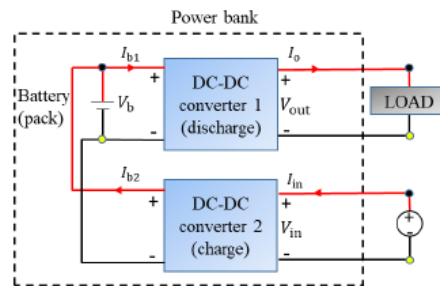


BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Powerbank

Powerbank adalah sistem baterai portabel yang fungsi utamanya sebagai unit penyimpanan daya cadangan, memungkinkan pengguna untuk mengisi ulang berbagai perangkat elektronik lainnya seperti smartphone, tablet, dan kamera digital di mana saja. (Diao et al., 2020). Secara fundamental, powerbank merupakan sistem penyimpanan energi (*Energy Storage System/ESS*) dalam skala mikro yang dirancang untuk mobilitas. Konsep ini muncul sebagai respon terhadap kebutuhan akan pasokan energi yang fleksibel dan independen dari sumber listrik utama.



Gambar 2. 1 Skema sederhana dari rangkaian *powerbank*

Sumber : Diao et al., 2020

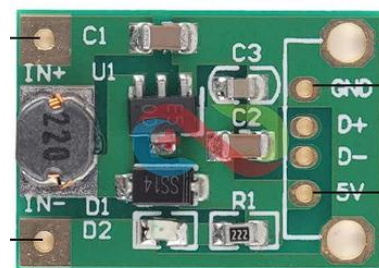
Gambar 2. 1 menunjukkan skema sederhana dari rangkaian powerbank. Powerbank biasanya terdiri dari satu atau lebih sel baterai yang dihubungkan secara seri dan/atau paralel. Sel-sel yang dihubungkan secara seri untuk meningkatkan tegangan, sedangkan sel-sel yang dihubungkan secara paralel untuk menambah kapasitas (Diao et al., 2020).

Sebuah powerbank disebut perangkat portabel karena memenuhi beberapa syarat utama:

- 1) Kemampuan untuk mengisi daya perangkat lain tanpa sumber listrik langsung.
- 2) Desain ringkas dan ringan. Agar powerbank dengan mudah dibawa kemana saja, powerbank didesain agar tidak terlalu besar dan berat, sehingga muat di dalam tas atau bahkan saku.
- 3) Memiliki baterai internal. Powerbank dilengkapi dengan baterai internal (umumnya lithium-ion) yang menyimpan energi listrik. Kapasitas baterai ini bervariasi (diukur mAh atau Wh).
- 4) Memiliki port input dan output.
- 5) Memiliki sirkuit kontrol. Powerbank dilengkapi dengan chip kontrol yang mengatur aliran daya.

2.2 Boost Converter

Boost converter, yang sering disebut juga sebagai konverter *step-up*, merupakan jenis konverter DC-DC yang berfungsi meningkatkan level tegangan keluaran agar lebih tinggi daripada tegangan masukannya. Tegangan *output* yang dihasilkan mempunyai polaritas yang sama dengan tegangan *inputnya* (Elfani & Sasmoko, 2016).



Gambar 2. 2 DC Boost Converter 5 V

Sumber : CNC Store

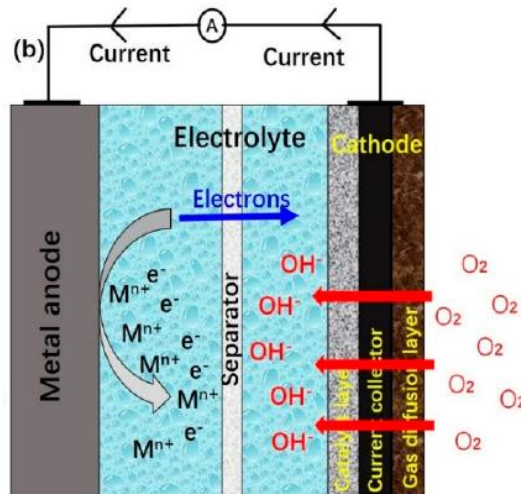
2.3 Baterai

Baterai merupakan perangkat yang merubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi reduksi-oksidasi elektrokimia atau biasa disebut dengan reaksi redoks. Setiap baterai memiliki terminal positif yang disebut katoda, dan terminal negatif yang disebut anoda (Astuti, 2024). Prinsip pengoperasian baterai mengandalkan prinsip elektrokimia melalui proses redoks dimana elektroda negatif (anoda) mengalami reaksi oksidasi, dan elektroda positif (katoda). Dalam reaksi redoks melibatkan transfer elektron dari suatu elektroda ke elektroda yang lain oleh ion elektrolit.

Baterai terbagi menjadi dua jenis, yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer merupakan baterai sekali pakai. Hal ini karena bahan aktif yang terkandung dalam material baterai hanya berubah secara *irreversible*, artinya saat baterai primer telah dipakai sekali, baterai tersebut tidak dapat diisi ulang. Baterai sekunder merupakan baterai yang dapat digunakan berkali-kali karena baterai dapat diisi ulang. Hal ini karena bahan aktif yang terkandung dalam baterai dapat berubah secara *reversible* (Astuti, 2024).

