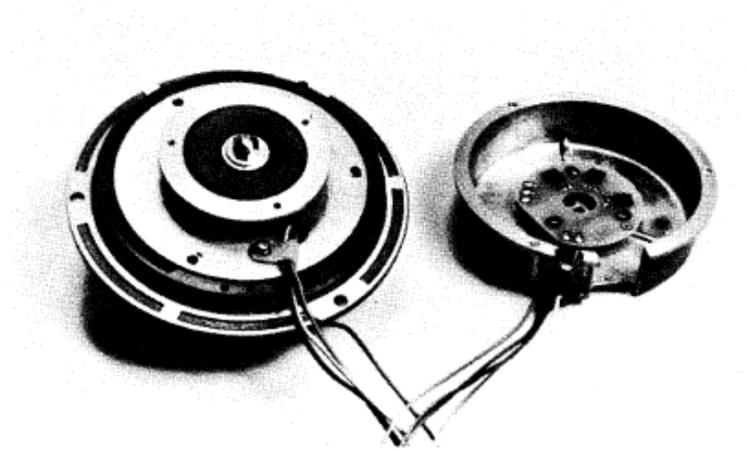


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengenalan BLDC Motor

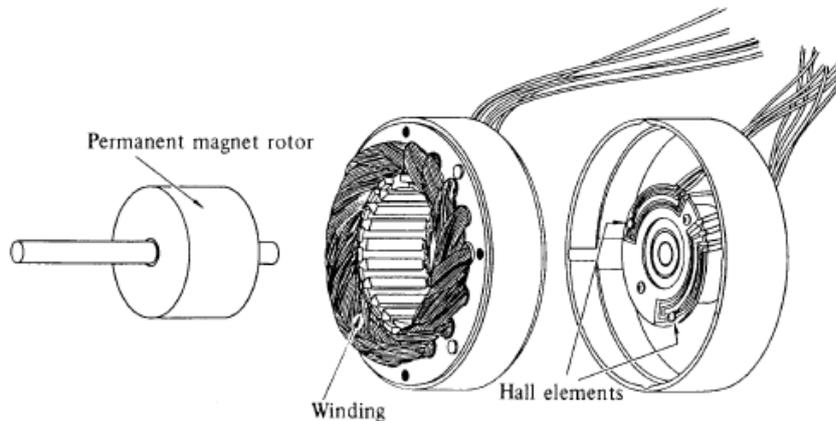


Gambar 2.1 Brushless DC motor tampak luar.

Sumber: Kenjo & Nagamori (1985,p.57).

Brushless DC motor atau biasa dikenal dengan BLDC motor (lihat Gambar 2.1 *Brushless DC motor tampak luar*) saat ini sedang sangat populer dikalangan masyarakat dikarenakan karakteristik torsi terhadap kecepatan yang lebih baik, *range* pengaturan kecepatan yang lebar, respon dinamik tinggi, torsi *starting* yang tinggi, efisiensi dan kehandalan tinggi, masa operasi lama (tidak ada erosi sikat), operasi tak bersuara, pengurangan interferensi elektromagnetik (EMI), rasio torsi terhadap ukuran motor tinggi, dll (Hamdi, 2015, p. 2). Kelebihan pada motor ini sendiri dikarenakan motor ini sudah menggunakan peralatan elektronik untuk pengganti komutasi pada motor DC konvensional biasa.

