

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Pada penelitian ini dilakukan studi literatur yang berupa pencarian buku-buku, artikel dan jurnal-jurnal dari penelitian terkait yang digunakan sebagai masukan dan ide untuk mengerjakan penelitian ini. Berdasarkan kajian pustaka-pustaka sebelumnya yang telah banyak dilakukan penelitian tentang perancangan generator dengan hasil-hasil yang sudah dipublikasikan sebagai berikut :

Penelitian tentang *Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machine and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial-Flux Machine*. Hasil penelitian yang dibuatnya menunjukkan bahwa mesin magnet permanen aksial fluks dengan konfigurasi satu rotor dua stator umumnya memiliki efisiensi lemah dari mesin magnet permanen radial-fluks jika untuk semua desain yang sama pemuatan listrik, *air-gap* fluks kerapatan dan kepadatan arus yang telah diterapkan. Disisi lain, mesin aksial-fluks yang biasanya lebih kecil dalam volume, terutama bila dibandingkan dengan mesin radial-fluks dimana rasio panjang (panjang aksial stator tumpukan vs celah udara diameter) adalah di bawah 0,5. Perbandingan Hasil juga menunjukkan bahwa mesin radial-flux dengan rendahnya jumlah pasangan kutub, $p < 4$, mengungguli mesin aksial-fluks (Pudji Irasari et al, 2016). Pada pengujian lain tentang *Design of a Direct-coupled Radial-Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbines*. Tujuan penelitian adalah untuk melakukan analisis dan desain menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) yang dimana data disain digunakan untuk mengoptimalkan bentuk dan kerapatan fluks magnet untuk *Permanent Magnet Generator* (PMG). Hasil dari percobaan ditampilkan dengan *prototype* PMG 400W/450 RPM. Generator mencapai efisiensi 92% dengan uji berbeban. Rotor dari PMG langsung dihubungkan ke turbin angin, sehingga kecepatan yang sesuai sangat tergantung pada kecepatan angin. Selanjutnya gabungan langsung PMG adalah yang paling cocok untuk generator hemat biaya karena menghilangkan kebutuhan untuk *gearbox* untuk turbin angin. Generator ini tidak perlu eksitasi terpisah untuk

bantalan utama turbin, efisiensi secara keseluruhan begitu tinggi dan keandalan dalam sistem secara keseluruhan dapat dicapai (Han & goleman, daniel; boyatzis, Richard; Mckee, 2019).

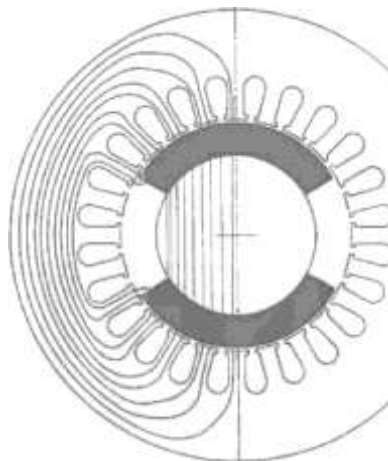
Penelitian tentang desain generator magnet permanen kecepatan rendah untuk pembangkit listrik tenaga bayu atau angin. Tujuan utama pada penelitian ini adalah rancangan khusus generator magnet permanen tiga fasa yang bekerja pada 1000 RPM untuk memanfaatkan *wind energy*. Hasil pengujian generator magnet permanen pada 1000 RPM menghasilkan tegangan keluaran 38 volt dan arus 114,1 mA antar fase. Pengukuran tegangan dan arus pada kecepatan 1000 RPM dengan fase nol mempunyai tegangan keluaran 20 volt dan arus 83,1 mA (Nuryadi, 2018). tentang simulasi dan analisis magnetik generator magnet permanen fluks radial menggunakan metode elemen hingga. Generator memiliki spesifikasi 25 V, 28 A, 3 fasa, 333 rpm. Fluks magnet yang dianalisis adalah pada celah udara, gigi dan alur stator untuk mengetahui pola distribusi dan fluktuasinya. Dari keseluruhan hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pola distribusi magnet yang disajikan oleh metode elemen hingga sangat membantu untuk menghindari penumpukan fluks magnet pada segmen tertentu. Selain itu kerapatan fluks celah udara (simulasi) sangat memudahkan dalam memprediksi besarnya Eph (Indriani, 2016).

Pada penelitian ini untuk menjaga kestabilan *charge* generator magnet permanen fluks radial diperlukan suatu alat yang mampu menjaga arus dan tegangan listrik agar tetap stabil (normal), arus yang stabil sangat dibutuhkan untuk berbagai peralatan elektronik. Oleh karena itulah dalam penelitian ini dipilih penstabil tegangan pada generator sinkron magnet permanen fluks radial sebagai cara agar tegangan dan arus yang dihasilkan akan jauh lebih stabil. MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) merupakan metode yang berguna dalam mengoptimalkan daya keluaran pada berbagai sumber pembangkit listrik. Pada generator sinkron magnet permanen fluks radial, MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) berfungsi sebagai pengoptimal daya keluaran pada generator sinkron magnet permanen fluks radial dengan mengaplikasikan converter daya elektronik.

2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron Magnet Permanen

Prinsip kerja generator sinkron dengan generator sinkron magnet permanen sesungguhnya tidak jauh berbeda pada umumnya. Penggunaan magnet permanen menghasilkan medan magnet yang tetap sehingga tidak memerlukan penguatan arus searah untuk menghasilkan medan magnet. Sedangkan fluks diperoleh dari magnet permanen yang telah diberikan perlakuan khusus sehingga arah garis-garis gaya magnet keluar dari kutub magnet secara radial atau axial. Generator ini juga memiliki konstruksi umum yang sama yaitu stator tempat yang memiliki kumparan stator sebagai tempat terjadinya induksi elektromagnetik, rotor tempat meletakkan magnet permanen sebagai sumber medan magnet, dan celah udara sebagai tempat mengalirnya fluks udara dari rotor ke stator.

Suatu alat penggerak utama (*prime mover*) dapat berupa turbin air, turbin uap/gas, ataupun turbin angin, diputar sampai pada kecepatan nominal yang dibutuhkan oleh generator. Putaran *prime mover* yang terhubung dengan poros rotor akan menggerakkan generator pada kecepatan nominalnya. Kemudian magnet permanen akan ikut berputar, seiring berputarnya rotor, magnet permanen sebagai penghasil medan magnet akan menyebabkan fluks magnet pada inti kutub rotor bersirkulasi di sekeliling rotor. Fluks magnet dari kutub rotor akan melewati celah udara dan mencapai permukaan stator serta kumparan yang dililitkan pada inti stator.



Gambar 2.1 Aliran Fluks Magnet Pada Desain Generator

Putaran rotor akan menyebabkan fluks magnet yang diterima oleh kumparan

stator untuk tiap fasa (dengan N lilitan) bersifat berubah terhadap waktu ($\frac{d\phi}{dt}$). Sesuai dengan hukum Induksi Faraday, tegangan akan terinduksi pada kumparan fasa stator sebesar:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

$$e = - \frac{d(N\phi)}{dt} \quad (2.2)$$

Keterangan :

e = Tegangan induksi (Volt)

N = Banyaknya lilitan

ϕ = Fluks magnet (Weber)

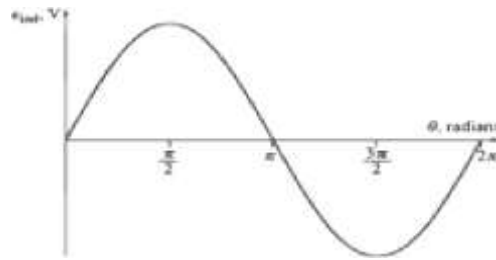
Tanda (-) merupakan hasil dari hukum Lenz yang menyatakan bahwa arah polaritas dari tegangan arus yang terinduksi pada kumparan akan menghasilkan arah fluks yang berlawanan dengan arah fluks yang menginduksikan tegangan tersebut. Sedangkan merupakan hasil perkalian dari banyaknya lilitan dengan besar fluks yang ditangkap tiap lilitan untuk suatu saat.

Penempatan kumparan pada stator menentukan tegangan keluaran dari generator. Tiap pasang kumparan pada stator akan memiliki sudut fasa tertentu sehingga jika kita menempatkan satu pasang kumparan saja, kita akan mendapatkan tegangan keluaran dengan satu fasa saja. Namun jika menempatkan tiga pasang kumparan pada stator dengan beda sudut 120° , maka akan diperoleh tegangan keluaran dengan fasa yang berbeda 120° juga.

$$e = - \frac{d(N\phi)}{dt} = - \frac{d(N\phi \cos(\omega t))}{dt} = N\phi\omega \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

$$e = Em \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

Saat sudut $\theta = \omega t$ berubah mulai dari 0° sampai 360° akan diperoleh perubahan besar tegangan terinduksi pada kumparan fasa (a) untuk setiap saat dalam satu putaran dalam bentuk satu siklus gelombang sinusoida, seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Perubahan Besar Tegangan Induksi Pada Fasa (a) Dalam 1 Putaran Penuh

Posisi kumparan fasa (b) dan fasa (c) tertinggal terhadap kumparan fasa (a) (jika dipandang dari arah putaran rotor) dengan ketertinggalan masing-masing sebesar 120° dan 240° . Sehingga persamaan tegangan induksi pada fasa (b) dan fasa (c) adalah :

$$e = Em \sin (\omega t - 120^\circ) \quad (2.5)$$

$$e = Em \sin (\omega t - 240^\circ) \quad (2.6)$$

Rumus tegangan puncak pada generator 3 fasa adalah:

$$Em = 2\pi \cdot f \cdot Nm \cdot \phi \quad (2.7)$$

Sedangkan untuk rumus tegangan rms (root mean square) atau tegangan efektif dari setiap fasa generator 3 fasa ini adalah:

$$Ea = \frac{Em}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

Ketika rotor berputar, medan magnet yang dihasilkan juga berputar dengan kecepatan yang sama. Karena medan magnet putar tersebut diinduksikan pada kumparan jangkar (stator), maka pada stator muncul tegangan induksi 3 fasa dengan frekuensi elektrik yang sama (sinkron). Frekuensi elektrik yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator adalah:

$$fe = \frac{p}{2} \cdot fm \quad (2.9)$$

Keterangan :

f_e = frekuensi elektrik generator (Hz)

f_m = frekuensi mekanik generator (Hz)

n = kecepatan putar generator (rpm)

p = jumlah kutub magnet

N_m = jumlah lilitan per fasa

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet maka persamaan di atas juga dapat digunakan untuk mencari hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada mesin 4 kutub, maka rotor harus berputar pada kecepatan 1500 rpm.

