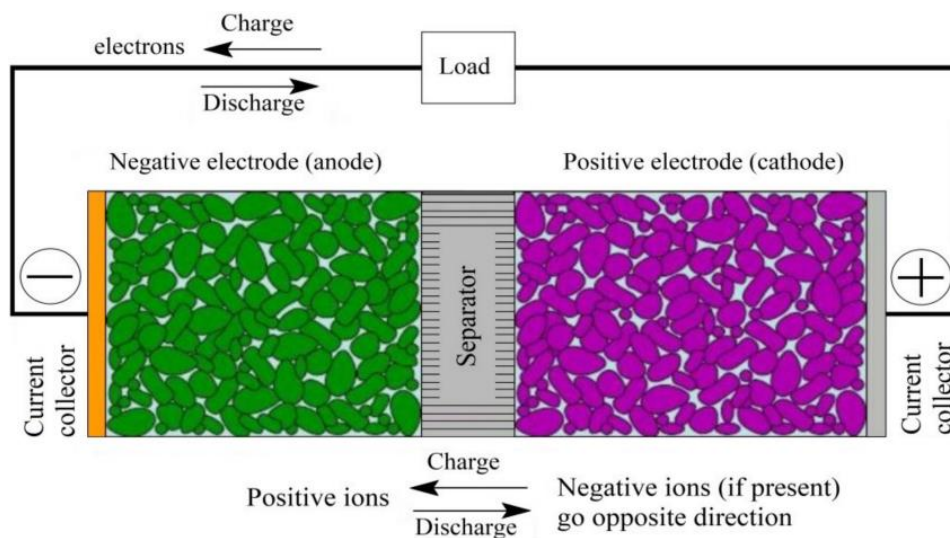


BAB II LANDASAN TEORI

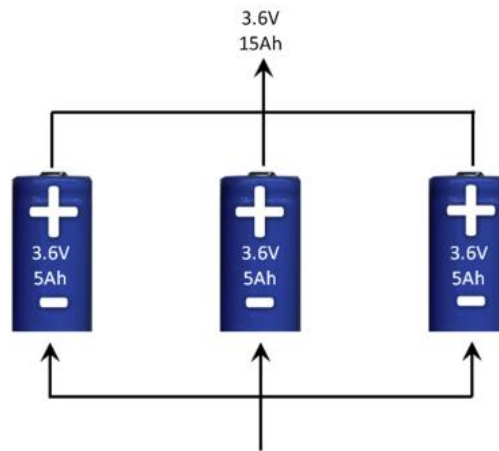
2.1. Baterai

Baterai merupakan perangkat penyimpanan energi yang unik, karena mampu menciptakan energi melalui reaksi kimia dan mampu menyimpan energi di perangkat yang sama (Warner, 2015). Baterai menjadi solusi terbaik saat ini dengan pertimbangan rapat energi yang tinggi, rendahnya *self-discharge*, umur pakai yang panjang, dan terdapat beberapa baterai yang tidak memiliki efek memori. Contoh penggunaan baterai bisa dijadikan sistem penyimpanan energi pada pembangkit listrik energi baru terbarukan, perangkat elektronik, kendaraan berbahan bakar listrik, dan sebagainya (Nagulapati et al., 2021).



Gambar 2.1 Struktur baterai (Al-Gabalawy et al., 2020)

Berdasarkan gambar 2.1 sebuah baterai dibuat dari satu atau lebih sel elektrokimia dan setiap sel disusun oleh dua elektroda kemudian terdapat elektrolit dan dipisahkan oleh separator.



Gambar 2.2 Konfigurasi paralel baterai (Warner, 2015)

