

## 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 yang 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 dibawah 0,5. Perbandingan Hasil juga menunjukkan bahwa mesin radial-flux dengan rendahnya jumlah pasangan kutub,  $p < 4$ , mengungguli mesin aksial-fluks [12].

Penelitian tentang *Design of a Direct-coupled Radial-Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbines*. Tujuan penelitian adalah untuk melakukan analisis dan disain menggunakan metode *Finite Element Analisis* (FEA) yang dimana data disain digunakan untuk mengoptimalkan bentuk dan kepadatan 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 digabungkan 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 *gear box* untuk turbin angin. Generator ini tidak perlu eksitasi terpisah untuk bantalan utama turbin, efisiensi secara keseluruhan begitu tinggi dan kehandalan dalam sistem secara keseluruhan dapat dicapai [6].

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 [2].

Penelitian 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 [10].

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% [3].

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  $357 \Omega$  dan reaktansi sinkron sebesar  $354,90 \Omega$  sedangkan stator dengan diameter kawat 0.25 mm memiliki tahanan jangkar sebesar  $196,47 \Omega$  dan reaktansi sinkron sebesar  $223,63 \Omega$  [14].

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Penelitian tentang perancangan generator 100 W menggunakan *software* Infolytica MagNet. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan generator 100 Watt. Dengan bantuan *software* infolytica MagNet 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 1000 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 didapatkan hasil tegangan sebesar 23.89 V dan arus 5 A [1].

Penelitian ini melanjutkan dari penelitian sebelumnya [1]. Pada penelitian tersebut tidak memaksimalkan potensi dari jumlah lilitan dan jumlah *pole* pada generator yang didesainnya. Sehingga performa desain generator tersebut tidak optimal, karena dengan studi yang peneliti lakukan terhadap penelitian tersebut, bahwa dengan ukuran dan dimensi seperti desain generator pada penelitian tersebut, seharusnya jumlah *pole* dan jumlah lilitannya bisa dimaksimalkan lagi. Maka pada penelitian ini akan memaksimalkan potensi dari jumlah lilitan dan jumlah *pole* untuk mengoptimalkan performa pada desain generator tersebut.

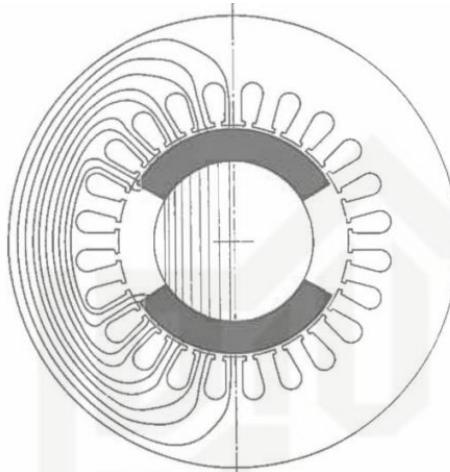
## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron Magnet Permanen [5][9]

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 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 disekeliling rotor. Fluks magnet dari kutub rotor akan melewati celah udara dan mencapai permukaan stator beserta kumparan yang dililitkan pada inti stator.



Gambar 2.1 Aliran Fluks Magnet Pada Desain Generator [9].

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 [5] :

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

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

Keterangan :

$e$  = Tegangan induksi (Volt)

$N$  = Banyaknya lilitan

$\Phi$  = 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  $\lambda$  merupakan hasil perkalian dari banyaknya lilitan dengan besar fluks yang ditangkap tiap lilitan untuk suatu saat.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

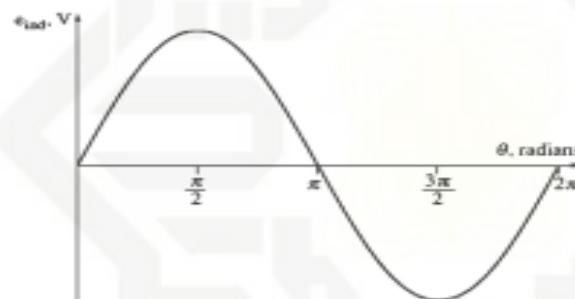
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Penempatan kumparan pada stator menentukan tegangan keluaran dari generator. Tiap pasang kumparan pada stator akan memiliki sudut phasa 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  $120^\circ$ , maka akan diperoleh tegangan keluaran dengan phasa yang berbeda  $120^\circ$  juga [5].

