Solar}} \times F_{\text{Derating}}} \quad (2.6)$$

C. Elektrolisis

Elektrolisis merupakan sebuah proses kimia dimana arus listrik dapat menguraikan suatu zat yang dinamakan zat elektrolit, pada proses elektrolisis terjadi konversi energi Listrik menjadi energi kimia yang dikenal dengan reaksi redoks[9].

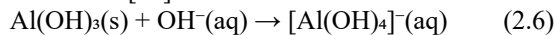


Gambar 2. 2 Proses Elektrolisis dengan PV [9]

Gambar 2.2 menggambarkan proses elektrolisis dengan memanfaatkan tenaga surya yang ditangkap oleh PV untuk melakukan reaksi elektrolisis. Kutub anode (+) akan menghasilkan asam (*acid*) karena selama proses elektrolisis anode akan mengalami oksidasi, sedangkan pada kutub katode (-) akan menghasilkan basa dan terjadi reduksi pada material katode yang digunakan. Ketika larutan yang digunakan sebagai elektrolit mengalami proses elektrolisis, persamaan reaksi sel pada baterai aluminium akan berubah[10]

Elektrolit merupakan zat yang dapat menghantarkan arus listrik ketika dilarutkan dalam air atau cairan pelarut lainnya. NaCl merupakan salah satu elektrolit yang umum digunakan dalam pengembangan larutan elektrolit yang digunakan pada proyek seperti pengembangan baterai aluminium. Elektrolit NaCl adalah larutan elektrolit netral yang terbentuk dari reaksi antara asam kuat (HCl) dan basa kuat (NaOH), dan kemudian NaCl akan dirubah menjadi NaOH pH 12 lewat proses elektrolisis menjadikannya elektrolit yang menunjang penelitian ini. Elektrolit lain yang dapat menjadi bahan uji selain NaCl adalah *Kalium Hidroksida* KOH yang merupakan larutan yang dapat dijadikan larutan basa keras dengan pH ± 14 yaitu melalui proses elektrolisis menjadi *Kalium Hidroksida* (KOH)

Elektrolit KOH menyediakan konsentrasi ion hidroksida (OH^-) yang sangat tinggi di dalam larutan. Ion OH^- inilah yang secara aktif "menyerang" dan bereaksi dengan lapisan pasif $\text{Al}(\text{OH})_3$, mengubahnya dari padatan yang tidak larut menjadi ion kompleks tetrahidroksoaluminat ($[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$) yang larut dalam air [11].



Dengan melarutkan lapisan penghalang ini, permukaan logam aluminium murni di bawahnya menjadi terekspos dan siap untuk mengalami reaksi oksidasi yang menghasilkan listrik:



Salah satu faktor kunci yang mempengaruhi laju dan efisiensi proses elektrolisis, serta kinerja akhir baterai, adalah konsentrasi atau molaritas larutan elektrolit.

Massa zat terlarut juga dibutuhkan untuk membuat larutan dengan molaritas tertentu dapat dihitung menggunakan rumus berikut [12]:

$$M = \frac{m}{Mr} \times \frac{1000}{v} \quad (2.7)$$

Dimana:

M = Molaritas larutan (mol/L)

m = massa zat terlarut (gram)

Mr = massa molekul relatif zat terlarut (g/mol)

v = volume larutan (mL)

D. Internet of Things (IoT)

Internet of thing (IoT) merupakan sebuah konsep arsitektur sistem yang tersusun atas perangkat keras, perangkat lunak, dan *website*. Adanya perbedaan protocol antara protocol web dan perangkat keras, sistem *embedded* berupa *gateway* diperlukan untuk menghubungkan dan menjembatani perbedaan protocol tersebut. Tujuannya adalah untuk membuat orang lebih mudah berinteraksi satu sama lain. Dengan memberikan nama semua mesin dengan pengenalan *IP address*, mereka akan dapat menggunakan jaringan [13].

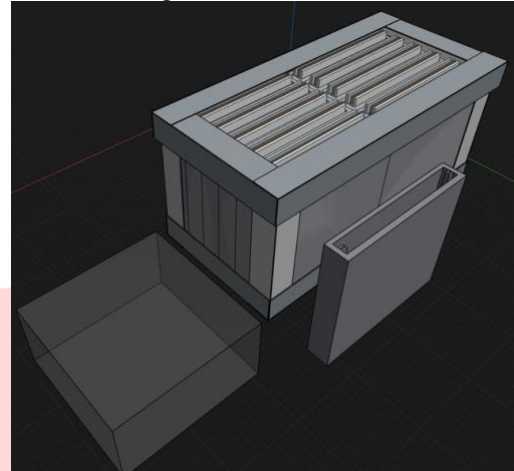
Media IoT yang digunakan dalam pengembangan sistem monitoring baterai Al-Zn adalah ThingSpeak. Pemilihan platform ini didasarkan pada keunggulannya yang relevan untuk pengembangan sistem purwarupa, terutama karena kemudahan dalam proses konfigurasi dan penggunaannya yang tidak memerlukan perancangan server web dari awal. Salah satu keunggulan utama ThingSpeak adalah kapabilitas visualisasinya. Setiap data yang berhasil dikirim dan tersimpan pada *field* di dalam sebuah kanal akan secara otomatis divisualisasikan oleh platform dalam bentuk grafik deret waktu (*time-series chart*) [14], [15].

