

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Baterai

2.1.1 Pengertian Baterai

Baterai merupakan alat penyimpanan energi yang dapat merubah energi kimia yang disimpannya menjadi energi listrik. Baterai secara umum memiliki empat buah komponen utama yaitu katoda, anoda separator dan elektrolit (Linden and Reddy, 2001).

2.1.1.1 Katoda

Katoda adalah kutub positif dari baterai. Secara umum, katoda didefinisikan sebagai tempat pada sel elektrokimia di mana terjadi proses reduksi, yaitu proses penangkapan elektron. Pada kasus baterai yang termasuk sel volta (sel yang menghasilkan energi listrik ketika terjadi reaksi kimia), katoda merupakan kutub positif. Namun, misal pada kasus sel elektrolisis (sel yang mengalami reaksi kimia ketika arus listrik dialirkan), katoda merupakan kutub negatif.

2.1.1.2 Anoda

Anoda adalah kutub negatif dari baterai. Kebalikan dari katoda, secara umum anoda didefinisikan sebagai tempat pada sel elektrokimia di mana terjadi proses oksidasi, yaitu proses pelepasan elektron. Pada kasus elektrolisis, anoda merupakan kutub positif. Jadi, ketika baterai disambungkan dengan rangkaian eksternal, elektron akan mengalir dari anoda ke katoda. Dengan kata lain, arus

mengalir dari katoda ke anoda, sehingga katoda merupakan kutub positif dan anoda kutub negatif.

2.1.1.3 Separator

Separator adalah pemisah antara katoda dan anoda. Baterai bertugas untuk mengalirkan elektron hanya melalui rangkaian eksternal, jadi diperlukan komponen baterai untuk mencegah aliran elektron dari anoda ke katoda di dalam baterai. Itulah tugas separator. Separator memiliki sifat isolator untuk elektron, tetapi konduktor untuk ion. Ketika logam anoda teroksidasi melepaskan elektron, ia akan menjadi ion logam. Ion tersebut akan mengalir menuju katoda melalui separator, sedangkan elektron akan mengalir menuju katoda melalui rangkaian eksternal.

2.1.1.4 Elektrolit

Elektrolit adalah suatu zat yang terlarut dalam bentuk ion-ionnya dan merupakan konduktor yang baik. Elektrolit biasanya berfasa cair, bisa berupa garam, asam, basa, atau senyawa kimia lainnya. Dua contoh elektrolit yang sering dipakai dalam baterai adalah larutan LiPF_6 dan larutan NaCl . Elektrolit juga bisa berbentuk jel, polimer, atau keramik. Namun, saat ini bentuk elektrolit padat masih jauh dari sempurna dan di pasaran elektrolit paling sering dipakai memang dalam bentuk cair untuk baterai sekunder.

Keempat komponen di atas adalah komponen utama baterai. Namun, bukan berarti tidak ada komponen baterai lainnya. Terdapat komponen-komponen lain yang pada umumnya bekerja sebagai pelengkap. Misalnya, *current collector* yang bertugas mengumpulkan arus yang mengalir melalui rangkaian eksternal karena

proses redoks baterai. Kemudian, terdapat *coating* yang bertugas melindungi elektroda dari kontak langsung dengan elektrolit. Elektroda pada umumnya mengandung unsur logam reaktif seperti litium,

sehingga tidak boleh terkena kontak langsung dengan cairan karena bisa tereduksi dengan mudah oleh larutan dan mengeluarkan panas atau bahkan api. Kemudian, terdapat juga *case* yang menjadi bagian luar baterai sebagai pelindung yang meminimalkan kerusakan dari luar (Deng, 2015).

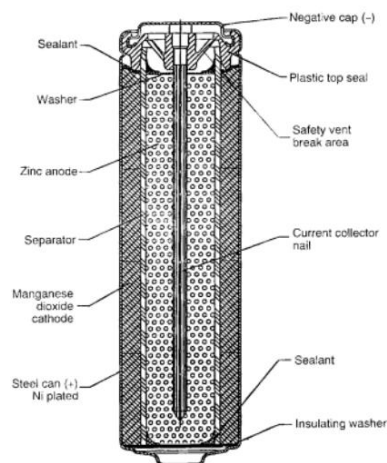
Baterai menyimpan energi dalam bentuk energi kimia, dan dapat mengalirkan listrik karena ada beda potensial antara katoda dan anoda. Ketika katoda dan anoda disambungkan melalui rangkaian listrik eksternal, arus listrik akan mengalir karena beda tegangan tersebut. Arus tidak akan mengalir di dalam baterai karena adanya elektrolit dan separator, yang berperan sebagai konduktor untuk ion tetapi isolator untuk elektron.

2.1.2 Jenis-jenis Baterai

Mengacu pada sumber energi listrik yang terbentuk dari hasil proses elektrokimia, maka baterai/ sel dikelompokkan sebagai berikut :

2.1.2.1 Baterai Primer

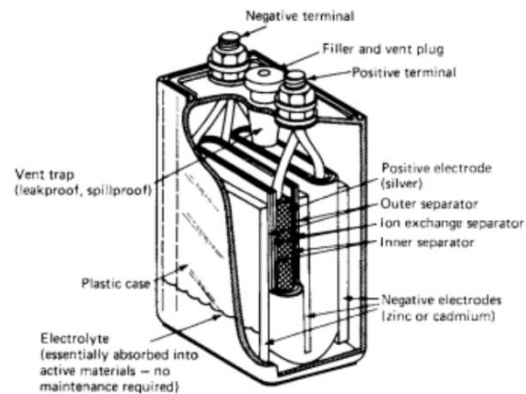
Baterai primer adalah baterai yang tidak dapat di isi ulang (*non-rechargeable*) dan hanya digunakan sekali dan dibuang. Pada umumnya baterai primer murah. Mudah digunakan sebagai sumber listrik untuk peralatan portabel. Memiliki densitas energi listrik yang besar dengan kecepatan *discharge* yang rendah dan tidak memerlukan perawatan.



