

DISAIN DAN SIMULASI GENERATOR MAGNET PERMANEN 3 PHASA MENGUNAKAN SOFTWARE MAGNET UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN KECEPATAN RENDAH

Joni Irfan¹⁾, Amir Hamzah²⁾

¹⁾Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro S1, ²⁾Dosen Teknik Elektro
Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru, Riau
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau

Email: joniirfan2@gmail.com

ABSTRACT

Indonesia is a country that has abundant energy resources and is built on the trajectory of the equator, so it has the potential to be used as a Wind Power Plant. The permanent magnet synchronous generator (GSMP) is the main component of the wind power generation. The author designs the GSMP using the MagNet Infolytica software. In designing the author publishes a number of journal guidelines and design specifications of products that synchronize permanent magnet generators marketed in the market. In accordance with technological developments and market requirements, in the study the authors agreed to the GSMP with the specifications of 18 12-pole slots with inter-phase voltage output of 41.5 volts AC, and 500 watts of power. This GSMP has a winding factor of 0.866, because it uses the single layer lap winding winding method. The inter phase output voltage from the generator simulation is 39.88 V AC, with the effective voltage value is 56.40 V AC. When compared with the calculation obtained the difference (error) of 1.62% for the value of voltage between phase and 1.65% for effective voltage.

Keywords: 3 phase Permanent Magnet Synchronous Generator, MagNet Infolytica, Wind power generator, low speed.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki sumber daya energi yang melimpah dan terletak di lintasan garis khatulistiwa, sehingga menyebabkan adanya potensi angin yang melimpah. Potensi angin rata-rata di Indonesia berkisar antara 3,5 – 7 m/s hasil dari pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). Potensi angin ini dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga angin, baik itu dalam skala kecepatan angin rendah maupun tinggi.

Sumber energi angin ini merupakan solusi alternatif yang berfungsi sebagai penggerak generator yang cukup ekonomis. Untuk Provinsi Riau sendiri potensi energi angin yang ada di termasuk kategori angin rata-rata berkecepatan rendah dan terkadang fluktuatif. Dengan kecepatan yang fluktuatif ini tidak akan menghilangkan potensi energi yang terkandung didalamnya, karena dapat dimanfaatkan oleh generator yang sesuai dengan karakteristik kecepatan angin tersebut (Pramono et al., 2015). Dalam penerapannya, lebih efektif menggunakan Generator Sinkron Magnet Permanen. Generator ini, memiliki efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan generator induksi, karena tidak ada rugi-rugi eksitasi yang dihasilkan sehingga banyak digunakan terutama untuk turbin angin.

Dewasa ini, generator sinkron magnet permanen semakin dikembangkan dan didesain praktis dan semudah mungkin untuk digunakan. Terutama untuk daerah dengan kecepatan angin yang rendah. Hal ini dapat kita lihat, akhir-akhir ini semakin bertambahnya jumlah kutub yang dikembangkan produsen-produken generator magnet permanen untuk dijual dipasaran. Menambah jumlah kutub sama halnya memudahkan generator bekerja dan menghasilkan listrik pada kecepatan putar angin yang rendah. Akhir-akhir ini sudah banyak ditemukan dipasaran generator magnet permanen dengan kutub 10 tetapi dengan daya kecil, karena diperuntukan bagi konsumen rumahan.

Melihat dari perkembangan generator magnet permanen yang berkembang dipasaran dalam penelitian ini penulis akan mendesain generator magnet permanen dengan spesifikasi dasar 12 kutub. Hal ini guna melihat Batasan energi yang dihasilkan generator pada putaran yang rendah dan pada kecepatan angin maksimum. Dalam hal ini digunakan software MagNet 64-bit versi 7.5.0121 untuk melihat hasil simulasi dari desain yang telah ditetapkan.

