BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan kajian pustaka-pustaka sebelumnya yang telah banyak dilakukan penelitian tentang perancangan generator dengan hasil-hasil yang sudah dipublikasikan sebagai berikut :

Putra (2014), telah melakukan penelitian tentang perancangan dan pembuatan generator fluks radial satu fasa menggunakan lilitan kawat sepeda motor dengan variasi diameter kawat. Penelitian ini bertujuan merancang dan membuat generator fluks radial satu fasa memanfaatkan stator dan magnet motor bekas. Penelitian ini melakukan pengujian menggunakan variasi diameter kawat yang berbeda yaitu 0,15 mm, 0,20 mm, dan 0,25 mm. Pengujian tanpa beban didapat tegangan sebesar 227,42 V untuk diameter kawat 0,15 mm, dan 228,71 untuk diameter kawat 0,25 mm. Stator dengan diameter kawat 0,15 mm mempunyai tahanan jangkar sebesar 357 Ω dan reaktansi sinkron sebesar 354,90 Ω sedangkan stator dengan diameter kawat 0,25 mm memiliki tahanan jangkar sebesar 196,47 Ω dan reaktansi sinkron sebesar 223,63 Ω.

Azka (2013), telah melakukan penelitian tentang analisis perancangan dan simulasi generator sinkron magnet permanen dengan rotor berlubang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa hasil desain generator sinkron magnet permanen dengan penambahan lubang udara pada rotor sebagai sistem pendingin. Penelitian ini menggunakan *software* FEMM. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fluks pada area celah udara, gigi, dan alur stator terdistribusi merata dan tidak megakibatkan panas serta sebaran fluks magnet tidak bocor kebagian inti poros. Tegangan induksi yang dihasilkan pada putaran 250 rpm dan frekuensi 50 Hz sebesar 264,23 V dengan efisiensi generator 62,37% untuk 24 kutub dan 12 slot. Sedangkan tegangan induksi pada kondisi tidak berlubang 226,48 V dengan efisiensi generator sebesar 55,04%.

Alqodri (2015), telah melakukan penelitian tentang rancang bangun generator fluks aksial putaran rendah magnet permanen jenis neodymium untuk turbin angin sumbu vertikal tipe *double-stage savonius*. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan generator yang cocok untuk turbin angin tipe *savonius* yang dapat berputar pada kecepatan rendah. Untuk memperbesar daya *output* maka dilakukan penggandaan generator yang akan dipasang pada turbin. Pada kecepetan putar rendah mampu

menghasilkan tegangan dan arus sekitar 0,079 V dan 0,079 A pada kecepatan putar 17,2 rpm, sedangkan menghasilkan 2 V dan 0,354 A pada kecepatan putar 500 rpm.

Anam (2017), telah melakukan penelitian tentang perancangan generator 100 W menggunakan *software* elektromagnet infolytica. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan generator 100 Watt. Dengan bantuan *software* magnet infolytica dapat dilakukan simulasi baik untuk diameter, material, ketebalan, jumlah lilitan, dan kecepatan putar generator sehingga melakukan pembuatan dapat mencapai keberhasilan yang tinggi. Adapun generator yang dirancang tipe radial fluks dengan 12 slot dan 8 *pole,* diameter 13 cm, ketebalan 5 cm serta menggunakan 12 lilitan diputar dengan kecepatan 100 rpm pada frekuensi 66,6667 Hz. Didapatkan hasil dari rancangan generator tanpa beban tegangan *output* sebesar 21,65 V dan arus 0 A, untuk rancangan generator berbeban didaptakan hasil tegangan sebesar 23,89 V dan arus 5 A.

Penelitian ini mengacu pada penelitian Anam (2017) Perbedaan penelitian ini dengan penelitian yang telah dilakukan adalah ada pada bentuk desain generator, jumlah slot dan *pole*, frekuensi yang akan disesuaikan dengan frekuensi yang digunakan di Indonesia yakni 50 Hz, dan daya *output* yang dihasilkan generator.

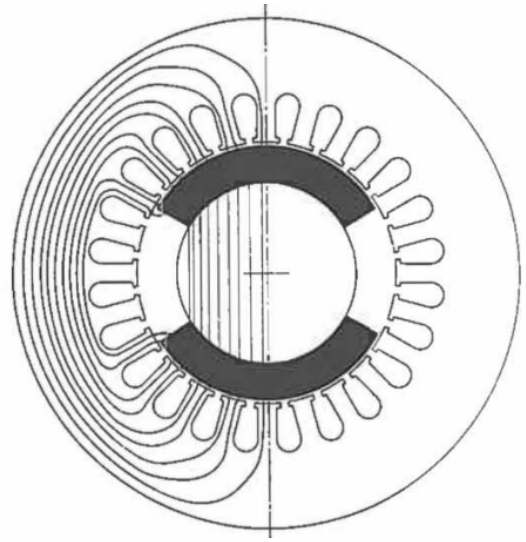
2.2 Dasar Teori

2.2.1 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 pencatuan 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 memiliki lilitan 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 disekeliling rotor. Fluks magnet dari kutub rotor akan melewati celah udara dan mencapai permukaan stator beserta lilitan pada inti stator.



Gambar 2.1 Aliran fluks magnet pada desain generator (Hendershot dkk, 1994).

Putaran rotor akan menyebabkan fluks magnet yang diterima oleh kumparan stator untuk tiap fasa (dengan N lilitan) bersifat berubah terhadap waktu ($d\Phi/dt$). Sesuai dengan hukum Induksi Faraday, tegangan akan terinduksi pada kumparan fasa stator sebesar :

$$e = -N\frac{d\Phi}{dt} \tag{2-1}$$

$$e = -\frac{d(N\Phi)}{dt} = -\frac{d\lambda}{dt} \tag{2-2}$$

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 λ merupakan hasil perkalian dari banyaknya lilitan dengan besar fluks yang ditangkap tiap lilitan untuk suatu saat.