Gambar 2.1 Contoh Baterai Primer Bentuk Silinder (Triwibowo, 2011)

2.1.2.2 Baterai Sekunder

Baterai sekunder adalah baterai yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) dan dapat digunakan dan diisi ulang beberapa kali. Pengisian dilakukan dengan memasukkan arus listrik pada kutub yang berlawanan. Baterai jenis ini disebut juga sebagai baterai penyimpan / storage battery atau *accumulator*. Baterai sekunder diaplikasikan dalam dua kategori, yaitu: Sebagai alat penyimpan energi/ *Energy-storage Device*. Umumnya baterai jenis ini tersambung dengan jaringan listrik permanen dan jaringan listrik primer saat digunakan. Contoh penggunaannya adalah dalam otomotif, pesawat terbang, *Uninterruptible Power Source* (UPS) dan sebagai pendukung *load leveling* pada *Stationary Energy Storage Systems*. Dan Sebagai sumber energi listrik pada portable device, pengganti baterai primer dan pada semua device yang menggunakan baterai primer, seperti telepon genggam, kamera, notebook



Gambar 2.2 Contoh baterai sekunder dengan elektrolit cair (Triwibowo, 2011)

2.1.2.3 Baterai Cadangan/ *Reserve Battery*

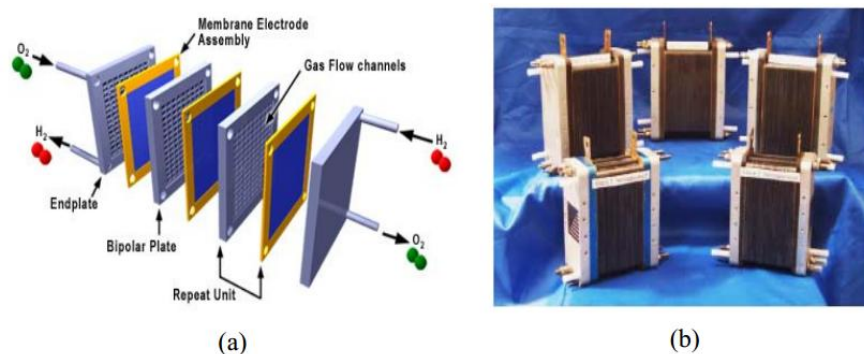
Baterai jenis ini juga hanya digunakan sekali pakai saja, namun komponen pembentuknya jauh berbeda dengan baterai primer yang umum. Komponen pembentuknya terpisah satu sama lain saat penyimpanan, terutama komponen elektrolitnya. Baterai ini memiliki masa penyimpanan yang sangat lama tanpa adanya *self discharged*, sehingga baterai tetap pada kondisi yang optimal saat penggunaannya. Baterai ini baru akan aktif pada suhu yang tinggi saat bahan elektrolitnya mencair dan membuat kontak dengan elektroda. Contoh battery jenis ini dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Zinc/Silver oxide primary reserve battery* dengan pengaktifan otomatis (Triwibowo, 2011)

2.1.2.4 Sel bakar/ *Fuel cell*

Seperti halnya baterai, Fuel cell juga merupakan alat pengkonversi energi kimia menjadi energi listrik melalui proses elektrokimia. Perbedaan yang mencolok adalah, pada baterai semua material aktifnya terintegrasi dalam kesatuan unit. Komponen sel bakar serta unit sel bakar yang utuh dapat dilihat di Gambar 2.4



Gambar 2.4 Komponen utama PEMFC (*Proton-exchange membrane fuel cell*). (a) menunjukkan kedudukan pelat bipolar, (b) contoh pelat bipolar yang diproduksi oleh ZBT. (Triwibowo, 2011)

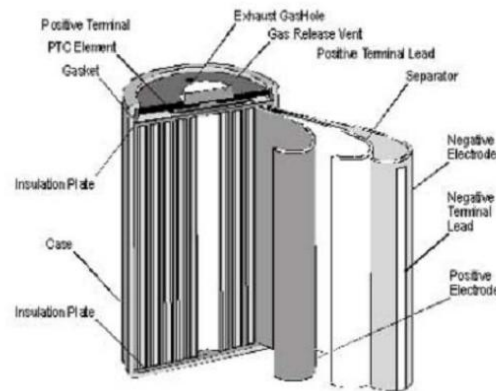
Pada Fuel cell ada material aktif yang harus dipasok dari luar. Selain itu, energi listrik yang dihasilkan pada sistem baterai akan berhenti disaat material aktif yang tersimpan dalam sistem ini habis terpakai. Pada Fuel cell energi listrik tidak akan berhenti dihasilkan sepanjang pasokan material aktif, misalnya gas hidrogen terus dialirkan. Teknologi Fuel cell dibagi dalam dua kategori yaitu Sistem langsung/ *Direct System* dimana bahan bakar yang dialirkan kedalam sistem *Fuel cell*, misalnya gas hidrogen/ metanol langsung bereaksi. Dan Sistem tidak langsung/ *Indirect System* dimana bahan bakar yang dialirkan, misalnya gas alam atau bahan bakar fosil diubah terlebih dahulu menjadi gas yang mengandung banyak hidrogen baru kemudian bereaksi menghasilkan listrik.

Untuk beberapa alasan, baterai sekunder didesain dalam beberapa bentuk. Pada intinya, material elektroda berbentuk lembaran dan elektrolit dapat berupa lembaran atau cair. Desain baterai sekunder dibagi menjadi (Triwibowo, 2011) :

2.1.2.5 Baterai Silinder

Jenis baterai ini paling banyak ditemui. Desain berbentuk silinder mudah dalam pembuatannya, disamping itu memiliki stabilitas mekanik yang baik. Saat *charging*, baterai akan menghasilkan gas yang memberikan tekanan dalam silinder, untuk itu baterai silinder dilengkapi pula dengan ventilasi. Ventilasi diperlukan untuk mengalirkan gas bila terjadi tekanan yang berlebih. Baterai silinder ditemui dalam berbagai ukuran. Kerugian dari desain ini adalah bentuknya yang tidak ringkas saat beberapa silinder digabungkan, yaitu akan terbentuk ruangan kosong diantaranya. Ilustrasi baterai silinder dapat dilihat pada

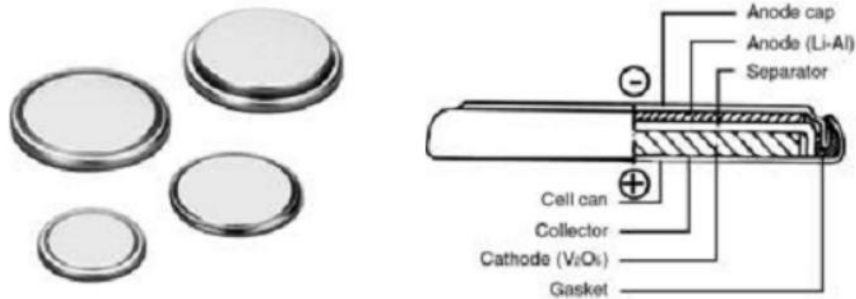
Gambar 2.5. Kapasitas listrik yang dikandung baterai ini berkisar antara 1800 – 2000mAh



Gambar 2.5 Desain silinder pada baterai sekunder dengan material elektroda berupa lembaran (Triwibowo, 2011)