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

$$e_a = E_m \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

Saat sudut  $\theta = \omega t$  berubah mulai dari  $0^\circ$  sampai  $360^\circ$  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 [5].

Posisi kumparan fasa (b) dan fasa (c) tertinggal terhadap kumparan fasa (a) (jika dipandang dari arah putaran rotor) dengan ketertinggalan masing-masing sebesar  $120^\circ$  dan  $240^\circ$ . Sehingga persamaan tegangan induksi pada fasa (b) dan fasa (c) adalah [5] :

$$e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.4)$$

$$e_c = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (2.5)$$

Rumus tegangan puncak pada generator 3 fasa adalah [5]:

$$E_m = 2\pi f N_m \Phi \quad (2.6)$$

Sedangkan untuk rumus tegangan rms (root mean square) atau tegangan efektif dari setiap fasa generator 3 fasa ini adalah [5] :

$$E_A = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

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 [5] :

$$f_e = \frac{p}{2} f_m \quad (2.8)$$

$$f_e = \frac{n \cdot p}{120} \quad (2.9)$$

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.

## 2.2.2 Konstruksi Generator Sinkron Magnet Permanen [3][9][11]

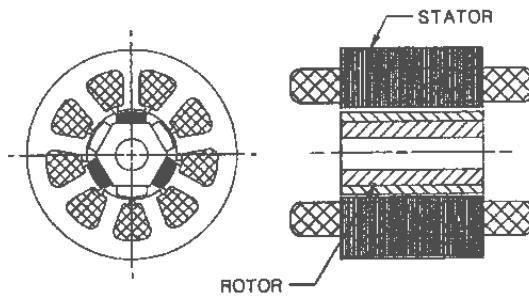
Konstruksi generator sinkron magnet permanen sama dengan generator sinkron pada umumnya yakni terdapat stator dan rotor. Perbedaannya terdapat pada sumber eksitasi dimana generator sinkron magnet permanen menggunakan medan magnet permanen sebagai sumber eksitasi medan magnet yang menuju stator.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

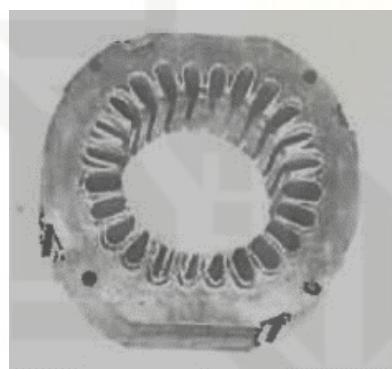
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.3 Generator Sinkron Magnet Permanen [9].

### 1. *Stator*

*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.



Gambar 2.4 *Stator* Pada Generator Sinkron Magnet Permanen [9].

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 eddy dan juga rugi histerisis.

**c. Slot**

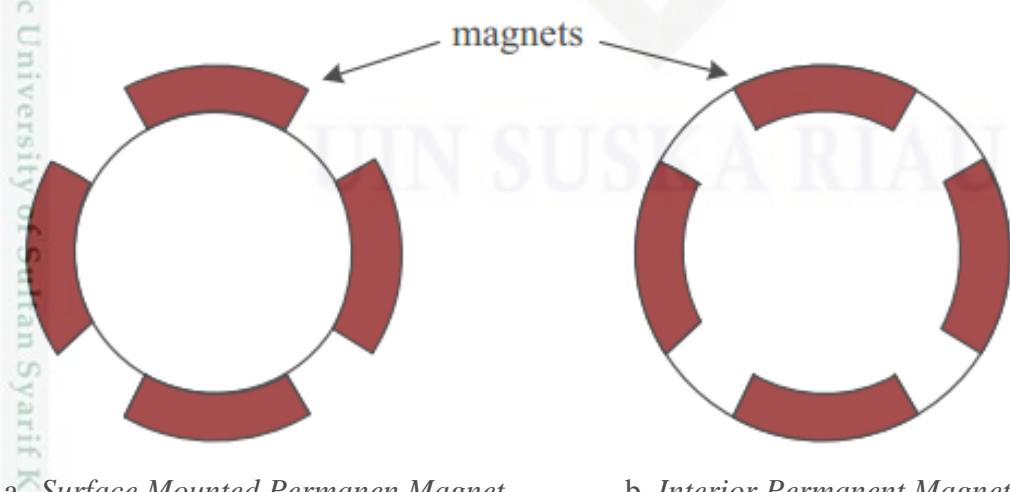
Slot merupakan tempat untuk meletakkan kumparan *stator* yang dibentuk dengan sistem berbuku-buku.