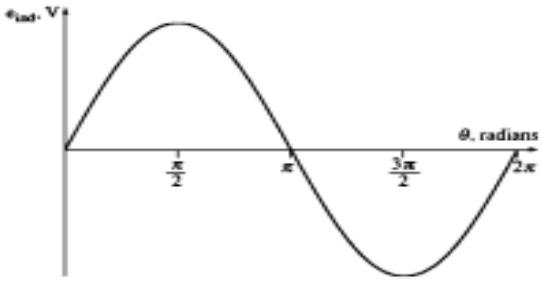
Penempatan kumparan pada stator menentukan tegangan *output* dari generator. Tiap pasang kumparan pada stator akan memiliki sudut phasa tertentu sehingga jika kita menempatkan satu pasang kumparan saja, kita akan mendapatkan tegangan *output* dengan satu fasa saja. Namun jika menempatkan tiga pasang kumparan pada stator

dengan beda sudut 120°, maka akan diperoleh tegangan *output* dengan phasa yang berbeda 120° juga.

$$e_a = -\frac{d(N\Phi)}{dt} = -\frac{d(N\Phi\cos(\omega t))}{dt} = N\Phi\omega\sin(\omega t) = 2\pi f N\Phi\sin(\omega t)$$

$$e_a = E_m \sin(\omega t) \tag{2-3}$$

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 (Chapman, 2005).

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 :

$$e_b = E_m \sin(\omega t - 120°) \tag{2-4}$$

$$e_c = E_m \sin(\omega t - 240°) \tag{2-5}$$

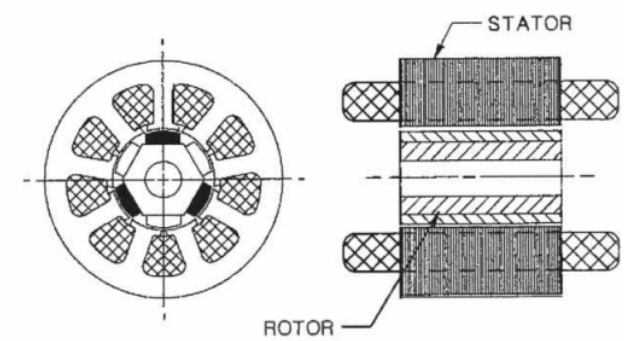
Ketika rotor berputar, medan magnet yang dihasilkan juga berputar dengan kecepatan yang sama. Karena medan magnet putar tersebut diinduksikan pada kumparan jangkar (stator), maka pada stator muncul tegangan induksi 3 fasa dengan frekuensi elektrik yang sama (sinkron). Frekuensi elektris yang dihasilkan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

$$f = \frac{n.p}{120} \tag{2-6}$$

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 8 kutub, maka rotor harus berputar pada 750 rpm.

2.2.2 Konstruksi Generator Sinkron Magnet Permanen



Gambar 2.3 Generator sinkron magnet permanen (Hendershot dkk, 1994).

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.

1. Stator

Gambar 2.4 Stator pada generator sinkron magnet permanen (Hendershot dkk, 1994).

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. Stator terbuat dari bahan Feromagnetik yang berbentuk laminasi untuk mengurangi rugi arus eddy.

Pada stator terdapat beberapa bagian, yaitu :

a. Rangka Stator

Rangka stator merupakan rangka luar dan berfungsi untuk menyokong struktur stator dan mempunyai kaki-kaki yang dipasang pada bagian fondasi. Rangka stator ini dibuat kokoh untuk mengatasi perubahan beban secara tiba-tiba atau hubung singkat tiga fasa.

b. Inti Stator

Inti stator terbuat dari segmen-segmen dimana tiap segmen tersebut terdiri dari laminasi lembaran plat baja silikon yang memiliki sifat kemagnetan sangat baik. Inti stator dibuat berlaminasi untuk mengurangi rugi arus edy dan juga rugi histerisis.

c. Slot

Slot merupakan tempat untuk meletakkan kumparan stator yang dibentuk dengan sistem berbuku-buku.

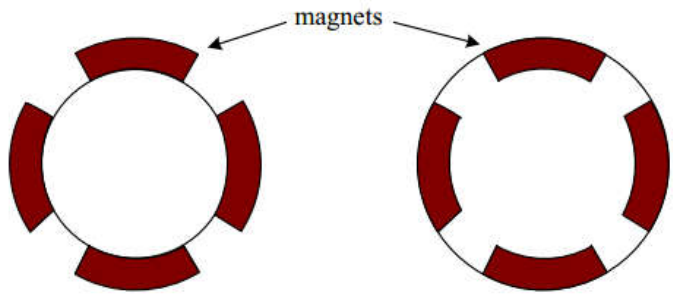
d. Kumparan stator

Kumparan stator merupakan tempat terbentuknya tegangan induksi pada generator dan didesain untuk menghasilkan kutub-kutub elektromagnetik stator yang sinkron dengan kutub magnet rotor. Kumparan stator ditempatkan melingkari gigi-gigi stator. Adapun konfigurasi kumparan stator dapat berupa kumparan terkonsentrasi dan kumparan terdistribusi. Kumparan terkonsentrasi memiliki keuntungan pada amplitudo tegangan induksi yang lebih tinggi dari kumparan terdistribusi. Menggunakan tembaga yang lebih sedikit karena belitan akhir lebih pendek, dan juga lebih mudah untuk diproduksi. Sedangkan kerugian dari kumparan terkonsentrasi adalah meningkatnya komponen harmonisa dalam fluks celah udara, sehingga menyebabkan kenaikan rugi arus edy pada inti stator.

2. Rotor

Rotor merupakan bagian yang ikut berputar pada generator, karena terdapat poros yang terhubung langusng dengan rotor. Pada generator sinkron magnet permanen, rotor juga merupakan tempat untuk diletakkannya magnet permanen sebagai penghasil fluks magnet yang menuju stator. Ada beberapa cara untuk meletakkan magnet

permanen pada rotor, yaitu dengan cara meletakkan magnet permanen pada permukaan rotor (*Surface Mounted Permanent Magnet*) atau dengan meletkkan magnet permanen didalam inti rotor (*Interior Permanent Magnet*).