LANDASAN TEORI

2.1 Angin

Angin adalah massa udara yang bergerak. Angin dapat bergerak secara horizontal maupun secara vertikal dengan kecepatan bervariasi dan berfluktuasi secara dinamis. Faktor pendorong bergeraknya massa udara adalah perbedaan tekanan udara antara satu tempat dengan tempat yang lain. Angin selalu bertiup dari tempat dengan tekanan udara tinggi ke tempat dengan tekanan udara yang lebih rendah. Jika tidak ada gaya lain yang mempengaruhi, maka angin akan bergerak secara langsung dari udara bertekanan tinggi ke udara bertekanan rendah. Akan tetapi, perputaran bumi pada sumbunya, akan menimbulkan gaya yang akan mempengaruhi arah pergerakan angin.

Angin secara garis besar dapat diklasifikasikan sebagai angin planetary dan lokal. Angin planetary disebabkan oleh pemanasan yang lebih besar pada permukaan bumi dekat ekuator daripada kutub utara dan selatan. Hal ini menyebabkan udara hangat di daerah tropis naik dan mengalir melalui atmosfer ke kutub dan udara dingin dari kutub mengalir kembali ke ekuator di dekat permukaan bumi.

Faktor terjadinya angin yaitu:

a. Gradien barometris

Bilangan yang menunjukkan perbedaan tekanan udara dari 2 isobar yang jaraknya 111 km. Makin besar gradien barometrisnya, makin cepat tiupan angin.

b. Letak tempat

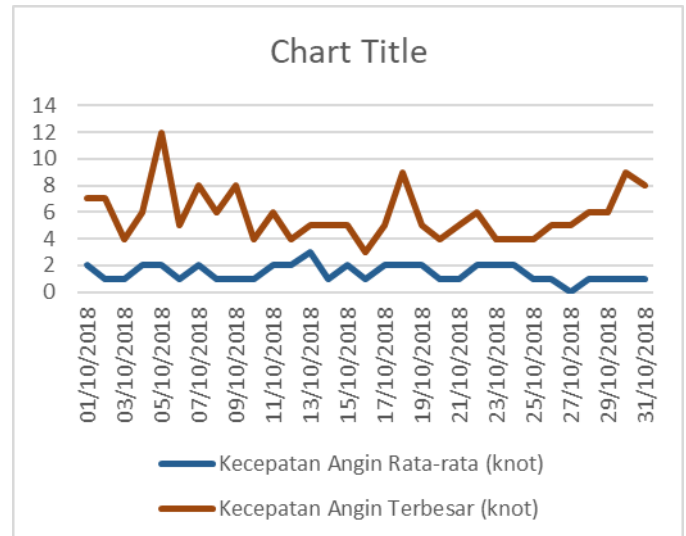
Kecepatan angin di dekat khatulistiwa lebih cepat dari yang jauh dari garis khatulistiwa.

c. Tinggi tempat

Semakin tinggi tempat, semakin kencang angin yang bertiup, hal ini disebabkan oleh pengaruh gaya gesekan yang menghambat laju udara. Di permukaan bumi, gunung, pohon, dan topografi yang tidak rata lainnya memberikan gaya gesekan yang besar. Semakin tinggi suatu tempat, gaya gesekan ini semakin kecil. Dikutip dari situs *windy.com* berikut penampakan pergerakan arah angin pada disekitar pulau Sumatra

Meski pada kenyataannya angin tidak dapat terlihat wujudnya namun masih dapat diketahui keberadaannya melalui efek yang ditimbulkan akibat hembusan angin pada benda yang terkena hembusan angin. Dari mana angin bertiup dan berapa kecepatannya dapat diketahui dengan menggunakan alat-alat pengukur angin seperti anemometer, wind fine, dan windsock. Selain menggunakan alat-alat tersebut, arah dan kecepatan angin juga dapat diukur atau diperkirakan menggunakan tabel skala beauford.