III. METODE

A. Desain Sistem

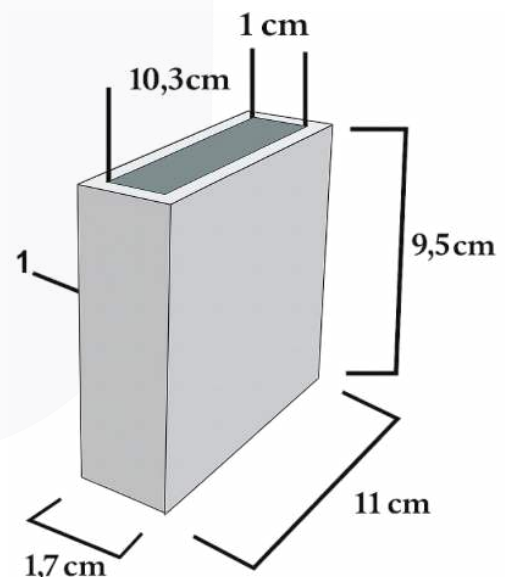
Sistem perancangan purwarupa baterai aluminium zinc dengan proses elektrolisis berbasis tenaga surya dan sistem monitoring berbasis IoT memiliki desain sistem dengan memanfaatkan media 3d print sebagai media yang memuat anode dan katode yang digunakan, dan material akrilik untuk memuat semua komponen berbentuk kotak yang digunakan dengan ukuran sebesar 12 x 23 cm. Tujuan digunakannya

media berukuran 12 x 23 cm tersebut untuk menonjolkan sisi efisiensi penggunaan material sepadat mungkin dan juga alat yang dirancang memiliki ukuran kecil yang mudah dapat dipindahkan dan tidak memakan tempat yang besar dengan bobot yang ringan dengan bobot kering 463 gram dan berat *housing* sel sebesar 53 gram.



Gambar 3. 1 Desain 3D Baterai dan Monitoring

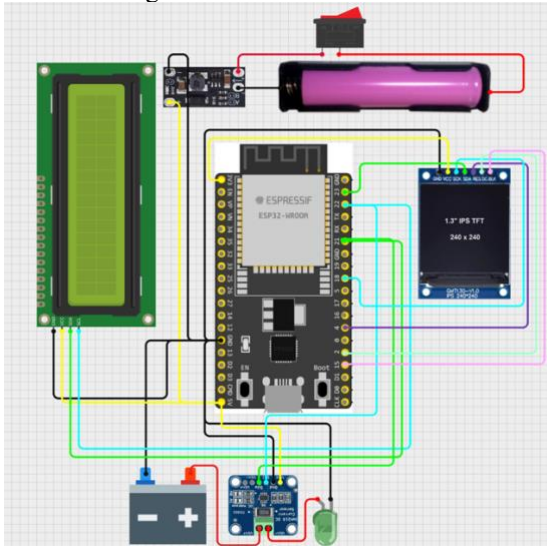
Sistem yang dimuat dalam kotak memisahkan komponen utama baterai dengan kotak komponen monitoring. Adanya perancangan pemisahan baterai dengan sistem monitoring ini bertujuan untuk mengantisipasi adanya kebocoran air elektrolit yang digunakan pada proses elektrolisis atau hal-hal yang diluar perhitungan terjadi pada komponen elektronika yang ada pada sistem keseluruhan alat.



Gambar 3. 2 Wadah Anode dan Katode

Gambar 3.2 merupakan gambaran desain wadah untuk memuat anode dan katode yang pada bagian tengahnya diberikan partisi berupa separator yang memiliki fungsi pembatas antara anode dan katode yang memiliki dimensi 11 x 1,7 x 9,5 cm.

B. Desain Perangkat Keras



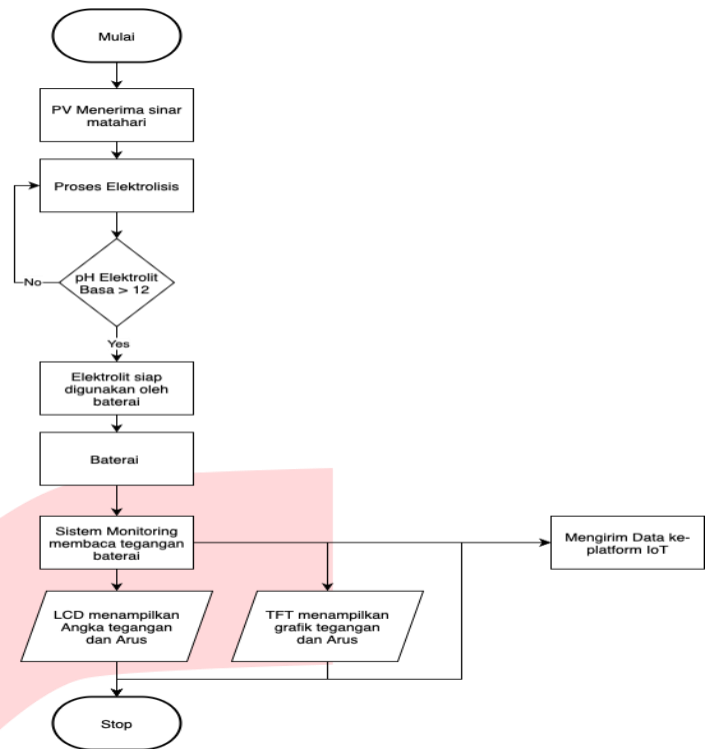
Gambar 3.3 Wiring Komponen Sistem Monitoring

Sistem monitoring menggunakan ESP32 yang dihubungkan dengan beberapa perangkat termasuk sensor tegangan dan arus INA 219, TFT display yang menggunakan pin SDA, SCK, RES, DC, BLK pada GPIO (23, 18, 4, 2, dan 15) Vin terhubung ke 3.3 V dan GND ke ground. LCD I2C pin SDA, SCL terhubung dengan GPIO (21, dan 22). Pin VIN ESP32 dihubungkan ke sumber daya 5V, sementara GND terhubung ke ground. Output dari sistem monitoring ini berupa LCD I2C, dengan output terhubung ke LED indicator.