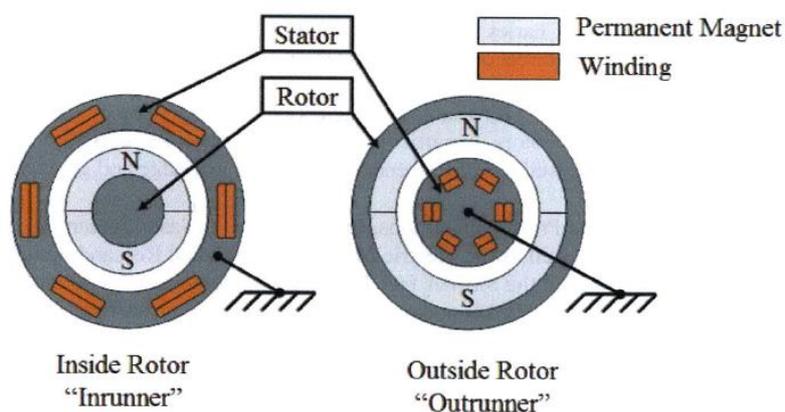
Dalam motor DC konvensional, jangkar adalah rotor, dan medan adalah stator. Pada *brushless DC motor* struktur ini sangat sulit untuk dibuat. Pembangunan modern *brushless DC motor* sangat mirip dengan motor AC, yang dikenal sebagai permanen magnet motor sinkron atau PMSM (lihat Gambar 2.2)



Gambar 2.2 Konstruksi per bagian BLDC motor : magnet permanen rotor, belitan, dan hall elemen.

Sumber: Kenjo & Nagamori (1985,p.57).

Motor BLDC secara umum terdiri dari dua jenis konstruksi yaitu *in-runner* dan *out-runner*, seperti terlihat pada Gambar 2.3. Pada konstruksi *in-runner*, rotor/magnet permanen terletak di sisi dalam sedangkan stator terletak di sisi bagian luar. Motor BLDC *in-runner* memiliki karakteristik kecepatan yang tinggi, torsi rendah, efisiensi lebih tinggi dari *out-runner*, lebih rentan rusak, dan menimbulkan suara bising. Sedangkan untuk konstruksi *out-runner*, bagian rotor/magnet permanen terletak di sisi luar dan stator terletak di bagian dalam. Motor BLDC *out-runner* memiliki karakteristik kecepatan yang rendah, torsi tinggi, mudah digunakan, dan motor lebih tenang (Victor, 2016, p. 9).



Gambar 2.3 Bentuk rotor dan stator motor BLDC *inrunner* dan *outrunner*.

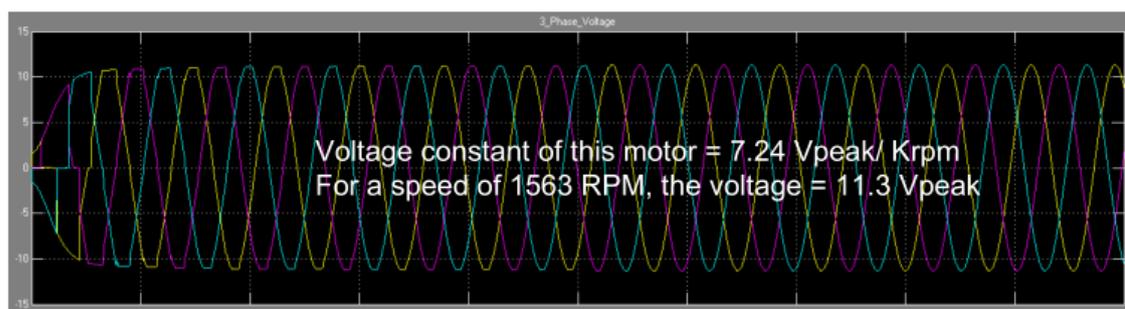
Sumber: Colton (2008,p.8).

2.2 BLDC Dioperasikan Sebagai Generator

Pengereman regeneratif adalah salah satu cara pengereman secara elektrik pada mesin listrik. Pengereman regeneratif dapat dilakukan dengan cara mengoperasikan

mesin sebagai generator. BLDC motor juga biasa disebut mesin sinkron magnet permanen, maka dari itu keluarannya-pun saat dioperasikan sebagai generator akan mirip dengan keluaran generator sinkron 3 fasa.