2.1.2.6 Baterai Kancing

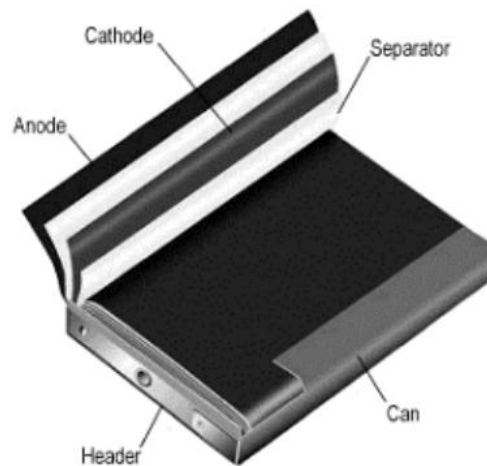
Baterai yang sering disebut baterai koin memiliki ukuran terkecil dibanding baterai lain. Disebabkan ukurannya, jenis ini tidak memiliki masalah dengan ruang yang tersedia. Karena bentuknya yang miniatur, baterai ini tidak dilengkapi dengan ventilasi (lihat Gambar 2.6). Sementara proses *charging* yang cepat akan membuat baterai menggelembung. Untuk menghindari keadaan ini, baterai kancing hanya dapat di charge dengan kecepatan yang rendah. Pengisian baterai jenis ini dapat memakan waktu 10-16 jam.



Gambar 2.6 Baterai sekunder berbentuk kancing tidak dilengkapi ventilasi. Kecepatan pengisian/ *charging* sangat rendah untuk mencegah terjadinya *swelling* dan tekanan (Triwibowo, 2011)

2.1.2.7 Baterai Prismatik

Baterai ini memaksimalkan penggunaan ruang yang ada dalam suatu perangkat elektrik. Oleh karenanya baterai jenis ini tidak memiliki ukuran yang standard. Ukuran senantiasa disesuaikan dengan ruang yang ada. Kapasitas listrik baterai ini umumnya dibawah baterai silinder, yaitu 400-2000 mAh. Stabilitas mekanik baterai ini juga tidak sebaik dengan baterai silinder, untuk itu diperlukan material yang lebih kuat untuk kemasan baterai. Ilustrasi baterai prismatik tertera pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Penampang baterai prismatic yang lebih fleksibel dalam segi ukuran. Densitas energi lebih rendah dan biaya pembuatannya lebih mahal dari baterai silinder (Triwibowo, 2011)

2.1.2.8 Baterai Kantung

Jenis baterai ini adalah yang paling fleksibel dalam segi bentuk dan ukuran. Disamping itu, juga paling ringan karena tidak menggunakan plat besi sebagai kemasan. Material aktif yang digunakan umumnya dalam bentuk lembaran polimer, dengan demikian dapat mengurangi produksi gas saat operasional. Proses *charging* dan *discharging* harus dilakukan dengan seksama agar tidak menghasilkan gas berlebih yang dapat menekan kantong. Baterai ini terbilang ringkih terhadap tekanan dari luar, benda tajam dan pemuntiran. Oleh karenanya penggabungan jenis baterai ini tidak dapat dilakukan dengan menumpuknya, tapi meletakkannya berdampingan. Ilustrasi baterai kantong dapat dilihat pada Gambar 2.8. Teknologi baterai kantong belum *mature*. Walaupun baterai ini banyak diaplikasikan, namun belum ada data-data kehandalan baterai ini. Standarisasi mengenai baterai ini juga belum ada.



Gambar 2.8 Baterai kantung yang simpel, fleksibel dan ringan. Kapasitas listriknya dibawah baterai konvensional lain, disamping itu biaya produksinya terbilang mahal (Triwibowo, 2011)

2.1.3 Baterai Logam – udara

Baterai logam udara menghasilkan listrik dari reaksi oksidasi pada logam sebagai anoda, dikombinasikan dengan reduksi oksigen dari udara yang menempel pada karbon aktif sebagai katoda. Secara teori, standar tegangan reduksi untuk baterai logam udara yaitu 1,23 V. Material yang digunakan sebagai bahan anoda untuk dijadikan baterai logam udara diantaranya Li-udara, Na-udara, Al-udara, Mg-udara, Zn-udara, Si-udara, Fe-udara, Ge-udara, Ca-udara, K-udara. Sistem elektrokimia penyimpan energi didesain untuk membangkitkan dan menyuplai energi dalam bentuk listrik atau reaksi kimia (Fu *et al.*, 2018).

Teori kapasitas spesifik dan densitas energi dari berbagai tipe logam udara dapat dilihat pada tabel 2.1. Konfigurasi baterai ini bersifat terbuka, dimana oksigen dari udara sebagai bahan untuk reaksi kimia reduksi bisa masuk ke pori pori. Hal ini menjadi kontribusi pada besarnya densitas energi yang dihasilkan (Liu *et al.*, 2017).

Tabel 2.1 Beberapa jenis baterai logam udara dengan beberapa parameter (Asayuti, 2020)

Batteries	Theoretical Voltage (V)	Theoretical specific capacity (Ah Kg-1)	Theoretical Energy density (kWh kg-1)	Practical Operrating Voltage
Li-air	3.4	1170	13	2.4
Zn-air	1.6	658	1.3	1.0 - 1.2
Mg-air	3.1	920	6.8	1.2 - 1.4
Na-air	2.3	687	1.6	2.3
Al-air	2.7	1030	8.1	1.2 -1.6

2.1.4 Baterai Alumunium udara

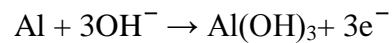
Baterai alumunium udara memiliki energi spesifik yang jauh lebih tinggi daripada baterai biasa. Daya tariknya terletak pada sumber zat pengoksidasi. Untuk reaksi pada katoda (elektroda positif) oksigen (O_2) diambil dari lingkungan bukan dari dalam baterai. Secara teori densitas energi spesifiknya (Wh / kg) sedikit lebih rendah daripada Li-ion baterai (Mardwianta *et al.*, 2017).

Baterai Zn-udara dan Al-udara sedang banyak dikembangkan karena biaya yang rendah dan kelimpahan material pada kedua logam ini. Korosi anoda logam akan menurunkan masa hidup baterai. Untuk membuat tumpukan volta dengan membangun sel aluminium-udara tambahan. Tumpukan dua atau tiga sel aluminium-udara di atas satu sama lain untuk membuat daya baterai lebih kuat.

