

# SIMULASI PENGARUH KETEBALAN YOKE ROTOR, JARAK ANTAR KUTUB DAN JENIS MATERIAL MAGNET PERMANEN TERHADAP RAPAT FLUKS PADA GENERATOR SINKRON FLUKS AKSIAL

Mirza Fata Alam<sup>\*)</sup>, Tedjo Sukmadi, and Susatyo Handoko

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang  
Jl. Prof. Sudarto, SH. Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)</sup> E-mail: mirzafata@gmail.com

## Abstrak

Generator sinkron 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. Pada generator ini rotor dan stator berbentuk piringan (cakram). Generator sinkron bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ada beberapa faktor yang berpengaruh terhadap jumlah fluks magnet yang dihasilkan pada generator. Dalam penelitian ini simulasi dilakukan dengan menggunakan software Finite Elemen Metode Magnetic (FEMM) dengan menggunakan spesifikasi rotor sebagai berikut jumlah kutub permanen 12 kutub, material magnet permanen keramik, diameter magnet permanen 23 cm, tebal magnet permanen 1,2 cm bentuk material yoke lingkaran, material yoke besi (pure iron). Desain simulasi dilakukan untuk mengetahui sebaran fluks magnetik pada rotor dan membuktikan adanya pengaruh tebal yoke, jarak antar kutub dan jenis material magnet permanen pada model rotor generator yang Flux Magnetik tipe Aksial. Variasi tebal yoke 1 cm, 2cm, 3cm, 4cm dan jarak antar magnet 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm dan 4 cm. Jenis material magnet yang divariasikan NdFeB, Alnico, keramik. Dari hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa Jarak antar magnet dan tebal yoke rotor berpengaruh pada kerapatan fluks rotor pada generator sinkron magnet permanen fluks aksial, berdasarkan hasil data simulasi didapatkan kerapatan fluks terbesar 0,45293 Tesla pada jarak antar kutub magnet 1 cm dan tebal yoke rotor 2 cm dan material jenis NdFeB 52 menghasilkan kerapatan fluks paling besar daripada Alnico 8 dan ceramic 8 pada jarak antar magnet 1 cm, tebal yoke 1 cm dan tebal magnet 1,2 cm yaitu sebesar NdFeB 52 = 1,53839 T, Alnico 8 = 0,682809 T dan ceramic 8 = 0,419436 T.

*Kata kunci: Generator sinkron magnet permanen fluks aksial, tebal yoke rotor, jarak antar kutub magnet permanen, jenis material magnet, distribusi fluks magnet*

## Abstract

Synchronous generator is the axial flux permanent magnet, synchronous generator that uses permanent magnet material as a substitute for field coils on the rotor so it does not need the availability of the plant (exciter) and brush with the direction of flow is perpendicular flux. During this generator rotor and stator disc-shaped (disc). Synchronous generator works on the principle of electromagnetic induction. There are several factors that influence the amount of magnetic flux produced in the generator. In this research simulations done using Finite Element Method Magnetic software (FEMM 4.2) using the following specifications total rotor pole 12 pole permanent, permanent magnetic material, ceramic permanent magnet diameter 23 cm, 1.2 cm thick permanent magnet yoke material form a circle, iron yoke material (pure iron). Design simulation conducted to determine the distribution of magnetic flux in the rotor and prove the yoke heavy influence, the distance between the poles and the permanent magnet material types on the model of the generator rotor type Axial Magnetic Flux. Yoke thickness variation of 1 cm, 2cm, 3cm, 4cm and magnetic spacing of 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm, 3 cm, 3.5 cm and 4 cm. The varied types of magnetic material NdFeB, Alnico, ceramic. From the simulation results, we can conclude that the distance between the magnet and the rotor yoke thickness effect on the rotor flux density in permanent magnet synchronous generator axial flux, based on the simulation, 0.45293 Tesla is obtained as the largest flux density distance of 1 cm between the magnetic poles and the rotor yoke thickness of 2 cm and NdFeB 52 material types produce the flux density of ceramic 8 and Alnico 8 at 1 cm spacing magnet, yoke 1 cm thick and 1.2 cm thick taker magnet NdFeB 52 = 1.53839 T, Alnico 8 = 0.682809 T and ceramic 8 = 0.419436 T.