Saat mobil listrik melaju dengan kecepatan tertentu dan menginginkan kecepatan mobil turun, maka dibutuhkan suatu cara untuk membuang atau mengkonversikan energi kinetik sisa pada mobil saat melaju menjadi energi lain agar kecepatan mobil listrik turun. Metode yang biasa dipakai adalah dikonversi menjadi energi panas melalui kampas rem. Metode yang kedua adalah mengoperasikan mesin pada mobil listrik menjadi generator. Saat pedal gas diputus maka rangkaian catu akan *off* pada saat ini jika kondisi ideal motor akan bergerak dengan V konstan dan tidak berhenti tetapi secara tidak langsung akan terjadi perlambatan karena adanya gesekan roda dengan jalan namun jika hanya memanfaatkan gesekan dengan jalan saja maka waktu berhentinya akan lebih lama karena motor listrik tidak memiliki *engine braking*, saat rotor dari BLDC motor berputar (pedal gas dilepas), maka pada terminalnya akan timbul tegangan. Jika terminal tersebut diberi beban maka akan arus pada beban dan timbul torsi lawan pada mesin tersebut, kemudian mesin terasa seperti melakukan pengereman. Tegangan keluaran dari mesin ini dipengaruhi oleh putaran rotornya. Berikut ini contoh tegangan keluaran BLDC motor berputar pada 1563 rpm. Namun perlu diingat bahwa tidak bisa mode *motoring* dan regeneratif bekerja secara bersama-sama karena menggunakan satu mesin yang sama.



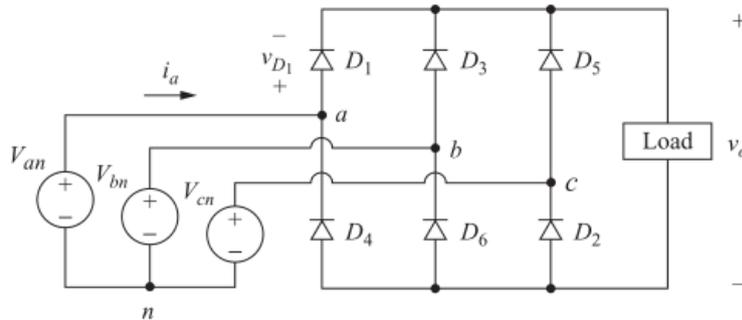
Gambar 2.4 Tegangan keluaran BLDC motor pada putaran 1563 rpm.

Sumber: Torres (2015,p.3).

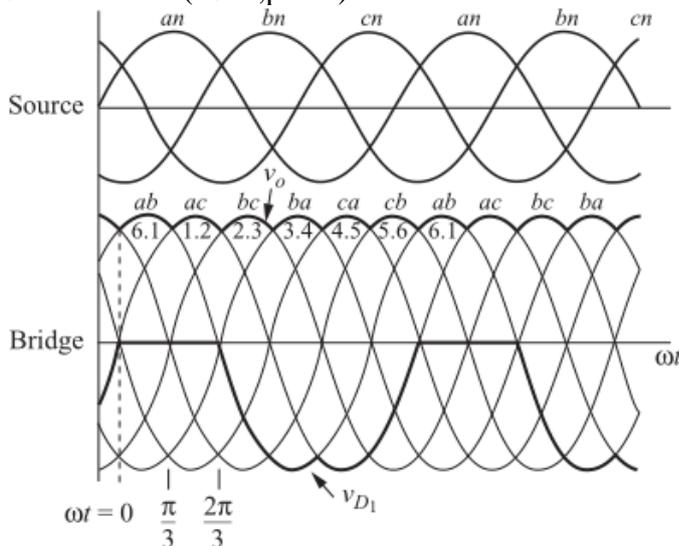
Energi yang dibangkitkan oleh mesin saat melakukan pengereman regeneratif akan disimpan pada *supercapacitor*. *Supercapacitor* menyimpan energi listrik dalam bentuk arus searah sedangkan keluaran dari mesin ini adalah arus bolak balik. Dengan demikian maka dibutuhkan konverter untuk mengubah gelombang arus bolak balik menjadi gelombang arus searah.