2.4 Baterai Logam-Udara

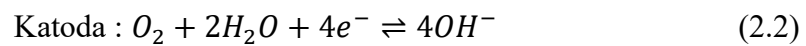
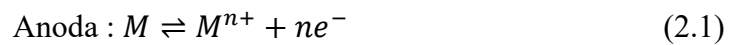
Baterai logam-udara dirakit dari anoda logam dan katoda udara didalam elektrolit yang sesuai. Anoda logam dapat berupa logam alkali (Li, Na, dan K), logam alkali tanah (Mg), atau logam transisi baris pertama (Fe dan Zn). Katoda udara memiliki arsitektur berpori terbuka yang memungkinkan suplai oksigen dari udara sekitar. Elektrolit dapat berupa cairan atau non-cairan tergantung pada sifat anoda yang akan dipakai (Li & Lu, 2017).



Gambar 2. 3 Skematik Prinsip Kerja Baterai Logam-Udara Elektrolit Berair

Sumber : Wang et al., 2019

Gambar 2.3 menunjukkan skema prinsip kerja baterai logam-udara dengan elektrolit berair. Oksigen (O_2) dan logam (*Metal Anode*) berpartisipasi dalam reaksi elektrokimia. Rumus reaksi kimianya ditulis pada persamaan (2.1) dan (2.2).



Teori dasar dari baterai logam-udara melibatkan reaksi kimia antara logam di anoda dan oksigen di katoda. Pada saat *discharge*, logam di anoda mengalami oksidasi, sementara oksigen di katoda mengalami reduksi. Contohnya, pada baterai magnesium-udara, reaksi yang terjadi adalah oksidasi magnesium di anoda dan reduksi oksigen di katoda, menghasilkan listrik.

Tabel 2. 1 Parameter Baterai Logam-Udara

Sumber : Liu et al., 2017

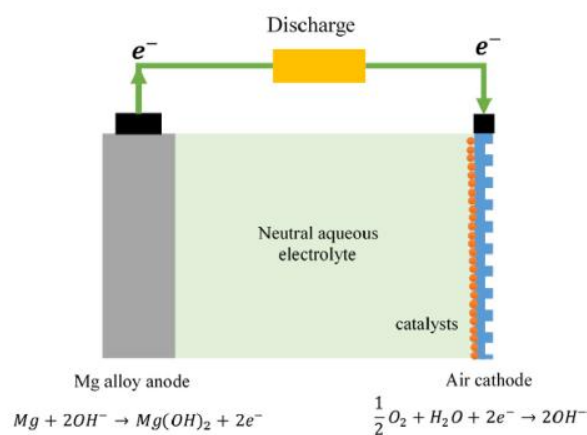
Baterai	Tegangan Teoritis (V)	Kapasitas Teoritis (Ah/kg)	Densitas Energi Teoritis (kWh/kg)	Tegangan Operasi (V)
Li-udara	3,4	1170	13	2,4
Zn-udara	1,6	658	1,3	1 – 1,2

Baterai	Tegangan Teoritis (V)	Kapasitas Teoritis (Ah/kg)	Densitas Energi Teoritis (kWh/kg)	Tegangan Operasi (V)
Mg-udara	3,1	920	6,8	1,2 – 1,4
Na-udara	2,3	687	1,6	2,3
Al-udara	2,7	1030	8,1	1,2 – 1,6

Tabel 2.1 menunjukkan parameter dari berbagai jenis baterai logam-udara. Konfigurasi dari baterai logam udara ini terbuka, reagen oksigen dapat langsung diterima dari udara sekitar, sehingga berkontribusi pada densitas energi teoritis (Liu et al., 2017).

2.5 Baterai Magnesium-Udara

Baterai magnesium-udara merupakan salah satu jenis baterai logam-udara yang tersusun dari anoda logam Magnesium, katoda udara, dan elektrolit berair.

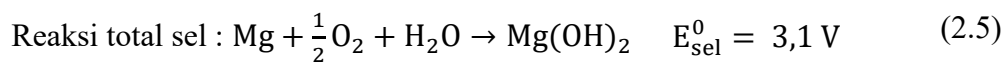
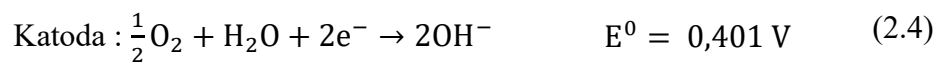
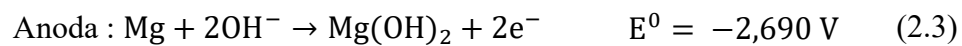


Gambar 2. 4 Skema baterai magnesium-udara dan reaksi elektrokimia di anoda dan katoda udara

Sumber : Tong et al., 2021

Gambar 2.4 merupakan skema baterai magnesium udara. Pada anoda, terjadi proses oksidasi logam magnesium dengan ion hidroksida OH^- (hasil reduksi oksigen di katoda) menjadi magnesium hidroksida ($Mg(OH)_2$) dengan pelepasan dua elektron ($2e^-$) ke katoda melalui rangkaian eksternal. Pada katoda, terjadi

reduksi gas oksigen (O_2) dalam lingkungan elektrolit cair. Elektron akan ditangkap oleh oksigen yang bergerak melalui katoda udara dan bereaksi dengan H_2O sehingga terjadi proses reduksi menjadi OH^- , yang kemudian akan bergerak menuju anoda melewati elektrolit untuk melanjutkan reaksi. Reaksi elektrokimia pada baterai magnesium-udara saat *discharge* ditulis pada persamaan (2.3), (2.4), dan (2.5).