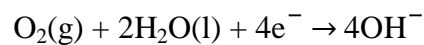
Untuk menghasilkan energi listrik, baterai ini bergantung pada oksidasi aluminium pada anoda, yang melepaskan elektron, dan pengurangan oksigen pada

katoda, yang menggunakan elektron. Pergerakan elektron melalui sirkuit eksternal menghasilkan arus listrik yang bisa digunakan untuk menyalakan perangkat sederhana. Reaksi pada baterai aluminium-udara dapat didefinisikan sebagai berikut (Mardwianta *et al.*, 2017):

Anoda :



Katoda :



2.1.5 Parameter-parameter Baterai

Untuk mengetahui performa suatu baterai dan memahami karakteristik baterai tertentu, perlu mengetahui parameter-parameter yang terkait. Misal untuk mengetahui berapa banyak energi yang bisa disimpan, perlu tahu berapa tegangan nominal dan kapasitas baterai. Untuk mengetahui seberapa lama usia suatu baterai bisa dipakai, perlu tahu jumlah siklusnya untuk *depth of discharge* dan temperatur tertentu. Berikut adalah parameter-parameter baterai.

2.1.5.1 Tegangan

Baterai merupakan sumber tegangan DC, di mana potensial listrik selalu konstan dan memiliki arah yang selalu sama. Besar tegangan kerja yang dikeluarkan oleh baterai disebut sebagai tegangan nominal (Samhan, 2018). Untuk baterai yang dijual di pasaran misalnya *lead acid battery*, tegangan nominal biasanya kelipatan 12V, paling umum yaitu 12, 24, dan 48V. Tegangan yang

terjadi pada praktiknya tidak selalu sama dengan tegangan nominal baterai. Tegangan pada praktiknya akan bergantung kepada usia baterai, kepada *state of charge*, dan temperatur. Secara fisika, tegangan merupakan potensial listrik. Ketika suatu muatan q diletakkan pada tegangan V , maka muatan tersebut memiliki energi potensial sebesar qV . Lalu, tegangan 1V didefinisikan besar tegangan yang ketika ada muatan 1C diletakkan, akan memiliki energi 1J.

2.1.5.2 Kapasitas

Kapasitas merupakan banyaknya muatan yang tersimpan dalam baterai, biasanya ada dalam satuan Ah (Ampere-hour). Satuan SI untuk muatan adalah Coulomb, tetapi pada teknologi baterai lebih sering digunakan satuan Ah. Karena $1\text{ C} = 1\text{ ampere-second}$, maka $1\text{ ampere-hour (Ah)} = 3600\text{ C}$. Perlu diperhatikan bahwa kapasitas baterai tidak sama dengan banyaknya energi yang dapat disimpan oleh baterai. Banyaknya energi yang dapat disimpan oleh baterai dirumuskan sebagai berikut

$$E_{bat,} = C_{bat} \times V \quad (2.1)$$

Keterangan:

$E_{bat,m}$: Energi maksimum yang dapat disimpan baterai (Wh)

C_{bat} : Kapasitas baterai (Ah)

V : Tegangan nominal baterai (V)

Dari rumus tersebut, belum tentu baterai dengan kapasitas lebih besar akan memiliki kapasitas energi maksimum yang lebih besar daripada baterai dengan kapasitas yang lebih kecil, tetapi tegangannya lebih besar.

Kalau dilihat dari strukturnya, tegangan baterai dipengaruhi oleh jenis material katoda dan anoda yang digunakan. Di lain sisi, kapasitas ditentukan secara langsung oleh kuantitas katoda dan anoda yang digunakan. Oleh karena itu, untuk jenis katoda dan anoda yang sama, secara umum baterai yang lebih besar akan memiliki kapasitas baterai yang lebih besar tetapi tegangannya sama. Seiring penggunaan baterai dan berjalanya waktu, nilai kapasitas baterai akan berkurang dikarenakan material anoda dan katoda tidak bisa benar-benar kembali ke semula saat proses *charging*.

2.1.5.3 State of Charge (SoC) dan Depth of Discharge (DoC)

SOC dan *DOD* adalah parameter yang menunjukkan keadaan baterai pada waktu tertentu. *SOC* menggambarkan seberapa banyak muatan yang tersedia di dalam baterai dibandingkan kapasitasnya, sedangkan *DOD* menggambarkan seberapa besar *discharge* atau seberapa banyak baterai sudah dipakai. Satu sama lain, *SOC* dan *DOD* saling komplementer.

Kedua besaran tersebut dirumuskan sebagai berikut (Smets *et al.*, 2016):

$$SoC = \frac{E_{bat}}{C_{bat} V} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$DoD = \frac{E_{bat} V - E_{bat}}{C_{bat} V} \times 100\% \quad (2.3)$$

Keterangan :

SoC : State of Charge (%)

E_{bat} : Energi yang tersimpan dalam baterai (Wh)

C_{bat} : Kapasitas maksimum baterai (Ah)

V : Tegangan nominal baterai (V)

DoD : *Depth of Discharge* (%)

Misal baterai yang memiliki kapasitas 4.000 Ah sudah dipakai sebanyak 1.000 Ah. Baterai tersebut berarti sedang memiliki *SoC* sebesar 75% dan *DoD* sebesar 25%.

2.1.5.4 Jumlah Siklus (*Duty Cycle*)

Jumlah siklus ini secara praktis menunjukkan seberapa lama “umur” suatu baterai. Secara umum, jumlah siklus didefinisikan sebagai banyaknya jumlah *charge* dan *discharge* ketika kapasitas baterai belum drop sampai di bawah 80% kapasitas nominal awalnya. Biasanya, jumlah siklus ini diberitahu oleh pabrik baterainya sebagai suatu angka absolut. Namun, jumlah siklus ini merupakan angka yang bergantung kepada suhu dan *DoD*. Secara umum, semakin tinggi suhu, maka semakin sedikit jumlah siklus suatu baterai. Secara umum juga, semakin besar angka *DoD* yang biasa diterapkan, semakin sedikit juga jumlah siklus baterai.

2.1.5.5 Penuaan

Performa baterai cenderung berkurang seiring berjalannya waktu. Mari ambil contoh misalnya baterai *lead acid*. Pada baterai ini, efek penuaan disebabkan utamanya oleh fenomena bernama *sulphation*, yaitu tumbuhnya kristal sulfat pada baterai yang tidak bisa diubah lagi menjadi timbal (*lead*) atau *lead*

Oxide (Smets *et al.*, 2016). Penyebab penuaan lainnya adalah korosi timbal pada elektroda. Ketika tadi timbal sudah terkorosi, maka baterai akan memiliki hambatan listrik yang lebih besar yang menyebabkan tegangan baterai akan drop saat baterai sedang digunakan untuk memberi listrik beban. Selain itu, baterai menjadi mudah panas. Pada prinsipnya, baterai mengalami penuaan karena terjadi perubahan struktur kimia di dalam baterai yang sifatnya tidak terbalikkan.