Penggunaan Step-Up 3V to 5V digunakan untuk menambah tegangan pada baterai yang digunakan sebagai daya utama system monitoring melihat baterai yang digunakan berukuran 3V. LCD I2C dan TFT display yang digunakan sebagai keluaran dari rangkaian monitoring akan menampilkan informasi sistem seperti tegangan dan arus. Dengan perancangan pengkabelan ini, sistem dapat memantau parameter penting secara real-time berupa angka maupun grafik.

C. Desain Perangkat Lunak

Flowchart sistem menggambarkan alur sistem secara keseluruhan yang berjalan dengan alur pekerjaan yang terstruktur dan logis. Proses ini diinisiasi saat Panel Surya (PV) menerima energi matahari yang kemudian dimanfaatkan untuk menjalankan Proses Elektrolisis. Salah satu elemen krusial dalam alur ini adalah implementasi *loop* pengecekan kondisi, di mana sistem akan secara kontinu memvalidasi pH larutan elektrolit. Setelah kondisi pH basa yang diinginkan tercapai, sistem akan melanjutkan ke tahap aktivasi baterai, di mana fungsi monitoring mengambil alih. Sistem Monitoring yang berbasis ESP32 kemudian mengakuisisi data parameter baterai yang didistribusikan melalui dua jalur keluaran secara simultan: ditampilkan secara lokal pada layar LCD dan TFT, serta dikirim ke platform IoT untuk pemantauan jarak jauh.



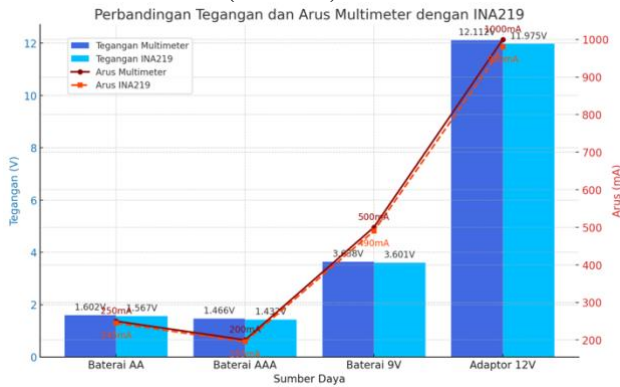
Gambar 3.4 Rancangan Flowchart Sistem

Gambar 3.13 flowchart sistem menggambarkan alur sistem Proses diinisiasi saat Panel Surya (PV) menerima energi matahari untuk menjalankan Proses Elektrolisis. Elemen paling krusial dalam alur ini adalah implementasi *loop* pengecekan kondisi, di mana pengecekan kondisi pH larutan elektrolit penting untuk menunjang performa baterai dengan target yang ditentukan, yaitu pH basa 12. Proses elektrolisis akan terus berjalan hingga tingkat kebasaaan yang ditentukan tercapai. Logika ini memastikan bahwa sel baterai hanya akan diaktifkan menggunakan elektrolit yang telah memenuhi spesifikasi kimia untuk memberikan performa yang optimal baterai.

Setelah kondisi pH basa terpenuhi, sistem melanjutkan ke tahap aktivasi baterai, di mana fungsi monitoring mengambil alih. Sistem Monitoring yang berbasis ESP32 akan mengakuisisi data parameter baterai seperti tegangan dan arus. Data tersebut kemudian didistribusikan melalui dua jalur keluaran secara simultan: dikirim secara nirkabel ke platform IoT ThingSpeak untuk monitoring jarak jauh, dan pada saat yang sama ditampilkan secara langsung pada layar LCD dan TFT untuk pemantauan lokal. Diagram alir ini penting untuk menunjukkan sebuah proses kerja sistem yang digunakan dalam pengembangan baterai Al-Zn guna memastikan setiap tahapan proses berjalan sesuai kondisi yang ditetapkan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kalibrasi Sensor (INA 219)



Gambar 4. 1 Grafik perbandingan multimeter dan sensor INA 219

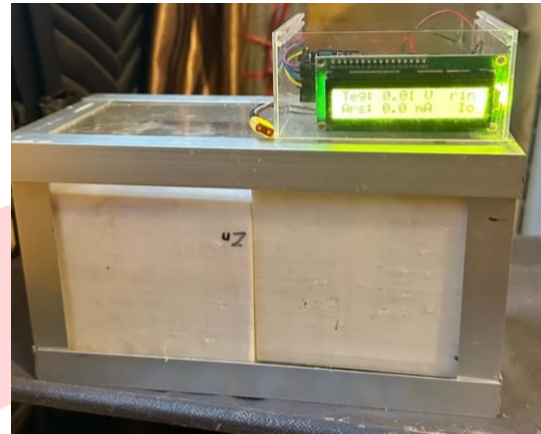
Gambar 4.2 memaparkan sumber daya terhadap tegangan, Sumber daya dengan arus perbandingan tegangan yang terbaca oleh sensor dengan multimeter. Gambar 4.2 diatas merepresentasikan grafik perbandingan tegangan dan arus menggunakan multimeter dan sensor INA 219 terhadap berbagai sumber daya dalam kasus ini baterai AA, AAA, 9V, dan adaptor 12V. Tegangan dan arus hasil deteksi sensor mengindikasikan bahwa sensor INA 219 secara umum mengukur tegangan sedikit lebih rendah dibandingkan pembacaan tegangan dan arus oleh multimeter digital. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya resistansi sensor. Garis merah pada grafik menunjukkan arus yang mempertegas bahwa terjadinya penurunan kecil dibandingkan nilai yang terukur pada multimeter digital. Secara keseluruhan meskipun terdapat sedikit variasi dalam pengukuran tegangan dan arus, sensor INA 219 masih mempertahankan tingkat akurasi yang memuaskan untuk memantau tegangan dan arus sesuai yang diharapkan. secara keseluruhan nilai ukur dan akurasi yang dimiliki sensor INA 219 dalam mengukur tegangan dan arus mencapai akurasi diatas 97% yang menandakan sensor dalam kondisi prima dan baik dalam pengukuran.