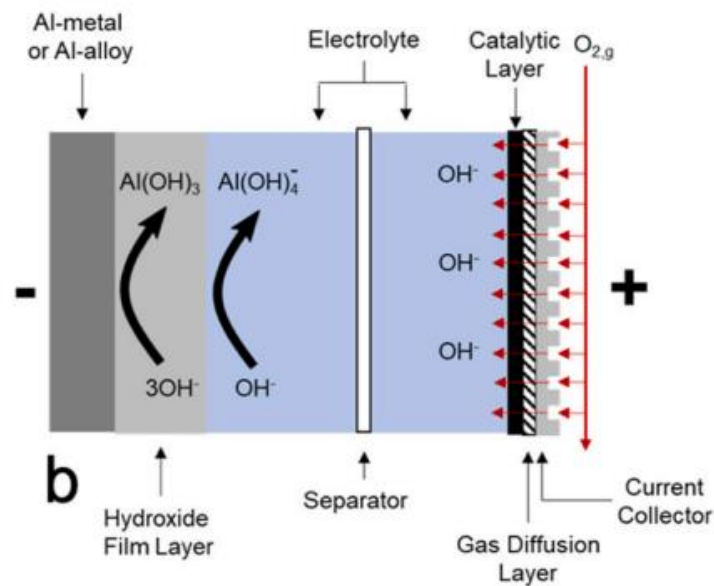


Gambar 2.3 Konfigurasi seri baterai (Warner, 2015)

Untuk konfigurasi baterai berpengaruh pada parameternya. Konfigurasi paralel membuat kapasitas arusnya bertambah tetapi tegangannya tetap, konfigurasi seri membuat kapasitasnya tetap tetapi tegangannya bertambah (Warner, 2015).

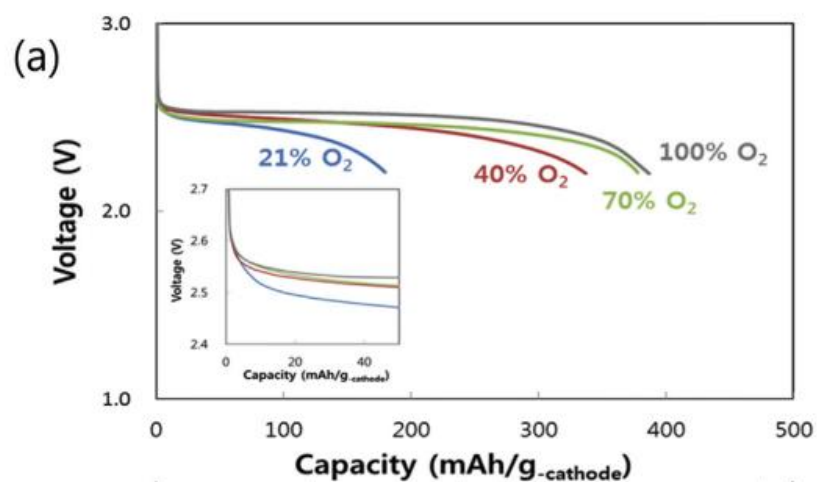
2.2. Baterai Aluminium Udara

Beberapa alasan aluminium dipilih menjadi komponen utama baterai logam udara ialah ringan, murah, melimpah dan baterai aluminium udara diprediksi lebih aman dibandingkan baterai berbasis lithium (Buckingham et al., 2021).



Gambar 2.4 struktur baterai aluminium udara (Buckingham et al., 2021)

Komponen esensial dari baterai aluminium udara adalah anoda aluminium, katoda udara, elektrolitnya bisa berupa *aqueous* atau *ionic liquid*, dan separator. Reaksi pada katoda adalah *oxygen reduction reaction* (ORR), kemudian anoda adalah tempat aluminium mengalami reaksi oksidasi. Baterai aluminium udara dengan elektrolit *aqueous* tidak cocok untuk dijadikan baterai sekunder (Buckingham et al., 2021).



Gambar 2.5 Kurva discharge baterai lithium-udara (Kwon et al., 2017)

Gambar 2.5 merupakan hasil pengukuran dari baterai Lithium-udara ketika diberikan variasi konsentrasi oksigen, yang mana mengalami peningkatan kapasitas ketika bereaksi dengan oksigen yang lebih murni.

2.3. Parameter Baterai

Parameter pada umumnya membantu dalam mendefinisikan atau memberi klassifikasi pada sesuatu. Untuk baterai, adanya parameter dapat membantu mengetahui informasi tertentu yang berkaitan dengan baterai (Samhan, 2018).