2.3 Konstruksi Generator Sinkron

Konstruksi generator sinkron terdiri atas beberapa komponen utama dan pendukung yaitu:

- a. Stator (Rangka, inti, slot dan gigi, kumparan)
- b. Rotor (Slip ring, kumparan, poros)
- c. Prime mover

2.2.1 Stator

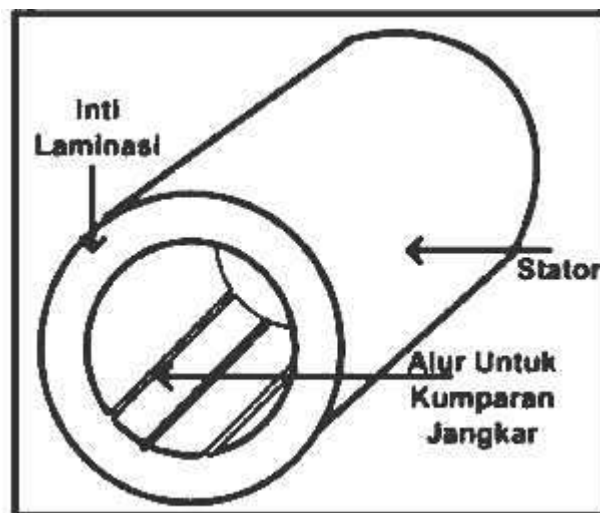
Stator atau armatur adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor yang mana arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armature. Komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder yang memiliki lilitan kawat konduktor yang sangat banyak dan armatur ini tidak bergerak. Oleh karena itu, komponen ini juga disebut dengan stator. Lilitan kawat konduktor pada armature generator dalam wye dan titik netral dihubungkan ke tanah. Lilitan dalam wye dipilih karena dapat:

1. Meningkatkan daya *output*.
2. Menghindari tegangan harmonik, sehingga tegangan *line* tetap sinusoidal dalam kondisi beban apapun.

Dalam lilitan wye tegangan harmonik ketiga masing-masing fasa saling

meniadakan, sedangkan dalam lilitan delta tegangan harmonik ditambahkan. Karena hubungan delta tertutup, sehingga membuat sirkulasi arus harmonik ketiga yang meningkatkan rugi-rugi (I^2R).

Stator dari mesin sinkron terbuat dari bahan ferromagnetik yang berbentuk laminasi untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar. Kualitas inti ferromagnetik yang baik akan memiliki permeabilitas dan resistivitas bahan tinggi. Gambar 2.2 memperlihatkan inti dan alur stator tempat kumparan jangkar.



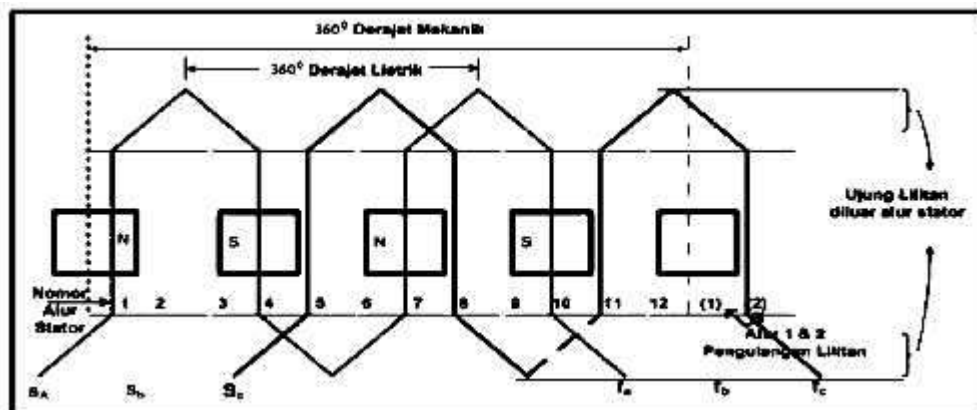
Gambar 2.3 Inti Stator dan Alur pada Stator
(Sunarlik, 2017)

Belitan jangkar (stator) yang umum digunakan oleh mesin sinkron tiga fasa terdiri atas dua tipe yaitu:

- a. Belitan satu lapis (*Single Layer Winding*).

Gambar 2.3 memperlihatkan belitan satu lapis karena hanya ada satu sisi lilitan di dalam masing-masing alur.

Dimana pada gambar ditunjukkan hubungan antara S dan F. Pada kumparan tiga fasa hubungan dimulai pada S_a , S_b , dan S_c dan berakhir di F_a , F_b , dan F_c yang disatukan dengan hubungan segitiga dan bintang.



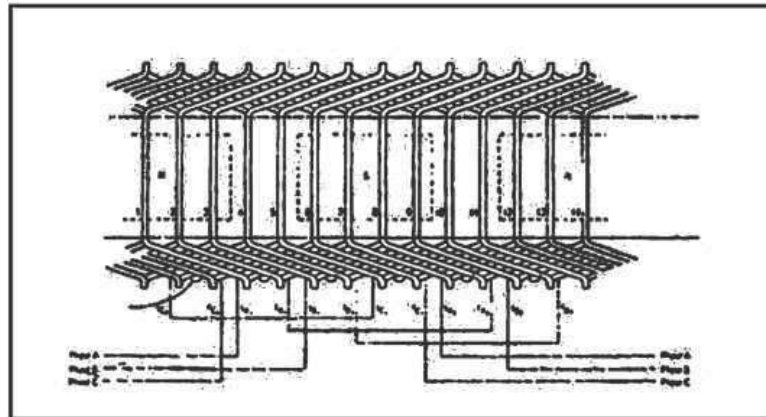
Gambar 2.4 Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Fasa
(hidayah, 2019)

b. Belitan berlapis ganda (*Double Layer Winding*).

Kumparan jangkar yang diperlihatkan pada hanya mempunyai satu lilitan per kutub per fasa, akibatnya masing-masing kumparan hanya dua lilitan secara seri. Bila alur-alur tidak terlalu lebar, masing-masing penghantar yang berada dalam alur akan membangkitkan tegangan yang sama. Masing-masing tegangan fasa akan sama untuk menghasilkan tegangan per penghantar dan jumlah total dari penghantar per fasa.

Dalam kenyataannya cara seperti ini tidak menghasilkan cara yang efektif dalam penggunaan inti stator, karena variasi kerapatan fluks dalam inti dan juga melokalisir pengaruh panas dalam daerah alur dan menimbulkan harmonik. Untuk mengatasi masalah ini, generator praktisnya mempunyai kumparan terdistribusi dalam beberapa alur per kutub per fasa.

Gambar 2.4 menunjukkan bagian dari sebuah kumparan jangkar pada belitan berlapis ganda generator sinkron tiga fasa yang banyak digunakan. Pada masing masing alur ada dua sisi lilitan yang memiliki lebih dari satu putaran. Bagian dari lilitan yang tidak terletak di dalam alur disebut dengan *winding overhang* dimana tidak ada tegangan dalam *winding overhang*.



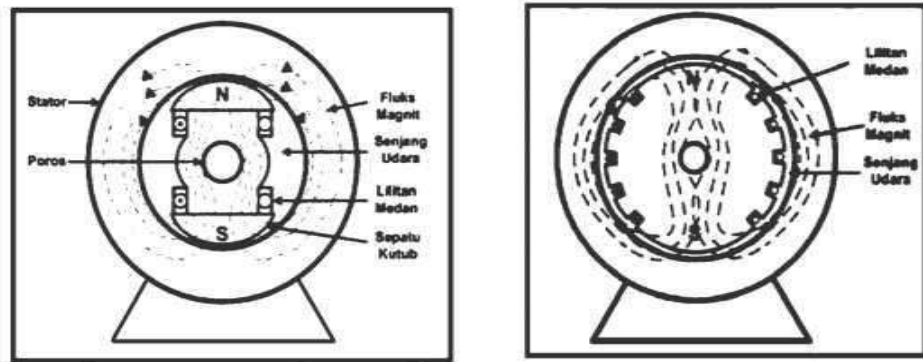
Gambar 2.5 Belitan Berlapis Ganda Generator Sinkron Tiga Fasa
(Atria Eka, 2014)

2.2.2 Rotor (Magnetic Field)

Rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet yang menghasilkan tegangan dan diinduksikan ke stator. Rotor pada generator sinkron terdiri atas:

- (1) Rotor berbentuk kutub sepatu (*salient pole*)
- (2) Rotor berbentuk kutub dengan celah udara sama rata (*cylindrical*)

Dimana perbedaan utama antara keduanya adalah turbin penggerakannya. *Salient pole rotor* digerakkan oleh turbin hidrolik putaran rendah sedangkan *cylindrical rotor* digerakkan oleh turbin uap dengan putaran tinggi. Sebagian besar turbin hidrolik harus berputar pada putaran rendah (50-300 rpm). *Salient pole rotor* dihubungkan langsung ke roda kincir dengan frekuensi yang diinginkan 60 Hz. Jumlah kutub yang dibutuhkan di rotor jenis ini sangat banyak dan membutuhkan diameter yang besar untuk membuat kutub yang sangat banyak tersebut. *Cylindrical rotor* lebih kecil dan efisien daripada turbin kecepatan rendah. Untuk 2 kutub dengan frekuensi 60 Hz putarannya adalah 3600 rpm, sementara pada 4 kutub putarannya adalah 1800 rpm. Bentuk rotor yang terdapat pada generator sinkron dapat dilihat pada Gambar 2.5. Dimana pada Gambar 2.5 terlihat bentuk rotor dengan kutub menonjol dan silinder (hidayah, 2019).