2.3 Penyearah Tiga Fasa Tak Terkontrol

Penyearah dibagi menjadi 2 yaitu penyearah tak terkontrol dan penyearah terkontrol. Penyearah tak terkontrol menggunakan dioda sebagai penyearah dan tegangan keluarannya hanya dipengaruhi oleh tegangan masukan.



Gambar 2.5 Rangkaian penyearah tiga fasa tak terkontrol.
Sumber: Hart (2011,p.144).



Gambar 2.6 Gelombang tegangan masukan dan keluaran penyearah tiga fasa tak terkontrol
Sumber: Hart (2011,p.144)

Penyearah tiga fasa tak terkontrol membutuhkan 6 dioda yang disusun seperti Gambar 2.5. Rangkaian ini mempunyai sifat bahwa dioda dengan nomor ganjil akan konduksi bila tegangan anodanya mempunyai harga yang paling tinggi dibandingkan dengan tegangan anoda dari komponen-komponen dengan nomor ganjil yang lain. Misalnya pada saat tegangan fasa a dalam keadaan paling tinggi dibandingkan dengan tegangan fasa b dan c, maka D1 konduksi. Sedangkan untuk dioda dengan nomor genap akan konduksi bila tegangan katodanya berada dalam keadaan paling rendah dibandingkan dengan tegangan katoda dari komponen-komponen dengan nomor genap yang lain. Jadi bila tegangan fasa b paling kecil dibandingkan dengan tegangan fasa b dan

c, maka D6 konduksi. Jadi pada prinsipnya pada rangkaian tersebut selalu ada dua dioda yang konduksi dalam waktu yang bersamaan.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, tegangan keluaran dari penyearah tiga fasa tak terkontrol hanya dipengaruhi oleh tegangan masukannya. Persamaan untuk menghitung tegangan keluarannya sebagai berikut:

$$V_{OAV} = \frac{3 V_{m,L-L}}{\pi} = 0,955 V_{m,L-L} = 2,3391 V_{L-N \text{ rms}} \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan:

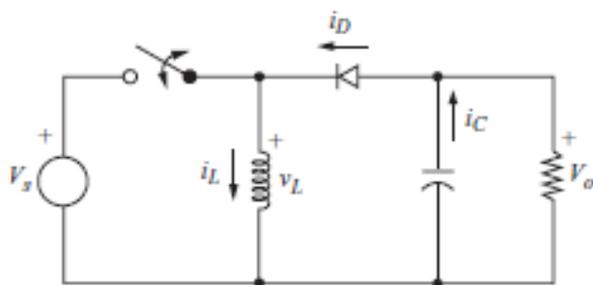
V_{OAV} = Tegangan keluaran rata-rata penyearah (volt)

$V_{m,L-L}$ = Tegangan masukan maksimal *line to line* penyearah (volt)

$V_{L-N \text{ rms}}$ = Tegangan masukan rms *line to neutral* (volt)

2.4 Buck-Boost Converter

Buck - boost converter adalah konverter elektronika daya dengan masukan tegangan DC dan keluaran tegangan DC dimana nilai tegangan keluarannya dapat lebih besar atau lebih kecil dari pada tegangan sumbernya. Konverter ini menggunakan induktor, dioda, kapasitor, dan MOSFET atau IGBT yang dirangkai seperti gambar berikut.



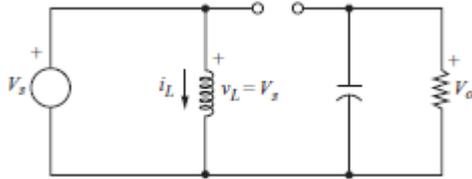
Gambar 2.7 Rangkaian *buck - boost converter*.

Sumber: Hart (2011,p.221).

Untuk memudahkan analisis, diasumsikan konverter ini:

1. Rangkaian beroperasi dalam keadaan tunak.
2. Arus induktor kontinyu.
3. Kapasitor cukup besar untuk mengeluarkan tegangan output konstan.
4. Saklar menutup selama DT dan membuka selama $(1-D)T$.
5. Komponen ini ideal.