2.3.1. Tegangan

2.3.1.1 Tegangan Nominal

Tegangan baterai ketika diberi beban

2.3.1.2 Tegangan *Open Circuit*

Tegangan baterai ketika tanpa beban

2.3.1.3 Tegangan *Cut Off*

Tegangan baterai ketika seluruh kapasitas baterai telah digunakan hingga habis sepenuhnya

2.3.1.4 Tegangan *Charge*

Tegangan baterai yang diperlukan dalam proses pengisian

2.3.1.5 Tegangan *Float*

Tegangan *charging* untuk menjaga muatan baterai ketika kondisi penuh

2.3.2. Kapasitas

Kapasitas merupakan parameter untuk banyaknya muatan yang tersimpan dalam baterai dengan satuan Ampere-hour (Ah), Satuan muatan adalah Coulomb (C). Perbandingannya adalah $1\text{ C} = 1\text{ Ampere-second}$ maka, $1\text{ Ah} = 3600\text{ C}$

Persamaan energi untuk *battery pack*:

$$E_P = V_P \times C_P \quad (1)$$

Keterangan:

E_P : Energi total pada *battery pack* (kWh)

V_P : Tegangan Nominal *battery pack* (V)

C_P : Kapasitas *battery pack* (Ah)

Apabila dilihat dari strukturnya, tegangan pada baterai dipengaruhi oleh material yang digunakan pada anoda dan katodanya. Sedangkan kapasitas baterai ditentukan oleh kuantitas anoda dan katodanya. Untuk jenis baterai dengan material anoda dan katoda yang sama, maka ukuran baterai yang lebih besar akan memiliki kapasitas yang lebih besar (Samhan, 2018).

2.3.3. SOC dan DOD

2.3.3.1 *State of Charge*

SOC merupakan persentase kapasitas yang tersedia dibandingkan dengan kapasitas penuh baterai

2.3.3.2 *Depth of Discharge*

DOD merupakan persentase kapasitas yang digunakan dari kapasitas penuh baterai

Persamaan SOC dan DOD:

$$SOC = \frac{E_{batt}}{C_{batt}V} \times 100\% \quad (2)$$

$$DOD = \frac{C_{batt}V - E_{batt}}{C_{batt}V} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

SOC : *State of Charge* (%)

DOD : *Depth of Charge* (%)

E_{batt} : Energi yang tersedia dalam baterai (kWh)

C_{batt} : Kapasitas Penuh baterai (Ah)

V : Tegangan nominal baterai (V)

2.3.4. Siklus

Siklus merupakan parameter yang merujuk pada proses pengisian dan pengosongan. Disebut satu siklus ketika baterai *charging* hingga penuh dan *discharge* hingga kosong ataupun sebaliknya (Warner, 2015). Siklus juga menjadi tanda umur dari suatu baterai

2.3.5. Penuaan

Penuaan merupakan pertanda berkurangnya kinerja baterai seiring berjalannya waktu. Contoh pada baterai primer, terdapat hasil reaksi yang melapisi permukaan elektroda dengan elektrolit yang menghambat reaksi (Samhan, 2018).

2.3.6. Resistansi Dalam Baterai

Resistansi dalam pada baterai merujuk pada besarnya drop tegangan yang terjadi pada baterai ketika digunakan pada beban. Nilai resistansi berbeda saat *charging* dan *discharging*, dan idealnya nilai resistansi dalam baterai adalah 0 ohm (Samhan, 2018; Warner, 2015). Resistansi dalam baterai dipengaruhi oleh temperatur baterai. Semakin panas baterai maka semakin besar resistansi dalam baterai, adanya hal ini membuat banyak daya yang terbuang menjadi panas.

Persamaan Resistansi Dalam:

$$P = I^2 R \quad (4)$$

Keterangan

P : Daya baterai yang terbuang menjadi panas (J)

I : Arus listrik (A)

R : Resistansi dalam (Ω)

2.3.7. Rapat Energi dan Energi Spesifik

Rapat energi merupakan parameter yang merujuk pada banyak energi dalam baterai per satuan volume (Watt-hour / liter (Wh/l). Untuk

energi spesifik merujuk pada banyak energi per massa baterai (Watt-hour / kilogram (Wh/kg)).

2.3.8. Rapat Daya dan Daya Spesifik

Rapat daya merupakan parameter yang merujuk pada banyaknya daya maksimum yang dapat dikeluarkan baterai per satuan volume (W/l). Untuk daya spesifik merujuk pada banyak daya yang dapat dikeluarkan per satuan massa (W/kg).

2.4. Komponen Penyusun Baterai

2.4.1 Komponen Aktif

Elektroda dan elektrolit digolongkan menjadi komponen aktif karena memiliki peran untuk menghasilkan energi dari reaksi reduksi dan oksidasi.