*Keyword: Generator axial flux permanent magnet synchronous, rotor yoke thickness, the distance between the poles of a permanent magnet, magnet material types, the distribution of magnetic flux*

## 1. Pendahuluan

Dewasa ini kebutuhan akan energi listrik telah menjadi suatu kebutuhan utama bagi manusia. Berbagai cara

dilakukan agar kebutuhan listrik tersebut dapat terpenuhi, baik secara kuantitas, kualitas maupun ketersediaan listrik tersebut. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan cara mengoptimalkan sistem pembangkitan yang ada atau dengan memberdayakan sumber daya alam yang

ada semaksimal mungkin. Salah satunya adalah dengan penggunaan generator fluks aksial.

Generator fluks aksial adalah salah satu jenis mesin listrik yang dapat membangkitkan energi listrik dengan arah aliran fluks secara tegak lurus Generator jenis ini terus dikembangkan dengan berbagai variasi desain agar didapat tingkat efisiensi yang tinggi untuk diimplementasikan dengan sumber daya alam yang ada.

Generator fluks aksial tipe rotor ganda stator tunggal tanpa inti besi adalah salah satu dari pengembangan generator fluks aksial. Generator ini biasanya digunakan untuk pembangkitan energi listrik pada putaran rendah. Generator ini menggunakan rotor ganda yang mengapit bagian stator di tengah-tengahnya. Bagian stator merupakan kumparan tanpa inti besi sedangkan bagian rotor terdiri dari beberapa pasang magnet permanen yang berfungsi sebagai pembangkit medan utama. Semakin besar luas permukaan permanen 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. Namun, luas maksimum yang dapat diimplementasikan pada masing-masing magnet permanen akan merubah jarak antar permanen magnet. Oleh karena itu perlu dilakukan suatu penelitian untuk membahas pengaruh jarak antar magnet permanen pada generator magnet permanen fluks aksial sehingga didapatkan hasil keluaran yang optimal dari generator tersebut.

## 2. Metode

### A. Software FEMM

FEMM adalah suatu deretan program untuk pemecahan permasalahan magnetism statis dan frekuensi rendah. Program ini menunjukkan permasalahan pada bidang 2D dan asimetrik.

### B. Desain Magnet Permanen

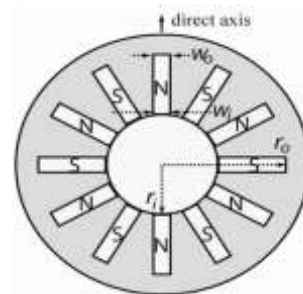
Magnet permanen digunakan untuk menghasilkan fluks magnet. Magnet permanen yang digunakan adalah magnet batang berjenis keramik (Fe).



Gambar 1 Magnet keramik Magnet Fe yang digunakan berdimensi  $p = 6$  cm,  $l = 2.5$  cm,  $t = 1.2$  cm

### C. Desain Rotor

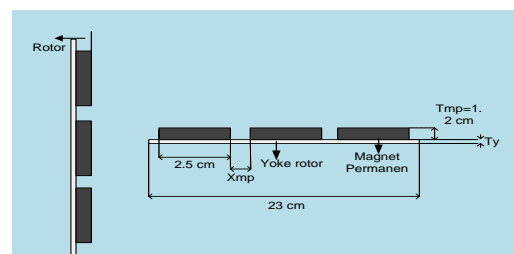
Rotor pada generator sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial berbentuk cakram (piringan), hal ini dikarenakan fluks magnet yang dimanfaatkan berasal dari sisi aksial dari magnet permanen. Bentuk rotor dan statornya serupa, berbentuk lingkaran seperti cakram. Dari segi dimensi, ukuran generator ini lebih kecil dibandingkan dengan generator berbentuk silinder. Sehingga pada aplikasinya akan lebih hemat ruang dan biaya. Adapun spesifikasi generator yang direncanakan memiliki jumlah magnet yang digunakan 12 buah untuk tiap rotor yang disusun secara simetris seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2 Komposisi magnet Dengan jarak  $r_o = 11.5$  cm (diameter 23 cm) dan  $r_i = 5.5$  cm