Dimana E^0 adalah potensial elektroda standar. Dari reaksi oksidasi, reduksi, dan reaksi total sel. Diketahui bahwa tegangan teoritis dari baterai magnesium-udara sebesar 3,1 V dapat dihitung menggunakan persamaan (2.6).

$$E_{sel}^0 = E_{katoda}^0 - E_{anoda}^0 \quad (2.6)$$

Namun, karena korosi parasit pada anoda Magnesium dan kinetika reaksi reduksi oksigen (*Oxygen Reduction Reaction/ORR*) yang lambat di katoda udara, tegangan operasi baterai biasanya dibawah 1,5 V (T. Zhang et al., 2014).

ORR merupakan reaksi reduksi molekul oksigen menjadi ion hidroksida (OH^-) yang terjadi pada permukaan katoda. Reaksi ini melibatkan transfer elektron dan dapat berlangsung secara lambat, sehingga membatasi efisiensi dan kinerja total sel. Selain itu, kinerja baterai magnesium-udara juga dipengaruhi oleh jenis anoda logam magnesium, elektrolit yang digunakan, serta desain dan performa katoda udara. (Tong et al., 2021).

2.6 Material Struktur Baterai Magnesium-Udara

Struktur dari baterai magnesium udara tersusun dari beberapa material yaitu anoda magnesium, katoda udara, katalis, *current collector*, separator, dan elektrolit.

2.6.1 Anoda

Anoda merupakan elektroda negatif yang dapat melepaskan elektron melalui sirkuit atau rangkaian luar serta mengalami oksidasi pada saat elektrokimia berlangsung pada baterai (Astuti, 2024). Pada baterai magnesium-udara, magnesium berperan sebagai anoda mengalami oksidasi menjadi Mg^{2+} dan melepaskan 2 elektron. Reaksi oksidasi magnesium ditulis pada persamaan (2.7).

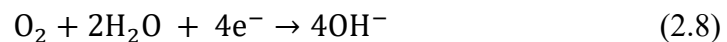


Elektron dilepaskan melalui rangkaian luar dan memberi arus listrik dan Mg^{2+} berdifusi dalam larutan elektrolit. Magnesium yang dilarutkan dalam elektrolit dapat menghasilkan kapasitas sebesar 2,2 Ah/g. Namun, Dalam lingkungan elektrolit cair netral dan asam, magnesium secara spontan berubah menjadi ion Mg yang bereaksi dengan air melalui reaksi elektrokimia untuk menghasilkan magnesium hidroksida ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) dan gas hidrogen (H_2). Dimana produk tersebut menyebabkan korosi pada magnesium. Paduan magnesium dengan logam lain seperti aluminium dengan sedikit seng untuk menghasilkan paduan Mg-Al-Zn dengan perbandingan 96 wt% - 3 wt % - 1 wt % seperti AZ31 secara luas digunakan sebagai anoda untuk baterai magnesium-udara. Pengujian pengosongan AZ31 dalam larutan netral 3,5 wt% NaCl dengan kerapatan arus 5 mA/cm² menunjukkan bahwa tegangan operasi adalah 1,125

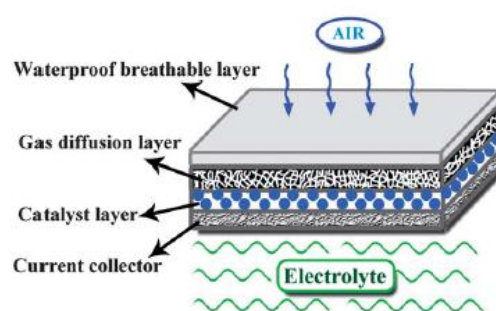
V dan kapasitas pengosongan spesifiknya adalah 1125 mAh/g (T. Zhang et al., 2014).

2.6.2 Katoda

Katoda merupakan elektroda positif yang mampu menerima elektron dari rangkaian luar sehingga mengalami reaksi reduksi saat proses elektrokimia terjadi didalam baterai. Katoda dapat berfungsi sebagai salah satu sumber ion untuk proses interkalasi yang terjadi dalam baterai. Proses interkalasi merupakan sebuah proses perpindahan atau pergerakan ion dari katoda menuju anoda yang melewati elektrolit. Pada baterai magnesium-udara, oksigen (O_2) dari udara yang bergerak di katoda menangkap elektron dari rangkaian luar dan bereaksi dengan H_2O sehingga mengalami reduksi menjadi $4OH^-$. Reaksi reduksi oksigen pada katoda ditulis pada persamaan (2.8)



Struktur dari sebuah katoda udara pada umumnya terbuat dari bahan konduktif berpori dengan katalis. (T. Zhang et al., 2014).