2.4.2 Komponen Pasif

Pengumpul arus (*Current Collector*) dan separator digolongkan menjadi komponen pasif karena memiliki peran menjadi aktivator bahan aktif untuk menjadi menyimpan energi dan isolator bagi medium perpindahan ion.

2.4.3 Komponen Eksternal

Casing dan Konektor DC digolongkan menjadi komponen eksternal karena kontak langsung dengan lingkungan dan beban.

2.5. Material Komponen Baterai Aluminium Udara

Berikut adalah bahan yang digunakan untuk komponen baterai aluminium udara:

2.5.1 Pengumpul Arus

Aluminium dipilih menjadi anoda baterai logam udara dikarenakan memiliki sifat ringan dan baterai berbasis aluminium diprediksi lebih aman dibandingkan baterai berbasis lithium (Buckingham et al., 2021).

Pengumpul arus seperti *nickel foam*, *copper foam*, *stainless-steel mesh*, *titanium mesh*, dan *nickel mesh*, yang mana memiliki konduktivitas dan resistansi oksidasi elektrokimia yang tinggi. Pengumpul arus tipe *mesh* tidak hanya menjadi pendukung fisik untuk katalis tetapi juga menjadi perantara difusi oksigen ketika reaksi berlangsung (Tomboc et al., 2020).

2.5.2 Katalis

Katalis memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja katoda udara dan memaksimalkan rapat energinya. Reaksi reduksi oksigen memiliki potensial berlebih dikarenakan udara ada di sekitar. Untuk mengatasi hal tersebut adalah mencari bahan katalis yang cocok digunakan. Bahan katalis yang dipertimbangkan diantaranya logam mulia dan perpaduannya, *chalcogenides*, logam makrosiklik dan bahan karbon (Liu et al., 2017).

2.5.3 Separator

Separator adalah material tipis berbentuk lembaran, biasanya terdiri dari satu atau lebih lapisan plastik *polypropylene* atau material keramik. Berguna untuk memisahkan anoda dan katoda untuk

mencegah adanya kontak dan membuat korsleting pada baterai. Pori pada separator harus bisa dilewati oleh ion sepanjang reaksi antara elektroda dengan elektrolit berlangsung (Warner, 2015). Pada arus *discharge*, kinerja separator *polypropylene* lebih dari separator kertas. Dalam uji coba separator *polypropylene* pada arus 10 mA, separator *polypropylene* dapat menjaga arus *discharge* selama 97 menit dibandingkan separator kertas yang hanya bisa menjaga selama 33 menit. Adapun dengan menambah ketebalan separator *polypropylene* dapat menambah jumlah elektrolit yang bisa disimpan dalam separator (Tan et al., 2021).

2.5.4 Elektrolit

Elektrolit adalah material seperti *liquid*, *gel*, *aqueous* yang biasa digunakan sebagai medium untuk transfer ion bolak-balik antara anoda dan katoda (Warner, 2015). Elektrolit *Aqueous* dapat diklasifikasikan berdasarkan besar pH contohnya alkalin ($7 < \text{pH} \leq 13$), garam netral ($\text{pH} = 7$), asam ($2 \leq \text{pH} < 7$). Halangan utama pada elektrolit *aqueous* adalah rendahnya tingkat kelarutan oksigen, hal ini mempengaruhi terhadap reaksi reduksi oksigen dan kinerja baterai. Elektrolit yang paling banyak digunakan dalam baterai aluminium udara diantaranya *potassium hydroxide* (KOH) dan *sodium hydroxide* (NaOH) *solutions*. Keunggulan KOH *solutions* adalah konduktivitas ion yang lebih baik, viskositas yang rendah, dan tingginya difusi oksigen (Liu et al., 2017).

2.6. Material Katalis Baterai Aluminium Udara

Berikut adalah bahan yang digunakan untuk katalis baterai aluminium udara:

2.6.1 Titanium Oxyde

Titanium dioksida (TiO_2) merupakan bahan kimia alami yang bisa dijadikan katoda karena tidak beracun dan memiliki ketahanan kimia

yang tinggi. Selain dijadikan sebagai katoda bisa pula dijadikan bahan campuran untuk membuat katalis. Dalam pengujiannya sebagai katoda TiO_2 mampu menghasilkan 112-165 mAh g^{-1} pada kerapatan arus 50 mA g^{-1} dalam elektrolit ionik dengan keasaman yang bervariasi (Wang et al., 2019).