2.1.5.6 C dan E-rates

Parameter *C-rates* menunjukkan seberapa besar listrik yang dapat dikeluarkan saat proses *discharge* sedangkan *E-rates* besar listrik yang dapat masuk ke baterai saat proses *charge* (Samhan, 2018). Baterai yang memiliki *C-rates* sebesar 1C berarti baterai tersebut bisa mengeluarkan arus paling cepat menghabiskan muatan yang ada di dalamnya dari *DoD* 0% hingga *SoC* 0% dalam waktu 1 jam. Misal untuk baterai 100Ah, berarti maksimum arus yang dapat ditarik untuk proses *discharge* adalah 100A. Misal untuk baterai yang sama *C-rates* nya ialah $C/2$, berarti maksimum arus yang dapat ditarik hanyalah 50A dan habis paling cepat dalam waktu 30 menit. *E-rates* dalam prinsip perhitungannya sama, hanya mendeskripsikan proses *charging*.

2.1.5.7 Rapat Energi dan Energi spesifik

Rapat energi merupakan banyaknya energi yang ada per volume baterai, satuannya Wh/L. Misalkan ada dua baterai A dan B, dan A memiliki rapat energi lebih dari B. Maka, untuk volume yang sama baterai A dapat menampung energi yang lebih banyak daripada B. Kemudian, energi spesifik merupakan banyaknya

energi yang ada per massa baterai, satuannya Wh/kg (Samhan, 2018). Pada dasarnya rapat energi dan energi spesifik menyatakan “densitas energi”, hanya penamaan saja, bahwa spesifik berarti per massa.

2.1.5.8 Rapat Daya dan Daya spesifik

Rapat daya adalah banyaknya daya maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai dalam volume tertentu, satuannya adalah W/L. Kemudian, daya spesifik adalah daya maksimum baterai dalam massa tertentu, satuannya W/kg (Samhan, 2018). Rapat daya ini menjadi sebuah parameter yang sangat dipertimbangkan dalam memilih baterai untuk aplikasi seperti mobil listrik di mana daya merupakan parameter penting tetapi ukuran baterai juga tidak bisa terlalu besar.

2.1.6 Pengujian Baterai (*Charge Discharge*)

Baterai terdapat dua macam, yaitu baterai *fast charging* dan baterai biasa. Tujuan dari pengujian baterai ini diharapkan mendapatkan baterai dengan proses pengisiannya sebentar akan tetapi proses pengosongannya lama.

Pengujian *charge discharge* bertujuan untuk mengetahui berapa lama pemakaian dari baterai (*life cycle*). Alat yang digunakan untuk pengujian CD bermerek Battery Testing System. Pengisian baterai adalah melakukan proses *charge sampai* dengan kondisi mengembalikan 100% dari kapasitas Ah yang terpasang dengan arus mendekati 0A di mana titik terakhir *charge* sudah tidak efektif lagi karena perubahan arus kecil sekali dan memerlukan waktu yang panjang. Dalam proses *charge discharge*, *cycle* pertama dimulai dari proses

discharge dengan 100% kapasitas baterai sampai dengan batas kapasitas bawah (Widjonarko, 2012).

2.1.7 Rugi-Rugi Pada Baterai

2.1.7.1 Faktor Internal

Pengkonversian energi kimia menjadi energi listrik tidak dapat mencapai efisiensi 100%. Dalam kondisi discharging baterai kehilangan energinya karena proses polarisasi. Proses polarisasi dibagi menjadi :

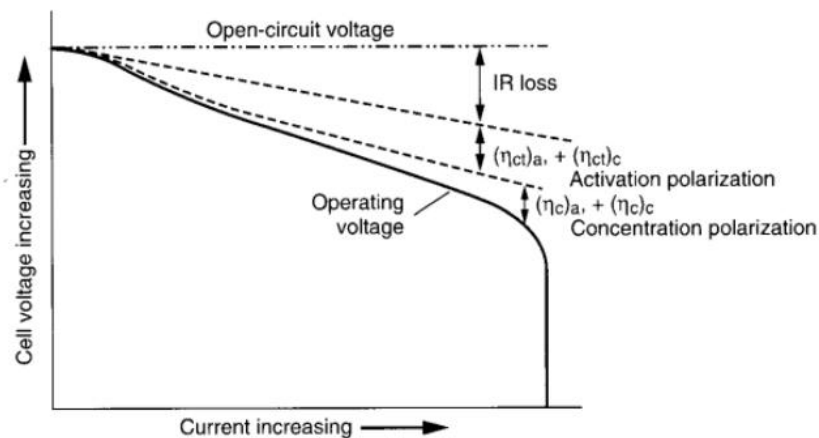
- a. Polarisasi aktivasi, yaitu polarisasi yang menyebabkan terjadinya proses elektrokimia pada permukaan elektroda.
- b. Polarisasi konsentrasi, yaitu polarisasi yang timbul karena perbedaan konsentrasi material yang bereaksi dan konsentrasi material hasil reaksi yang berada di bulk dan di permukaan elektroda akibat dari transfer massa.

Kedua polarisasi ini mengkonsumsi energi baterai dan menghasilkan panas. Faktor penting lainnya yang ikut mempengaruhi performa baterai adalah tahanan dalam/ internal impedance sel baterai. Tahanan ini menyebabkan penurunan tegangan/ voltage drop, biasanya disebut juga IR drop atau ohmic polarization. Besarnya IR drop tergantung pula pada arus listrik yang dikeluarkan melalui sirkuit luar. Total tahanan dalam dari suatu sel adalah jumlah dari tahanan ionik elektrolit, tahanan elektronik dari material aktif, pengumpul muatan/ *current collector* dan tahanan antarmuka/ interface antara material aktif dan *current*

collector. Saat sel baterai dihubungkan dengan suatu muatan, maka tegangan yang dihasilkan akan mengikuti persamaan dibawah ini:

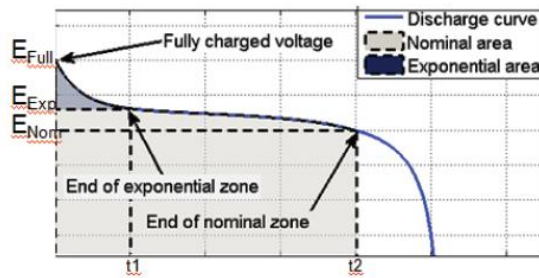
$$E = E_O - [(\eta_{ct})_a + (\eta_{ct})_c] - [(\eta_c)_a + (\eta_c)_c] - iR_i = iR \quad (2.4)$$

Dari persamaan diatas terlihat bahwa tegangan yang dapat digunakan oleh sel baterai tereduksi oleh fenomena polarisasi dan penurunan tegangan/ IR drop. Fenomena polarisasi dapat digambarkan seperti yang terlihat dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Polarisasi sel baterai sebagai fungsi arus listrik yang dihasilkan (Triwibowo, 2011)

Kurva discharge baterai ideal ditunjukkan pada gambar 2.10 dimana t_3 adalah kapasitas baterai pada saat kondisi penuh (satuannya A.h), t_2 adalah kapasitas baterai pada saat kondisi end of nominal zone (A.h), t_1 adalah kapasitas baterai saat kondisi end of exponential zone (A.h), E_{full} adalah tegangan discharge saat kondisi penuh (V), E_{nom} adalah tegangan discharge saat kondisi end of nominal zone (A.h), dan E_{exp} adalah tegangan baterai pada saat end of exponential zone.