Gambar 2. 5 Struktur katoda udara pada baterai magnesium-udara

Sumber : T. Zhang et al., 2014

Gambar 2.5 merupakan struktur katoda udara yang terdiri dari empat lapisan, yaitu:

1. *Waterproof breathable layer*, merupakan lapisan kedap air yang permeabel terhadap gas. Material ini biasanya bersifat hidrofobik dan berpori, seperti paraffin wax atau teflon. Fungsi utamanya adalah memisahkan (*separate*) elektrolit dari udara sekaligus memungkinkan hanya oksigen (O_2) yang dapat melewatinya, sementara karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O) terhalang.
2. *Gas Diffusion Layer* (GDL), memiliki porositas tinggi yang memungkinkan distribusi gas yang merata dan konduktivitas elektronik yang baik untuk mendukung aliran elektron secara efisien. Lapisan ini biasanya terbuat dari karbon hitam asetilena sebagai bahan dasar yang ditambah bahan hidrofobik seperti *polytetrafluoroethylene* (PTFE) untuk meningkatkan ketahanan terhadap air.
3. *Catalyst layer*.
4. *Current Collector*.

2.6.3 Katalis

Katalis merupakan substansi (zat atau materi) yang berfungsi untuk mempercepat laju reaksi kimia tanpa mengalami perubahan akibat reaksi tersebut (Purnami et al., 2015). Pada baterai logam-udara, katalis terdapat pada katoda udara. Katalis yang terdapat pada katoda udara merupakan faktor penentu dalam efektifitas kinerja elektroda. Untuk baterai yang menggunakan oksigen sebagai reaktan seperti baterai magnesium-udara, reaksi reduksi oksigen pada katoda sangat penting. Katalis digunakan untuk mempercepat reaksi ini dan meningkatkan efisiensi elektrokimia. Katalis bekerja dengan menyediakan situs aktif untuk reaksi kimia pada permukaan katoda. Dalam

konteks ORR, katalis membantu dalam adsorpsi molekul oksigen, memfasilitasi pemutusan ikatan $O=O$, dan mengatur transfer elektron yang diperlukan untuk reaksi reduksi. Bahan katalis yang bisa digunakan untuk katalis katoda adalah logam mulia seperti platinum (Pt) dan emas (Au), material berbasis karbon, oksida logam transisi, dan logam kompleks yang mengandung nitrogen.

2.6.4 *Current Collector*

Current collector atau pengumpul arus adalah media penghantar elektron yang dihasilkan dari reaksi redoks di dalam sel baterai dari satu elektroda ke elektroda lainnya. (nam et al., 2021). *Current collector* berfungsi berfungsi sebagai penopang untuk pelapisan elektroda positif maupun elektroda negatif. Bahan yang paling umum digunakan untuk kolektor arus anoda adalah *copper foil*, karena menawarkan konduktivitas listrik yang tinggi dan stabilitas yang baik terhadap reaksi elektrokimia dalam rentang operasi elektroda karbon.

Pada magnesium-udara *current collector* biasanya terbuat dari bahan konduktif yang mampu mendukung efisiensi pengumpulan arus dari anoda (plat magnesium) dan katoda (berbasis oksigen dari udara). Umumnya terbuat dari logam berpori seperti tembaga dan nikel atau bahan non-logam seperti karbon (kain karbon, grafit) (nam et al., 2021).

2.6.5 Separator

Separator merupakan membran berpori yang terletak diantara anoda dan katoda sebagai pemisah dan berfungsi untuk mencegah terjadinya hubungan arus pendek atau korsleting (Arifin & Zainuri, 2014). Untuk mencapai fungsinya, separator yang ideal adalah membran berpori yang dapat dibasahi

yang bersifat *electrically insulating* (isolasi listrik) tapi konduktif secara ionik. Membran polimer yang direndam ke dalam elektrolit cair konduktor ionik merupakan bentuk umum separator pada baterai logam-udara. Beberapa material yang dapat digunakan sebagai separator antara lain *polyolefins* (PE dan PP). *Polyvinylidene fluoride* (PVdF), PTFE (teflon), PVC, dan *polyethylene oxide*. (Salado & Lizundia, 2022).

2.6.6 Elektrolit

Elektrolit merupakan larutan cair maupun senyawa yang berfungsi sebagai medium yang memungkinkan perpindahan ion antar elektroda agar reaksi elektrokimia bisa berlangsung. Semakin banyak produksi ion yang dihasilkan maka konduktivitas listriknya semakin tinggi (Nuril Ihsan et al., 2022). Karakteristik elektrolit yang penting untuk diperhatikan antara lain konduktivitas, aman (tidak beracun) serta harganya murah. Elektrolit ini terbagi dalam dua jenis yaitu elektrolit cair dan elektrolit padat.

2.7 Material Katalis Baterai Magnesium-Udara

2.7.1 Grafit

Grafit, sebagai alotrop karbon dengan konduktivitas listrik yang sangat baik, memiliki peran fundamental dalam sistem baterai, khususnya pada katoda baterai magnesium-udara (Mg-udara). Dalam aplikasi ini, grafit tidak hanya berfungsi sebagai aditif konduktif untuk memfasilitasi transfer elektron, tetapi juga sebagai penopang katalis (catalyst support) yang efektif untuk reaksi reduksi oksigen (ORR), proses kunci dalam produksi energi baterai. Struktur grafit yang berpori dan stabil secara kimia menawarkan luas permukaan yang

memadai untuk menopang partikel katalis, dan bahkan cacat atau doping pada strukturnya dapat menciptakan situs aktif intrinsik untuk ORR. Dengan demikian, grafit secara signifikan meningkatkan kinerja baterai melalui pengurangan resistansi internal, peningkatan ketersediaan situs katalitik, serta perbaikan stabilitas dan integritas struktural katoda.