Berikut ini adalah spesifikasi rotor yang akan disimulasikan pada parameter tebal yoke, jarak antar kutub magnet permanen dan jenis bahan magnet:

- Jumlah kutub magnet permanen 6 buah
- Material magnet permanen keramik (FE)
- Bentuk magnet permanen persegi
- Lebar magnet permanen 2,5 cm
- Tebal magnet permanen 1,2 cm
- Bentuk Generator Cakram
- Tipe Stator Tanpa Inti
- Bentuk material yoke lingkaran
- Material Yoke besi
- Diameter Yoke 23 cm



Gambar 3. Spesifikasi desain rotor generator sinkron magnet permanen

Keterangan gambar 3:

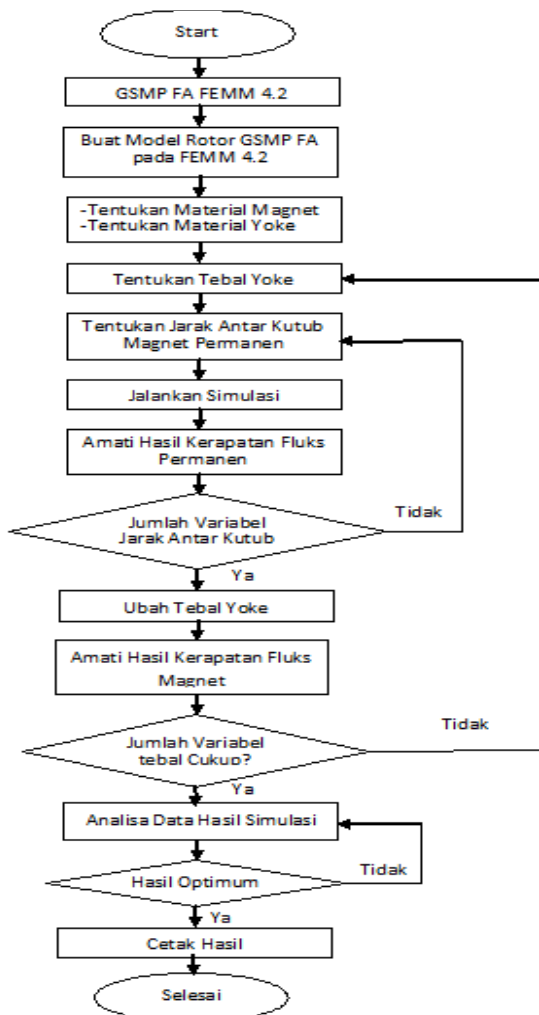
$X_{mp}$  = Jarak antar magnet permanen (cm),

$T_{mp}$  = Tebal magnet permanen (cm),

$T_y$  = Tebal plat rotor (yoke) (cm)