2.6.2 Carbon Black

Karbon hitam adalah produk dari pembakaran tidak sempurna antara tar dan batubara. Karbon hitam dihasilkan ketika terjadi penurunan suhu nyala pada *boiler* berbahan bakar batubara. Karbon hitam dapat digunakan sebagai bahan elektrokimia karena luas permukaan spesifiknya yang besar. Untuk ukuran partikel karbon hitam pada dasarnya di bawah 100 nm (Feng et al., 2021).

2.6.3 Polyvinylidene difluoride

Polyvinylidene Fluoride (PVdF) merupakan thermoplastic yang memiliki sifat tidak reaktif, tidak mudah terlarut pada asam dan basa. PVdF digunakan sebagai binder atau perekat campuran katalis sebagai penguat struktur dan peningkatan konduktivitas katoda. Sebagai contoh, penambahan bahan konduktif seperti carbon black untuk bahan katoda yang konduktivitasnya rendah seperti lithium ketika interkalasi, dengan adanya binder PVdF dapat menyatukan bahan aktif dengan bahan penambah konduktivitas tanpa bereaksi dengan elektroda dan elektrolit. Bahan penambah konduktivitas dan polymer binder merupakan bahan tidak aktif, tetapi jika penerapannya secara berlebihan maka akan mengurangi total kapasitas dari sel baterainya dan sebaliknya jika terlalu sedikit akan mengurangi konduktivitas elektroda (Lee, 2019).

2.6.4 *N-Methyl-2-pyrrolidone*

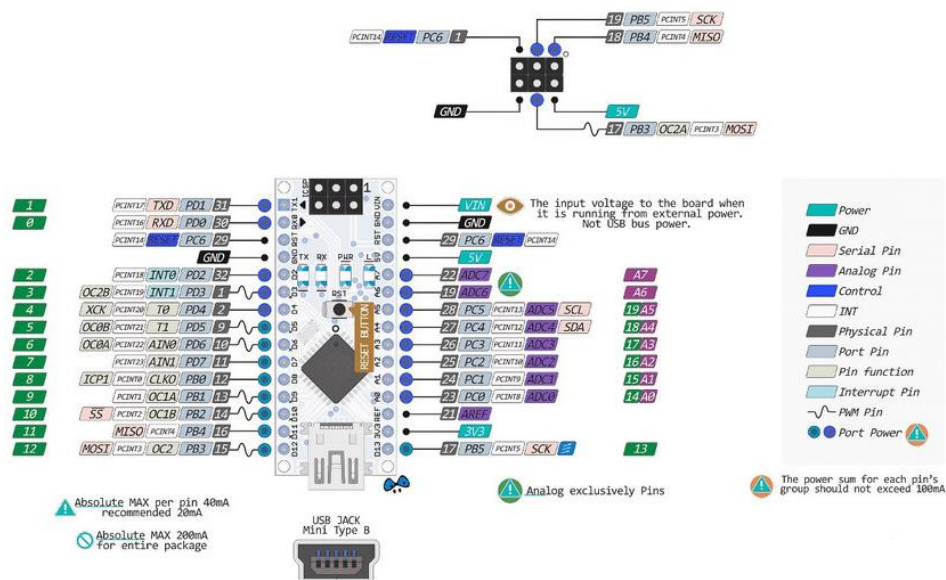
N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) adalah senyawa organik dengan ciri tidak berwarna dan mudah larut dengan air. Memiliki banyak fungsi sebagai pelarut dan medium reaksi yang digunakan di berbagai industri seperti elektronik, farmasi, cat dan pelapis (*coating*) (Solís-González et al., 2018). Dengan beberapa penerapan tersebut maka dari itu NMP digunakan sebagai bahan campuran katalis untuk melarutkan TiO_2 , carbon black, dan PVdF yang membuatnya mudah untuk melapisi katoda udara.

2.7. Komponen Alat Pengukuran

Berikut merupakan komponen dalam pembuatan alat pengukuran:

2.7.1. Arduino Nano

Arduino merupakan perangkat keras *open-source* yang ditujukan untuk kebutuhan membuat purwarupa. Arduino digunakan sebagai suatu system kendali dan sebagai sistem tertanam pada suatu alat. Dalam penggunaannya dibutuhkan perangkat lunak yang disebut Arduino IDE sebagai sarana memasukan perintah dengan bahasa pemrograman. Untuk tipe Nano dibekali ATMEGA328P (Junaidi & Prabowo, 2018).