D (*dutycycle*) adalah perbandingan dari periode *on* dibandingkan dengan periode *on* ditambah dengan *off* pada saklar.



Gambar 2.8 Rangkaian pada saat saklar tertutup.

Sumber: Hart (2011,p.221).

Analisis ketika saklar tertutup - Ketika saklar menutup, induktor akan mendapatkan arus dari sumber. Pada waktu yang sama kapasitor membuang muatan (*discharge*) dan menjadi sumber arus dan tegangan untuk beban. Tegangan pada induktor adalah

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \dots\dots\dots(2-2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \dots\dots\dots(2-3)$$

dengan:

V_L = Tegangan pada induktor *buck boost converter* (volt)

V_s = Tegangan sumber *buck boost converter* (volt)

L = Nilai induktor pada *buck boost converter* (henry)

Besarnya perubahan dari arus induktor konstan, menunjukkan bahwa pertambahan arus induktor naik secara linier. Perubahan arus induktor dihitung dari

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \dots\dots\dots(2-4)$$

dengan:

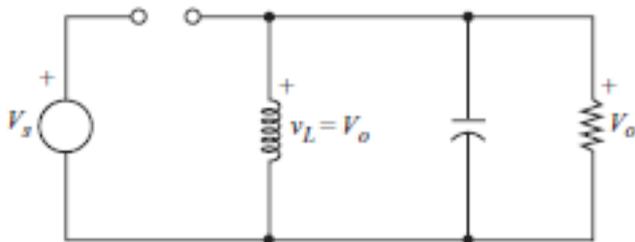
D = *Dutycycle*

T = Periode *switching* (sekon)

Δi_L = Perubahan arus pada induktor (A)

Dengan menyelesaikan persamaan diatas maka

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_s DT}{L} \dots\dots\dots(2-5)$$



Gambar 2.9 Rangkaian pada saat saklar terbuka.
 Sumber: Hart (2011,p.221).

Analisis ketika saklar terbuka - Ketika saklar terbuka, maka tegangan masukan akan terputus, sehingga tidak ada arus yang mengalir pada induktor, sedangkan diode akan dibias maju. Induktor akan menyuplai (*charge*) kapasitor dan beban sehingga ketika saklar ON, maka beban akan disuplai oleh kapasitor dan saat saklar OFF beban akan disuplai oleh induktor. Pada keadaan saklar terbuka, besar tegangan pada induktor adalah:

$$V_L = V_o = L \frac{di_L}{dt} \dots\dots\dots (2-6)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \dots\dots\dots (2-7)$$

Besarnya perubahan arus induktor konstan, jadi arus akan berubah secara linier saat saklar terbuka. Perubahan arus induktor saat saklar terbuka adalah

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_o}{L} \dots\dots\dots (2-8)$$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas maka

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{(V_o)(1-D)T}{L} \dots\dots\dots (2-9)$$

Untuk pengoperasian keadaan tunak, total arus induktor saat saklar tertutup dan terbuka adalah nol.

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \dots\dots\dots (2-10)$$

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{(V_o)(1-D)T}{L} = 0 \dots\dots\dots (2-11)$$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas, maka