**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 eddy pada inti *stator*.

**2. Rotor**

*Rotor* merupakan bagian yang ikut berputar pada generator, karena terdapat poros yang terhubung langsung 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 meletakkan magnet permanen didalam inti *rotor* (*Interior Permanent Magnet*).

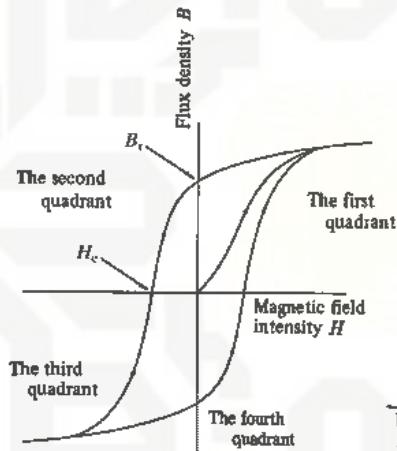


Gambar 2.5 Magnet Permanen Pada Rotor [3].

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa Izin UIN Suska Riau.

### 3. Magnet Permanen

Sebagai penghasil medan magnet utama, medan magnet pada *rotor* merupakan medan magnet permanent yang kuat. Magnet permanen tidak memiliki kumparan penguatan dan tidak menghasilkan disipasi daya elektrik (hilangnya daya elektrik). Magnet permanen dapat digambarkan oleh kurva histeresis. Dari bentuk kurva histeresis dapat dibedakan antara *soft magnetic* dan *hard magnetic*. *Soft magnetic* memiliki nilai koersivitas dan remanen yang kecil sehingga bentuk kurva histeresisnya akan menyempit. Sedangkan untuk *hard magnetic* memiliki nilai koersivitas dan remanen yang besar sehingga bentuk kurva histeresisnya akan melebar.



Gambar 2.6 Kurva Histeresis Magnetik [11].

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 magnet 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.

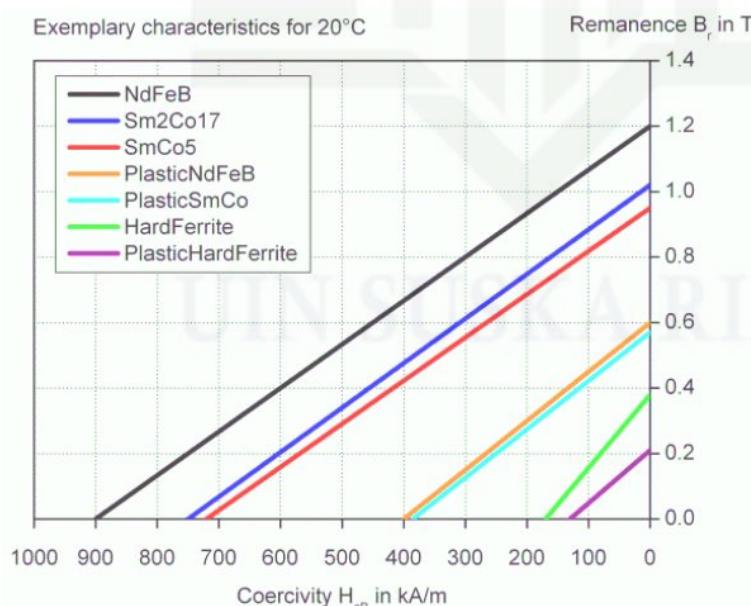
### b. Magnet Ferit atau Magnet Keramik

Tidak seperti magnet Alnico, magnet Ferit memiliki kerapatan fluks yang rendah namun memiliki gaya koersif yang tinggi. Magnet Ferit 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 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 karakteristik dibawah, NdFeB menjadi bahan yang paling baik dari bahan-bahan magnet permanen lainnya. NdFeB mempunya densitas fluks yang lebih besar dibandingkan bahan feromagnetik yang lain. Selain itu, harga dari NdFeB saat ini menjadi lebih terjangkau. Itulah sebabnya magnet permanen jenis NdFeB lebih banyak digunakan dari pada magnet permanen yang lainnya.