Gambar 2.6 Arduino Nano (Nair et al., 2016)

2.7.2. Sensor Oksigen OCS-3F

Oxygen Concentrations Sensor (OCS) merupakan sensor gas tipe ultrasonik yang mampu mengukur konsentrasi dan laju aliran oksigen. Prinsip kerja OCS-3F adalah mengukur adanya oksigen yang masuk melalui lubang input dengan cara sensor ultrasoniknya mendeteksi adanya oksigen berdasarkan massa molar ($O_2 = 32g/mol$) untuk mengukur konsentrasi atau kemurniannya dan kecepatan suara dari

gas untuk mengukur laju aliran oksigen tersebut. Beberapa keunggulan OCS-3F adalah sensor ini memiliki rentang 21-95% konsentrasi oksigen, laju aliran dari 0-10 L/min, dan sudah dikalibrasi dari pabriknya, sehingga sensor ini bisa langsung digunakan. Sensor ini juga memiliki pin I2C. (Winpower.com.cn).

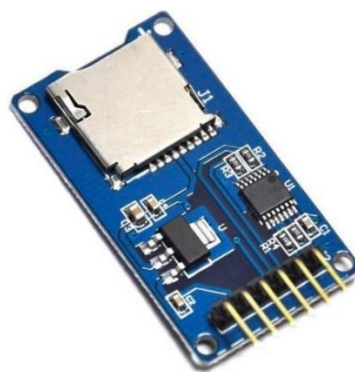


Gambar 2.7 Sensor OCS-3F

(sumber: winpower.com.cn)

2.7.3. Data Logger

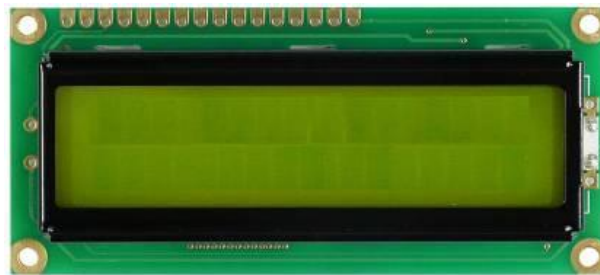
Data logger dengan *platform* Arduino biasanya digunakan untuk merekam atau mencatat data temperature, kelembapan relative, dan karbon dioksida. Dalam mencatat data, Data Logger menggunakan MicroSD sebagai media penyimpanannya (Silva et al., 2020).



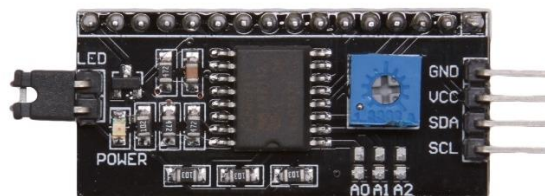
Gambar 2.8 Data Logger MicroSD

2.7.4. LCD

LCD (Liquid Crystal Display) adalah perangkat keluaran yang menggunakan sistem dot matriks yang digunakan untuk menampilkan karakter sebagai keluaran dari masukan pada mikrokontroler arduino. Jenis yang biasa digunakan adalah modul LCD yang dikendalikan secara serial dengan perangkat bantuan modul I2C. Modul I2C digunakan untuk mengurangi penggunaan pin digital arduino, yang semula memerlukan 6 pin digital menjadi 2 pin yaitu pin SDA (Serial Data) pada pin A4 dan SCL (Serial Clock) pada pin A5 (Junaidi & Prabowo, 2018).