Mengutip data hasil pengujian di lapangan dari website BMKG (<https://www.bmkg.co.id>) di dapatkan grafik kecepatan angin rata-rata dan maksimum, sebagai berikut :



Gambar 2.2 : Grafik kecepatan angin rata-rata dan maksimum di Pekanbaru bulan Agustus

Grafik diatas menunjukkan data potensi kecepatan angin di pekanbaru. Data tertinggi kecepatan angina dalam menunjukkan angka 12 knot. Jika dikonversikan kedalam meter/second nilai nya adalah 6.17 m/s. Potensi angin ini diklasifikasikan kepada kecepatan angin rendah.

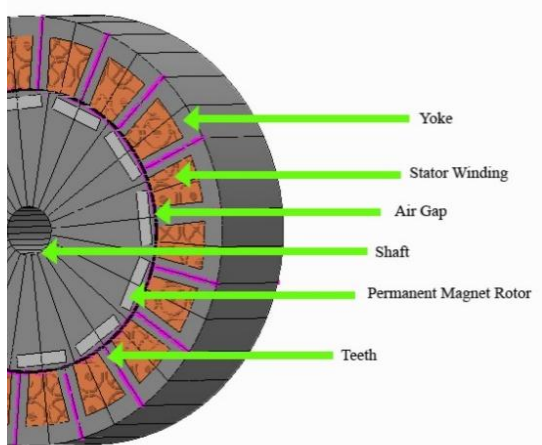
2.2 Generator Sinkron Magnet permanen

Mesin listrik sinkron termasuk mesin listrik arus bolak-balik medan putar yang dapat bekerja atau berfungsi sebagai generator atau sebagai motor. Bila bekerja sebagai generator, agar diperoleh frekuensi yang tetap stabil maka putarannya harus teliti, sedangkan sebagai motor mesin dipasok oleh jala-jala dengan frekuensi tetap. Mesin sinkron atau mesin serempak merupakan mesin listrik yang memerlukan frekuensi dan putaran yang tetap.

Prinsip pembangkitan generator sinkron sama dengan generator arus searah, yaitu dengan induksi elektromagnetik. Pada generator terjadi induksi elektro magnetik yang mengacu pada hukum Faraday dan Lenz . Hukum Faraday menjelaskan bahwa adanya perubahan *fluks* magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut. Sedangkan hukum Lenz menjelaskan bahwa GGL induksi yang muncul berarah melawan perubahan *fluks* menyebabkan arus yang mengalir atau dengan kata lain arus induksi menghasilkan medan magnet yang melawan perubahan *fluks* magnet yang menghasilkan arus induksi. Generator sinkron magnet permanen bekerja menggunakan medan eksitasi yang dihasilkan dari magnet

permanen, bukan dari kumparan. Sehingga *fluks* magnetik pun dihasilkan oleh medan magnet permanen.

Generator sinkron magnet permanen terdiri dari beberapa bagian komponen, dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 1. Komponen-komponen Generator Sinkron Magnet Permanen

Pada penelitian ini penulis mengambil data dari buku karangan J.R Hendershot untuk desain kombinasi *slot* dan *pole* yang akan dirancang.

NO OF POLES, 2P													
S	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
3	.866												
6		.866											
9			.866										
12				.866									
15					.866								
18						.866							
21							.866						
24								.866					
27									.866				
30										.866			

Dari table dapat dilihat untuk jumlah kutub 18 *slot* 12 *pole* memiliki nilai faktor belitannya adalah 0.866. Struktur ini telah menunjukkan nilai faktor belitan rata-rata, dengan format ini kita dapat menghemat dimensi yang akan digunakan untuk membentuk generator magnet permanen 3 fasa.