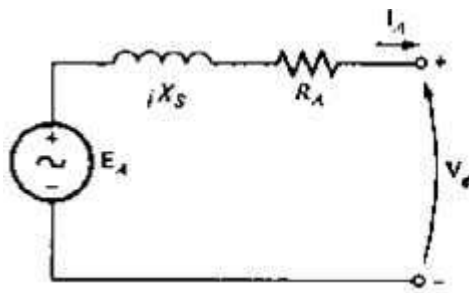


Gambar 2.6 (a) Rotor kutub menonjol (b) Rotor Silinder Gambar 2.5 Bentuk Rotor
(Sunarlik, 2017)

2.4 Menentukan Parameter-parameter Generator Sinkron

Parameter generator sinkron dibutuhkan untuk menggambarkan rangkaian ekivalen beserta karakteristiknya seperti Gambar 2.8. Parameter yang dibutuhkan untuk menggambarkan karakteristik generator sinkron dalam penulisan ini yaitu tahanan jangkar (R_a) dan reaktansi sinkron (X_s).

Nilai (R_a) dapat dihitung dengan melakukan pengujian tahanan jangkar dan kumparan jangkar dihubungkan pada sumber tegangan arus searah (dc) ketika mesin dalam keadaan diam lalu diukur besar arus yang mengalir pada kumparan jangkar.



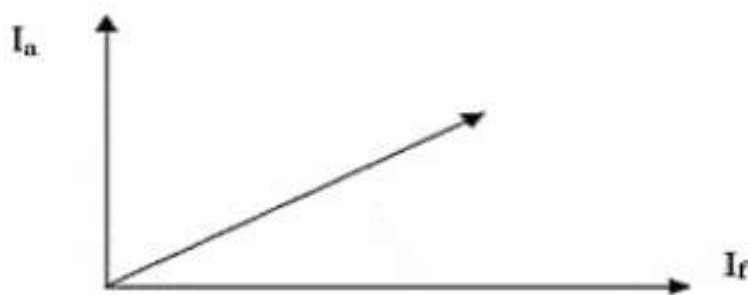
Gambar 2.7 Rangkaian ekivalen generator sinkron
(Armansyah, 2016)

Tahanan jangkar dapat dihitung menggunakan persamaan 2.10.

$$R_a = \frac{V_{dc}}{I_a}$$

$$\sqrt{R_a^2 + X_s^2} = \frac{E_a}{I_a} \quad (2.10)$$

Untuk mendapatkan nilai (X_s) dilakukan dengan percobaan tanpa beban dan percobaan hubung singkat. Pada pengujian tanpa beban, generator diputar pada kecepatan ratingnya sehingga didapat nilai $E_A = V_\phi$. Pada pengujian hubung singkat, mula-mula arus medan dibuat menjadi nol dan terminal jangkar dihubungkan singkat melalui amperemeter. Kemudian arus jangkar (I_a) diukur dengan mengubah arus eksitasi medan sehingga didapat hubungan antara arus jangkar (I_a) dan arus medan (I_f) yang berbentuk linear karena tidak adanya efek saturasi seperti Gambar 2.9.



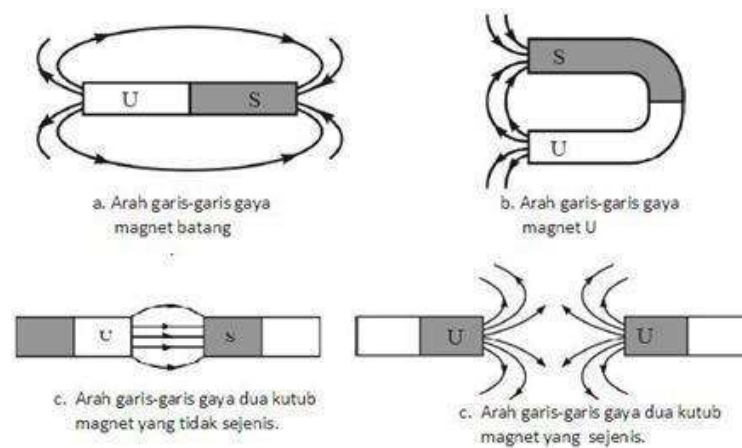
Gambar 2.8 Karakteristik Hubung Singkat Alternator
(Armansyah, 2016)

2.4.1 Konversi Garis Gaya Magnet (GGM) menjadi Gaya Gerak Listrik (GGL)

Konversi energi baik dari energi listrik menjadi energi mekanik atau sebaliknya yaitu dari energi mekanik menjadi energi listrik berlangsung melalui medium medan magnet. Energi yang akan diubah dari satu sistem ke sistem lainnya akan tersimpan sementara pada medium medan magnet kemudian dilepaskan menjadi energi sistem lainnya. Dengan demikian magnet selain berfungsi sebagai tempat penyimpanan energi juga sebagai medium untuk mengkopel proses perubahan energi.

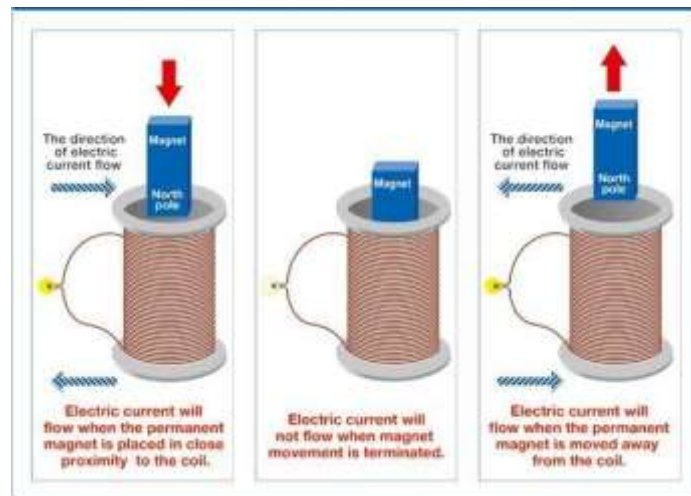
Seperti yang diketahui bahwa setiap magnet memiliki kutub magnet yang berlawanan yaitu kutub utara dan selatan. Sama halnya dengan muatan listrik, kutub yang senama apabila didekatkan akan terjadi tolak menolak dan kutub yang berlawanan jika didekatkan akan terjadi tarik menarik. Ketika terjadi tolak-menolak atau tarik-menarik tersebut terdapat daerah medan magnet diantara kutub

utara dan selatan. Medan magnet tersusun dari garis-garis yang keluar dari kutub utara menuju kutub selatan yang disebut garis gaya magnet (ggm), semakin kuat medan magnet maka semakin banyak pula garis gaya magnetnya. Jumlah garis gaya magnet yang keluar dari kutub utara magnet disebut fluks magnet yang disimbolkan Φ_m dengan satuan internasional Weber (Wb) dimana 1 Weber = 10^8 garis gaya magnet.



Gambar 2.9 Garis-Garis Gaya Magnet

Apabila garis gaya magnet (fluks) yang dihasilkan berubah-ubah terhadap waktu, maka suatu medan listrik akan dibangkitkan atau diinduksikan dan menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) induksi, hubungan ini dinyatakan oleh Hukum Faraday yaitu “*GGL induksi yang timbul antara ujung-ujung loop suatu penghantar berbanding lurus dengan laju perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh loop penghantar tersebut*”.



Gambar 2.10 Prinsip Timbulnya Gaya Gerak Listrik (GGL) Hukum Faraday

Hukum faraday menyatakan bahwa jika fluks melewati perubahan kumparan kawat, tegangan akan diinduksi pada pergantian kawat yang langsung sebanding dengan tingkat perubahan fluks sehubungan dengan waktu (Stephen J, 2005). Dari hukum faraday diatas dapat disimpulkan bahwa ketika medan magnet memotong suatu kumparan akan menghasilkan tegangan induksi begitu juga halnya sama ketika medan magnet dipotong oleh suatu kumparan. Dijelaskan pada persamaan sebagai berikut :

$$E_{in} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.11)$$

Dimana :

E_{in} = Tegangan Induksi (Volt)

N = Jumlah Lilian

$d\Phi$ = Perubahan Fluks Magnetik (Wb)

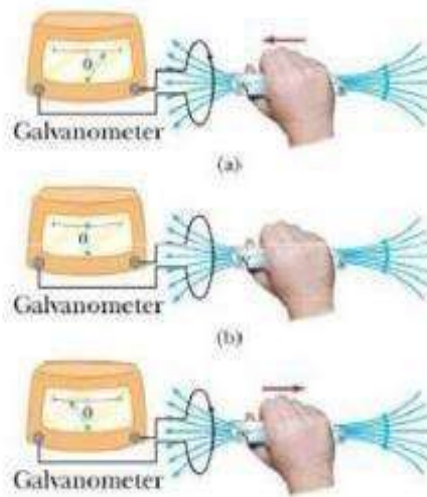
dt = Perubahan Waktu (detik)

Tegangan yang diinduksi pada putaran koil dan Φ ialah fluks yang melewati belokan. Jika kumparan memiliki N berubah dan jika fluks yang sama melewati semua.

2.4.2 Hukum Lenz

Fisikawan asal Rusia yang bernama Heinrich Friedrich Emil Lenz, mengemukakan suatu pernyataan sebagai berikut : “Arus induksi memiliki arah sedemikian rupa sehingga medan magnet akibat arus menentang perubahan fluks

magnet yang menginduksi arus” (Jearl Walker, 2014).