**D. Simulasi Pengaruh tebal yoke rotor dan jarak antar kutub magnet**

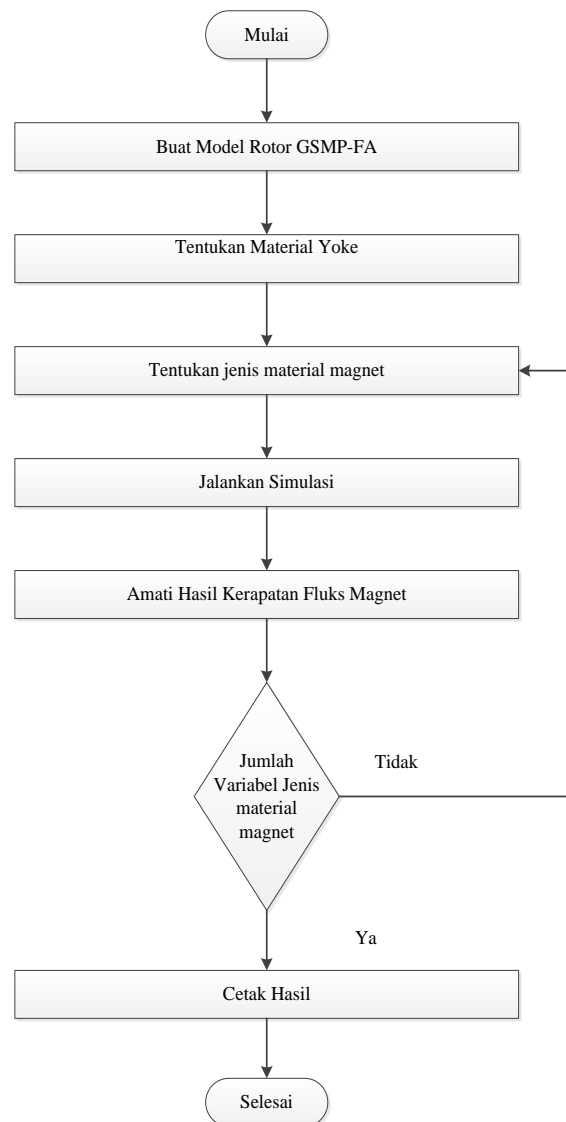
Pada tahap ini, langkah awal yang dilakukan adalah menyusun *flowchart* untuk mempermudah proses simulasi. Susunan *flowchart* simulasi pengaruh tebal *yoke rotor* dan jarak antar kutub magnet permanen ditunjukkan pada gambar 3.



**Gambar 4** *Flowchart* simulasi pengaruh ketebalan *yoke rotor* dan jarak antar magnet

**E. Simulasi Pengaruh jenis material magnet permanen**

Sama seperti pada simulasi sebelumnya, pada tahap ini, penulis menyusun *flowchart* untuk mempermudah proses simulasi. Susunan *flowchart* simulasi pengaruh jenis material magnet permanen ditunjukkan pada gambar 4 berikut ini.



**Gambar 5.** *Flowchart* simulasi pengaruh jenis material magnet permanen

Pada simulasi ini, jenis bahan magnet permanen akan divariasikan menggunakan *ceramics 8*, *alniko 8* dan *NdFeB 52*. Kemudian akan dianalisa hasil kerapatan fluks yang diperoleh. Proses simulasi menggunakan tebal *yoke rotor* dan jarak antar kutub magnet sebesar 1 cm dan panjang *yoke* 23 cm.

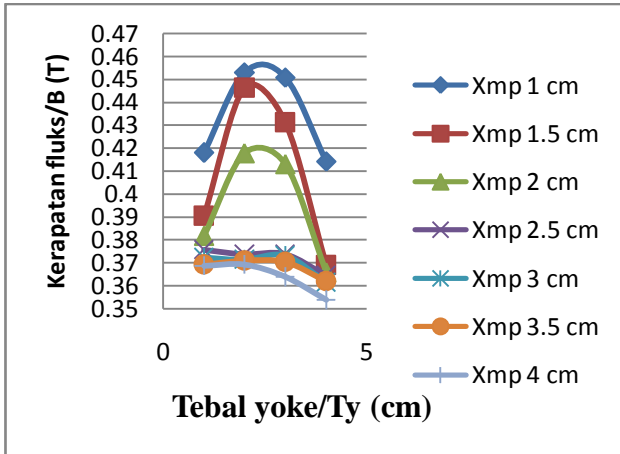
**3. Hasil Dan Analisa**

**a Data hasil simulasi pengaruh ketebalan yoke rotor dan Jarak antar kutub magnet permanen.**

Dalam urutan simulasi yang dilakukan, langkah pertama yang dilakukan adalah membuat simulasi pengaruh ketebalan *yoke rotor* dengan cara memvariasikan tebal *yoke rotor* ( $T_y$ ) sebesar 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4cm dan jarak antar kutub magnet ( $X_{mp}$ ) sebesar 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm , 4 cm untuk mendapatkan kerapatan

fluks magnet yang optimum pada berbagai macam variasi tebal *yoke* dan jarak antar magnet.

Grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.1 berikut ini.



Gambar 6 Hasil simulasi pengaruh tebal *yoke* dan jarak antar magnet

Berdasarkan grafik diatas, material *yoke* sangat berpengaruh terhadap distribusi kerapatan fluks yang dihasilkan pada rotor, besarnya distribusi kerapatan fluks yang dihasilkan dipengaruhi oleh besarnya permeabilitas material.

Hal ini dapat dilihat dari bentuk kurva nilai kerapatan fluks yang diperoleh cenderung naik pada tebal *yoke* 1 dan 2 cm, kemudian nilai kerapatan fluksnya turun pada tebal *yoke* 3 dan 4 cm. Pada simulasi ini digunakan material *yoke pure iron*, material ini memiliki permeabilitas dan konduktivitas elektrik yang tinggi atau disebut juga dengan bahan *ferromagnetic*. Berdasarkan kurva magnetisasi besi bahwa *pure iron* memiliki karakteristik permeabilitas yang optimum pada keadaan tidak jenuh dan akan mengalami penurunan pada saat jenuh (*saturasi*).

Pada rangkaian magnet, akan timbul *reluktansi*. Salah satu faktor yang mempengaruhi *reluktansi* adalah (*l*) tebal bahan. *Reluktansi* dapat dianalogikan seperti R (tahanan) pada rangkaian listrik. Sebagai mana yang terjadi pada rangkaian listrik semakin besar tahanan bahan maka bahan tersebut akan semakin sulit dilewati arus listrik. Begitu juga dengan rangkaian magnet semakin besar reluktansi yang dihasilkan maka bahan tersebut akan semakin sulit untuk dilewati garis gaya magnet. Hal ini dapat dilihat pada nilai kerapatan fluks pada ketebalan *yoke* 3 dan 4 cm lebih kecil dari pada nilai fluks pada ketebalan 1 dan 2 cm. Gerak fluks di sekitar cincin merupakan fungsi tahanan dari inti besi yang membawa fluks tersebut atau disebut *Reluktansi* ( $\mathcal{R}$ )<sup>[2]</sup>. Reluktansi berbanding lurus dengan panjang (*l*), berbanding terbalik dengan penampang luas bidang (*A*), dan bergantung pada

bahan magnetik rangkaian magnetik tersebut. Berdasarkan grafik data simulasi ,dapat dilihat bahwa nilai kerapatan fluks berangsur-angsur turun pada jarak antar magnet 1 cm hingga 4cm. Hal ini juga ditunjukkan oleh gambar 6. Kurva jarak terdekat yaitu 1 cm berada di atas kurva jarak 1.5 cm, kurva jarak 1.5 cm berada di atas kurva jarak 2 cm, dan begitu seterusnya sehingga kurva jarak terjauh 4 cm terletak paling bawah. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa semakin besar jarak antar kutub magnet maka intensitas medan magnet yang dihasilkan semakin kecil sehingga fluks magnet yang dihasilkan juga sedikit. Intensitas medan magnet (*H*) berbanding terbalik dengan jarak antar kutub magnet (*L*). Semakin besar jarak antar kutub magnet maka semakin sedikit intensitas medan magnet yang ditimbulkan sehingga kerapatan fluks (*B*) yang dihasilkan juga semakin kecil.

b. Data hasil simulasi pengaruh jenis material bahan magnet permanen.

Tabel 1. Data perbandingan nilai permeabilitas, intensitas medan magnet dan kerapatan fluks magnet pada beberapa jenis material magnet permanen.