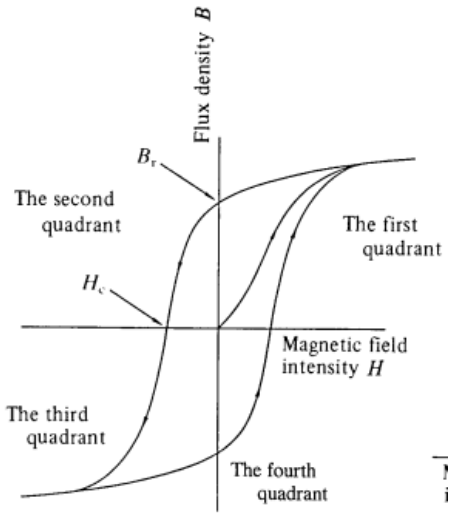


(a) *Surface Mounted PM* (b) *Interior Permanent Magnet*

Gambar 2.5 Magnet permanen pada rotor (Azka, 2013).

3. Magnet Permnanen

Magnet permanen merupakan material yang memiliki banyak manfaat terutama dalam bidang konversi energi, yaitu digunakan untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik maupun sebaliknya. Sehingga pengembangan material magnet permanen menjadi perhatian penting para peneliti dan akademisi untuk menghasilkan magnet dengan kualitas terbaik dan efisiensi yang tinggi dalam aplikasinya. Sebagai penghasil medan magnet utama, medan magnet pada rotor merupakan medan magnet permanent yang kuat. Magnet permanen tidak memiliki kumparan penguat dan tidak menghasilkan disipasi daya elektrik (hilangnya daya elektrik).



Gambar 2.6 Kurva histerisis magnetik (Kenjo dkk, 1985).

Magnet permanen merupakan material feromagnetik yang memiliki histeresis loop yang lebar. Histeresis loop yang lebar menunjukkan sedikitnya pengaruh induksi dari luar terhadap magnet tersebut.

Bahan awal manget yang diproduksi adalah baja. Magnet yang terbuat dari baja mudah dimagnetisasi, tetapi bahan tersebut dapat menyimpan energi yang rendah sehingga mudah didemagnetisasi. Sehingga dikembangkanlah material lain agar mampu menyimpan energi yang lebih besar untuk menghasilkan peralatan yang lebih baik. Ada tiga jenis pembagian magnet permanen yang digunakan untuk mesin elektrik, diantaranya yaitu:

a. Magnet Alnico

   Magnet jenis ini memiliki kerapatan fluks yang tinggi dengan gaya koersif yang rendah. Ketika koersifitasnya rendah dan dua kutub magnet saling berlawanan berada pada jarak dekat, maka kutub-kutub tersebut dapat saling melemahkan.

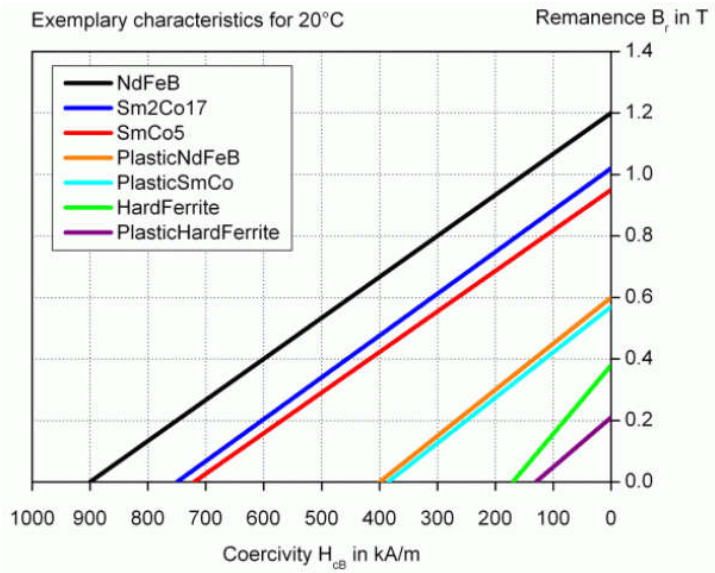
b. Magnet Ceramic atau Magnet Keramik

   Tidak seperti magnet Alnico, magnet Ceramic memiliki kerapatan fluks yang rendah namun memiliki gaya koersif yang tinggi. Magnet Ceramic banyak digunakan karena memiliki biaya produksi yang rendah.

c. Magnet *Rare-Earth*

   Terdapat dua tipe dari magnet langka yang masih ada di bumi, yaitu magnet SmCo (*Samarium-Cobalt*), dan magnet NdFeB (*Neodymium-Iron-Boron*). Penggunaan magnet NdFeB magnet dapat memberikan *power density* yang tinggi dalam volume material yang kecil sehingga mampu menghasilkan mesin berkualitas terbaik dengan sedikit rugi-rugi daya dengan material yang lebih ringan.

Berdasarkan pada kurva karkateristik dibawah, magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron menjadi bahan yang paling baik dari bahan-bahan magnet permanen lainnya. Neodymium Iron Boron mempunyai nilai fluks remanen yang paling besar dibandingkan bahan feromagnetik yang lain. Dimana untuk magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron memiliki fluks remanen senilai 1,2 T magnet permanen jenis Samarium Cobalt memiliki fluks remanen senilai 1,0 T, dan magnet permanen jenis Ceramic memiliki fluks remanen senilai 0,4 T.



Gambar 2.7 Kurva karakteristik bahan magnet permanen pada suhu 20°C (Azka, 2013).