Gambar 4. 2 Akurasi Sensor

Pada gambar 4.1 merupakan bukti akurasi sensor yang sangat memuaskan dan dapat dilihat pada panel LCD merekam tegangan 0.68 V dan multimeter sebagai alat ukur standar 0.678 V, yang mana membuktikan selisih tegangan yang sangat minim.

B. Integrasi dan Implementasi Sistem



Gambar 4. 3 Housing Baterai dan Sistem Monitoring

Housing baterai yang terdapat pada gambar 4.2 1 Housing baterai telah diukur dan dibuktikan ukuran yang presisi dapat memuat sel baterai dengan jumlah total 12 sel baterai dengan format 12 seri. Material utama yang digunakan pada housing baterai adalah akrilik yang menunjang penampilan serta kekuatan material yang digunakan untuk menampung semua komponen baterai.



Gambar 4. 4 Sistem Elektrolisis

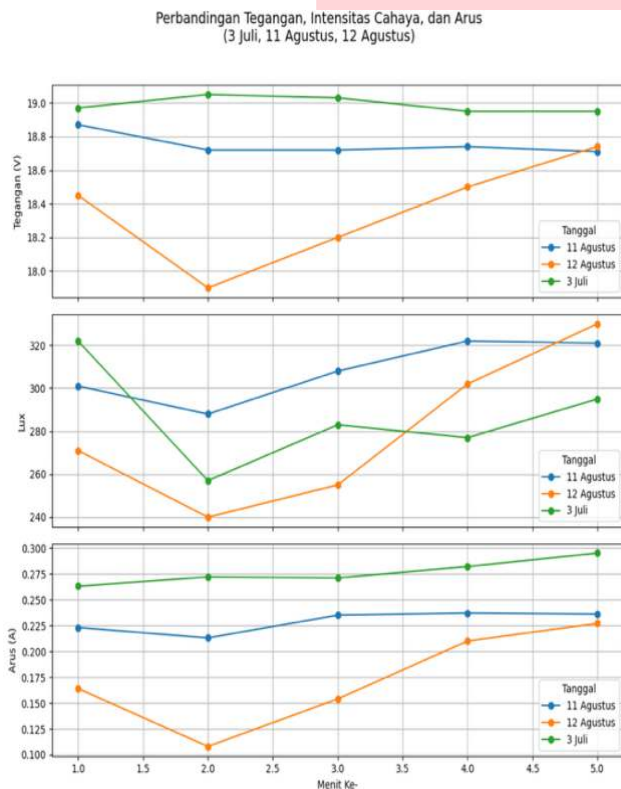
Alat yang ditampilkan dalam gambar menunjukkan sistem terintegrasi baik pada proses elektrolisis air dan sel baterai yang menggunakan larutan elektrolit yang dihasilkan oleh proses elektrolisis. Pada jug yang bertanda "Ionizer Air", terdapat sel elektrolitik di mana arus listrik dialirkan melalui dua elektroda yang terendam dalam air, dengan sedikit elektrolit seperti NaCl dan KCl yang diubah melalui proses elektrolisis menjadi *Natrium Hidroksida* (NaOH) dan *Kalium Hidroksida* (KOH) untuk meningkatkan

konduktivitas. Proses kimia di katoda menghasilkan gas hidrogen (H_2) dan ion hidroksida (OH^-) sementara di anoda menghasilkan gas oksigen (O_2) dan ion hidrogen (H^+). Pembentukan ion OH^- membuat air menjadi basa, dan karena itu pH larutan meningkat dan dapat mencapai sekitar pH 11, menunjukkan pembentukan larutan natrium hidroksida ($NaOH$) dan kalium hidroksida (KOH), yang merupakan basa kuat..

C. Hasil Pengukuran

Tabel 4. 1 Data Pengukuran PV Pagi

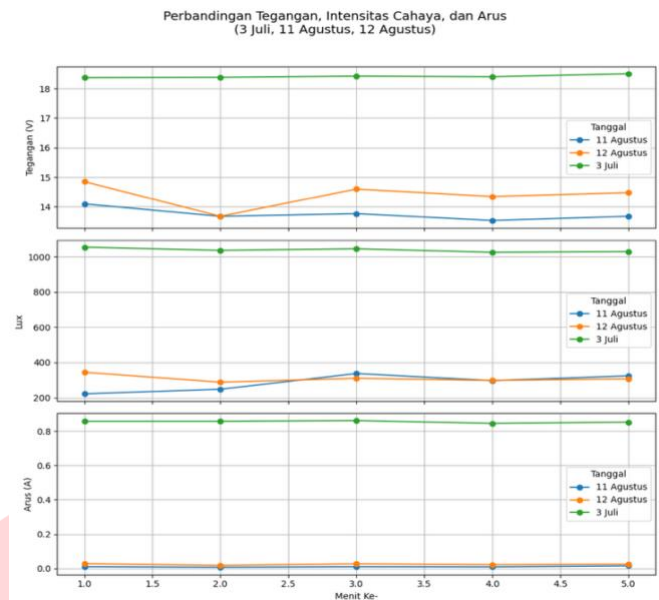
Menit Ke- (Menit)	Suhu (C)	Waktu Pengukuran (Jam)	Tegangan (V)	Intensitas Cahaya (Lux)	Arus (A)
5	26	07:30	18.97	322	0.263
10	26	07:35	19.05	257	0.272
15	26	07:40	19.03	283	0.271
20	26	07:45	18.95	277	0.282
25	26	07:50	18.95	295	0.295