Gambar 2.9 LCD 16x2



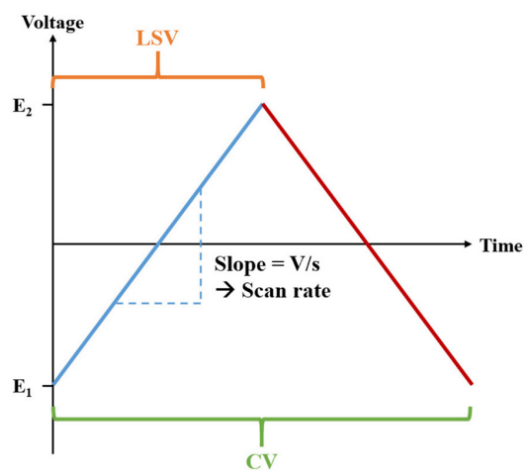
Gambar 2.10 Modul I2C LCD

2.8. Pengujian Karakteristik Baterai

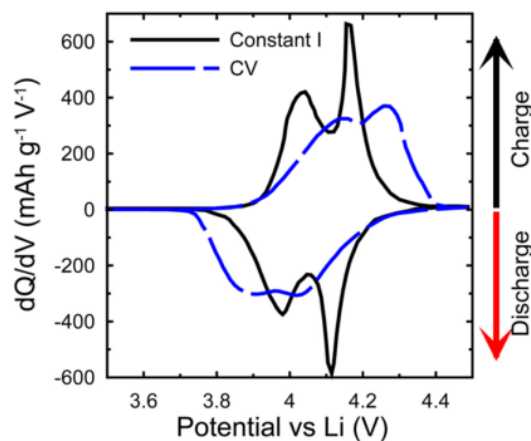
2.8.1. Cyclic voltammetry (CV)

CV adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan parameter kinetik dari reaksi redoks yang terbatas pada permukaan elektroda (Gonzalez & Sequí, 2019). CV didasarkan pada prinsip *Linear Sweep*

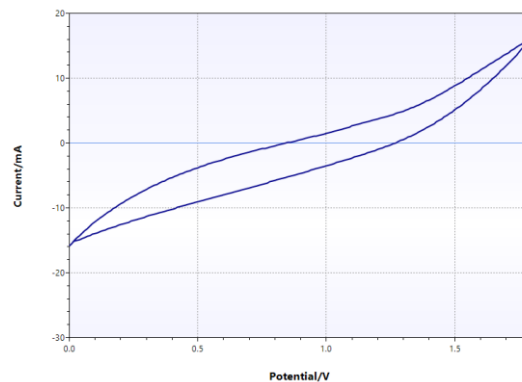
Voltammetry (LSV) yaitu suatu teknik untuk mengukur arus sedangkan potensial dikondisikan secara linier sebagai sebuah fungsi waktu. Kemiringan tegangan berubah dari waktu ke waktu didefinisikan sebagai tingkat pemindaian (m.s^{-1}). LSV ditujukan berbagai hasil tergantung pada faktor-faktor seperti kecepatan proses transfer elektron, reaktivitas bahan elektrokimia, kecepatan pemindaian (*scan rate*) untuk pengukuran (Kim et al., 2020).



Gambar 2.11 Kurva Tegangan berbanding Waktu untuk LSV dan CV (Kim et al., 2020)



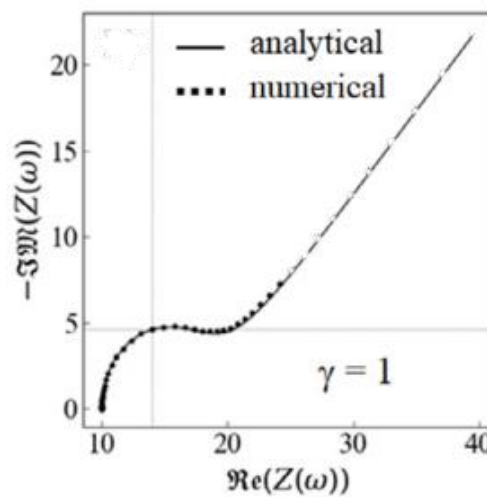
Gambar 2.12 Kurva CV dan dQ/dV pada arus konstan (Kim et al., 2020)



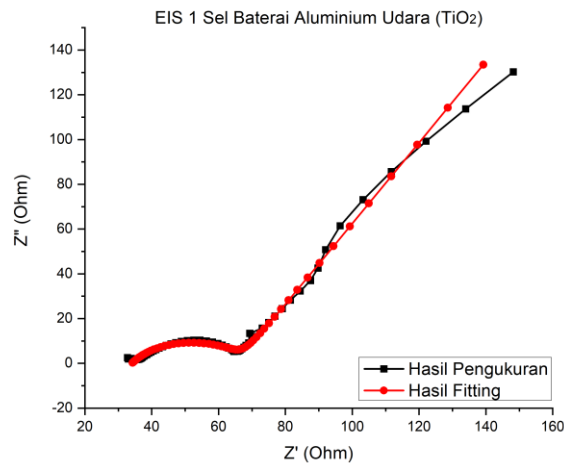
Gambar 2.13 Contoh kurva CV baterai Aluminium-udara
(sumber: dokumentasi pribadi)

2.8.2. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

EIS digunakan untuk menganalisis adanya resistansi internal baterai yang mana resistansi internal ini muncul akibat adanya lapisan *solid electrolyte interphase* (SEI) pada anoda yang menghambat pertukaran ion ke katoda (Warner, 2015).