Gambar 2.10 Model kurva ideal untuk discharge baterai

Walaupun energi yang dikandung sel baterai tergantung pada reaksi elektrokimia pada kedua elektrodanya, namun ada beberapa faktor lain yang turut mempengaruhi besar kecilnya atau cepat lambatnya reaksi transfer muatan, kecepatan difusi dan energi terbuang. Dibawah ini dituliskan beberapa faktor yang dapat memperbaiki performa sel baterai hingga didapat efisiensi yang tinggi dengan kehilangan energi yang minim:

- a. Pemilihan material elektrolit dengan konduktivitas yang tinggi
- b. Garam elektrolit dan pelarut harus memiliki kestabilan kimia yang baik untuk mencegah reaksi yang mungkin timbul dengan material elektroda
- c. Kecepatan reaksi pada elektroda yang tinggi sehingga polarisasi aktivasi dan *charge-transfer* tidak terlalu tinggi yang dapat menyebabkan baterai berhenti beroperasi.
- d. Reaktan dari sel baterai pada umumnya berasal dari elektroda. Produk dari reaksi elektrokimia harus berdifusi dari permukaan elektroda. Untuk itu diperlukan elektrolit yang cocok untuk memfasilitasi *charge-transfer* agar tidak terjadi penumpukan konsentrasi pada permukaan elektroda

- e. Material *current collector* harus sesuai dengan material elektroda dan elektrolit tanpa menimbulkan masalah korosi
- f. Untuk baterai sekunder selayaknya produk hasil reaksi tetap berada pada permukaan elektroda. Hal ini untuk memfasilitasi reaksi bolak-balik yang terjadi saat *charging* dan *discharging*.

2.1.7.2 Faktor External

Rugi-Rugi pada baterai tidak hanya disebabkan oleh faktor internal namun juga dipengaruhi oleh faktor diluar baterai seperti wiring. Kawat yang digunakan dalam wiring baterai idealnya mempunyai konduktivitas 100 % atau hambatannya 0. Namun setiap jenis kawat mempunyai hambatan jenis, dan resistansi suatu kawat sebanding dengan panjang kawat dan berbanding terbalik dengan luas penampang kawat atau mengikuti persamaan dibawah ini

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.5)$$

Dimana

R = Resistansi kawat

ρ = Hambatan jenis kawat

l = Panjang kawat

A = Luas Penampang kawat.

2.1.8 *Internal Resistance Baterai*

Tabel 2.2 Perbandingan resistansi internal baterai pada beberapa jenis baterai secara umum (Buchmann, 2011).

Jenis Baterai		Internal Resistance (mΩ)
Lead Acid		<100 12V pack
NiCd		100-200 6V pack
NiMH		200-300 6V pack
Li-ion	Cobalt	150-300 7.2 V
	Manganese	25-75 per cell
	phosphate	25-50 per cell

Resistansi internal bervariasi tergantung rata-rata kapasitas mAh, *wiring*, jumlah sel, serta ukuran dan design sel baterai.

2.1.9 *EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy)*

Hambatan listrik adalah kemampuan sirkuit menahan arus listrik. Hukum Ohm mendefinisikan hambatan sebagai perbandingan antara beda potensial dengan arus listrik. Hukum ini hanya berlaku untuk hambatan ideal, yang memenuhi :

1. Sesuai dengan hukum Ohm untuk berbagai potensial dan arus.
2. Nilai hambatan tidak tergantung pada frekuensi.
3. Sinyal arus dan potensial AC yang melewati hambatan sefasa.

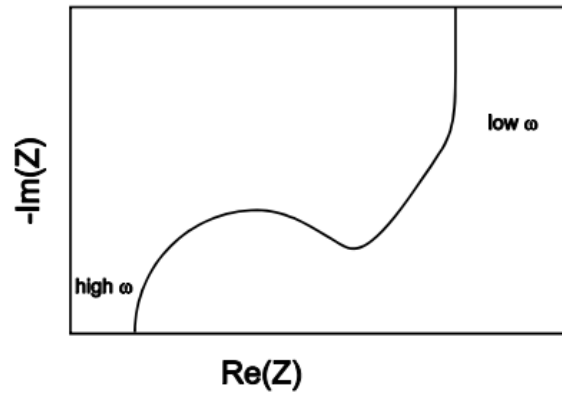
Namun dalam sistem elektrokimia nyata, hambatan yang berlaku tidaklah ideal, nilainya tergantung pada frekuensi. Maka pengukuran dilakukan dengan menggunakan sistem AC. Resistansi merupakan ratio antara tegangan dan arus pada sistem DC (*Direct Current*) sementara rasio antara tegangan/potensial dengan arus pada sistem AC (*Alternating Current*) disebut dengan Impedansi.

Prinsip pengukuran EIS adalah dengan menggunakan stimulus elektrik (potensial atau arus listrik) pada sistem dan mengukur responnya (kuat arus, potensial atau sinyal lainnya) pada frekuensi yang berbeda. Ketika sel diberi stimulus maka serangkaian proses mikroskopik terjadi yang meliputi transfer elektron sepanjang jalur konduksi, antara antarmuka elektrolit-elektroda, ataupun antar atom bermuatan dengan lingkungan sekitarnya (reduksi atau oksidasi). Laju elektron (arus listrik) bergantung pada hambatan elektroda, hambatan elektrolit dan reaksi antarmuka elektroda-elektrolit.

Sifat intrinsik yang berhubungan dengan konduktivitas sel elektrokimia yang dapat dipelajari dengan EIS dikategorikan menjadi 2 (dua) jenis.

1. Sifat yang berhubungan dengan bahan itu sendiri seperti konduktivitas, konstanta dielektrik, dan mobilitas muatan.
2. Sifat yang berhubungan dengan antarmuka elektroda-bahan yaitu konstanta laju reaksi adsorpsi, kapasitansi antarmuka, dan koefisien difusi.