2.7.2 Carbon Black

Carbon Black adalah material karbon padat yang dihasilkan melalui proses manufaktur yang sangat terkontrol, menghasilkan partikel granular dengan sifat yang direkayasa secara spesifik, meliputi variasi ukuran (mulai dari 10 nm hingga sekitar 500 nm), bentuk, porositas, dan kimia permukaan. Dengan kandungan karbon murni di atas 95%, dan konduktivitas listrik yang sangat baik, karbon hitam merupakan komponen kunci dalam katalis baterai elektrokimia (misalnya, baterai litium-ion dan baterai udara). Penggunaannya pada katoda sangat penting untuk mendukung katalis logam transisi dalam memfasilitasi reaksi reduksi oksigen (ORR), berkontribusi pada peningkatan kinerja dan efisiensi baterai (ORION Engineered Carbons, 2014).

2.7.3 Binder (Pengikat)

Binder memegang peranan krusial dalam arsitektur elektroda, berfungsi untuk merekatkan material aktif pada kolektor arus, menjaga integritas struktural elektroda, serta memfasilitasi jalur interkalasi ion selama proses konduksi. Dalam aplikasi baterai litium-ion, polimer seperti *Polivinilidena Fluorida* (PVDF) atau *Etilen Propilena Diena Monomer* (EPDM) dipilih sebagai pengikat. Pemilihan ini didasarkan pada kapabilitas mereka untuk

mengikat material aktif dan aditif konduktif seperti karbon hitam, tanpa bereaksi secara kimiawi atau elektrokimia dengan elektroda maupun elektrolit, karena keduanya bersifat tidak aktif secara elektrokimia. Namun, penting untuk dicatat bahwa proporsi aditif konduktif dan pengikat polimer harus dioptimalkan. Kelebihan kuantitas dapat berpotensi menurunkan kapasitas total sel, sementara kekurangan kuantitas akan mengakibatkan penurunan konduktivitas elektronik serta kekuatan mekanis elektroda (Y. K. Lee, 2019).

2.8 Parameter Baterai

Beberapa parameter yang umum pada baterai antara lain:

2.8.1 Tegangan

Voltase atau tegangan sel adalah perbedaan potensial antara katoda dan anoda tergantung pada bahan atau material aktif yang digunakan. Tegangan dinyatakan dalam satuan Volt (V).

2.8.2 Arus

Arus listrik merupakan muatan listrik yang mengalir per detik atau berpindah melalui suatu konduktor, seperti kawat, akibat perbedaan potensial (tegangan) antara dua titik. Arus listrik diukur dalam satuan Ampere (A), yang menunjukkan jumlah muatan yang mengalir melalui suatu titik dalam sirkuit per detik.

2.8.3 Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai merupakan kemampuan baterai untuk menyimpan energi listrik dan kemudian dikeluarkan kembali oleh baterai. Besar kapasitas baterai baterai tergantung dari banyaknya energi yang dapat disimpan dalam baterai

tersebut dalam satuan ampere hour (Ah). Kapasitas baterai dapat dinyatakan pada persamaan (2.9).

$$C = I \times t \quad (2.9)$$

Dimana:

C = kapasitas baterai (Ah atau mAh)

I = kuat arus baterai (A)

t = waktu (jam)

Atau kapasitas baterai dapat dihitung menggunakan persamaan (2.10), integral arus terhadap waktu. Artinya menghitung jumlah total muatan listrik yang mengalir selama waktu t (Hidayat et al., 2022):

$$C = \int_0^t I(t) dt \quad (2.10)$$

Dimana:

C = kapasitas baterai (Ah atau mAh)

$I(t)$ = arus sebagai fungsi waktu t (A atau mA)

dt = perubahan waktu

2.8.4 Daya

Daya listrik pada baterai merupakan jumlah energi listrik yang dapat diserap dari baterai atau dihasilkan oleh baterai melalui sirkuit atau rangkaian listrik. Tegangan dari baterai akan menghasilkan daya listrik sedangkan beban yang terhubung dengan baterai akan menyerap daya listrik tersebut. Daya listrik juga dapat didefinisikan sebagai tingkat konsumsi energi dalam sebuah rangkaian

listrik. Semakin tinggi nilai tegangan dan arus yang dihasilkan oleh baterai maka daya yang dihasilkan akan semakin tinggi (Mardwianta, 2017).

Daya yang disuplai oleh baterai tergantung pada tegangan (V) dan arus (I) yang dihasilkan oleh baterai. Daya listrik dapat dihitung menggunakan rumus dasar pada persamaan (2.11).

$$P = V \times I \quad (2.11)$$

Dimana:

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.8.5 Salinitas

Salinitas merupakan konsentrasi garam terlarut yang ditemukan dalam sampel air yang diukur sebagai jumlah total garam terlarut dalam bagian per seribu (*part per thousand*, ppt). Contohnya, air laut memiliki salinitas rata-rata sekitar 35 ppt total padatan terlarut. Ini dapat ditulis sebagai 3,5% atau 35 ppt (Stott, 2011).