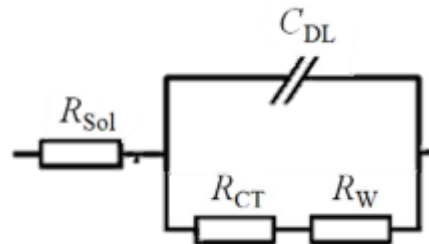


Gambar 2.14 Contoh Nyquist Plot dari EIS (Tichter et al, 2021)

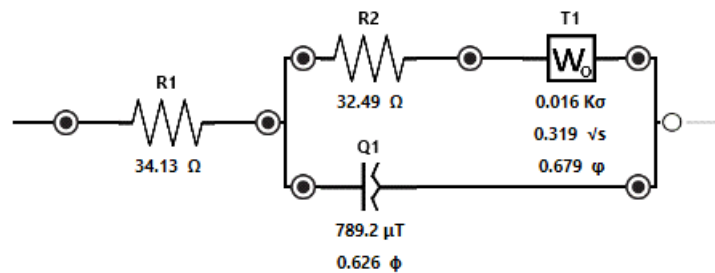


Gambar 2.15 Contoh Nyquist plot dari baterai Aluminium-udara
(sumber: dokumentasi pribadi)

Rangkaian Ekuivalen atau bisa disebut *Circuit Randles* digunakan untuk mendefinisikan elektroanalitik untuk mensimulasikan hasil pengukuran EIS dengan rangkaian yang terdiri dari Resistor dan Kapasitor dengan γ sebagai Parameter untuk Kapasitor (Tichter et al., 2021).



Gambar 2.16 Contoh Rangkaian Ekuivalen (*Fitting*) (Tichter et al., 2021)



Gambar 2.17 Contoh Rangkaian Ekuivalen (*Fitting*) dari gambar 2.15
(sumber: dokumentasi pribadi)

R_{CT} (*charge-transfer resistance*), resistansi permukaan elektroda yang bertemu elektrolit (*interface*)

R_{Sol} (*solution*), resistansi elektrolit

R_w (*warburg*), resistansi transfer massa atau disebut resistansi warburg

C_{CPE} (*Constant Phase Element*) atau C_{DL} (*Double Layer*) karena $C_{CPE} = 1 C_{DL}$, Kapasitansi ideal ada non ideal pada permukaan elektroda

2.9. Penulisan Terkait

Berdasarkan studi tentang baterai aluminium-udara yang pernah dilakukan. Terdapat beberapa penelitian yang berhubungan penelitian pada tabel dibawah ini:

Tabel 2.1 Penulisan yang Berkaitan

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan tahun penelitian	Pembahasan Jurnal
1	<i>Aluminum-Air Battery with Cotton Substrate: Controlling the Discharge Capacity By Electrolyte Pre-Deposition</i> (Baterai Aluminium-Udara Dengan Substrat Kapas:	Wending Pan, Yifei Wang	The University of Hong Kong, 2021	Membahas tentang inovasi separator dengan bahan campuran katun dan alkalin untuk mencegah korosi aluminium dan elektrolit berlebih

	Mengontrol Kapasitas Discharge Dengan Elektrolit Pra-Endapan)			
2	Rancang Bangun Dan Unjuk Kerja Baterai Aluminium-Udara Sebagai Penggerak Kendaraan Listrik	Nico Wahyu Ananto	Universitas Siliwangi, 2022	Membahas tentang pembuatan baterai aluminium-udara dengan pengujian pada beban motor dc
3	Uji Kinerja Baterai Al Udara Untuk Beban Elektrodinamika Putar Motor DC Maksimum 120mA	Rian Hidayatillah	Universitas Siliwangi, 2022	Membahas tentang pengaruh bahan campuran katalis katoda udara terhadap arus keluaran baterai aluminium-udara