Terdapat beberapa rumus yang digunakan untuk melakukan rancangan dimensi generator sinkron magnet permanen, adapun rumus-rumus tersebut adalah :

Dimensi Rotor dan Stator

Menghitung *derajat slot*, (θ_s)

$$\theta_s = \frac{(2 \cdot \pi)}{N_s} \quad (1)$$

Menghitung Derajat pole, (θ_p)

$$\theta_p = \frac{(2 \cdot \pi)}{p} \quad (2)$$

Menghitung slot pitch, (τ_s)

$$\tau_s = r_{si} \cdot \theta_p \quad (3)$$

Menghitung coil pitch, (τ_c)

$$\tau_c = \text{coil span} \cdot \tau_s \quad (4)$$

Menghitung lebar gigi stator, (W_{ts})

$$W_{ts} = \frac{p \cdot B_g \cdot A_{pr}}{N_s \cdot L_i \cdot B_{ts}} \quad (5)$$

Menghitung area kutub rotor, A_{pr}

$$A_{pr} = \tau_r \cdot L_i \quad (6)$$

Rotor pole pitch, τ_r

$$\tau_r = \tau_p \cdot 0,75 \quad (7)$$

Stator pole pitch, τ_p

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{p} \quad (8)$$

Effective core length, L_i

$$L_i = L \cdot k_{stack} \quad (9)$$

Rotor diameter D_r ,

$$D_r = D - 2 \cdot l_g \quad (10)$$

Stator yoke $Y(s)$

$$Y_s = \frac{\phi}{2 \cdot L_i \cdot B_{ts}} \quad (11)$$

Desain Magnet

Luas area perkutub, S_m

$$S_m = \pi \cdot \frac{D_i + D_a}{2} \cdot \frac{1}{p} \cdot L_h \quad (12)$$

Luas ekuivalen air gap, S_g

$$S_g = \pi \cdot \frac{D_i + D_c}{2} \cdot \frac{1}{N_s} \cdot L_a \quad (13)$$

Koefisien permeance, P_c

$$P_c = \frac{L_m \cdot S_g}{\sigma_g \cdot S_m} \cdot \frac{k_f}{k_r} \quad (14)$$

Kemiringan kurva demagnetisasi, μ_r

$$\mu_r = \frac{B_r}{H_c} \cdot \frac{10^7}{4 \cdot \pi} \quad (15)$$

Kerapatan fluks di titik pengoperasian generator, B_d

$$B_d = \frac{P_c \cdot B_r}{P_c + \mu_r} \quad (16)$$

Kerapatan fluks rata-rata dalam celah udara, B_g

$$B_g = \frac{B_d \cdot S_m}{k_f \cdot S_g} \quad (17)$$

Nilai fluks medan magnet, Φ

$$\Phi = B_g \cdot S_m \quad (18)$$

Desain Kumparan Stator

Luas lubang slot, A_s

$$A_s = \pi \frac{De^2 - Dc^2}{4} \cdot \frac{1}{N_s} - Lt \cdot Lt - \frac{\pi \cdot Dc - Lt \cdot N_s}{N_s} \cdot Lt - Wts \cdot \frac{De - Dc - 2 \cdot Lt}{2} \quad (19)$$

Jari-jari kawat penghantar, r_{cu}

$$r_{cu} = \sqrt{\frac{A_0 \cdot Sf}{2 \cdot n_c \cdot \pi}} \quad (20)$$

Jumlah lilitan (Z) yang dapat diisi dalam slot :

$$Z = \frac{A_0}{\frac{\pi \cdot (d \cdot 10^{-3})^2}{4}} \quad (21)$$

Jumlah belitan tiap fasa, n_c

$$n_c = \frac{E_{ph}}{4,44 \cdot f \cdot k_w \cdot \phi} \quad (22)$$

Frekuensi PMSG (f)

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \quad (23)$$

Langkah-langkah mendesain generator

Merujuk kepada buku karangan J.R. Hendershot Jr dan TJE Miller dengan judul “Design of Brusless Permanent-Magnet Motor” ada beberapa tahapan penting dalam merancang generator sinkron magnet permanen. Adapun tahapan tersebut adalah sebagai berikut :