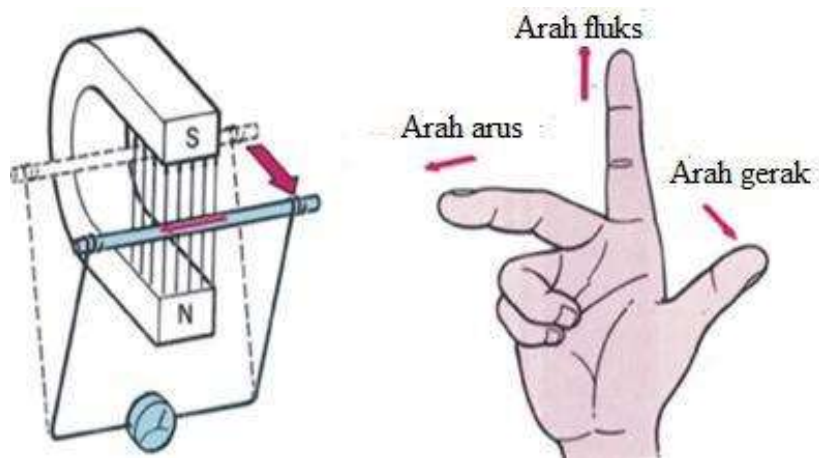


Gambar 2.11 Prinsip Hukum Lenz
(Amelia et al., 2017)

Pada dasarnya hukum lenz mengacu pada hukum faraday. Hukum faraday menjelaskan bahwa suatu medan magnet yang memotong suatu kumparan akan menghasilkan tegangan induksi pada ujung konduktor tersebut, tetapi pada hukum faraday tidak menjelaskan arah arus induksi. Pada hukum lenz ini menjelaskan tentang arah arus induksi yang menentang perubahan medan magnet awal yang menghasilkannya. Oleh sebab itu muncul tanda negatif pada rumus faraday yang menandakan arah gaya gerak listrik (GGL) induksi, tanda negatif pada rumus faraday bukan menyatakan suatu nilainya. Arus induksi yang muncul akan berlawanan arah dengan arah perubahan fluks yang menyebabkan arus induksi mengalir. Dengan kata lain, arah induksi menghasilkan medan magnet yang melawan arah perubahan fluks magnet (Amelia et al., 2017).

2.4.3 Aturan Tangan Kanan (Fleming)

Kaidah tangan kanan atau *Fleming* adalah sebuah metode untuk memudahkan menentukan arah vektor dari ketiga komponen hukum Faraday, yakni arah gaya gerak kumparan kawat, arah medan magnet, serta arah arus listrik (Stephen J, 2005).

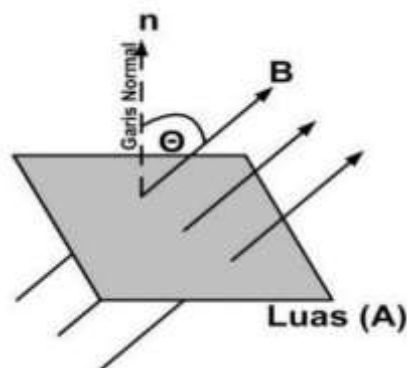


Gambar 2.12 Kaidah Tangan Kanan (Fleming)
(Jearl Walker, 2014)

Pada gambar 2.12 di atas ibu jari akan menunjukkan arah gaya, telunjuk menunjukkan arah medan magnet dan jari tengah menunjukkan arah arus listrik.

2.5 Fluks Magnet

Jika dalam suatu ruang terdapat medan magnet, jumlah garis gaya yang menembus permukaan dengan luas tertentu bisa berbeda-beda, tergantung pada kuat medan magnet dan sudut antara medan magnet dengan vektor permukaan. Fluks magnetik ialah jumlah garis gaya yang menembus suatu permukaan (Warsito et al., 2018). Fluks magnetik dilambangkan Φ (phi) dengan satuan Wb (Weber).



Gambar 2.13 Fluks Magnetik Menembus Bidang
(Emitor et al., 2005)

Kerapatan medan magnet yang dilambangkan (B) didefinisikan banyaknya

garis medan magnet yang menembus suatu bidang secara tegak lurus (yaitu 90° dari garis ke bidang yang ditembus) persatuan luas. Nilai fluks magnetik dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad (2.12)$$

Dengan :

Φ = Fluks magnet (Weber)

B = Medan magnet (Wb/m^2)

A = Luas bidang (m^2)

Tetapi persamaan di atas hanya berlaku untuk medan magnet yang tegak lurus pada gambar 2.3 diilustrasikan garis medan magnet pada garis normal, dan jika garis medan magnet tidak tegak lurus maka berlaku persamaan sebagai berikut:

$$\Phi = |B||A| \cos \theta \quad (2.13)$$

Dengan :

Φ = Fluks magnet (Weber)

B = Medan magnet (Wb/m^2)

A = Luas penampang (m^2)

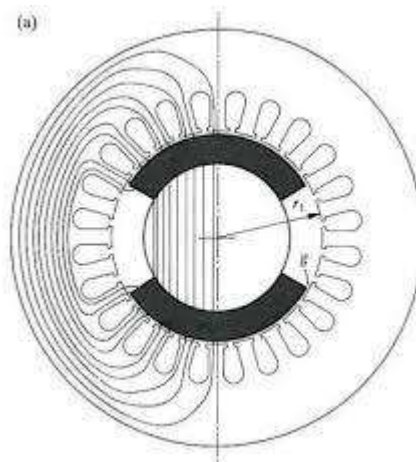
θ = Sudut antara garis-garis magnet dengan garis normal

2.6 Generator Magnet Permanen

Generator magnet permanen merupakan generator yang medan eksitasinya dihasilkan oleh magnet permanen bukan kumparan sehingga fluks magnetik ditimbulkan oleh medan magnet permanen (Fitriyani Hayono, 2020). Magnet permanen yang telah diberikan perlakuan khusus menghasilkan fluks sehingga arah garis-garis gaya magnet keluar dari kutub magnet secara radial atau axial. Generator ini memiliki konstruksi umum yaitu stator atau kumparan stator sebagai tempat terjadinya induksi elektromagnetik, rotor tempat tertanamnya magnet permanen sebagai sumber medan magnet, dan celah udara sebagai tempat mengalirnya fluks udara dari rotor ke stator.

Suatu alat penggerak utama (*prime mover*) dapat berupa turbin air, turbin uap/gas, ataupun turbin angin, diputar sampai pada kecepatan nominal yang dibutuhkan oleh generator. Putaran *prime mover* yang terhubung dengan poros rotor

akan menggerakkan generator pada kecepatan nominalnya. Kemudian magnet permanen akan ikut berputar seiring berputarnya rotor, magnet permanen sebagai penghasil medan magnet akan menyebabkan fluks magnet pada inti kutub rotor bersirkulasi di sekeliling rotor. Fluks magnet dari kutub rotor akan melewati celah udara dan mencapai permukaan stator serta kumparan yang dililitkan pada inti stator.

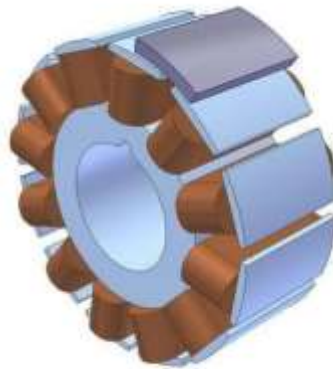


Gambar 2.14 Aliran Fluks Magnet Pada Desain Generator
(Wijaya et al., 2016)

Pada dasarnya generator magnet permanen dibedakan menjadi 2, yakni generator magnet permanen fluks radial (GMP) dan generator magnet permanen fluks aksial (GMP FA).

2.9.1 Generator magnet permanen fluks radial

Generator magnet permanen fluks radial adalah salah satu jenis mesin listrik yang dapat membangkitkan energi listrik yang menghasilkan arus bolak-balik (AC), generator ini biasa disebut dengan RFPM (*Radial Flux Permanent Magnet*) (Pramono et al., 2017). Generator ini membangkitkan medan magnet dari kutub magnet permanen yang terletak pada rotor sehingga tidak perlu pencatutan arus searah untuk membangkitkan garis-garis medan magnet. Generator magnet permanen fluks radial bisa beroperasi pada putaran rendah dan tinggi selain itu generator ini memiliki keunggulan mudah dalam pemasangan magnet permanen dan biasa dimanfaatkan pada pembangkit listrik.

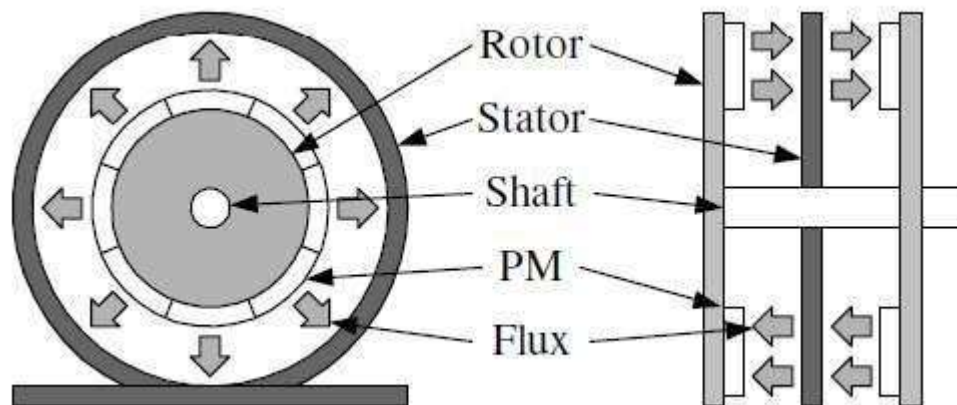


Gambar 2.15 Generator magnet permanen fluks radial
(Pramono et al., 2017)

2.9.2 Generator Magnet Permanen Fluks Aksial

Generator magnet permanen fluks aksial adalah generator sinkron yang menggunakan material magnet permanen sebagai pengganti kumparan medan pada rotor sehingga tidak diperlukan adanya pembangkit (*exciter*) dan sikat dengan arah aliran fluks secara tegak lurus (Alam et al., 2013). Generator *flux axial* mengubah energi mekanik menjadi energi elektrik dan memiliki aliran flux rotornya yang memotong stator secara tegak lurus atau axial. Untuk pemanfaatan pembangkit listrik di mana ukuran generator menjadi faktor yang sangat penting, generator fluks aksial sangat cocok untuk digunakan karena mempunyai ukuran diameter yang lebih kecil untuk daya yang sama dibandingkan generator lainnya.