$$V_o = -V_s \left(\frac{D}{1-D} \right) \dots\dots\dots (2-12)$$

Pada Persamaan 2-12 maka bisa diperoleh nilai *dutycycle* (D) yang besarnya

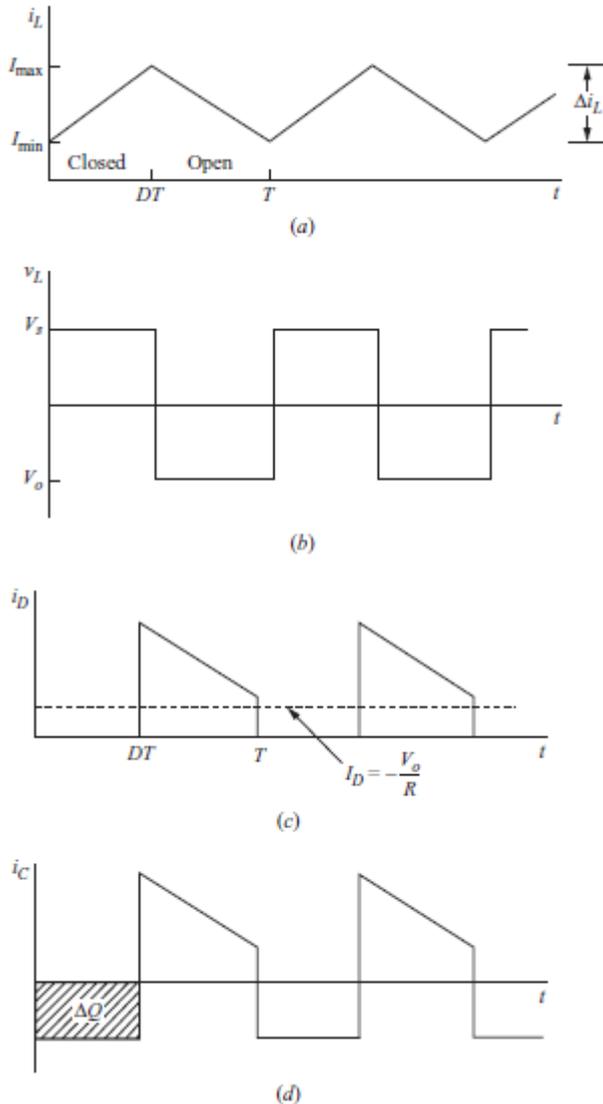
$$D = \frac{|V_o|}{V_s + |V_o|} \dots\dots\dots (2-13)$$

Sedangkan rumus untuk menentukan nilai induktor (L)

$$L = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \dots\dots\dots(2-14)$$

Untuk menentukan nilai kapasitor yang digunakan dengan rumus berikut

$$C = \frac{V_o.D}{\Delta V_o.R.f} \dots\dots\dots(2-15)$$



Gambar 2.10 Bentuk gelombang buck-boost converter (a) arus induktor (b) tegangan induktor (c) arus diode (d) arus kapasitor.

Sumber: Hart (2011,pp.223-224).

Pada gambar diatas arus induktor terlihat mengisi, ini terjadi pada siklus t_{on} (DT) dimana pengisian tampak linier dikarenakan induktor dianggap ideal, pada saat melepas t_{off} ($T-DT$) arus induktor berkurang secara linier nilai arus ini dirumuskan seperti persamaan 2.5 dan 2.9 masing – masing saat t_{on} t_{off} . Pada tegangan induktor saat t_{on} kondisi ideal maka akan sama dengan tegangan sumber sedangkan saat t_{off} maka sama tetapi negatif karena arah arus yang dipaksakan sama dengan arah dioda. Pada arus dioda akan

terisi pada saat t_{off} saja dan memiliki bentuk linier seperti arus induktor karena nilai arusnya memang sama satu *loop* sedangkan saat t_{on} dioda *open* sehingga tidak ada arus yang mengalir. Pada arus kapasitor saat t_{off} akan sama dengan arus dioda dan induktor sedangkan pada t_{on} ada muatan pengisian sebesar $\Delta Q = C \cdot V$.

2.5 Penyimpanan Energi Elektrik

Pada dasarnya energi listrik juga membutuhkan media penyimpanan, ada banyak macam media penyimpanan itu sendiri dengan karakter penyimpanan masing – masing, yang semuanya memiliki suatu kelebihan dan kekurangan pula. Pada penelitian ini media penyimpanan energi elektrik disimpan pada *supercapacitor* dikarenakan *supercapacitor* memiliki kelebihan paling penting dalam penelitian ini yakni mampu menyimpan energi dengan cepat.



Gambar 2.11 Supercapacitor 2,7 V / 360 F.