Gambar 4. 5 Pengukuran PV Pagi

Tabel 4. 2 Data Pengukuran PV Siang

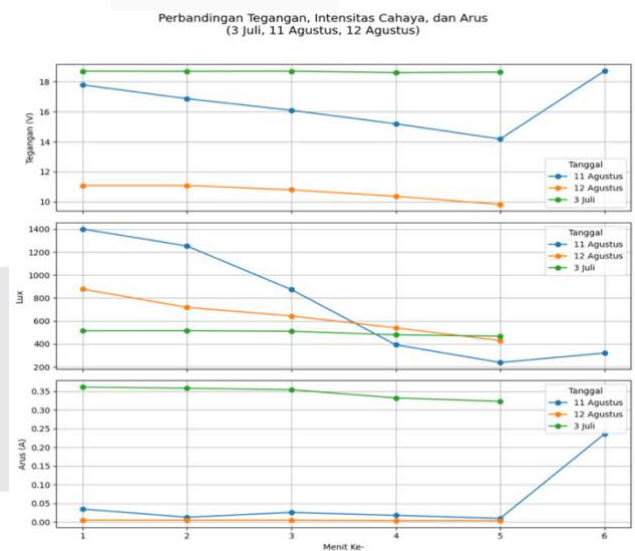
Menit Ke- (Menit)	Suhu (C)	Waktu Pengukuran (Jam)	Tegangan (V)	Intensitas Cahaya (Lux)	Arus (A)
5	30	11.30	18.37	1055	0.857
10	30	11.35	18.38	1037	0.857
15	30	11.40	18.42	1046	0.861
20	30	11.45	18.40	1026	0.845
25	30	11.50	18.50	1030	0.852



Gambar 4. 6 Pengukuran PV Siang

Tabel 4. 3 Data Pengukuran PV Sore

Menit Ke- (Menit)	Suhu (C)	Waktu Pengukuran (Jam)	Tegangan (V)	Intensitas Cahaya (Lux)	Arus (A)
5	29	15.30	18.69	515	0.361
10	29	15.35	18.68	516	0.358
15	29	15.40	18.69	511	0.354
20	29	15.45	18.60	480	0.332
25	29	15.50	18.63	468	0.323



Gambar 4. 7 Pengukuran PV Sore

Berdasarkan hasil pengukuran kinerja panel surya yang telah dilakukan pada tiga interval waktu yang berbeda (pagi, siang, dan sore), dapat ditarik beberapa analisis fundamental mengenai karakteristik panel. Data yang tersaji pada Tabel 4.2 Tabel Pengukuran Pv Pagi, 4.3 Tabel Pengukuran Pv Siang, dan 4.4 Tabel Pengukuran Pv Sore secara kolektif menunjukkan adanya korelasi yang sangat kuat antara intensitas cahaya (Lux) dengan arus listrik (Ampere) yang dihasilkan, sementara tegangan (Voltage)

cenderung menunjukkan kestabilan yang tinggi di semua kondisi hanya bergantung pada kondisi keadaan cuaca diambilnya data yang mempengaruhi nilai pengukuran.

Tabel 4. 4 Tabel Pengukuran pH Elektrolit KOH

Pengukuran Ke-	Waktu (Menit)	pH
1	05.01	11.4
2	12.39	12.1
3	15:35	12.3
4	20:40	12.5
5	25:24	12.5
6	31:36	12.6

Tabel 4.5 Pengukuran pH Elektrolit KOH menyajikan data hasil pengukuran pH pada larutan elektrolit KOH selama proses elektrolisis. Tabel ini merekam enam titik pengukuran, menunjukkan perubahan nilai pH dari 11.4 pada awal proses hingga mencapai 12.6 setelah durasi 31 menit 36 detik.



Gambar 4. 8 Pengujian Full Baterai dengan KOH

Gambar ini menyajikan hasil pengukuran OCV pada konfigurasi tumpukan penuh 12 sel baterai dengan elektrolit KOH. Pengukuran ini mencatat tegangan total yang dihasilkan oleh keseluruhan sel, dengan nilai yang terbaca pada multimeter sebesar 4.888 V.

Tabel 4. 5 Tabel Pengukuran pH Elektrolit NaOH

Pengukuran Ke-	Waktu (Menit)	pH
1	05.03	9.5
2	10.04	9.7
3	15:04	9.8
4	20:05	9.8
5	25:52	9.8
6	30:52	9.9

Tabel 4.6 Tabel Pengukuran pH Elektrolit NaOH ini menampilkan data hasil pengukuran pH untuk larutan elektrolit NaOH selama proses elektrolisis. Data yang terdiri dari enam titik pengukuran ini menunjukkan bahwa nilai pH larutan meningkat dari 9.5 pada awal pengukuran dan mencapai kondisi stabil di sekitar 9.8 hingga 9.9 setelah berjalan selama kurang lebih 30 menit 52 detik.