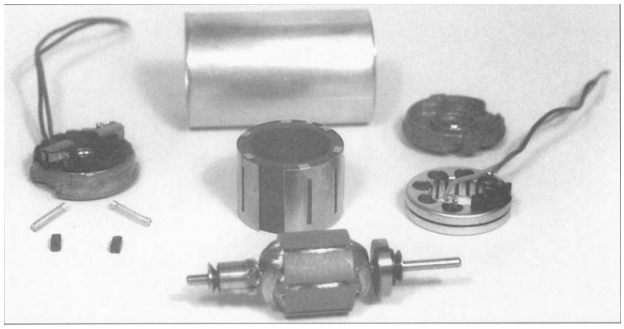
Generator dengan magnet permanen memiliki tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan generator dengan sistem eksitasi sumber DC, karena tidak ada rugi-rugi eksitasi yang dihasilkan sehingga banyak digunakan terutama untuk turbin angin. Bentuknya yang lebih sederhana membuat generator magnet permanen menjadi lebih rapi, ringan, dan tersusun padat. Akan tetapi, generator magnet permanen tidak dapat diatur seberapa besar eksitasi yang diberikan kepada generator, karena fluks magnetik yang dihasilkan magnet ini tetap sehingga arus eksitasi yang dihasilkan pun tidak dapat diubah sesuai kebutuhan.

Dengan menggunakan magnet permanen sebagai penghasil medan magnet utama, generator ini tidak membutuhkan lagi adanya pencatuan arus DC sehingga biaya dan tenaga untuk merawat serta mengganti komponen-komponen pencatuan tersebut dapat dihilangkan.

2.2.3 Jenis-jenis Generator Sinkron Magnet Permanen

1. Generator Fluks Radial

Generator fluks radial merupakan generator permanen magnet yang memiliki arah fluks radial terhadap sumbu putar sehingga arah fluks searah dengan arah putaran rotor, hal ini dikarenakan fluks dihasilkan oleh magnet permanen yang letaknya melingkari bagian rotor, sedangkan lilitan melekat pada inti yang terhubung pusat stator.



Gambar 2.8 Generator fluks radial (Fitzgerald dkk, 2002).

Generator fluks radial memiliki keunggulan yaitu mudah dalam pemasangan magnet permanen ke rotor. Fluks radial permanen magnet ini strukturnya mirip dengan motor DC maupun motor AC yang digunakan sehari-hari.

2. Generator Fluks Aksial

Generator fluks aksial merupakan generator permanen magnet yang memiliki arah medan fluks sejajar dengan sumbu putar. Fluks tersebut merupakan hasil dari gaya tarik menarik antara dua buah magnet permanen yang memiliki kutub yang berbeda. Penggunaan dua buah magnet yang terletak diantara dua buah slot disk rotor sehingga bahan stator merupakan bahan non-magnetik. Generator fluks axial memiliki sejumlah keunggulan yang berbeda dari fluks radial, yaitu dirancang untuk memiliki daya tinggi, sehingga rasio bahan inti berkurang, mudah disesuaikan dengan kondisi udara, mengurangi kebisingan dan tingkat getaran. Selain itu, arah jalan airgap fluks dapat bervariasi.

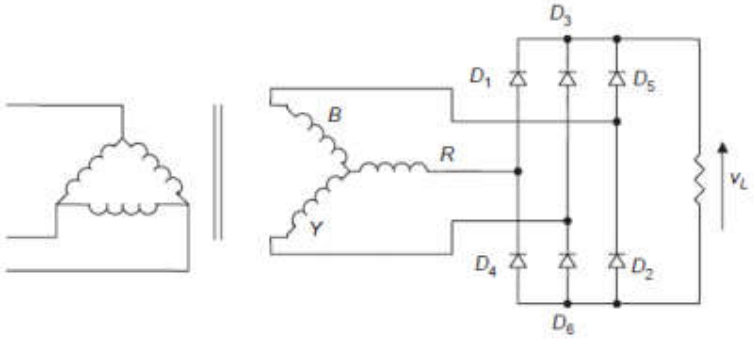
Gambar 2.9 Generator fluks aksial (Fitzgerald dkk, 2002).

2.2.4 Penyearah Daya

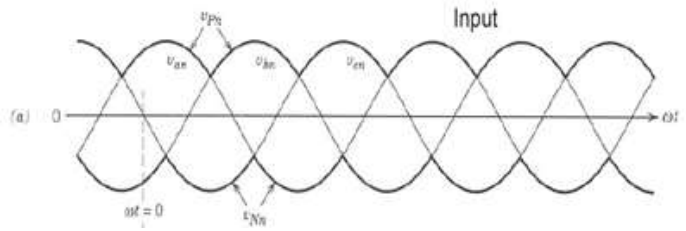
Penyearah daya merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber *input* AC dalam bentuk sinusoidal menjadi tegangan *output* DC dalam bentuk tegangan searah yang tetap. Jenis sumber tegangan *input* untuk mencatu rangkaian penyearah daya dapat menggunakan tegangan AC satu fasa maupun tiga fasa. Penyearah satu fasa merupakan rangkaian penyerah daya dengan sumber *input* tegangan AC satu fasa, sedangkan rangkaian penyearah daya dengan sumber tiga fasa merupakan rangkaian penyearah daya dengan sumber *input* tegangan AC tiga fasa. Terdapat dua jenis rangkaian penyearah daya, yaitu penyearah gelombang penuh dan penyearah setengah gelombang.

1. Penyearah Gelombang Penuh 3 Fasa

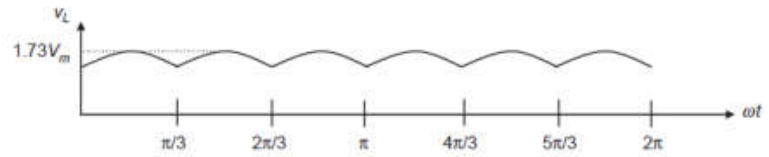
Pada Gambar 2.10 dapat dilihat bentuk rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa, dimana terdapat rangkaian primer sumber yang dihubungkan dengan trafo kemudian *output* dari trafo disearahkan menggunakan penyearah gelombang penuh 3 fasa. Pada penyearah gelombang penuh tiga fasa terdapat enam dioda yang digunakan, keenam dioda akan konduksi dengan urutan konduksi tertentu, misalnya D_1D_2, D_2D_3, D_3D_4, D_4D_5, D_5D_6, D_6D_1. Tiap pasangan dioda juga akan tersambung dengan tegangan line to line.