Gambar 2.7 Kurva Karakteristik Bahan Magnet Permanen Pada Suhu 20°C [3].

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa Izin UIN Suska Riau.

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.

#### 4. Kombinasi Slot per Pole Untuk Mesin Tiga Fasa

Untuk pasangan jumlah *pole* dengan jumlah *slot* untuk mesin tiga fasa bisa dilihat pada tabel 2.1 dibawah ini.

Tabel 2.1 Kombinasi *Slot/Pole* untuk mesin tiga fasa [18]

| 3-phasal  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Slot  | 3  | 6  | 9  | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 39 | 42 | 45 | 48 |
| Pole  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| State Islamic University of Sultan Syarif Kasim | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  |
|   | 8  | 6  | 8  | 8  | 6  | 8  | 8  | 6  | 8  | 8  | 6  | 8  | 8  | 6  | 8  | 8  |
|   | 10 | 8  | 10 | 10 | 8  | 10 | 10 | 8  | 10 | 10 | 8  | 10 | 10 | 8  | 10 | 10 |
|   |    | 10 | 14 | 14 | 10 | 14 | 14 | 10 | 14 | 14 | 10 | 14 | 14 | 10 | 14 | 14 |
|   |    | 12 | 16 | 16 | 12 | 16 | 16 | 12 | 16 | 16 | 12 | 16 | 16 | 12 | 16 | 16 |
|   |    | 14 | 20 | 20 | 14 | 20 | 20 | 14 | 20 | 20 | 14 | 20 | 20 | 14 | 20 | 20 |
|   |    | 16 | 22 | 22 | 16 | 22 | 22 | 16 | 22 | 22 | 16 | 22 | 22 | 16 | 22 | 22 |
|   |    |    | 26 | 20 | 26 | 26 | 18 | 26 | 26 | 20 | 26 | 26 | 20 | 26 | 26 | 26 |
|   |    |    | 28 | 22 | 28 | 28 | 20 | 28 | 28 | 22 | 28 | 28 | 22 | 28 | 22 | 28 |
|   |    |    |    | 24 | 32 | 32 | 22 | 32 | 32 | 24 | 32 | 32 | 24 | 32 | 32 | 24 |
|   |    |    |    | 26 | 34 | 34 | 24 | 34 | 34 | 26 | 34 | 34 | 26 | 34 | 34 | 26 |
|   |    |    |    | 30 | 38 | 38 | 26 | 38 | 38 | 28 | 38 | 38 | 28 | 38 | 38 | 28 |
|   |    |    |    | 32 | 40 | 40 | 28 | 40 | 40 | 30 | 40 | 40 | 30 | 40 | 40 | 30 |
|   |    |    |    | 34 |    | 44 | 30 | 44 | 44 | 32 | 44 | 44 | 32 | 44 | 44 | 32 |

1. Dilarang mengujup sebagaian atau seturun karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Untuk kombinasi *slot per pole* berpengaruh langsung terhadap faktor belitan yang dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 faktor belitan untuk model 12 *slot* [18]

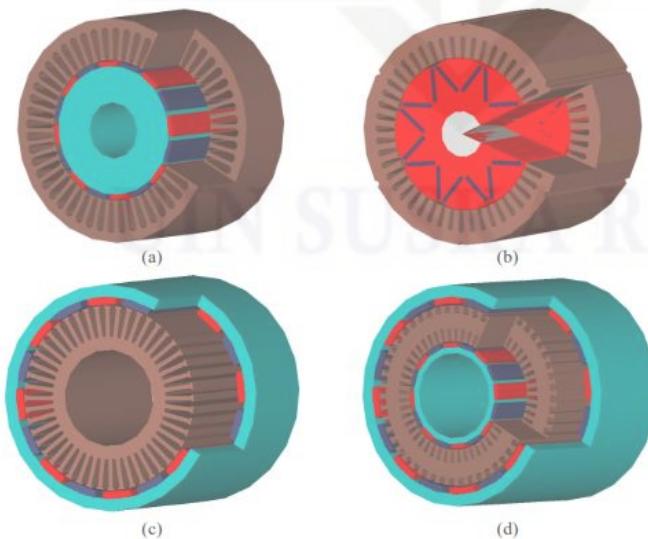
| Jumlah Pole | Faktor Belitan |
|-------------|----------------|
| 2           | 0.966          |
| 4           | 1              |
| 8           | 0.866          |
| 10          | 0.933          |
| 14          | 0.933          |
| 16          | 0.866          |
| 20          | 0.5            |
| 22          | 0.25           |