Generator magnet permanen fluks aksial merupakan generator sederhana yang mampu bekerja pada putaran rendah (Alqodri et al., 2015). Kemudahan dalam pembuatan dan juga scale up generator magnet permanen sangat memudahkan dalam mendesain generator dengan kapasitas tertentu, tegangan tertentu dan kecepatan tertentu, dengan mengubah parameter seperti kekuatan fluks magnet, jumlah kumparan dan belitannya, jumlah magnet serta ukuran diameter kawat.



Gambar 2.16 Struktur generator fluks aksial
(Faza, 2012)

Bagian stator generator fluks aksial ini dapat dilihat dari berbagai macam variasi diantaranya adalah stator dengan inti besi berbentuk torus, stator tanpa inti besi, dan jumlah gulungan. Sedangkan rotor pada generator terdiri dari tatakan penyanggah magnet dan juga magnet permanen yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet permanen, magnet permanen direkatkan atau ditanamkan pada piringan plat (*disk*) agar kokoh dan tahan getaran pada saat dioperasikan (Tinjo, 2010). Semakin Besar luas permukaan permanent magnet yang digunakan, semakin banyak pula fluks magnetik yang dibangkitkan oleh magnet permanen tersebut dan menembus kumparan pada stator, sehingga gaya gerak listrik (GGL) induksi yang dibangkitkan juga semakin tinggi (Piggott, 2009).



Gambar 2.17 Bentuk generator fluks aksial
(Sitorus & Pramono, 2017)

Berbeda dengan generator-generator konvensional lainnya yang aliran fluksnya secara radial. Generator fluks aksial ini memiliki ukuran yang jauh lebih kecil yang biasanya dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga angin (Sitorus & Pramono, 2017).

Keuntungan dari generator flux axial dibandingkan dengan jenis generator lainnya di antaranya:

1. Mempunyai rotor yang pendek di sumbu axial, sehingga memiliki model mesin yang lebih sederhana dan lebih memiliki kekompakkan dalam kinerjanya.
2. Tingkat efisiensi lebih tinggi sebab menggunakan permanent magnetic, yang menyebabkan daya tidak hilang dalam putaran rotor.
3. Kepadatan kapasitas keluarannya tinggi dengan kapasitas yang lebih kecil.
4. Mempunyai struktur yang kuat dibanding generator lainnya seperti flux radial.

Generator flux axial juga bisa bila dirancang dengan berbagai macam variasi struktur jenis generator misalkan dimodifikasi jumlah stator dan juga bentuk statornya, jenis dan bentuk magnet permanen yang digunakan di rotor, jumlah kutubnya di rotor, dan efektif celah udara. Ini dilakukan agar memperoleh kekuatan dan efisiensi baik sesuai dengan yang dibutuhkan.

2.7 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Fluks Radial BLDC Motor

Generator adalah sebuah mesin konversi energi yang dapat mengubah energi gerak (mekanik) menjadi energi listrik (elektrik) dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Sumber energi mekanik yang menggerakkan generator tersebut bermacam-macam. Generator pada pembangkit listrik tenaga angin dihubungkan dengan turbin angin.

Salah satu jenis generator yang banyak digunakan untuk dikopel dengan turbin angin adalah *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Perbedaan dari generator biasa adalah sistem penguatan yang digunakan menggunakan magnet permanen bukan menggunakan kumparan. Magnet permanen yang diletakkan pada rotor yang berputar dengan stator yang diam untuk menghasilkan GGL induksi

sehingga menghasilkan listrik tanpa penggunaan catu daya DC sehingga tidak ada rugi-rugi eksitasi. Makna sinkron pada PMSG artinya frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut, bisa dilihat dari gelombang sinus yang dihasilkan menggunakan osiloskop (Fitrianda, 2016). Kemudian makna sinkron juga menunjukkan bahwa medan magnet putar antara stator dan rotor adalah sinkron (sama) sehingga tidak ada slip dan *fluks* yang dibangkitkan secara bersamaan antara stator dan rotor.

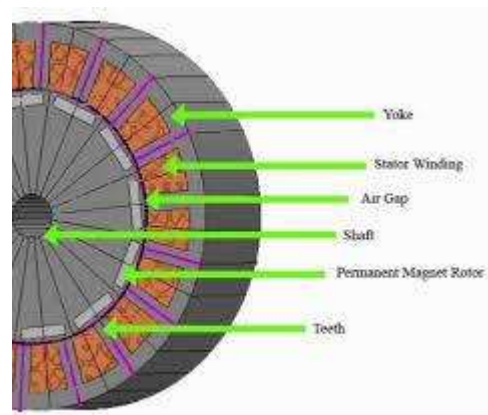


Gambar 2.18 *permanent magnet synchronous generator (PMSG)* (Fitrianda, 2016)

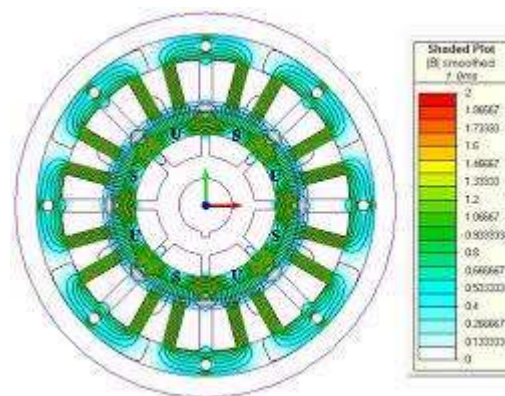
Permanent magnet synchronous generator (PMSG) banyak digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti mesin elektrik, pompa, kipas, kontrol katup, hingga peralatan industri. Tetapi untuk saat ini, pengembangan *permanent magnet synchronous generator* banyak diaplikasikan sebagai pembangkit energi listrik.

2.10.1 Konstruksi Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Fluks Radial BLDC Motor

Konstruksi generator sinkron magnet permanen sama dengan generator sinkron pada umumnya yakni terdapat stator dan rotor. Perbedaannya terdapat pada sumber eksitasi dimana generator sinkron magnet permanen menggunakan medan magnet permanen sebagai sumber eksitasi medan magnet yang menuju stator sehingga tidak ada rugi-rugi eksitasi.



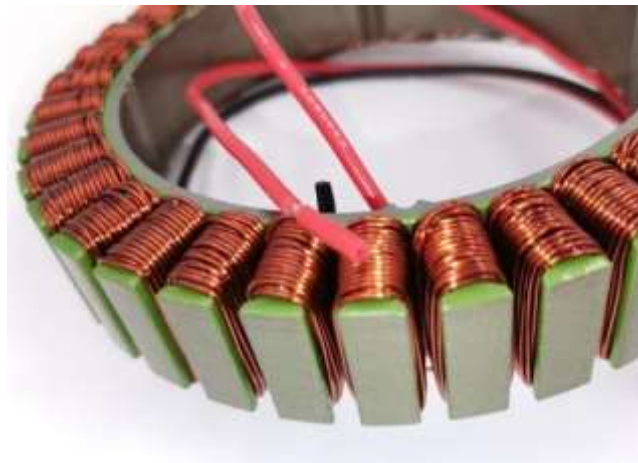
Gambar 2.19 Konstruksi Permanent Magnet Synchronous Generator
(Irfan & Hamzah, 2019)



Gambar 2.20 Medan Magnet pada Permanent Magnet Synchronous Generator
(Umami Irsyadul et al., 2018)

2.10.2 Stator Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Fluks Radial BLDC Motor

Stator merupakan bagian generator yang diam dan berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi fluks magnet dari magnet permanen yang melekat pada rotor. Stator juga sebagai tempat untuk menghasilkan arus listrik yang menuju ke beban. Stator berbentuk sebuah rangka silinder yang memiliki lilitan kawat konduktor yang banyak.



Gambar 2.21 Bentuk Stator PMSG
(Faudi, 2018)

Pada stator terdapat beberapa bagian, yaitu:

- Rangka Stator

Rangka stator merupakan rangka luar dan berfungsi untuk menyokong struktur stator dan mempunyai kaki-kaki yang dipasang pada bagian pondasi. Rangka stator ini dibuat kokoh untuk mengatasi perubahan beban secara tiba-tiba

- Inti Stator

Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetic khusus terpasang ke rangka stator.

- Alur (slot) dan Gigi

Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup seperti pada gambar 2.21 berikut :



Gambar 2.22 Bentuk Alur Stator (Armature)
(Marsudi, 2016)

- Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi. Untuk menentukan jumlah kumparan dengan persamaan berikut:

$$N_s = p \frac{N_{ph}}{2} \quad (2.14)$$

Dimana :

N_s = Jumlah Kumparan

P = Jumlah Kutub

N_{ph} = Jumlah Fasa

2.10.3 Rotor Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Fluks Radial BLDC Motor

Rotor yaitu bagian yang berputar dalam suatu generator dimana tempat menyimpan magnet permanen. Kecepatan putar rotor mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan. Pada rotor terdapat jumlah kutub magnet yang akan mempengaruhi banyaknya putaran per menit yang harus bekerja untuk menimbulkan frekuensi yang diinginkan (Fajar, 2017).



Gambar 2.23 Rotor Generator Magnet Permanen Fluks Radial

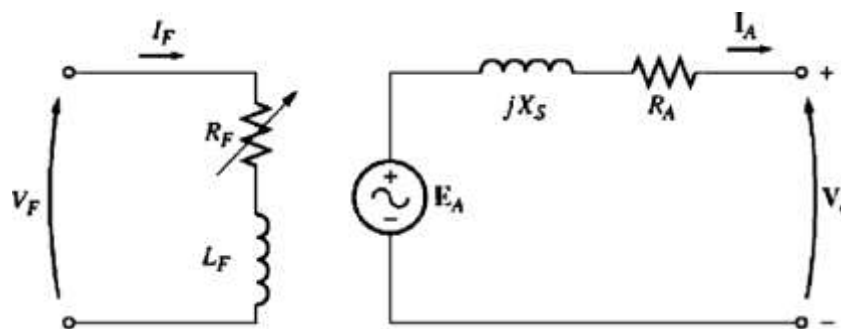
2.10.4 Celah Udara Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Fluks Radial BLDC Motor

Celah udara adalah celah antara stator dan rotor, celah udara inilah yang merupakan tempat berpindahnya fluks dari magnet permanen yang ada di rotor kemudian terinduksi pada kumparan stator. Celah udara ini sangat mempengaruhi terhadap penginduksian fluks magnet pada kumparan.