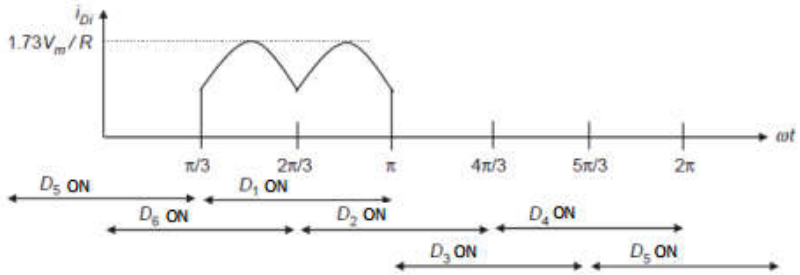
Gambar 2.10 Rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa. a) rangkaian primer, b) rangkaian sekunder (Rashid, 2001)



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.11 Gelombang *input* dan *output* penyearah gelombang penuh 3 fasa (a) gelombang *input,* (b) *output* tegangan, (c) *output* arus (Rashid, 2001).

Gambar 2.11 adalah bentuk gelombang 3 fasa *input* dan gelombang tegangan dan arus searah pada sisi *output*. Dapat dilihat bahwa dengan menggunakan penyearah gelombang penuh 3 fasa hasil *output* gelombang dapat mendekati sinyal DC. Gambar 2.11(a) merupakan gambar untuk gelombang *input* 3 fasa, kemudian Gambar 2.11(b) merupakan gambar gelombang *output* tegangan setelah disearahakan, dan pada Gambar 2.11(c) merupakan gambar gelombang *output* arus setelah disearahkan.

Dengan menggunakan asumsi bahwa tegangan *input* merupakan tegangan 3 fasa berbentuk *cosinus* (fungsi *cos*), dan setiap pasangan dioda konduksi selama 60° yang mulai konduksi pada -30° dan berakhir pada +30°. Jika V_m adalah tegangan maksimum perfasa dari tegangan sekunder dan dengan 6 pulsa dalam satu siklus, maka tegangan rata-rata *output* dan arus rata-rata pada sisi beban dapat diperoleh dengan cara (Rashid, 2001) :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi}.V_m = 1{,}654.V_m \qquad (2\text{-}7)$$

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{3}.V_m}{R} \tag{2-8}$$

2.2.5 Perhitungan Matematis Desain Generator

Rumus matematis desain generator merupakan rumus dasar untuk menentukan nilai dari beberapa parameter generator sinkron magnet permanen yang akan didesain. Berdasarkan Modul Pembelajaran Perancangan Motor Toshiba (Simanjuntak, 2014) terdapat rumus-rumus untuk melakukan perhitungan desain rangkaian magnet, dan desain kumparan stator.

1. Desain Rangkain Magnet

Menghitung luas area magnet per kutub (S_m) :

$$S_m = \pi.\frac{D_i + D_a}{2}.\frac{1}{p}.L_h \qquad (m^2) \tag{2-9}$$

Menghitung luas ekuivalen gap (S_g) :

$$S_g = \pi.\frac{D_i + D_c}{2}.\frac{N_c}{N_s}.L_a \qquad (m^2) \tag{2-10}$$

Menghitung koefisien permeance (P_c) :

$$P_c = \frac{L_m.S_g}{\sigma_g.S_m}.\frac{k_f}{k_r} \tag{2-11}$$

Koefisien kebocoran fluks (k_f) merupakan rasio dari total fluks magnet yang dihasilkan magnet pada rangkaian tertentu dengan fluks *linkage* yang terdapat pada celah udara, nilai dari koefisien kebocoran fluks (k_f) berada pada rentang 1.05~2. Koefisien kebocoran emf (*electromotive force*) (k_r) merupakan rasio dari total gaya magnetomotif dengan gaya magnetomotif yang terdapat pada celah udara, nilai dari koefisien kebocoran emf berapa pada rentang nilai 1~1.2.

Menghitung kemiringan kurva demagnetisasi (μ_r) di kuadran II untuk material magnet baik magnet NdFeB dan juga Magnet Ceramic :

$$\mu_r = \frac{B_r}{H_c}.\frac{10^7}{4.\pi} \tag{2-12}$$

B_r merupakan nilai kerapatan fluks remanen (T), sedangkan H_c merupakan nilai dari *coercive force* (A/m).

Titik pengoperasian generator harus selalu ada di atas garis demagnetisasi magnet. Dimana B_d merupakan nilai kerapatan fluks di titik pengoperasian generator.

$$B_d = \frac{P_c.B_r}{P_c + \mu_r} \qquad (T) \qquad (2\text{-}13)$$

Menghitung kerapatan fluks dalam celah udara (B_g) :

$$B_g = \frac{B_d.S_m}{k_f + S_g} \qquad (T) \qquad (2\text{-}14)$$

Menghitung kerapatan fluks dalam celah udara rata-rata ($B_g{}'$) :

$$B_g{}' = \frac{2}{\pi}.B_g \qquad (T) \qquad (2\text{-}15)$$

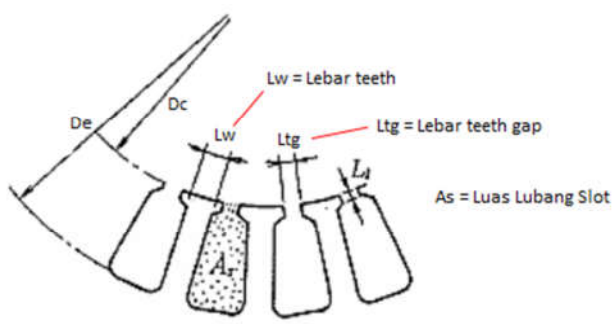
Jumlah fluks efektif yang melalui air gap ke koil (Φ_g) :

$$\Phi_g = B_g.S_g \quad (Wb) \qquad (2\text{-}16)$$

Jumlah fluks efektif rata-rata ($\Phi_g{}'$) :

$$\Phi_g{}' = \frac{2}{\pi}.\Phi_g \quad (Wb) \qquad (2\text{-}17)$$

2. Desain Kumparan Stator



Gambar 2.12 Bentuk desain stator (Simanjuntak, 2016).