Namun untuk untuk kombinasi model 12 *slot* yang menjanjikan untuk dirancang yaitu 12 *slot* 8 pole, 12 *slot* 10 pole dan 12 *slot* 14 pole [18].

### 2.2.3 Jenis-jenis Generator Sinkron Magnet Permanen [12] [3]

#### 1. Generator Fluks Radial

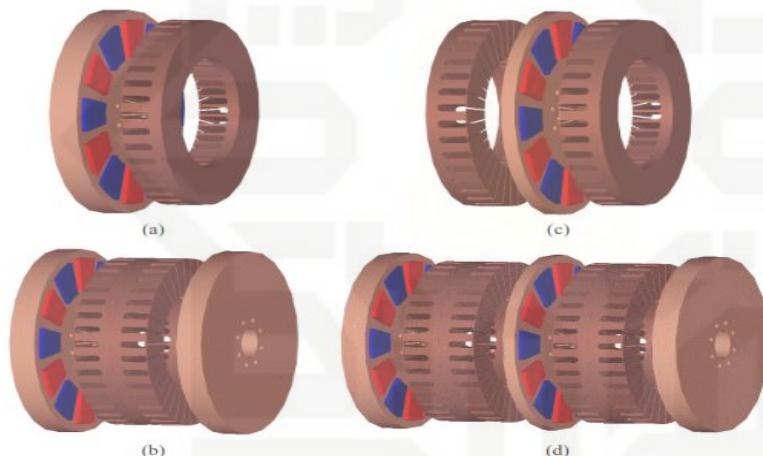
Generator fluks radial merupakan generator permanen magnet yang memiliki arah fluks radial terhadap sumbu putar sehingga arah fluks searah dengan arah putaran rotor, hal ini dikarenakan fluks dihasilkan oleh magnet permanen yang letaknya melingkari bagian rotor, sedangkan lilitan melekat pada inti yang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



Gambar 2.8 Desain Fluks Radial Generator Magnet Permanen [12].

## 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 Desain fluks aksial generator magnet permanen [12].

### 2.2.4 Perhitungan Matematis Desain Generator [3][10][15]

Rumus matematis desain generator merupakan rumus dasar untuk menentukan nilai dari beberapa parameter generator sinkron magnet permanen yang akan didesain. Adapun berikut ini data-data yang dibutuhkan untuk melakukan pendesainan generator yaitu :

$D_i$  = diameter luar rotor / luar magnet (mm)

$D_a$  = diameter dalam magnet (mm)

$D_b$  = diameter luar stator (mm)

$D_c$  = diameter dalam stator (mm)

$D_e$  = diameter dalam lubang slot (mm)

|            |                                |
|------------|--------------------------------|
| $L_m$      | = tebal magnet (mm)            |
| $L_h$      | = panjang magnet (mm)          |
| $L_a$      | = tebal inti stator/rotor (mm) |
| $L_{tg}$   | = jarak antar slot (mm)        |
| $L_t$      | = tinggi teeth (mm)            |
| $L_w$      | = Lebar teeth (mm)             |
| $\sigma_g$ | = celah udara (mm)             |
| $p$        | = jumlah pole                  |
| $Q_s$      | = jumlah slot                  |
| $W_d$      | = lebar magnet per kutub       |

Berdasarkan Modul Pembelajaran Perancangan Motor Toshiba, terdapat rumus-rumus untuk melakukan perhitungan desain rangkaian magnet, desain kumparan stator, dan juga rumus untuk menghitung impedansi lilitan.