2.10.5 Prinsip Kerja Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Fluks Radial BLDC Motor

Prinsip kerja dari generator radial tidak terlalu berbeda dengan generator konvensional pada umumnya, penggunaan magnet permanen sebagai penghasil medan magnet sehingga tidak memerlukan sistem eksitasi untuk memasok arus searah untuk menghasilkan medan magnet seperti yang digunakan generator konvensional pada umumnya. Prinsip kerja generator adalah menurut hukum Faraday “Setiap perubahan medan magnet pada kumparan akan menyebabkan gaya gerak listrik (GGL) induksi yang sebanding dengan laju perubahan fluks”. Jadi

prinsip kerja generator ketika sebuah magnet diputar pada kecepatan yang konstan pada sebuah kumparan akan terinduksi tegangan, begitupun jika sebaliknya jika kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet maka akan terinduksi tegangan pada kumparan tersebut. Besarnya tegangan yang akan dibangkitkan akan meningkat sesuai dengan meningkat-nya medan magnet dan kecepatan gerak magnet. Selain itu, tegangan yang di bangkitkan juga bertambah besar bila jumlah kumparannya ditambah.



Gambar 2.24 Rangkaian Ekivalen Generator
(Stephen J, 2005)

Tegangan induksi E_A dibangkitkan pada fasa generator sinkron. Tegangan ini biasanya tidak sama dengan tegangan yang muncul pada terminal generator. Tegangan induksi dan tegangan terminal bernilai sama ketika tidak ada arus jangkar pada mesin.

2.8 Parameter Generator

Parameter yang dimaksud disini adalah variabel-variabel atau konstanta yang terkandung dalam konsep pembangkitan energi listrik seperti frekuensi, GGL induksi, dan kerapatan fluks magnet.

2.11.1 Generator Pada Kondisi Tanpa Beban

Ketika sebuah medan magnet diputar dengan kecepatan konstan maka fluks magnet pada rotor terinduksi pada kumparan rotor yang besarnya E_a dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$E_A = C n s \Phi \quad (2.15)$$

Dengan :

C = Konstanta Mesin

n_s = Kecepatan sinkron (kecepatan rotor sama dengan kecepatan medan)

Φ = Fluks yang dihasilkan (Wb)

2.11.2 Generator Pada Kondisi Berbeban

Ketika generator diberi beban yang berubah ubah maka tegangan pada terminal ($V\Phi$) juga akan ikut berubah. Ada beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya perbedaan nilai antara tegangan induksi dan tegangan terminal, antara lain :

1. Reaktansi bocor jangkar.
2. Resistansi kumparan jangkar.
3. Terjadinya reaksi jangkar atau mengalirnya arus pada stator yang menyebabkan distorsi medan magnet pada celah udara.

Untuk efek reaksi jangkar dan induktansi sendiri kumparan jangkar digabungkan menjadi reaktansi tunggal, yang disebut reaktansi sinkron :

$$X_S = X + X_A \quad (2.16)$$

Dengan :

X_S = Reaktansi Sinkron (Ohm)

X = Reaktansi bocor jangkar

X_A = Reaksi jangkar

2.11.3 Tegangan Induksi Yang Dibangkitkan Generator

Besar tegangan induksi yang dibangkitkan oleh generator magnet permanen fluks aksial menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$E_{rms} = \frac{E_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \times N \times f \times \Phi_{maks} \times \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (2.17)$$

Dimana:

E_{rms} = Tegangan induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan per kumparan

f = Frekuensi (Hz)

Φ_{max} = Fluks magnet (Wb)

N_s = Jumlah kumparan

N_{ph} = Jumlah fasa

2.11.4 Arus Generator

Untuk mencari arus pada Generator dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini :

$$I = S.E_{rms} \quad (2.18)$$

Dengan :

I = Arus (Ampere)

S = Daya Semu (VA)

E_{rms} = Tegangan Induksi (Volt)

2.11.5 Daya Semu Generator

Untuk mencari daya semu dari generator dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$S = E_{rms}.I \quad (2.19)$$

Dengan :

S = Daya semu (VA)

E_{rms} = Tegangan induksi (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.11.6 Daya Aktif

Untuk mencari daya aktif atau daya output dari generator dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_{out} = E_{rms} .I.\cos\phi \quad (2.20)$$

Dengan :

P_{Out} = Daya aktif (Watt)

E_{rms} = Tegangan induksi (Volt)

I = Arus (Ampere)

$\cos\phi$ = Faktor daya

2.11.7 Daya Motor DC

Untuk mencari daya motor dc untuk menggerakan generator dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_{in}=V_{DC} \text{ motor DC motor} \quad (2.21)$$

Dengan :

P_{in} = Daya input (Watt)

VDC motor = Tegangan motor (Volt)

IDC motor = Arus motor (Arus)

2.11.8 Efisiensi

Untuk mencari efisiensi generator dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\eta = P_{Out} / P_{In} \times 100\% \quad (2.22)$$

Dengan :

η = Efisiensi

P_{Out} = Daya aktif (Watt)

P_{in} = Daya Input (Watt)

2.11.9 Frekuensi

Hubungan antara kecepatan putar dan frekuensi generator dapat dirumuskan pada persamaan berikut.

$$n = \frac{120 f}{p} \quad (2.23)$$

Keterangan:

n = Putaran (rpm)

f = Frekuensi (Hz)

p = Jumlah kutub magnet

2.11.10 Tegangan pada GGL induksi

Prinsip kerja generator dalam mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik adalah berdasarkan hukum faraday. Tegangan induksi yang dihasilkan oleh generator ini dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$N_a = N_r \times N_s / 2 \quad (2.24)$$

$$E = 2 \times \phi_{max} \times N_a \times N$$

$$E_{max} = E_{in} \times N_x$$

Keterangan:

E_{in} = Tegangan induksi (v)

ϕ_{max} = Fluks magnet (Wb)

N_a = Jumlah kumparan x Jumlah lilitan

N = Rotasi per sekon (rpm/s)

N_s = Jumlah lilitan/spull

N_r = Jumlah kumparan (spull)

N_{ph} = Jumlah phasa

N_s = Jumlah stage

2.11.11 Kerapatan Fluks Magnet

Fluks magnet maksimum atau nilai kerapatan fluks magnet maksimum dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$B_{max} = B_r \frac{l_m}{l_m + \delta} \quad (2.25)$$

Keterangan:

B_r = Kerapatan fluks (T)

L_m = Tinggi magnet (m)

δ = Lebar celah udara (m)

B_{max} = Fluks magnet maksimal (T)

2.11.12 Menentukan jumlah kutub rotor

$$f = \frac{p}{2} \times \frac{n}{60} \quad (2.26)$$

n = Kecepatan putar rotor (rpm)

p = Jumlah kutub rotor

f = frekuensi (Hz)

2.9 Magnet Permanen

Magnet permanen adalah suatu bahan yang dapat menghasilkan medan magnet yang besarnya tetap tanpa adanya pengaruh dari luar atau disebut magnet alam karena memiliki sifat kemagnetan yang tetap. Magnet permanen dibuat orang dalam berbagai bentuk dan dapat dibedakan menurut bentuknya menjadi :

- Magnet batang.
- Magnet ladam (sepatu kuda).
- Magnet jarum.

- Magnet silinder.
- Magnet lingkaran.

Medan magnet permanen dihasilkan dengan cara mengalirkan arus listrik atau digosok-gosokkan dengan magnet alam. Bila suatu bahan penghantar dialiri arus listrik, besarnya medan magnet yang dihasilkan tergantung pada besar arus listrik yang dialirkan. Medan magnet remanen yang digunakan dalam praktek kebanyakan dihasilkan oleh arus dalam kumparan yang berinti besi. Agar medan magnet yang dihasilkan cukup kuat, kumparan diisi dengan besi atau bahan sejenis besi dan sistem ini dinamakan *electromagnet*. Keuntungan elektromagnet adalah bahwa kemagnetannya dapat dibuat sangat kuat, tergantung dengan arus yang dialirkan. Dan kemagnetannya dapat dihilangkan dengan memutuskan arus listriknya.

2.12.1 Sifat – Sifat Magnet Permanen

Sifat – sifat kemagnetan permanen magnet (*hard ferrite*) dipengaruhi oleh kemurnian bahan, ukuran butir (*grain size*), dan orientasi kristal. Parameter kemagnetan juga dipengaruhi oleh temperatur. Koersivitas dan remanensi akan berkurang apabila temperaturnya mendekati temperatur *curie* (T_c) dan akan kehilangan sifat kemagnetannya.

1) Koersivitas

Koersivitas digunakan untuk membedakan *hard magnet* atau *soft magnet*. Semakin besar gaya koersivitasnya maka semakin keras sifat magnetnya. Bahan dengan koersivitas tinggi berarti tidak mudah hilang kemagnetannya. Tinggi koersivitas, juga disebut medan koersif, dari bahan feromagnetik. Koersivitas biasanya diukur dalam *Oersted* atau *ampere / meter* dan dilambangkan H_c .

2) Remanen

Remanen atau keterlambatan adalah sisa medan magnet B dalam proses magnetisasi pada saat medan magnet H dihilangkan, atau remanensi terjadi pada saat intensitas medan magnet H berharga nol dan medan magnet B menunjukkan harga tertentu. Bagaimanapun juga koersivitas sangat dipengaruhi oleh nilai remanensinya. Oleh karena itu besar nilai remanensi yang dikombinasikan dengan besar koersivitas pada magnet permanen menjadi

sangat penting.