Menghitung luas lubang slot (A_s) :

$$A_s = \pi \frac{D_e{}^2 - D_c{}^2}{4}.\frac{1}{N_s} - L_{tg}.L_t - \frac{\pi.D_e - L_{tg}.N_s}{N_s}.L_t - L_w.\frac{D_e - D_c - 2.L_t}{2} \quad (m^2) \qquad (2\text{-}18)$$

Besar nilai *coil fill factor* (S_f) ditentukan berdasarakan cara melilit kumparan pada *teeth* stator. Apabila menggukan *double layer winding* maka nilai *fill factor* (S_f)

berkisar antara 0.3-0.35, sedangkan apabila menggunakan *single layer winding* maka nilai dari *fill factor* (S_f) berkisar antara 0.65-0.7. Besar nilai *fill factor* (S_f) juga akan dipengaruhi oleh adanya keterbatasan proses pelilitan pada saat ini, yaitu pada umumnya masih melilit dengan tangan dan juga pegaruh adanya insulator (Hendershot dkk, 1994).

Menghitung luas area slot (A_o) yang dapat terisi oleh lilitan :

$$A_o = As.\frac{S_f}{100} \qquad (m^2) \tag{2-19}$$

Menghitung jumlah lilitan (N_t) yang dapat diisi dalam slot :

$$\frac{N_t}{2} = \frac{A_S}{\frac{\pi.(d.10^{-3})^2}{4}} \tag{2-20}$$

banyaknya lilitan (N_t) yang digunakan dapat dihitung dengan $N_t x2$.

3. Mengitung Tegangan *Output* 3 Fasa Generator Sinkron Magnet Permanen

Besarnya kerapatan fluks magnet celah udara (B_g) berpengaruh langsung pada besarnya tegangan induksi yang dibangkitkan, sesuai dengan persamaan (Azka, 2013) :

$$q = \frac{N_s}{p.n_{ph}} \tag{2-21}$$

$$K_w = \frac{1}{q}.\frac{\sin(\pi/6)}{\sin(\pi/6.q)} \tag{2-22}$$

$$E_{ph} = 4{,}44.f.N_c.k_w.k_s.\Phi.\frac{N_s}{N_{ph}} \quad (Volt) \tag{2-23}$$

$$E_{ll} = E_{ph}.\sqrt{3} \quad (Volt) \tag{2-24}$$

Skewing sering diterapkan untuk mengurangi torsi *cogging*. Untuk generator sinkron magnet permanen dalam penelitian ini, karena tidak menggunakan *skewing*, maka nilai dari faktor *skewing* (K_s) adalah 1.

4. Menghitung Torsi Generator Sinkron Magnet Permanen

Untuk menghitung nilai torsi pada generator sinkron magnet permanen dapat menggunakan rumus (Kenjo dkk, 1985) :

$$\omega = \frac{n.2\pi}{60} \qquad (rad/\sec) \tag{2-25}$$

$$K_e = \frac{V_{dc}}{\omega} \tag{2-26}$$

$$K_t = K_e \tag{2-27}$$

$$T = K_t.I \qquad (Nm) \tag{2-28}$$

5. Menghitung Daya pada Generator Sinkron Magnet Permanen

Besarnya Daya pada generator sinkron magnet permanen dapat dihitung dengan rumus (Hanselmen, 2006) :

$$P_{in} = T.\omega \qquad (Watt) \tag{2-29}$$

$$P_{out} = V.I \qquad (Watt) \tag{2-30}$$

6. Menghitung Nilai Kapasitor Pada Penyearah Gelombang Penuh 3 Fasa

Untuk mendapatkan besar nilai kapasitor sebagai filter yang digunakan pada penyearah gelombang penuh 3 fasa dilakukan dengan cara (Boylestad dkk, 1998) :

$$r = \frac{V_{rms}}{V_{dc}}.100\% = \frac{2,4.I_{dc}}{C.V_{dc}}.100\% = \frac{2,4}{R.C}.100\% \tag{2-31}$$

$$C = \frac{2,4}{R.r} \ (\mu F) \tag{2-32}$$

nilai persentase *ripple* yang dimasukkan adalah maksimum sebesar 5%.

2.2.6 Angin

Udara yang bergerak disebut angin. Angin bertiup karena ada perbedaan suhu dan tekanan udara antara satu tempat dengan tempat lain. Angin bertiup dari wilayah bertekanan tinggi ke wilayah bertekanan rendah. Daerah dengan suhu tinggi akan mempunyai tekanan udara relatif rendah, sebaliknya daerah dengan suhu rendah akan mempunyai tekanan udara relatif tinggi. Di Indonesia yang merupakan Negara Kepulauan dan berada di kawasan tropis, sinar matahari dipancarkan pada siang hari rata-rata 12 jam sepanjang tahun. Perubahan suhu dan tekanan udara di atmosfer yang

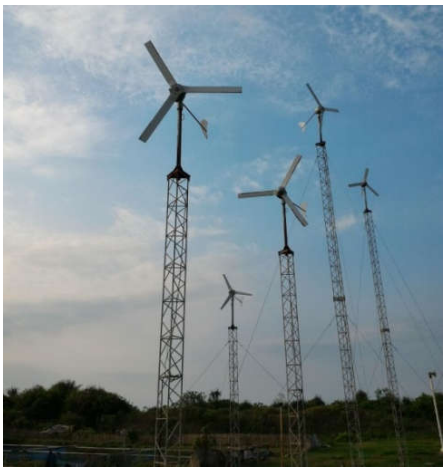
silih berganti menghasilkan gerakan angin yang cukup potensial sebagai sumber daya energi Pembangkit Listrik Tenaga Angin.