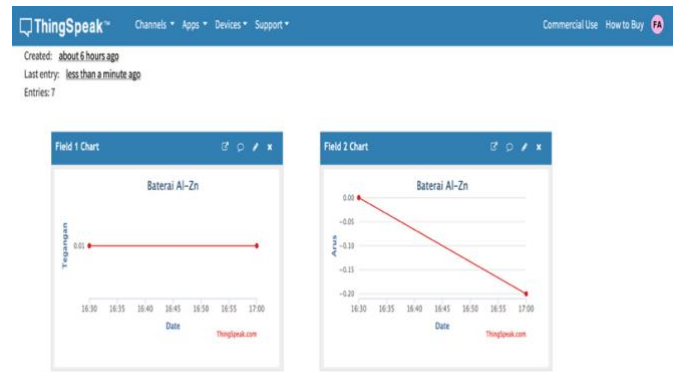
Gambar 4. 9 Pengujian penuh Baterai dengan NaOH

Gambar ini menampilkan hasil pengukuran OCV pada tumpukan penuh 12 sel baterai dengan elektrolit NaOH. Pada gambar ini, multimeter mencatat nilai tegangan sebesar -1.688 V, di mana tanda negatif mengindikasikan adanya polaritas probe yang terbalik saat pengukuran.

Hasil pengukuran ini membuktikan adanya inkonsistensi performa antar sel dan ketidakmampuan NaOH untuk menghasilkan tegangan yang stabil dan dapat diskalakan. Sebaliknya, elektrolit KOH menunjukkan kinerja yang jauh lebih unggul. Tumpukan 3 sel mampu menghasilkan tegangan sebesar 1.328 V (~0.443 V/sel), atau 2.3 kali lebih tinggi dari NaOH.

Tabel 4.7 Tabel Pengosongan baterai Elektrolit KOH

Tegangan (V)	Arus (A)	Waktu & Tanggal	Tegangan (V)	Arus (A)	Waktu & Tanggal
3.8	0	2025-07-12 19:15:28	0.65	0	2025-07-12 20:22:58
3.55	0	2025-07-12 19:15:58	0.64	0	2025-07-12 20:23:28
3.4	0	2025-07-12 19:16:28	0.63	0	2025-07-12 20:23:58
1.93	-2.8	2025-07-12 19:19:28	0.62	0	2025-07-12 20:24:28
1.9	0	2025-07-12 19:19:58	0.62	0	2025-07-12 20:24:58
1.95	0	2025-07-12 19:20:28	0.61	0	2025-07-12 20:25:28
1.98	-2	2025-07-12 19:20:58	0.61	0	2025-07-12 20:25:58
1.95	0	2025-07-12 19:21:28	0.6	0	2025-07-12 20:26:28
1.94	0	2025-07-12 19:21:58	0.59	0	2025-07-12 20:26:58
1.99	0	2025-07-12 19:22:28	0.58	0	2025-07-12 20:27:28
1.99	0	2025-07-12 19:22:58	0.58	0	2025-07-12 20:27:58
1.96	0	2025-07-12 19:23:28	0.57	0	2025-07-12 20:28:28
1.95	0	2025-07-12 19:23:58	0.56	0	2025-07-12 20:28:58
1.96	0	2025-07-12 19:24:28	0.56	0	2025-07-12 20:29:28
1.95	0	2025-07-12 19:24:58	0.54	0	2025-07-12 20:29:58
1.88	0	2025-07-12 19:25:28	0.54	0	2025-07-12 20:30:28
1.88	0	2025-07-12 19:25:58	0.52	0	2025-07-12 20:31:28
1.88	0	2025-07-12 19:26:28	0.52	0	2025-07-12 20:31:58
1.92	0	2025-07-12 19:26:58	0.51	0	2025-07-12 20:32:28
1.87	0	2025-07-12 19:27:28	0.51	0	2025-07-12 20:32:58
1.87	0	2025-07-12 19:27:58	0.5	0	2025-07-12 20:33:28
1.87	0	2025-07-12 19:28:28	0.49	0	2025-07-12 20:33:58
1.86	0	2025-07-12 19:29:28	0.48	0	2025-07-12 20:34:28
1.7	0	2025-07-12 19:29:58	0.48	0	2025-07-12 20:34:58
1.68	0	2025-07-12 19:30:28	0.47	0	2025-07-12 20:35:28
1.68	0	2025-07-12 19:30:58	0.46	0	2025-07-12 20:35:58
1.61	0	2025-07-12 19:31:28	0.46	0	2025-07-12 20:36:28
1.5	0	2025-07-12 19:31:58	0.45	0	2025-07-12 20:36:58
1.39	0	2025-07-12 19:32:28	0.44	0	2025-07-12 20:37:28
1.68	0	2025-07-12 19:32:58	0.44	0	2025-07-12 20:37:58
1.65	0	2025-07-12 19:33:28	0.44	0	2025-07-12 20:38:28
1.62	0	2025-07-12 19:33:58	0.42	0	2025-07-12 20:38:58
1.59	0	2025-07-12 19:34:28	0.42	0	2025-07-12 20:39:28
1.57	0	2025-07-12 19:34:58	0.41	0	2025-07-12 20:39:58
1.84	0	2025-07-12 19:35:28	0.4	0	2025-07-12 20:40:28
1.83	0	2025-07-12 19:35:58	0.39	0	2025-07-12 20:40:58
1.82	0	2025-07-12 19:36:28	0.39	0	2025-07-12 20:41:28
1.82	0	2025-07-12 19:36:58	0.38	0	2025-07-12 20:41:58
1.81	0	2025-07-12 19:37:28	0.38	0	2025-07-12 20:42:28
1.81	0	2025-07-12 19:37:58	0.37	0	2025-07-12 20:42:58
1.87	0	2025-07-12 19:38:28	0.36	0	2025-07-12 20:43:28
1.88	0	2025-07-12 19:39:28	0.36	0	2025-07-12 20:43:58
1.87	0	2025-07-12 19:40:28	0.35	0	2025-07-12 20:44:28
1.85	0	2025-07-12 19:40:58	0.34	0	2025-07-12 20:44:58
1.83	0	2025-07-12 19:41:28	0.33	0	2025-07-12 20:45:28
1.8	0	2025-07-12 19:41:58	0.32	0	2025-07-12 20:45:58
1.78	0	2025-07-12 19:42:28	0.25	0	2025-07-12 20:46:28
1.75	0	2025-07-12 19:42:58	0.25	0	2025-07-12 20:46:58
1.73	0	2025-07-12 19:43:28	0.25	0	2025-07-12 20:47:28
1.68	0	2025-07-12 19:43:58	0.24	0	2025-07-12 20:47:58
1.66	0	2025-07-12 19:44:28	0.23	0	2025-07-12 20:48:28
1.65	0	2025-07-12 19:44:58	0.22	0	2025-07-12 20:48:58
1.63	0	2025-07-12 19:45:28	0.21	0	2025-07-12 20:49:28
1.61	0	2025-07-12 19:45:58	0.2	0	2025-07-12 20:49:58
1.6	0	2025-07-12 19:46:28	0.19	0	2025-07-12 20:50:28
1.57	0	2025-07-12 19:46:58	0.18	0	2025-07-12 20:50:58
1.56	0	2025-07-12 19:47:28	0.17	0	2025-07-12 20:51:28
1.54	0	2025-07-12 19:47:58	0.16	0	2025-07-12 20:51:58
1.51	0	2025-07-12 19:48:28	0.15	0	2025-07-12 20:52:28
1.49	0	2025-07-12 19:48:58	0.1	0	2025-07-12 20:52:58
1.47	0	2025-07-12 19:49:28	0.09	0	2025-07-12 20:53:28
1.45	0	2025-07-12 19:49:58	0.08	0	2025-07-12 20:53:58
1.43	0	2025-07-12 19:50:28	0.07	0	2025-07-12 20:54:28
1.41	0	2025-07-12 19:50:58	0.06	0	2025-07-12 20:54:58
1.4	0	2025-07-12 19:51:28	0	0	2025-07-12 20:55:28
1.38	0	2025-07-12 19:51:58	0	0	2025-07-12 20:55:58
1.36	0	2025-07-12 19:52:28	0	0	2025-07-12 20:56:28
1.34	0	2025-07-12 19:52:58	0	0	2025-07-12 20:56:58
1.32	0	2025-07-12 19:53:28	0	0	2025-07-12 20:56:58