3) Temperatur Curie

Temperature *Currie c* dapat didefinisikan sebagai temperatur kritis dimana fase magnetik bertransisi dari konfigurasi struktur magnetik yang teratur menjadi tidak teratur. sifat magnet dan pengaruhnya terhadap temperatur *Curie* Dengan pensubstitusian ion *NI* dan *Co*. Dari hasil penelitiannya pada komposisi $x = 2,5$, sifat ferrimagnetik berubah menjadi paramagnetik dan nilai temperature *Currie*nya naik seiring naiknya komposisi substitusi Ti dan Co. Dimana untuk $x = 2,5$ temperatur *currie*nya adalah 692°C sedangkan pada $x=5$ temperatur *Currie*nya 730°C . Hal tersebut juga mempengaruhi penurunan nilai remanensinya.

4) Medan anisotropi (HA)

Medan anisotropi (HA), juga merupakan nilai intrinsik yang sangat penting dari magnet permanen karena nilai ini dapat didefinisikan sebagai koersivitas maksimum yang menunjukkan besar medan magnet luar yang diberikan dengan arah berlawanan untuk menghilangkan medan magnet permanen. Anisotropi magnet dapat muncul dari berbagai sebab seperti bentuk magnet, struktur kristal, efek stress, dan lain sebagainya (konsorsium magnet).

2.12.2 Sifat Kemagnetan Bahan

Sifat – sifat kemagnetan bahan pada material magnet dapat diklasifikasikan antara lain diamagnetik, paramagnetik, ferromagnetik, antiferromagnetik dan ferrimagnetik.

1) Ferromagnetik

Ferromagnetik merupakan bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik positif yang sangat tinggi. Dalam bahan ini sejumlah kecil medan magnet luar dapat menyebabkan derajat penyearahan yang tinggi pada momen dipol magnetik atomnya. Dalam beberapa kasus, penyearahan ini dapat bertahan sekalipun medan kemagnetannya telah hilang.

Hal ini terjadi karena momen dipol magnetik atom dari bahan – bahan ferromagnetik ini mengarahkan gaya – gaya yang kuat pada atom disebelahnya. Sehingga dalam daerah ruang yang sempit, momen ini

disearahkan satu sama lain sekalipun medan luarnya tidak ada lagi. Daerah ruang tempat momen dipol magnetik yang disearahkan ini disebut daerah magnetik. Dalam daerah ini, semua momen magnetik disearahkan, tetapi arah penyearahnya beragam dari daerah sehingga momen magnetik total dari kepingan mikroskopik bahan ferromagnetik ini adalah nol dalam keadaan normal.

2) Ferrimagnetik

Pada bahan yang bersifat dipol yang berdekatan memiliki arah yang berlawanan tetapi momen magnetiknya tidak sama besar. Bahan ferromagnetik memiliki nilai suseptibilitas tinggi tetapi lebih rendah dari bahan ferromagnetik, beberapa contoh dari bahan ferromagnetik adalah *ferrite* dan *magnetite*.

3) Paramagnetik

Bahan paramagnetik adalah bahan – bahan yang memiliki suseptibilitas magnetik X_m yang positif dan sangat kecil. Paramagnetik muncul dalam bahan yang atom – atomnya memiliki momen magnet permanen yang berinteraksi satu sama lain secara sangat lemah. Apabila tidak terdapat Medan magnet luar, momen magnetik ini akan berorientasi acak. Dengan adanya medan magnet luar, momen magnetik ini arahnya cenderung sejajar dengan medannya, tetapi ini dilawan oleh kecenderungan momen untuk berorientasi acak akibat gerakan termalnya. Perbandingan momen yang menyearahkan dengan medan ini bergantung pada kekuatan medan dan pada temperaturnya. Pada medan magnet luar yang kuat pada temperatur yang sangat rendah, hampir seluruh momen akan disearahkan dengan medannya.

Karakteristik dari bahan yang bersifat paramagnetik adalah memiliki momen magnet permanen yang akan cenderung menyerahkan diri sejajar dengan arah medan magnet dan harga suseptibilitas magnetiknya berbanding terbalik terbalik dengan suhu T adalah merupakan hukum *Curie*.

4) Diamagnetik

Bahan diamagnetik merupakan bahan yang memiliki nilai suseptibilitas negatif dan sangat kecil. Sifat diamagnetik ditemukan oleh Faraday pada tahun

1846 ketika sekeping *bismuth* ditolak oleh kedua kutub magnet, hal ini memperlihatkan bahwa medan induksi dari magnet tersebut menginduksi momen magnetik pada *bismuth* pada arah berlawanan dengan medan induksi pada magnet.

2.12.3 Magnet Permanen Neodymium

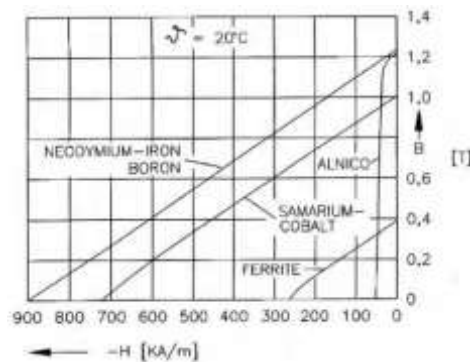
Magnet yang digunakan pada pembuatan generator fluks aksial tugas akhir ini adalah jenis permanent magnet jenis neodymium. Magnet NdFeB, merupakan sejenis magnet yang dibuat dari bahan campuran logam neodymium. Maka dari jenis magnet tersebut yang akan digunakan adalah jenis magnet neodymium (NdFeB).

Magnet permanen jenis ini memiliki nilai medan magnet dan kerapatan fluks magnet yang lebih besar dibandingkan jenis magnet permanen lainnya yaitu sebesar 1,2 tesla. Penggunaan jenis magnet permanen neodymium iron-boron (NdFeB) bertujuan untuk memperoleh nilai fluks magnet yang maksimal sehingga memperoleh tegangan induksi yang maksimal. Penentuan ukuran magnet permanen yang digunakan berdasarkan kemampuan peneliti dalam memperoleh magnet permanen tersebut.

Medan magnet yang dihasilkan pada rotor, merupakan medan magnet yang kuat dari magnet permanen NdFeb. Magnet permanen ini tidak memiliki kumparan penguat dan tidak menghasilkan disipasi daya elektrik. Magnet permanen NdFeb merupakan magnet yang bermaterial keras artinya material ferromagnetik yang memiliki hysteresis loop yang lebar. hysteresis loop yang lebar menunjukkan sedikitnya pengaruh induksi dari luar terhadap magnet tersebut.

Ada 3 jenis magnet yang sering dipakai di generator listrik, yaitu:

- a. Jenis Alnicos (Al, Ni, Co, Fe);
- b. Jenis Keramik (ferrite), seperti jenis Barium ferrite ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$);
- c. Rare earth material, seperti jenis samarium-cobalt (SmCo) dan magnet jenis neodymium-iron-boron (NdFeB).

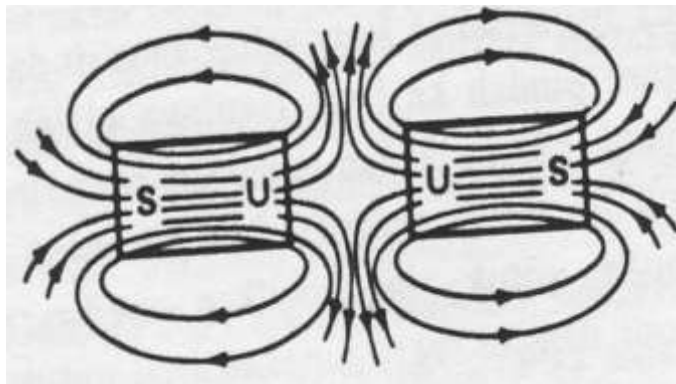


Gambar 2. 25 Kurva Magnetisasi Bahan Feromagnetik
(Anggraini & Oliver, 2019)

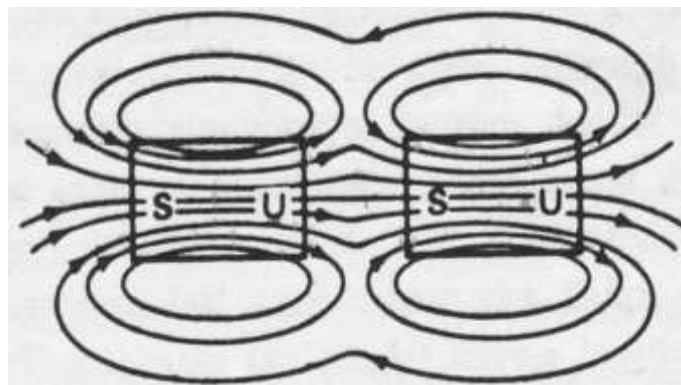
Pada gambar 2.25 kurva magnetisasi magnet permanen yang paling tinggi densitas fluks ialah Neodymium-Iron Boron. Magnet neodymium memiliki beberapa kelebihan dibandingkan jenis magnet yang lain, yaitu (Fajar, 2017):

1. Kekuatan medan magnet yang besar
2. Resistansi terhadap kehilangan daya magnetik
3. Kepadatan energi magnetik
4. Ketahanan terhadap suhu yang tinggi
5. Magnet neodymium tidak tahan terhadap korosi sehingga di-coating

Magnet memiliki arah fluks dari kutub utara ke kutub selatan, ketika kutub yang berbeda didekatkan maka akan saling Tarik-menarik, begitu sebaliknya jika kutub yang sama didekatkan maka akan saling tolak-menolak. Hal ini disebabkan garis-garis yang arahnya sama akan saling tolak-menolak diilustrasikan pada gambar 2.17 dan garis-garis yang mempunyai arah berlawanan akan saling tarik-menarik diilustrasikan pada gambar 2.18 (Asy & Ardiyatmoko, 2012).