Material magnet permanen	intensitas medan magnet (A/m)	Permeability (H/m)	Kerapatan fluks magnet pada simulasi (T)
NdFeB 52	891300	1.05	1.53839
Alnico 8	109300	6.678	0.682809
ceramic 8	233568	1.43846	0.419436

Dengan menggunakan ukuran dan jarak antar magnet sama yaitu tebal magnet 1,2 cm dan jarak antar magnet permanen 1 cm, nilai kerapatan fluks dengan menggunakan magnet permanen jenis NdFeB 52 lebih tinggi dari kerapatan fluks magnet permanen jenis alnico 8 dan ceramic 8.

Dari data simulasi pada tabel 1, dapat dilihat bahwa material NdFeB 52 memiliki intensitas medan magnet (*Hc*) lebih tinggi dibandingkan dengan bahan alnico 8 dan ceramic 8 dan bahan ceramic 8 nilai intensitas medan magnetnya lebih tinggi dari pada alnico 8. Sedangkan nilai permeabilitas bahan alnico 8 paling tinggi dibandingkan permeabilitas ceramic 8 dan NdFeB 52.

Dari data pada tabel di atas dapat diambil kesimpulan bahwa semakin besar intensitas medan magnet dan permeabilitas suatu bahan maka bahan tersebut dapat menghasilkan kerapatan fluks yang semakin besar. Dari data pada tabel 1 meskipun nilai permeabilitas bahan NdFeB 52 paling kecil akan tetapi pada hasil simulasi, bahan ini dapat menghasilkan nilai rapart fluks yang paling besar. hal ini dikarenakan bahan NdFeB 52 memiliki intensitas medan magnet yang jauh lebih besar dibandingkan dengan bahan lain. Perhitungan kerapatan

fluks yang dapat dihasilkan oleh beberapa material magnet

1. Bahan NdFeB 52

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \cdot \mu_r H \\ &= \mu_0 \cdot 1,05 \cdot 891300 \\ &= 935865 \mu_0 \text{ Tesla} \end{aligned}$$

=1.175446 Tesla

2. Bahan Alnico 8

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \cdot \mu_r H \\ &= \mu_0 \cdot 6,758 \cdot 109300 \\ &= 741600,5 \mu_0 \text{ Tesla} \end{aligned}$$

=0.931450 Tesla

3. Bahan Ceramic 8

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \cdot \mu_r H \\ &= \mu_0 \cdot 1,43846 \cdot 233568 \\ &= 335978,2 \mu_0 \text{ Tesla} \end{aligned}$$

=0,4219886 Tesla

Dari perhitungan di atas terlihat bahwa material NdFeB 52 dapat menghasilkan kerapatan fluks yang paling besar. Itulah mengapa pada hasil simulasi NdFeB 52 memiliki rapat fluks paling besar meskipun mempunyai permeabilitas bahan yang paling kecil.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil studi dan pembahasan kerapatan fluks pada rotor generator sinkron magnet permanen fluks aksial maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

Jarak antar magnet dan tebal *yoke* rotor berpengaruh pada kerapatan fluks rotor pada generator sinkron magnet permanen fluks aksial, berdasarkan hasil data simulasi didapatkan kerapatan fluks terbesar 0,45293 Tesla pada jarak antar kutub magnet 1 cm dan tebal *yoke* rotor 2 cm. Berdasarkan dari tiga jenis material magnet yang disimulasikan yaitu NdFeB 52, alnico 8 dan ceramic 8 didapatkan hasil bahwa material jenis NdFeB 52 menghasilkan kerapatan fluks paling besar daripada Alnico 8 dan ceramic 8 pada jarak antar magnet 1 cm, tebal *yoke* 1 cm dan tebal magnet 1,2 cm yaitu sebesar NdFeB 52 = 1,53839 T, Alnico 8 = 0,682809 T dan ceramic 8 = 0,419436 T Jenis material NdFeB 52 memiliki intensitas medan yang paling besar dibandingkan jenis material alnico 8 dan keramik 8 yaitu 891300 A/m.