Gambar 4. 10 Interface IoT

Simpulan harus diuraikan dalam bentuk paragraf yang berisi poin utama pembahasan hasil penelitian, berupa uraian dan tidak boleh menggunakan pointer. Di sisi *cloud*, platform ThingSpeak berperan sebagai *backend* dan *frontend* sekaligus. Ketika ESP32 mengirimkan data, ThingSpeak secara otomatis menerima dan memetakannya ke *Field* yang sesuai (misalnya, Field 1 untuk Tegangan Baterai, Field 2 untuk Arus, dan seterusnya). Setiap data yang masuk akan disimpan lengkap dengan *timestamp* yang presisi. Untuk menampilkan data kepada pengguna melalui antarmuka yang disediakan langsung oleh ThingSpeak.

V. KESIMPULAN

Penelitian baterai aluminium zinc ini telah berhasil mencapai tujuan utamanya, yaitu merancang dan merealisasikan sebuah purwarupa baterai Aluminium-Zinc (Al-Zn) yang terintegrasi dengan sistem elektrolisis bertenaga surya dan monitoring IoT. Tingkat ketercapaian tujuan tersebut terbukti melalui beberapa hasil. Implementasi panel surya 20 Wp berhasil menahan proses elektrolisis, di mana elektrolit Kalium Hidroksida (KOH) terbukti superior dengan mencapai pH 12.6, melampaui target yang ditetapkan. Pengukuran elektrolisis dilakukan dengan membandingkan dua pemasok tegangan, yaitu adaptor 12V dan PV yang menghasilkan performa lebih baik pada penggunaan adaptor. Menilik dari efektifitas penggunaannya dalam kondisi yang berbeda maka PV tetap menjadi pilihan utama dengan alasan penggunaan energi hijau yang tetap dapat digunakan pada situasi tanpa listrik.

Purwarupa baterai 12 sel berhasil dirakit dan diuji, menunjukkan profil tegangan *discharge* yang baik dan stabil, yang membuktikan validitas konsep elektrokimianya. Sistem monitoring IoT dapat diimplementasikan dan mampu mengirimkan data dari perangkat baterai ke platform *cloud* thingspeak. sistem monitoring IoT berhasil diimplementasikan secara konseptual, mampu mengirimkan data dari perangkat ke platform *cloud*. Meskipun tujuan utama tercapai, analisis komprehensif dari hasil eksperimen menyiratkan temuan kritis mengenai performa praktis sistem. Temuan utama adalah adanya dualisme performa baterai: meskipun profil tegangannya stabil, kapasitas praktis yang terukur sangat rendah, yaitu hanya sebesar 0.20 mAh. Hal ini mengindikasikan bahwa performa baterai sangat dibatasi oleh tingginya resistansi internal sel. Selain itu, ditemukan juga bahwa penggunaan elektrolit KOH murni dengan

Dengan menggunakan rumus kapasitas Kapasitas (Ah) = Arus (A) × Waktu (Jam), perhitungan untuk menghitung kapasitas baterai yaitu dengan hasil perhitungan: Kapasitas = 0.0239 mA × 1.69 Jam = 0.0239 mA. Hasil perhitungan ini dibulatkan, sehingga kapasitas praktis yang terukur dari purwarupa baterai ini adalah sekitar 0.0239 mA, yang dapat dibulatkan menjadi 0.040 mAh ini menunjukkan bahwa meskipun baterai mampu menghasilkan tegangan dengan *plateau* yang stabil, kemampuannya untuk menyuplai arus secara berkelanjutan masih sangat terbatas dalam konfigurasi saat ini. Data ini sangat berharga karena secara kuantitatif menyiratkan area pengembangan di masa depan, seperti optimasi desain elektroda atau komposisi elektrolit untuk meningkatkan transfer ion dan menurunkan resistansi internal sel guna mencapai kapasitas yang lebih tinggi.