Karena angin adalah udara yang bergerak maka angin memiliki jenis energi gerak yang bisa dimanfaatkan dan dikonversi menjadi bentuk energi lain. Besar energi kinetik yang dimiliki angin merupakan hasil dari setengah kali massa jenis udara (ρ) dengan luas penampang bilah (A) dan pangkat tiga dari kecepatan angin (v^3).

$$P_{angin} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{angin} \cdot A.v^3 \ (Watt) \tag{2-33}$$

Untuk mengetahui potensi angin, patokan yang digunakan adalah kecepatan angin yang berhembus. Kecepatan angin merupakan jarak tempuh yang dilalui angin persatuan waktu, dapat dinyatakan dalam meter per detik (m/s). Menurut hasil penelitian Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), daerah Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, dan pantai selatan Jawa dan pantai selatan Sulawesi memiliki potensi angin paling tinggi dimana kecepatan angin diatas 5 m/s (Rahmat, 2017).

2.2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu



Gambar 2.13 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu di PT Lentera Angin Nusantara.

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu adalah peralatan yang mampu mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik. Angin yang bergerak akan membuat bilah berputar menghasillkan energi mekanik untuk menggerakkan generator dan akhirnya menghasilkan energi listrik. Adapun jenis-jenis Pembangkit Listrik Tenaga Bayu berdasarkan perbedaan turbin anginnya.

1. *Horizontal Axis Wind Turbine*

Turbin anign jenis *Horizontal Axis Wind Turbine* memiliki poros rotor utama dan generator listrik berada di puncaknya. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin, sedangkan turbin berukuran besar biasanya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo.

Gambar 2.14 Turbin angin jenis *Horizontal Axis Wind Turbine*.

2. *Vertical Axis Wind Turbine*

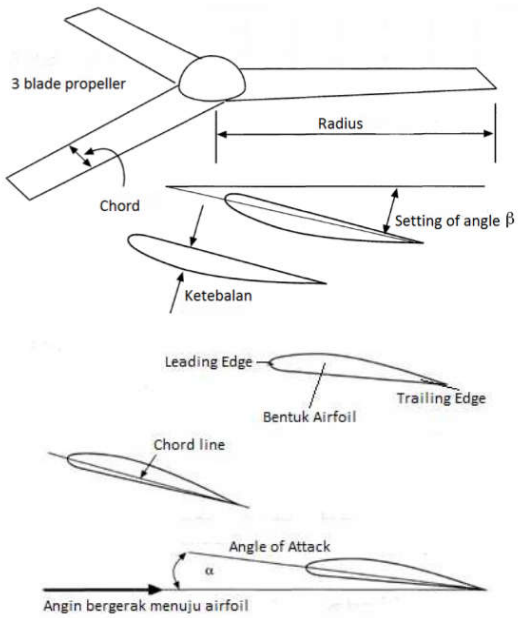
Turbin angin jenis *Vertical Axis Wind Turbine* memiliki sumbu rotor yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan menghadap angin. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. Dengan sumbu yang vertikal, generator serta gearbox bisa ditempatkan di dekat tanah sehingga menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Kekurangan turbin angin jenis ini yaitu produksi energi yang dihasilkan hanya 50% dari efisiensi jenis horizontal.

Gambar 2.15 Turbin angin jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (Anonim, 2014).

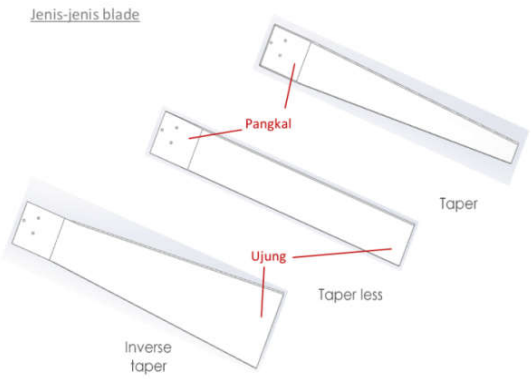
Pembangkit Listrik Tenaga Angin merupakan suatu sistem yang memiliki banyak komponen-komponen di dalamnya yang saling bekerja agar fungsi PLTB tercapai. Secara umum, PLTB memiliki komponen-komponen,

1. Bilah

Bilah merupakan bagian penting dalam suatu sistem turbin angin sebagai komponen yang berinteraksi langsung dengan angin. Blade terdiri dari beberapa bagian, antara lain : *Radius* (jari-jari bilah), *Chord* (lebar bilah), *Leading edge*, *Trailing edge*, *Chord line* (garis yang menghubungkan leading dan trailing edge), *Setting of angle* (*pitch*, sudut antara *chord line* dan bidang rotasi dari rotor), *Angle of attack* (sudut antara *chord line* dengan arah gerak udara relatif).



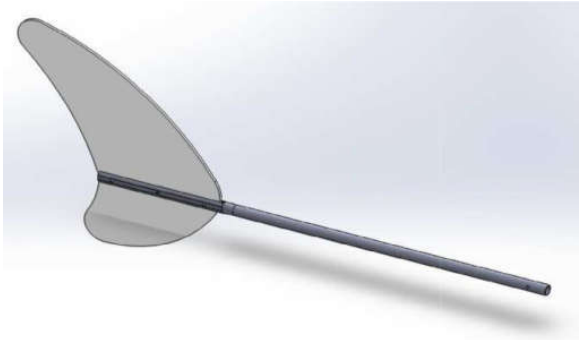
Gambar 2.16 Bagian-bagian bilah (Anonim, 2014).



Gambar 2.17 Jenis- jenis bilah (Anonim, 2014).

Bilah memiliki 3 jenis berdasarkan desainnya, yaitu taper (mengecil ke ujungnya), tapperless (pangkal dan ujungnya memiliki lebar yang sama), dan inverse-taper (membesar ke ujungnya). Ketiga bilah ini memiliki kapasitasnya masing-masing seperti jenis taper yang sesuai untuk angin kecepatan tinggi, sementara inverse-taper sesuai untuk kecepatan angin rendah (putaran rendah, torsi tinggi) dan bilah tapper-less dengan kemampuan di antara keduanya.