Satuan ppt merupakan ukuran kandungan molekul bahan tertentu dalam 1000 molekul cairan atau air. Dalam hal ini jika salinitas air laut adalah 35 ppt maka artinya ada 35 molekul garam dalam 1000 molekul air. Perhitungan massa garam untuk tingkat salinitas tertentu dihitung menggunakan persamaan (2.12)

$$m_g = x \cdot V \quad (2.12)$$

Dimana m_g merupakan massa garam yang dibutuhkan, x merupakan tingkat salinitas dalam satuan *part per thousand* (ppt), dan V merupakan volume larutan yang diinginkan (Hidayat et al., 2022).

2.9 Komponen Penyusun Baterai

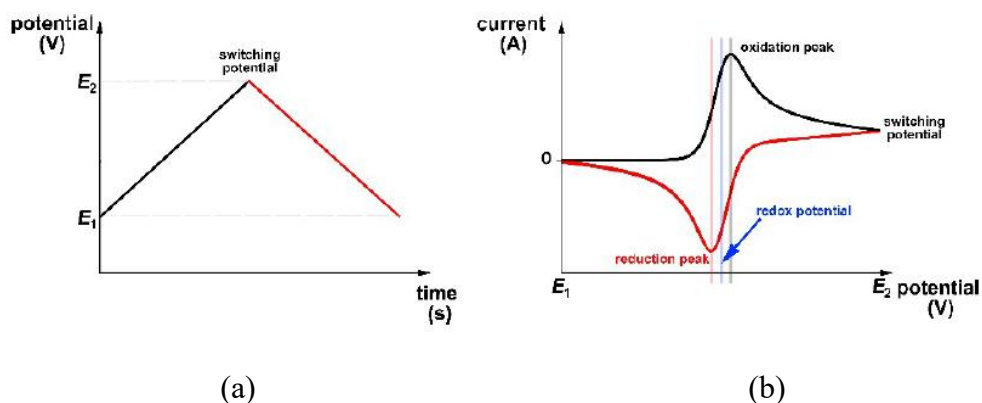
Terdapat 3 komponen penyusun pada baterai yaitu:

1. Komponen Aktif, merupakan bagian yang terlibat langsung dalam proses penyimpanan dan pelepasan energi. Yang terdiri dari dua buah elektroda (katoda dan anoda), dan elektrolit yang memungkinkan terjadinya reaksi redoks. Pada elektroda, terjadi reaksi kimia yang menyimpan energi dalam bentuk energi elektrokimia, yang kemudian dapat dilepaskan saat baterai digunakan.
2. Komponen Pasif, merupakan elemen yang mendukung dan memfasilitasi fungsi komponen aktif tanpa terlibat langsung dalam reaksi elektrokimia. Ini termasuk struktur seperti logam current collector yang berfungsi mengalirkan arus listrik dan separator yang mencegah kontak langsung antara elektroda positif dan negatif untuk menghindari korsleting. Komponen pasif berperan penting dalam menjaga efisiensi dan keamanan operasional baterai.
3. Komponen Eksternal, merupakan bagian yang berfungsi untuk menghubungkan baterai dengan beban. Komponen ini meliputi casing baterai, yang berfungsi melindungi komponen internal dari kerusakan fisik dan lingkungan. Casing juga dirancang agar sesuai dengan aplikasi dari baterai, baik dari aspek ukuran, bentuk, maupun material. Selain casing,

komponen eksternal dapat mencakup terminal atau konektor yang mengalirkan listrik dari baterai ke beban.

2.10 Cyclic Voltammetry (CV)

Cyclic Voltammetry (CV) adalah teknik pengukuran untuk menganalisa karakteristik sistem elektrokimia salah satunya yaitu baterai. CV bekerja dengan merekam nilai arus sesuai perubahan tegangan ketika reaksi reduksi oksidasi. (Keune et al., 2024). Voltametri melibatkan penyapuan potensial untuk menghasilkan profil arus-potensial, yang dikenal sebagai voltammogram (J. Lee, 2014).

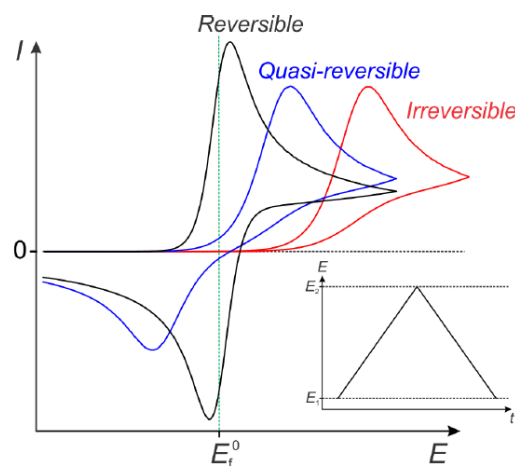


Gambar 2. 6 (a) Profil tegangan terhadap arus pada grafik linier dan CV (b) Grafik CV yang dihasilkan

Sumber : Keune et al., 2024

Pada gambar 2.6 (a) menunjukkan profil tegangan terhadap arus pada grafik linier dan CV. Potensial diberikan dalam suatu siklus antara dua nilai potensial berbeda, potensial awal E_1 meningkat secara linier ke potensial maksimum E_2 (*switching potential*) dan selama proses ini terjadi reaksi oksidasi, lalu potensial turun kembali secara linier ke potensial awal dan selama proses ini terjadi reaksi reduksi. Sehingga arus anodik dan arus katodik dapat terukur. Gambar 2.7 (b)

merupakan voltammogram hasil pengukurannya, berupa grafik hubungan antara potensial (sumbu X) dan arus listrik (sumbu Y) (Keune et al., 2024). Luas kurva CV menunjukkan jumlah muatan listrik (Q) yang terlibat dalam proses elektrokimia, baik reduksi maupun oksidasi pada elektroda selama satu siklus pemindaian potensial.