Sumber: dokumen penulis

Prinsip dasar cara kerja kapasitor itu sendiri adalah ketika tegangan listrik diberikan, muatan – muatan yang berlawanan akan terakumulasi pada permukaan elektroda, muatan ini dipisahkan oleh dielektrik yang mengisi ruang antar plat kapasitor, sehingga menghasilkan medan listrik yang menyebabkan kapasitor dapat menyimpan energi . Pada *supercapacitor* cara kerjanya sama dengan kapasitor biasa hanya saja luas area permukaan elektroda (A) dibuat lebih besar dan ketebalan bahan dielektrik dibuat jauh lebih tipis sehingga menurunkan jarak antar elektroda D (Riyanto, 2014, p. 6).

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{D} \dots \dots \dots (2-16)$$

Dengan :

ϵ_0 = permisivitas ruang vakum (C/(Vm))

ϵ_r = konstanta dielektrik isolasi elektroda

A = luas permukaan elektroda (m^2)

D = jarak antar muatan (elektroda) (m)

Energi yang tersimpan pada *supercapacitor* berbanding lurus dengan nilai kapasitansi (C)

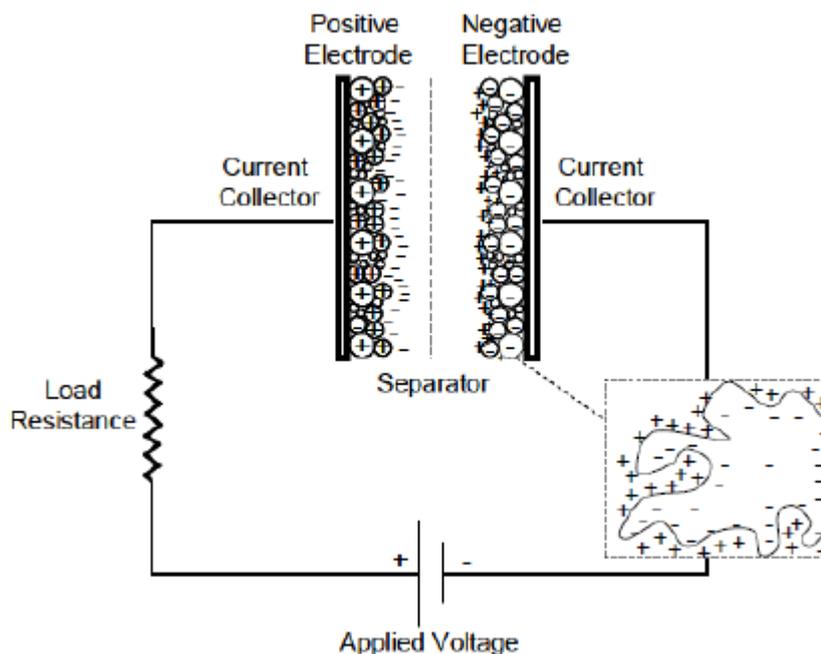
$$E = \frac{1}{2} CV^2 \dots \dots \dots (2-17)$$

Dengan :

E = Energi tersimpan pada kapasitor (Ws)

C = Kapasitas kapasitor (F)

V = Tegangan kapasitor (V)



Gambar 2.12 Skema *supercapacitor* tipe ELDC.

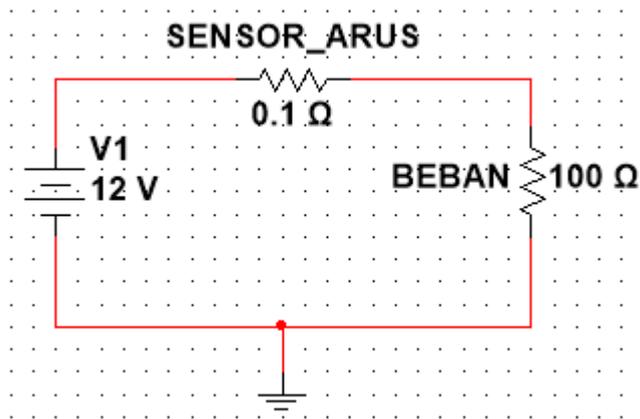
Sumber : Riyanto (2017,p.4).