Gambar 2.26 Garis-garis Gaya Magnet Tolak-Menolak
(Asy & Ardiyatmoko, 2012)



Gambar 2.27 Garis-garis Gaya Magnet Tarik
(Asy & Ardiyatmoko, 2012)

Untuk memperoleh nilai medan maksimum maka dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$B_{avg} = a_i \cdot B_{mg} \quad (2.27)$$

Dimana:

B_{avg} = Rata-rata kerapatan fluks di pusat celah udara

a_i = Rasio nilai rata-rata ke puncak kerapatan fluks magnetik ditengah celah udara

B_{mg} = Nilai puncak dari kerapatan fluks celah udara

$$B_{mg} = \frac{Br}{\frac{1}{fLKG} + \frac{Mr.g}{hm}} \quad (2.28)$$

Dimana :

B_{mg} = Nilai puncak dari kerapatan fluks celah udara

B_r = Kerapatan fluks remanen dari magnet

μ_r = Permeabilitas recoil relative magnet

g = Celah udara

f_{LKG} = Koefisien kebocoran

h_m = Tinggi magnet

Dan besarnya fluks per kutub magnet yang melalui suatu bidang dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

$$\Phi_p = B_{avg} \frac{\pi \cdot l_a}{p} (2R_0 - l_a) \quad (2.29)$$

Dimana :

Φ_p = Fluks per kutub (Wb)

B_{avg} = Rata-rata kerapatan fluks di pusat celah udara

l_a = Panjang magnet (m)

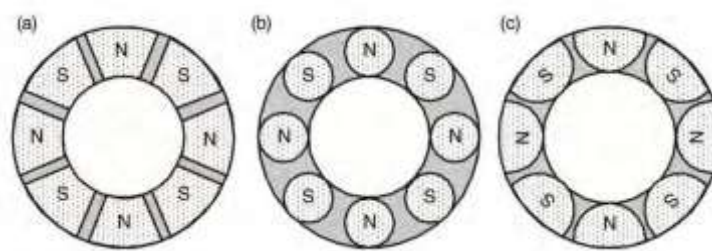
p = Jumlah kutub

R_0 = Radius luar magnet (m)

Berdasarkan dari gambar 2.24 kurva *Magnetisasi* di atas, dapat dilihat bahwa Bahan magnet neodymium menjadi jenis magnet yang paling baik daripada jenis magnet lainnya karena mempunyai densitas flux yang lebih besar daripada jenis magnet dari material yang lainnya. Akan tetapi jika untuk diimplementasikan di generator flux axial pada kecepatan putar yang tinggi, jenis magnet samarium-cobalt lebih optimal dari penggunaannya karena titik leburnya paling tinggi daripada neodymium. Tetapi untuk diimplementasikan saat kecepatan rendah neodymium lebih efektif untuk implementasinya daripada jenis magnet lainnya.

Selain itu, harga dari *neodymium-iron-boron* saat ini menjadi lebih terjangkau. Tetapi untuk implementasi generator fluks aksial pada putaran tinggi, *samarium-cobalt* lebih optimal pada penggunaannya dikarenakan titik leburnya lebih tinggi dibanding *neodymium-iron-boron*. Tetapi implementasi pada putaran rendah *neodymium-iron-boron* lebih efektif untuk diimplementasikan. Kurva magnetisasi dari ketiga bahan feromagnetik dapat dilihat pada gambar 2.18 (Anggraini & Oliver, 2019).

Magnet permanen yang sering dipakai di rotor generator flux axial sangat bervariasi bentuknya, seperti misalnya, trapezoidal, circular, dan square. Hal seperti ini harus menyesuaikan dengan cara pertimbangan atas tingkat efisiensi dari generator rotor, proporsi rotornya, serta tingkat kesulitannya dan tingkat ekonomis biaya produksi.



Gambar 2.28 Bentuk-bentuk kutub Magnet Permanen. (a) *Trapezoidal*, (b) *circular*, (c) *rectangular*
(Anggraini & Oliver, 2019)

2.10 Maximum Power Point Tracking

Maximum Power Point Tracking (MPPT) adalah sistem elektronik yang dioperasikan pada sebuah panel surya sehingga panel surya bisa menghasilkan power maksimum. MPPT adalah sebuah sistem elektronik yang bisa menelusuri titik power maksimum yang bisa dikeluarkan oleh sebuah panel surya.

Dengan kapasitas daya dan arus yang sama, controller jenis PWM umumnya lebih murah daripada jenis MPPT. Tegangan input dengan rentang yang tidak terlalu jauh dengan tegangan baterai/aki, contohnya di kontroler input 12-23 VDC untuk baterai 12V serta input 24-30 VDC untuk baterai 24V. Sedangkan jenis MPPT umumnya memiliki kelebihan, yaitu tegangan input yang tinggi untuk pengisian baterai baik 12V s/d 48V. Bahkan sebagian controller mampu melakukan pengisian hingga 60VDC.

Selain itu, MPPT mampu mengisi baterai lebih efektif dibandingkan PWM saat cuaca mendung. Hal itu disebabkan, karena MPPT mampu memanfaatkan kelebihan tegangan tersebut kemudian dikonversi sebagai arus yang tinggi ke baterai. Sedangkan di PWM saat cuaca mendung, meski tegangan tidak mengalami penurunan, tetapi arus jauh lebih kecil. Dengan kata lain, MPPT lebih efektif dan

lebih terjamin dalam melakukan pengisian dan ketersediaan arus untuk ke baterai.

2.11 Baterai/*accumulator*

Baterai/*accumulator* merupakan alat penyimpan energi listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi kimia dan sebaliknya. Baterai memiliki kelebihan yang dapat diisi ulang atau melalui proses *charging*. Menurut Rudolf Michael, *accumulator* merupakan sel listrik yang tempat berlangsung proses elektrokimia secara bolak-balik (*reversible*) dengan nilai efisiensi yang tinggi. Di dalam *akumulator* terjadi proses perubahan tenaga kimia menjadi tenaga listrik, dan sebaliknya tenaga listrik menjadi tenaga kimia dengan cara regenerasi dari elektroda yang dipakai. Yaitu, dengan melewati arus listrik dengan arah yang berlawanan di dalam sel-sel yang ada dalam *accumulator*. Saat pengisian, tenaga listrik dari luar diubah menjadi tenaga kimia lalu disimpan di dalam *accumulator*. Sedangkan saat penggunaan, tenaga kimia di dalam *accumulator* diubah lagi menjadi tenaga listrik yang digunakan untuk beban peralatan listrik. Dengan adanya proses tersebut *accumulator* sering dikenal dengan elemen primer dan sekunder. Untuk dapat melihat lebih jelas berikut adalah salah satu bentuk dari *accumulator*.

Baterai biasanya diklasifikasikan terhadap dua tipe, yakni baterai primer dan baterai sekunder. Baterai yang digunakan untuk pembangkit sel surya adalah baterai sekunder, artinya baterai yang dapat diisi dan dikosongkan secara berulang-ulang. Pada umumnya baterai yang digunakan untuk pembangkit tenaga surya adalah baterai *lead acid* dan baterai *nickel cadmium*. Dalam pemasangan suatu pembangkit tenaga surya biaya untuk pengadaan baterai ini biasanya hampir 10% dari biaya totalnya.

Ada beberapa tipe baterai yang dapat digunakan dalam sistem listrik surya, seperti baterai industrial, *lithium*, *air zinc*, *vanadium redoks*, hingga baterai hidrogen. Setiap jenis baterai tersebut memiliki tipe dan spesifikasi berbeda, sehingga model penggunaannya pun berbeda. Sekarang ini, tipe baterai *industrial lead acid* merupakan tipe yang paling sering digunakan. Baterai ini memanfaatkan Asam Timbal (*Lead Acid*) sebagai bahan kimianya. Dalam penggunaannya, tipe baterai ini memiliki batas ideal 80%. Sedangkan untuk tipe baterai *lithium*,

memiliki batas ideal 95-99%, yang berarti lithium dapat digunakan secara maksimal dibandingkan dengan baterai industrial. Walaupun lebih ideal, namun baterai lithium memiliki biaya yang masih lebih mahal dibandingkan baterai industrial. Sehingga penggunaan secara luas, masih belum cukup banyak.



Gambar 2.29 Lead Acid Battery

Meskipun baterai yang digunakan pada PLTS adalah tipe baterai sekunder, tetapi tidak semua baterai sekunder cocok untuk digunakan pada PLTS.

2.12 Inverter

Inverter merupakan suatu rangkaian elektronik yang dapat mengubah tegangan input DC menjadi output AC. Tegangan output yang berubah-ubah dapat diperoleh dengan mengubah-ubah tegangan input DC dan menjaga agar penyalan inverter tetap konstan. Sebaliknya jika tegangan input dibuat konstan maka tegangan output variabel dapat diubah-ubah penyalan dari inverter yang pada umumnya menggunakan modulasi lebar pulsa. Penyalan inverter dapat diperoleh dari perbandingan tegangan output AC dengan tegangan input DC.

Untuk kebutuhan listrik AC, listrik DC yang disimpan di baterai/aki diubah menjadi listrik AC menggunakan Inverter. Inverter mengkonversi tegangan DC 12-24 V dari baterai menjadi tegangan AC 220 V. Rangkaian kontrol digunakan untuk mendapatkan tegangan keluaran yang diinginkan. Rangkaian control berfungsi untuk mengatur frekuensi amplitudo gelombang keluaran. Supaya gelombang keluarannya dapat mendekati gelombang sinus, maka digunakan filter. Filter berfungsi untuk melewatkan frekuensi yang diharapkan saja.

Filter yang umum digunakan adalah filter jenis bandpass filter yang akan menangkal frekuensi rendah dan frekuensi tinggi yang tidak diinginkan pada

keluarannya. Inverter mode saklar adalah rangkaian utama dari sistem yang berfungsi untuk membalikkan tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik. Disebut mode saklar karena alat ini bekerja dengan menggunakan teknik *switching*. Keluaran dari inverter mode saklar ini masih berupa pulsa-pulsa berfrekuensi tinggi (frekuensi *switching*). Sementara rangkaian kontrol berfungsi untuk mengendalikan proses *switching* yang terjadi pada inverter mode saklar. Pengendalian ini akan menentukan bentuk gelombang, amplitudo gelombang, serta frekuensi gelombang keluaran pada sistem secara keseluruhan.



Gambar 2.30 Inverter DC to AC