D. Sistem Monitoring IoT

Pengimplementasian sistem monitoring berbasis IoT Sistem ini dirancang untuk memantau kinerja seluruh komponen, mulai dari panel surya, proses elektrolisis, hingga kondisi baterai Al-Zn secara *real-time*, serta menyimpan data historis untuk analisis. Arsitektur sistem ini terdiri dari tiga komponen utama: Perangkat Keras (Akuisisi Data) yang terdiri dari mikrokontroler ESP32 beserta jajaran sensor INA219 dan sensor pH, Perangkat Lunak Tertanam (*Firmware*) yang diprogram untuk mengelola data, dan Platform Cloud IoT (ThingSpeak) yang berfungsi sebagai penerima, penyimpan, sekaligus visualisator data.

konsentrasi tinggi dapat mengakibatkan kerusakan fisik pada *housing* baterai berbahan PLA, yang menunjukkan adanya ketidakcocokan material. Tantangan juga ditemukan pada sistem monitoring IoT yang datanya belum akurat, menegaskan bahwa kalibrasi sensor adalah faktor krusial.

REFERENSI

- [1] S. Manahara, S. Kusuma Putri, and I. W. Septa Kencana, "Tantangan transisi energi terbarukan di Indonesia (Studi kasus PLTS di Kabupaten Cilacap)," *JIMESE*, vol. 1, no. 1, pp. 78–90, Jul. 2023, [Online]. Available: <https://journal-iasssf.com/index.php/JIMESE/JIMESE>
- [2] H. A. Munadi, Aripin, and N. Hiron, "Studi Analisis Rugi-rugi Baterai Tipe Aluminium Udara pada Beban Listrik Statis," *E- JOINT (Electronica and Electrical Journal of Innovation Technology)*, vol. 02, no. 2, Dec. 2021.
- [3] M. Gattan Kertanegara, "Pengaruh Molaritas Cairan Elektrolit dan Pembuatan Karbon Grafit sebagai Katoda terhadap Kel," pp. 1–10, 2024.
- [4] MASRUFAYAH, "KINERJA BATERAI ELEKTROLIT AIR TAWAR DAN AIR LAUT SEBAGAI SUMBER ENERGI APLIKATIF," INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER, Surabaya, 2016.
- [5] D. Yulianti, A. Supriyanto, G. Ahmad, and P. Jurusan, "Analisis Kelistrikan Sel Volta Memanfaatkan Logam Bekas," *JURNAL Teori dan Aplikasi Fisika*, vol. 4, no. 02, Jul. 2016.
- [6] Samsudin and Yohannes, "KARAKTERISTIK MEDIA KONDUKTOR PADA PEMANFAATAN AIR LAUT SEBAGAI ENERGI TERBARUKAN," 2021.
- [7] M. Saleh Al Amin, I. F. Kartika, and Y. Irwansi, "Penggunaan Panel Surya Sebagai Pembangkit Listrik Pada Alat Pengering Makanan," vol. 7, no. 1, 2022, doi: 10.31851/ampere.
- [8] R. P. Hanifan, E. Kurniawan, and E. Susanto, "Integrasi Modul Sel Surya Pada Baterai Aluminium," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 11, no. 5, Oct. 2024.
- [9] N. Wicaksanajati, E. Kurniawan, and U. Kurniawan Usman, "Analisis Pembuatan Elektrolit Dengan Panel Surya," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 11, no. 5, pp. 1–4, Oct. 2024.
- [10] N. Wicaksanajati, E. Kurniawan, and U. Kurniawan Usman, "Analisis Pembuatan Elektrolit Dengan Panel Surya," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 11, no. 5, Oct. 2024.
- [11] D. R. Egan, C. Ponce De León, R. J. K. Wood, R. L. Jones, K. R. Stokes, and F. C. Walsh, "Developments in electrode materials and electrolytes for aluminium-air batteries," Jan. 22, 2013, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.01.141.
- [12] Y. Agnes, A. Turnip, M. Mungkin, D. Maizana, H. Satria, and J. T. Elektro, "Rancang Bangun Baterai Alternatif Menggunakan Metode Sel Volta dengan Charger Panel Surya," *Electron : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 156–165, Nov. 2024.
- [13] A. Fitra Ritonga, S. Wahyu, and F. Octavia Purnomo, "Implementasi Internet of Things (IoT) untuk Meningkatkan Kompetensi Siswa SMK Jakarta 1," *Risenologi (Jurnal Sains, Teknologi, Sosial, Pendidikan, dan Bahasa)*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Apr. 2020, [Online]. Available: <http://ejurnal.kpmunj.org>
- [14] A. Agung and G. Ekayana, "IMPLEMENTASI SIPRATU MENGGUNAKAN PLATFORM THINGSPEAK BERBASIS INTERNET OF THINGS," *Jurnal Nasional Pendidikan Teknik Informatika*, vol. 8, no. 3, pp. 237–247, Dec. 2019.
- [15] Z. Ibnu Faqih, E. Kurniawan, and U. Kurniawan Usman, "SYNERGY Jurnal Ilmiah Multidisiplin PENERAPAN IOT SEBAGAI MONITORING JARAK JAUH UNTUK MENGETAHUI PROSES ELEKTROLISIS AIR MINERAL," vol. 1, no. 2, pp. 70–74, 2023, [Online]. Available: <https://e-journal.naurendigiton.com/index.php/sjim>