Saran pengembangan bisa dengan mensimulasikan air gap dan stator dengan menggunakan software lain missal matlab fea,comsol sehingga didapatkan rancang generator yang ideal.

#### Referensi

- [1]. Gieras, J.F., and Mitchell King. 2002. *Permanent Magnet Motor Technology*. New York: Marcel Dekker Inc.
- [2]. J.F. Gieras, R. Wang dan M.J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine, Second Edition*. The Netherlands : Springer, 2008.
- [3]. Meeker, D.2004,Finite element Method Magnet version 4.0:user manual,http://femm.berlios.de.
- [4]. M. Sadeghierad, A. Darabi, H. Lesani, H. Monset. *Leakage Flux Consideration in modeling of High Speed Axial Flux PM Generator*. Electrical and Computer Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran., Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 2008.
- [5]. M. Sadeghierad, A. Darabi, H. Lesani, H. Monset. *Rotor Yoke Thickness of Coreless High-Speed Axial-Flux Permanent Magnet Generator*. Electrical and Computer Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran., Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 2009.
- [6]. Nurhadi,Arif., *Perancangan Generator Putaran Rendah Magnet Permanen Jenis Fe Fluks Aksial* , Skripsi S1 Universitas Diponegoro, Semarang, 2011.
- [7]. Pudjanarsa, Astu dan Djati Nursuhud. 2006. *Mesin Konversi Energi*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- [8]. Sunarjo. *Pemodelan Histerisis Ferromagnetik Untuk Analisis Medan Magnet Mesin Listrik*. Jurusan Teknik Elektro. Politeknik Negeri Malang.
- [9]. Tamura, Junji. *Calculation Method of Losses and Efficiency of Wind Generators*. Springer-Verlag. London, 2012.
- [10]. Utomo, Agus R. *Mesin Sinkron*, Diktat Kuliah Teknik Tenaga Listrik, Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia
- [11]. Wildi, Theodore. 1993. *Electrical Machines, Drives, And Power Systems*. New Jersey: Prentice Hall Inc
- [12]. Zuhail. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama, 1995
- [13]. *Properties of mag mat*.  
[http://ftp.dei.polimi.it/outgoing/Massimo.Ghioni/Power%20Electronics%20Passives/magnetics/magnetics\\_basics/properties%20of%20mag%20mat.pdf](http://ftp.dei.polimi.it/outgoing/Massimo.Ghioni/Power%20Electronics%20Passives/magnetics/magnetics_basics/properties%20of%20mag%20mat.pdf)  
diakses pada tanggal 9 Maret 2013
- [14]. Bab II Generator Sinkron  
<http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/22352/4/Chapter%20II.pdf>  
diakses pada tanggal 9 Maret 2013
- [15]. *Generator Equivalent Circuit And Main parts*  
<http://www.powerelectricalblog.com/2007/03/generator-equivalent-circuit-and-main.html>  
diakses pada tanggal 9 Maret 2013
- [16]. Magnet dan Elektromagnet (bagian 1)  
<http://airlangga25.wordpress.com/2011/08/27/magnet-dan-elektromagnet-bagian-1/>  
diakses pada tanggal 9 Maret 2013
- [17]. Magnet dan Elektromagnet (bagian 2)  
<http://airlangga25.wordpress.com/2011/08/27/magnet-dan-elektromagnet-bagian-2/>  
diakses pada tanggal 9 Maret 2013
- [18]. *Magnetic properties of materials*.

- <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/mu/>  
diakses pada tanggal 3 April 2013
- [19]. *HysteresisLoop*.  
<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/HysteresisLoop.html>  
diakses pada tanggal 3 April 2013
- [20]. *Permeability*.  
<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/Permeability.html>  
diakses pada tanggal 3 April 2013
- [21]. *Electronics Tutorial About Magnetic Hysteresis*,  
<http://www.electronicstutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.html>  
diakses pada tanggal 3 April 2013
- [22]. -----, Magnet Datasheet, <http://www.pro-perfect.com>  
diakses pada tanggal 3 April 2013