### 1. Desain Rangkain Magnet

Untuk Menghitung luas area magnet per kutub sesuai dengan bentuk magnet yang didesain namun untuk menghitung luas magnet berbentuk cincin atau berbentuk balok dapat dihitung sesuai dengan persamaan[15]:

$$S_m = \pi \cdot \frac{D_i + D_a}{2} \cdot \frac{1}{P} \cdot L_h \quad \text{atau} \quad S_m = W_d \cdot L_h \quad (m^2) \quad (2.10)$$

Menghitung luas ekuivalen gap ( $S_g$ ) [15]:

$$S_g = \pi \cdot \frac{D_i + D_c}{2} \cdot \frac{1}{Q_s} \cdot L_a \quad (m^2) \quad (2.11)$$

Menghitung koefisien permeance ( $P_c$ ) [15]:

$$P_c = \frac{L_m \cdot S_g}{\sigma_g \cdot S_m} \cdot \frac{k_f}{k_r} \quad (2.12)$$

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

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



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 ( $\mu_r$ ) di kuadran II untuk material magnet baik magnet NdFeB dan juga Magnet Ferite [15]:

$$\mu_r = \frac{B_r}{H_c} \cdot \frac{10^7}{4\pi} \quad (2.13)$$

$B_r$  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. Oleh karena itu, titik pengoperasian ( $B_d$ ) diberikan pada titik pertemuan dengan Permeance. Dimana  $B_d$  merupakan nilai kerapatan fluks di titik pengoperasian generator dengan persamaannya adalah [15]:

$$B_d = \frac{P_c \cdot B_r}{P_c + \mu_r} \quad (T) \quad (2.14)$$

Menghitung kerapatan fluks dalam celah udara ( $B_g$ ) [15]:

$$B_g = \frac{B_d \cdot S_m}{k_f \cdot S_g} \quad (T) \quad (2.15)$$

Menghitung kerapatan fluks dalam celah udara rata-rata ( $B_g'$ ) [15]:

$$B_g' = \frac{2}{\pi} \cdot B_g \quad (T) \quad (2.16)$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

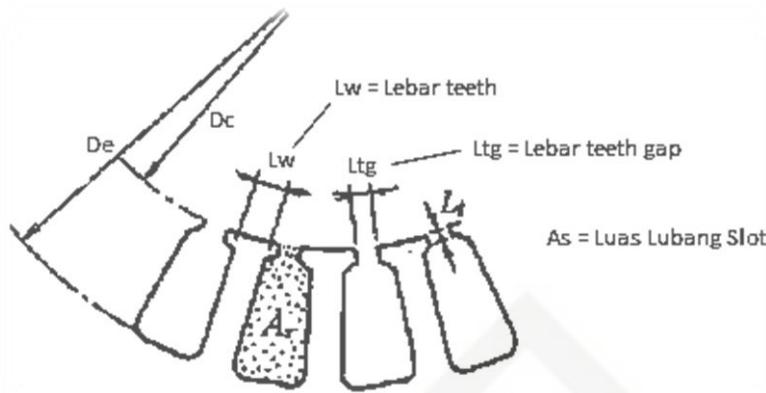
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## 2. Desain Kumparan Stator

1. Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak mengujikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.10 Bentuk Desain Stator [15].

Menghitung luas lubang slot ( $A_s$ ) [15]:

$$A_s = \left( \pi \frac{D_e^2 - D_c^2}{4} \cdot \frac{1}{Q_s} - L_{tg} \cdot \frac{D_e - D_c}{2} - \frac{\pi \cdot D_e - L_{tg} \cdot Q_s}{Q_s} \cdot L_t - L_w \cdot \frac{D_e - D_c - 2 \cdot L_t}{2} \right) \cdot \frac{1}{2} (m^2) \quad (2.17)$$

Besar nilai *coil fill factor* ( $S_f$ ) ditentukan berdasarkan cara melilit kumparan pada teeth stator. Apabila menggunakan *double layer winding* maka nilai *fill factor* ( $S_f$ ) berkisar antara 0.3-0.5, 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.