Gambar 2. 7 Perbedaan bentuk kurva CV untuk proses transfer elektron dengan gambar inset menunjukkan perubahan potensial yang diberikan selama pengukuran

Sumber : J. Lee, 2014

Gambar 2.7 menunjukkan perbedaan bentuk kurva CV *reversible*, *quasi-reversible*, *irreversible*. Dimana bentuk voltammogram dapat memberikan informasi tentang mekanisme redoks sebagai berikut:

1. Reaksi Reversible. Reaksi ini tidak memiliki hambatan kinetik atau kimia untuk proses oksidasi maupun reduksi. Cirinya yaitu:

- $|i_{pa}| = |i_{pc}|$, arus puncak anodik = arus puncak katodik
- $\Delta E_p = E_{pa} - E_{pc} = 57/n$ atau $59/n$ mV, dimana n adalah jumlah elektron yang terlibat.

Sehingga, implikasinya baterai memiliki kemampuan untuk berulang kali mengisi dan mengosongkan daya secara efisien dan meminimalkan kehilangan energi.

2. Reaksi Quasireversible. Reaksi ini dapat mengalami oksidasi dan reduksi, namun dengan adanya beberapa hambatan kinetik. Sehingga proses transfer elektron tidak sepenuhnya cepat. Cirinya yaitu:

- $|i_{pa}| \approx |i_{pc}|$
- $\Delta E_p \neq 57/n$ atau $59/n$ mV, tidak ideal.

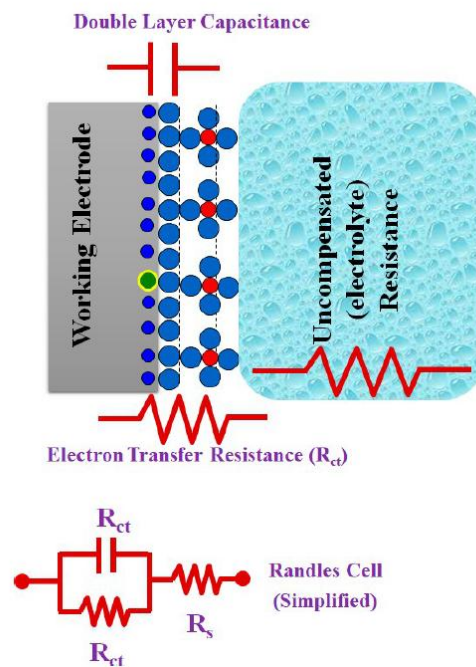
Sehingga, implikasinya efisiensi pengisian dan pengosongan dayanya sedang karena ada energi yang hilang selama proses redoks.

3. Reaksi Irreversible. Untuk reaksi ini, hanya mengalami oksidasi saja atau reduksi saja. Akibatnya, pada voltammogram hanya akan terlihat satu puncak oksidasi atau reduksi. Sehingga, efisiensi dan daya yang dihasilkan kecil, akan mengalami kehilangan energi yang signifikan selama proses berlangsung. Reaksi ini biasanya pada baterai primer.

2.11 *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*

EIS adalah salah satu teknik elektrokimia dimana impedansi dalam rangkaian diukur dengan ohm (sebagai satuan resistansi). Dalam sel elektrokimia konvensional, interaksi materi (spesies redoks) – elektroda meliputi konsentrasi spesies elektroaktif, transfer muatan, dan transfer massa dari larutan *bulk* ke permukaan elektroda di samping resistansi elektrolit. Masing - masing fitur ini dicirikan oleh rangkaian listrik yang terdiri dari resistansi, kapasitor, atau elemen fase konstan (CPE, *Constant Phase Element*) yang dihubungkan secara paralel atau seri untuk membentuk rangkaian yang setara (gambar 2.8). Dengan demikian, EIS

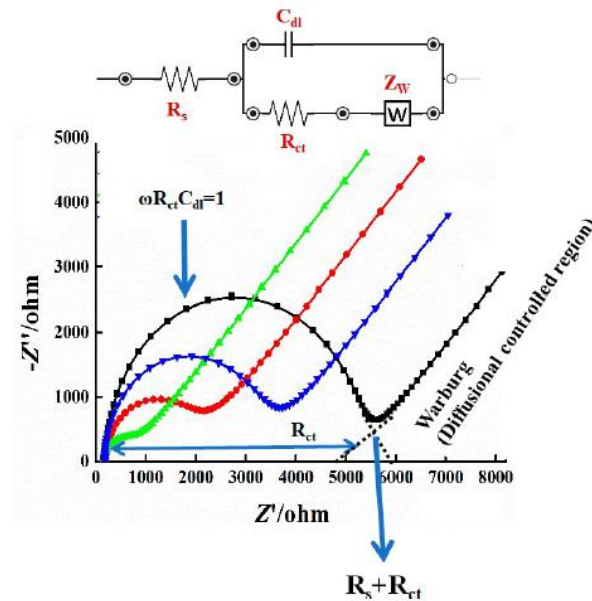
dapat digunakan untuk mengeksplorasi proses transfer massa, transfer muatan, dan difusi. Juga untuk mempelajari sifat material intristik atau proses spesifik yang dapat mempengaruhi konduktansi, resistansi, atau kapasitansi sistem elektrokimia. Impedansi berbeda dengan resistansi, karena resistansi yang diamati pada sirkuit DC mematuhi Hukum Ohm secara langsung. Eksitasi sinyal kecil diterapkan untuk mengukur respons impedansi (Magar et al., 2021).