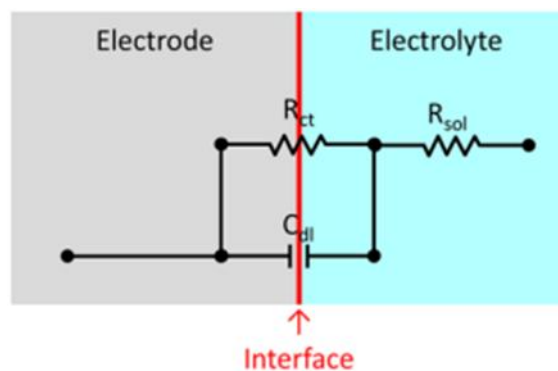
Hasil dari pengukuran EIS ditampilkan dalam Nyquist plot seperti tampak pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Grafik Nyquist Plot (Harrington, 2004)

Dimana garis sumbu x merupakan impedansi bagian real dan sumbu y bagian imajiner. Plot di sebelah kiri grafik merupakan keadaan pada saat frekuensi tinggi sedangkan yang dibagian sebelah kanan pada saat frekuensi rendah.

Keadaan didalam baterai bisa di ilustrasikan dalam gambar berikut



Gambar 2.12 Ilustrasi antarmuka elektroda dan elektrolit (Ogihara *et al.*, 2015)

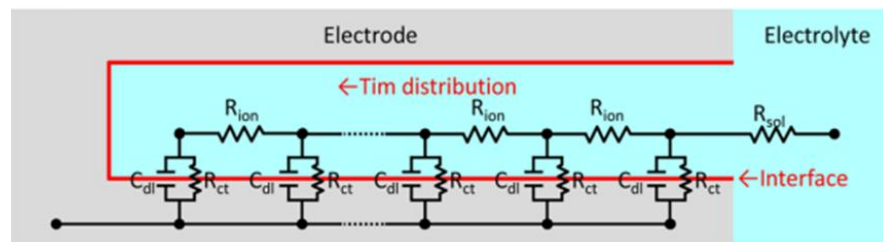
Gambar diatas merupakan ilustrasi antarmuka antara elektroda dan elektrolit terdapat beberapa parameter yaitu :

R_{sol} : Tahanan larutan elektrolit

R_{ct} : Tahanan Transfer muatan

C_{dl} : kapasitansi double layer

Karena elektroda nya berpori maka gambar antarmuka elektroda-elektrolitnya menjadi seperti dibawah ini

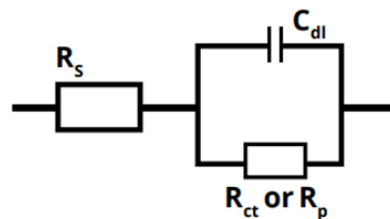


Gambar 2.13 Ilustrasi antarmuka elektroda berpori dengan elektrolit

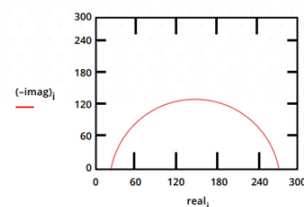
(Ogihara *et al.*, 2015)

Dengan ilustrasi gambar diatas Hasil EIS dapat dianalisa dengan mencocokkan data kedalam sebuah model sirkuit ekuivalen.

Model Randels sel adalah salah satu pemodelan sederhana dan banyak digunakan dalam pemodelan sel baterai.



(a)

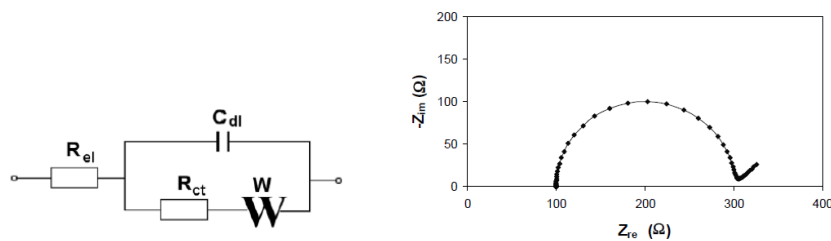


(b)

Gambar 2.14 (a) Model Sel Randle (b) Nyquist Plot dari Model Randle

(Instrument, 2014)

Dalam model randels sudah terdapat resistansi elektrolit, capacitor double layer dan resistansi charge transfer (atau resistansi polarisasi). Dalam gambar, kapasitor double layer paralel dengan resistansi charge transfer sedangkan resistansi elektrolit terhubung secara seri. Untuk menjadikan model ini lebih tepat dalam perhitungannya, model randles sederhana ini adalah sebagai titik awal permulaan untuk model yang lebih kompleks lagi.



Gambar 2.15 Randle sel dan grafik nyquist plot

Pada gambar 2.15 menunjukkan sel Randles dengan element warburg secara seri dengan Rct dengan rentang frekuensi 1 MHz sampai 1 mHz ($R_{el} = 100 \Omega$, $R_{ct} = 200 \Omega$, $C_{dl} = 0.0001 \text{ F}$, $= 5 \Omega s^{-1/2}$).

Beberapa parameter dalam perhitungan EIS yaitu :

- a. R_s (*Resistance Solution*) adalah tahanan larutan elektrolit, tiap elektrolit pada baterai memiliki tahanan tergantung pada jenis zat elektrolit yang dipakai

- b. R_{ct} (*Resistance Charge Transfer*) adalah Tahanan transfer muatan, dimana tahanan ini ada pada antarmuka elektrolit dan elektroda
- c. C_{dl} (*Capacitance Double Layer*) atau kapasitansi double layer
- d. Z_w (*Warburg Impedance*) adalah tahanan akibat dari difusi ion

Prinsip pengukuran EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*) yaitu dengan menggunakan stimulus elektrik (potensial atau arus listrik) pada sistem dan mengukur responsnya (kuat arus, potensial atau sinyal lainnya) pada frekuensi yang berbeda. Ketika sel diberi stimulus maka serangkaian proses mikroskopik terjadi yang meliputi transfer elektron sepanjang jalur konduksi, antara antarmuka elektrolit-elektroda, ataupun antar atom bermuatan dengan lingkungan sekitarnya (reduksi atau oksidasi). Laju elektron (arus listrik) bergantung pada hambatan elektroda, hambatan elektrolit dan reaksi antarmuka elektroda-elektrolit. Beberapa parameter dalam perhitungan EIS yaitu :

- a. R_s (*Resistance Solution*) adalah tahanan larutan elektrolit, tiap elektrolit pada baterai memiliki tahanan tergantung pada jenis zat elektrolit yang dipakai.
- b. R_{ct} (*Resistance Charge Transfer*) adalah Tahanan transfer muatan, dimana tahanan ini ada pada antarmuka elektrolit dan elektroda

2.1.10 Voltametri Siklik (*Cyclic Voltammetry*)

Voltametri siklik merupakan teknik analisis yang digunakan untuk memperoleh informasi kualitatif dari reaksi elektrokimia. Kelebihan teknik ini yaitu mampu memberikan informasi mengenai termodinamika dari proses

reduksi-oksidasi, kinetika reaksi transfer elektron, dan proses adsorpsi. Prinsip dasar teknik ini yaitu melihat hubungan antara potensial yang diberikan dan arus yang terukur.