Menghitung luas area slot ( $A_o$ ) yang dapat terisi oleh lilitan [15]:

$$A_o = A_s \cdot \frac{S_f}{100} \quad (m^2) \quad (2.18)$$

Menghitung jumlah maksimum lilitan ( $n_{max}$ ) yang dapat diisi dalam slot [15]:

$$n_{max} = \frac{A_s}{\pi \cdot (d \cdot 10^{-3})^2} \quad (2.19)$$

Keterangan :

$d$  = diameter konduktor (mm)

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

### 3. Mencari Tegangan Keluaran

Besarnya kerapatan fluks magnet celah udara ( $B_g$ ) berpengaruh langsung pada besarnya tegangan induksi yang dibangkitkan, sesuai dengan persamaan [9] :

$$E_{ph} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot k_w \cdot n_s \cdot \Phi \frac{Q_s}{N_{ph}} \quad (Volt) \quad (2.20)$$

Sedangkan untuk menghitung fluks medan, sesuai dengan persamaan [15] :

$$\Phi = B_g \cdot S_g \quad (Wb) \quad (2.21)$$

Besarnya tegangan tiga fasa rangkaian star generator, sesuai dengan persamaan [5] :

$$V_T = \sqrt{3} \cdot E_{ph} \quad (Volt) \quad (2.22)$$

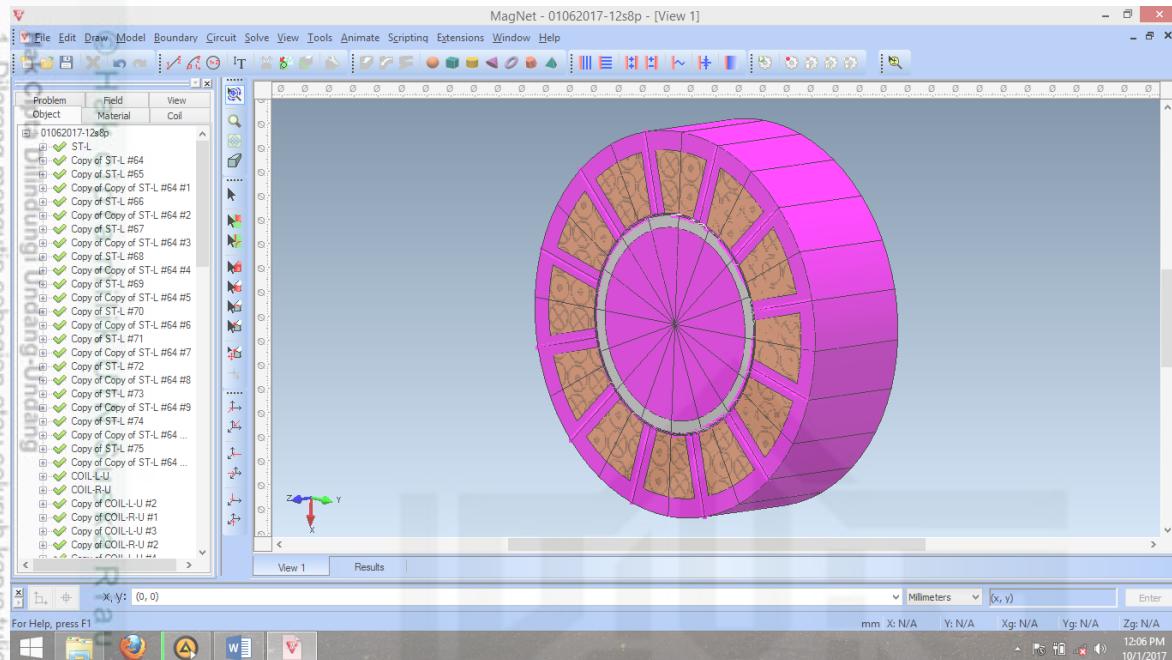
Keterangan :

- |          |                                       |
|----------|---------------------------------------|
| $E_{ph}$ | = tegangan fasa (Volt)                |
| $V_T$    | = tegangan tiga fasa (Volt)           |
| $K_w$    | = faktor belitan                      |
| $\Phi$   | = fluks medan magnet celah udara (Wb) |
| $n_s$    | = jumlah lilitan per slot             |
| $N_{ph}$ | = Jumlah Fasa                         |

#### 2.2.5 Software Infolytica MagNet [17]

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

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



Gambar 2.12 Tampilan Menu Utama Software Infolytica MagNet

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

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.