Gambar 2. 8 Skema sederhana untuk menggambarkan EIS dan reaksi redoks yang terjadi pada permukaan elektroda kerja dalam sistem elektrokimia

Sumber : Magar et al., 2021

Gambar 2.8 menunjukkan skema sederhana untuk menggambarkan EIS dan reaksi redoks yang terjadi pada permukaan elektroda sistem elektrokimia. R_s (*Resistance Solution*) merupakan resistansi elektrolit, R_{ct} (*Resistance charge-transfer*) merupakan resistansi transfer muatan, dan C_{dl} (*Capacitance Double Layer*) merupakan kapasitansi lapisan ganda (Magar et al., 2021).



Gambar 2. 9 Plot Nyquist dan simulasi yang menunjukkan rangkaian ekuivalen

Sumber : Magar et al., 2021

Gambar 2.9 merupakan representasi impedansi yang dibagi menjadi impedansi real (Z') diplot pada sumbu X dan impedansi imajiner ($-Z''$) diplot pada sumbu Y, sehingga akan terbentuk “Plot Nyquist”. Proses elektrokimia yang terkait dengan elektrolit/antarmuka dan reaksi redoks disimulasikan/dikomputasi sebagai rangkaian listrik (rangkaian ekuivalen). Rangkaian ekuivalen ini dirancang dan diimplementasikan untuk memahami dan mengevaluasi masing-masing komponen sistem EIS. (Magar et al., 2021). Pengukuran EIS menggunakan potensial AC dengan amplitudo rendah (~ 10 mV) dari rentang frekuensi yang sangat lebar. Parameter EIS meliputi :

- 1) R_s (*Resistance Solution*) untuk mengetahui hambatan larutan elektrolit. Elektrolit yang digunakan pada baterai memiliki nilai tahanan yang berbeda sesuai dengan zat elektrolit yang digunakan.
- 2) R_{ct} (*Resistance Charge-transfer*) untuk mengetahui karakteristik kecepatan reaksi elektroda atau transfer muatan pada antarmuka elektrolit dan

elektroda. Resistance charge-transfer yang besar mengartikan bahwa reaksi elektrokimia yang lambat.

- 3) Cdl (*Capacitance Double Layer*) yaitu kapasitansi double layer.
- 4) Cpe (*Constant Phase Element*) yaitu metode untuk melihat kapasitansi permukaan yang tidak rata.
- 5) Zw (*Warburg Impedance*) untuk mengetahui hambatan akibat difusi ion.

2.12 Pengujian *Discharge* Baterai

Pengujian *discharge* baterai dilakukan dalam kondisi pengosongan dengan beban tertentu untuk mensimulasikan kondisi pengoperasian baterai yang sebenarnya. Salah satu alat yang digunakan untuk pengujian discharging baterai yaitu BTS NEWARE (Battery Testing System).



Gambar 2. 10 *Battery Testing System* (BTS) NEWARE

Gambar 2.10 merupakan alat yang digunakan untuk pengujian *discharging* yang dihasilkan oleh baterai dengan arus konstan tertentu. Pengukuran *discharge* dilakukan untuk mengetahui karakteristik baterai yang meliputi waktu hidup serta performa baterai (Dwi Susilo, 2018).

Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk memantau penurunan kapasitas baterai selama baterai tersebut masih menyimpan energi sampai energinya habis, sehingga dapat menilai masa pakai dan status kesehatannya. Melalui siklus pengisian/pengosongan parameter kinerja kapasitas pengisian/pengosongan baterai, efisiensi coulomb, dan tingkat retensi kapasitas dapat diuji (*Battery Cycle Performance Analysis and BTS Process Step Setting Introduction*, 2024)

2.13 Penelitian Terkait

Tabel 2. 2 Penelitian Terkait

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan
1.	<i>Design and Performance of High-Capacity Magnesium–Air Battery for Power Generator System</i>	Kwang-Yeop Jang, Sang-Won Seo, Dong-Jin Kim, and Dong-Gun Lee, 2024	Menyajikan desain dan pembuatan sel baterai untuk pengaplikasian <i>Power Generator System</i> . Dimana pelapisan katalis pada pembuatan katoda dilakukan dengan di press menggunakan mesin roll.
2.	<i>Magneium-air battery with seawater electrolyte for seawater-activated batteries application</i>	Afriyanti Sumboja, Anggraeni Mulyadewi, Bagas Prakoso, 2021	Penelitian ini mengembangkan baterai mg-air yang diaktifkan oleh elektrolit air laut dan NaCl 3,5 wt%. MnOx (<i>manganese oxide</i>) sebagai katalis dan katalis Pt/C sebagai pembanding. Pengujian EIS pada sampel MnOx menunjukkan Rct yaitu 11,85 Ω dengan elektrolit NaCl dan 18,05 Ω dengan elektrolit air laut. Pengujian <i>discharging</i> dengan arus konstan 1,25 mA mampu bertahan sampai 24 jam.