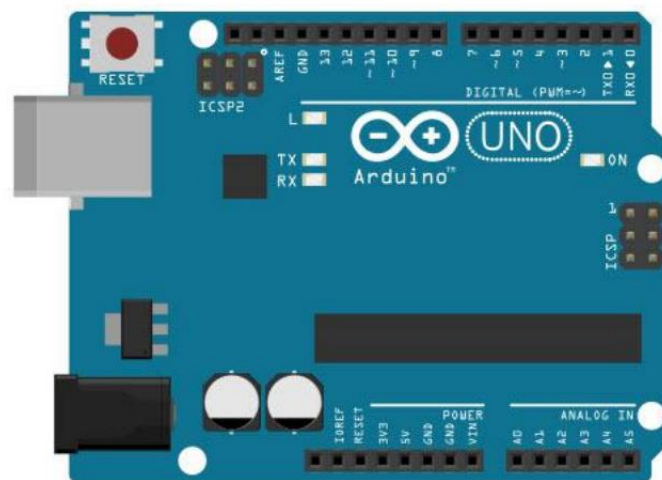
Pada teknik voltametri siklik, pengukuran arus listrik dilakukan dengan rentang potensial awal dan akhir yang sama. Potensial diberikan dalam suatu siklus antara dua nilai beda potensial, dengan potensial yang meningkat hingga maksimum kemudian turun secara linear dengan nilai kemiringan yang sama hingga kembali ke potensial awal dan dapat dibalik kembali setelah reaksi berlangsung. Oleh karena itu arus anodik dan katodik dapat terukur. Arus katodik merupakan arus yang digunakan pada saat penyapuan dari potensial terbesar menuju potensial terkecil. Sementara arus anodik merupakan penyapuan dari potensial terkecil menuju potensial terbesar.

2.2 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah komputer yang berukuran mikro dalam satu chip IC (integrated circuit) yang terdiri dari processor, memory, dan antarmuka yang bisa diprogram. Jadi disebut komputer mikro karena dalam IC atau chip mikrokontroller terdiri dari CPU, memory, dan I/O yang dapat dikontrol dengan memprogramnya. I/O juga sering disebut dengan GPIO (General Purpose Input Output Pins) yang berarti : pin yang bisa diprogram sebagai input atau output sesuai kebutuhan.

2.3 Arduino Uno

Board Arduino terdiri dari hardware / modul mikrokontroler yang siap pakai dan software IDE yang digunakan untuk memprogram arduino uno. Kelebihan dari Arduino yaitu tidak direpotkan dengan rangkaian minimum sistem dan programmer karena sudah built in dalam satu board. Oleh sebab itu bisa fokus ke pengembangan sistem.

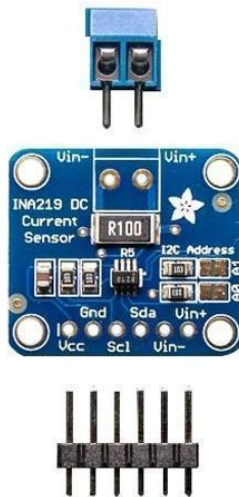


Gambar 2.16 Board arduino Uno (Santoso, 2015)

2.4 Sensor arus

Sensor arus yang digunakan adalah sensor arus INA219. Sensor INA219 merupakan modul sensor yang dapat memonitoring tegangan dan arus pada suatu rangkaian listrik. INA219 didukung dengan *interface* I2C atau SMBUS-COMPATIBLE dimana peralatan ini mampu memonitoring tegangan shunt dan suplai tegangan bus, dengan konversi program *times* dan *filtering*. INA 219 memiliki sebuah amplifier input maksimum adalah ± 320 mV ini berarti dapat mengukur arus hingga ± 3.2 A. Dengan internal data 12 bit ADC, resolusi pada

kisaran 3.2 A adalah 0.8 mA. Dengan *gain* internal yang ditetapkan pada minimum div8, maks saat ini adalah ± 400 mA dan resolusi 0.1 mA. INA 219 mengidentifikasi tegangan shunt pada bus 0-26 V.(Monda, Feriyonika and Rudati, 2018)



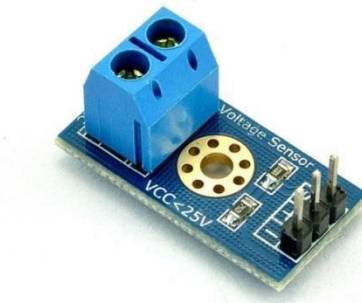
Gambar 2.17 sensor arus type INA 219

2.5 Sensor Tegangan

Sensor tegangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sensor tegangan DC dengan kemampuan untuk membaca besarnya tegangan maksimum 25 Volt. Sensor ini memiliki dua buah pin input + dan - yang dihubungkan pada tegangan yang akan diukur. Pin keluaran dari sensor ini adalah S, + dan - yang masing-masing dihubungkan pada tegangan +5V untuk +, ground untuk - dan S adalah output sensor berupa tegangan analog. Keluaran dari sensor ini akan dihubungkan ke variabel resistor untuk

mengatur sensitifitasnya, dan selanjutnya akan dihubungkan ke IC multiplexer CD4051.

Sensor tegangan DC menerapkan prinsip pembagi tegangan dengan dengan rumus hukum khirchof tentang tegangan.(Susanto, 2018)



Gambar 2.18 Sensor Tegangan

2.6 LCD (Liquid Cristal Display) 20x4 character

LCD (Liquid Cristal Display) adalah suatu display dari bahan cairan kristal yang pengoprasiannya menggunakan sistem dot matriks. LCD banyak digunakan sebagai display dari alat-alat elektronika seperti kalkulator, multimeter digital, Jam digital dan sebagainya.

LCD (Liquid Cristal Display) sudah dilengkapi perangkat pengontrol sendiri yang menyatu dengan LCD sehingga memudahkan dalam penggunaannya tinggal menyesuaikan data pin LCD tersebut dengan mikrokontroler.



Gambar 2.19 LCD dengan 20x4 character