Electrochemical double-layer capacitors, tersusun atas dua elektroda berbasis karbon, elektrolit dan pemisah seperti gambar diatas. ELDS memanfaatkan muatan elektrokimia *double-layer* untuk menyimpan energi. Bila tegangan diterapkan muatan terakumulasi pada permukaan elektroda. Ion - ion dalam larutan akan mengalir melalui separator ke pori – pori elektroda. Ion ini akan pecah dan berikatan dengan elektroda membentuk *double - layer* yang seperti pada gambar diatas (kanan bawah), *double - layer* ini akan semakin banyak seiring dengan penambahan energi.

2.6 Sensor Arus

Sensor arus adalah suatu sensor yang merubah besaran arus menjadi besaran tegangan. Sensor arus didalamnya menggunakan resistor yang dipasang seri dengan jalur yang ingin diukur besar arusnya. Namun besar resistansi yang dipasang seri diharapkan

sekecil mungkin agar tidak membuang daya terlalu besar. Dengan persamaan $P= I^2.R$, maka dapat disimpulkan semakin besar resistansi yang digunakan, maka daya yang terbuang melalui resistor tersebut akan terbuang.



Gambar 2.13 Sensor arus sederhana.

Sumber : Hariyanto (2015,p.18).

Dengan rangkaian sederhana diatas maka dapat disimpulkan saat ada arus yang melewati resistor $0,1 \Omega$ akan keluar tegangan sebesar $V = R.I = 0,1 \cdot 0,12 = 0,012 \text{ V}$. Rugi-rugi daya pada resistor tersebut adalah $P = I^2.R = (0,12)^2 \cdot 0,1 = 0,00144 \text{ watt}$. Semakin kecil nilai resistor yang digunakan untuk sensor, semakin kecil rugi-rugi dan juga semakin kecil nilai tegangan yang keluar pada resistor tersebut.

2.7 Arduino Uno R3

Pada penelitian ini digunakan adruino Uno R3 dikarenakan disini dibutuhkan kontroler untuk mengatur keseluruhan *block diagram*, mulai dari *input set point* sampai *actuator* berupa *dutycycle*, juga diperlukan untuk membaca nilai sensor arus yang berupa tegangan kemudian digunakan perhitungan sensitivitas sehingga menjadi nilai arus dan proses pengontrolan lainnya. Teknik PWM (*pulse wide modulation*) juga digunakan dalam penelitian ini teknik ini yaitu dengan melakukan pensaklaran sesuai dengan *dutycycle* yang diinginkan agar memperoleh tegangan yang di inginkan baik lebih besar atau lebih kecil dari masukannya.



Arduino Uno R3 Front

Arduino Uno R3 Back

Gambar 2.14 Aduino Uno R3.

Sumber : Data Sheet.

Gambar 2.14 merupakan modul Aduino Uno R3 , disana sudah dilengkapi sistem *clock*, *input - output* dan memori. Aduino Uno R3 merupakan sebuah *board* mikrokontroler berbasis ATmega328p. Modul ini memiliki 14 digital *input/output* dimana 6 digunakan untuk PWM *output* dan 6 digunakan sebagai analog *input*, 4 port serial, 16 MHz osilator Kristal, koneksi USB, *power jack*, ICISP *Header*, dan tombol *reset*. Memiliki *flash memory* sebesar 32 KB sangat cukup untuk menampung program yang banyak.

Aduino Uno R3 memiliki spesifikasi kerja sebagai berikut:

- *Operating 5V*.
- *Input Voltage* (rekomendasi) 7-12V.
- *Input Voltage* (batas) 6-20V.
- Digital I/O Pins 14 termasuk 6 pin *output* PWM Analog *Input* Pins 6.
- DC Current per I/O Pin 40 mA.
- DC Current for 3.3V Pin 50 mA.
- *Flash Memory* 32 KB, 0,5 KB digunakan oleh *bootloader*.
- SRAM 2 KB.
- EEPROM 1 KB *Clock Speed* 16 MHz.