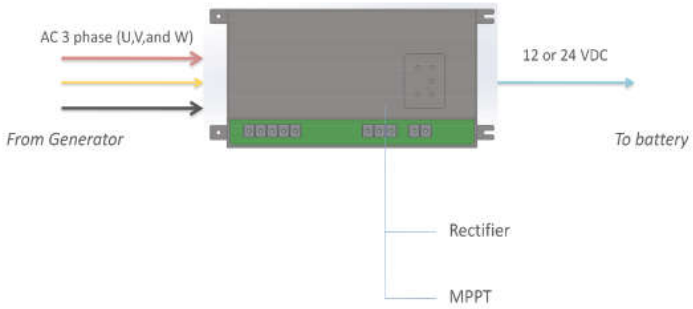
2. Bagian Ekor



Gambar 2.18 Bagian ekor (Anonim, 2014).

Ekor turbin angin berfungsi mengarahkan turbin angin menghadap arah angin. Ukuran ekor perlu disesuaikan dengan turbin angin sehingga mampu mendorong badan turbin ke arah angin.

3. *Controller*



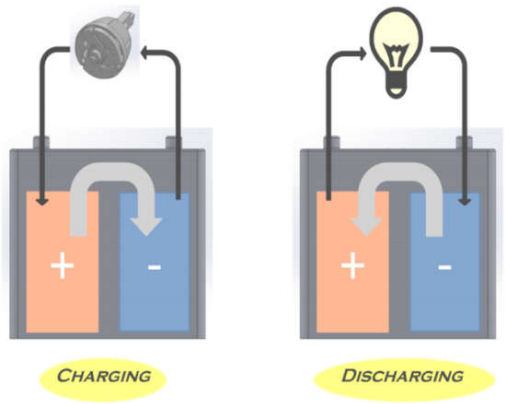
Gambar 2.19 Skema Kerja *Controller* (Anonim, 2014).

Controller berperan sebagai alat konversi energi listrik dari AC menjadi DC dan pengatur sistem tegangan *input* yang fluktuatif dari generator untuk distabilkan sebelum disimpan ke baterai.

4. Data Logger

Data Logger berperan sebagai media penyimpanan data, tegangan dan arus dari controller akan melewati data logger untuk direkam. Kemudian tegangan dan arus ini kembali dialirkan kembali menuju baterai. Rekaman data disimpan di dalam SD Card dalam format excel seperti waktu perekaman data dalam detik.

5. Baterai



Gambar 2.20 Dua Proses Kerja Baterai (Anonim, 2014).

Baterai berperan sebagai media penyimpanan energi listrik. Pada baterai terjadi reaksi elektrokimia charging dan discharging. Proses charging ini bekerja saat baterai berfungsi sebagai beban dan sumber energinya dari generator, sementara itu proses discharging adalah ketika baterai menjadi sumber energi untuk menyuplai listrik ke beban lain (misalnya lampu).

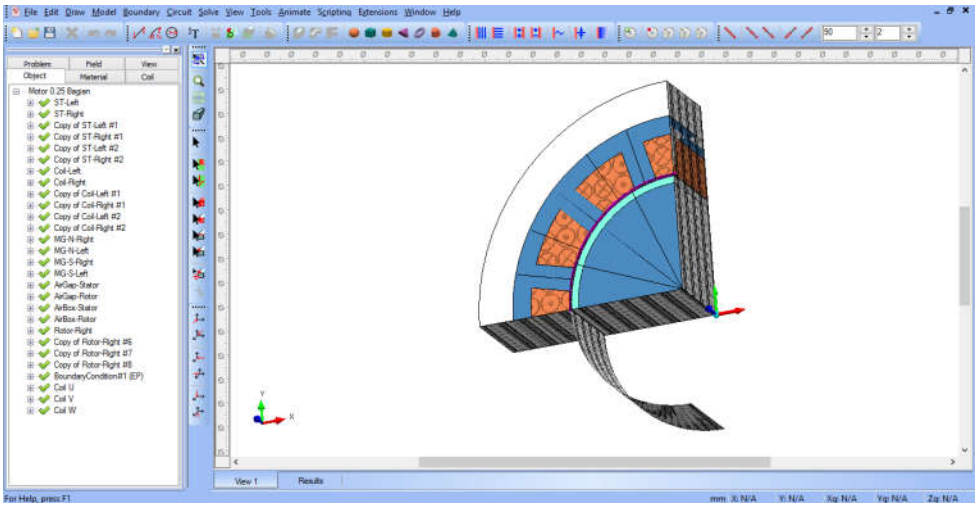
6. Inverter

Inverter berfungsi sebagai alat konversi listrik DC menjadi AC agar bisa digunakan pada beban-beban rumah, seperti peralatan rumah tangga sehari-hari sehari hari yaitu lampu, televisi, kulkas, dll.

Gambar 2.21 Aliran Kerja Inverter (Anonim, 2014).

2.2.8 Perangkat lunak MagNet Infolytica

MagNet Infolytica merupakan perangkat lunak yang digunakan sejak tahun 1978 sebagai pemodelan parangkat elektromagnetik di komputer. Perangkat lunak MagNet Infolytica menyediakan laboratorium virtual yang dapat digunakan untuk membuat model serta menentukan sendiri bahan mateial yang digunakan seperti bahan inti besi, bahan magnetik maupun bahan lilitan.



Gambar 2.22 Tampilan menu utama perangkat lunak MagNet Infolytica

MagNet Infolytica dirancang sebagai perangkat lunak pemodelan dua dimensi dan tiga beserta pemecahan masalah elektromagnetik. Peralatan-peralatan yang dapat disimulasikan pada perangkat lunak MagNet Infolytica dapat berupa motor atau generator, solenoida, loudspeakers, tranformator, atau beberapa peralatan yang menggunakan magnet permanen atau lilitan.

MagNet Infolytica sendiri dapat dihubungkan ke berbagai perangkat lunak lain seperti MatLab, Simulink, SolidWorks, Pro-E, dan lain-lain. Produk MagNet Infolytica banyak digunakan dalam perancangan produk elektromekanis yang memiliki kinerja tinggi seperti pada industri penerbangan, otomotif, peralatan listrik, elektronik, dan pembangkit listrik.