- 1) Menentukan spesifikasi generator yang tergantung terhadap aplikasi generator yang akan dirancang.
- 2) Menentukan jenis konfigurasi generator interior-rotor, exterior-rotor, atau axial-gap.
- 3) Menentukan jenis magnet yang digunakan.
- 4) Menentukan jumlah kutub magnet.
- 5) Menentukan jumlah slot dan fasa.
- 6) Melakukan perhitungan kasar terkait dimensi.
- 7) Menentukan jarak air gap dan menentukan beban magnetik.
- 8) Mendesain rotor dan menentukan fluks setiap kutub.
- 9) Menentukan dimensi laminasi stator.
- 10) Menghitung jumlah konduktor dan jumlah lilitan tiap coil.
- 11) Menghitung ukuran konduktor.
- 12) Menghitung performa.
- 13) Memeriksa besar fluks dan demagnetisasi magnet.
- 14) Memodifikasi dan mengoptimasi rancangan hingga rancangan generator yang optimal didapat sesuai kebutuhan.

Hasil dan Pembahasan

Spesifikasi rancangan generator sinkron magnet permanen

Tabel.1. Input parameter

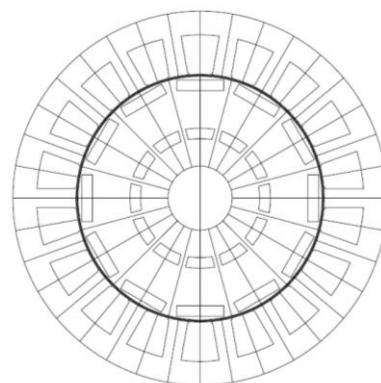
Power 3 phasa, P	500 watt
Tegangan phasa, V	24 Volt AC
Jumlah phasa, m	3
Jumlah Slot, S	18
Jumlah Kutub, P	12
Frekuensi, F	50 Hz
Kecepatan, N	500 rpm
Faktor Belitan, k_w	0.866
Faktor daya, $\cos \theta$	0.85

Tabel. 2. Spesifikasi diameter generator 18S12P

No	Dimensi	Unit	Nilai
1	Jumlah Slot	-	18
2	Jumlah Pole	-	12
3	Diameter Dalam Magnet	mm	109
4	Diameter Luar Stator	mm	175
5	Diameter dalam Stator	mm	116
6	Diameter Rotor	mm	114
7	Diameter Dalam lubang slot	mm	159
8	Diameter Luar Magnet	mm	110.5
9	Tebal inti Stator/Rotor	mm	45
10	Panjang Magnet	mm	45
11	Tebal Magnet	mm	18
12	Tinggi <i>umbrella</i>	mm	20
13	Jarak antar Slot	mm	6
14	Lebar <i>Teeth</i>	mm	8,8
15	Celah udara	mm	1

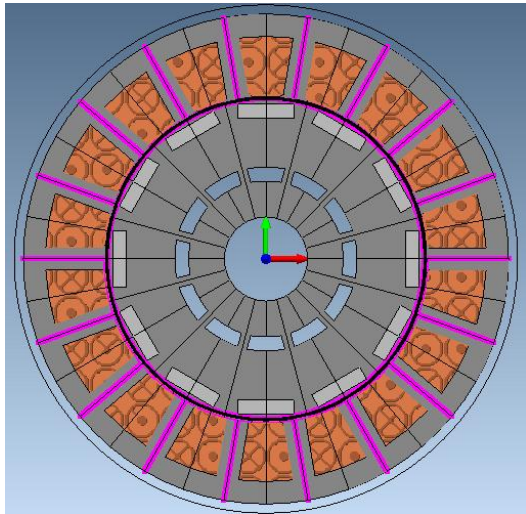
Semua data spesifikasi dan parameter diatas, akan dibuatkan kerangka rancangannya dengan menggunakan *software* autocad atau Solidworks. Penulis memilih menggunakan autocad untuk membuat kerangka rancangannya. File yang telah selesai dibuat, disimpan dalam format .dxf pada *software* autocad.

Tampilan dari rancangan generator ditunjukkan pada gambar berikut :



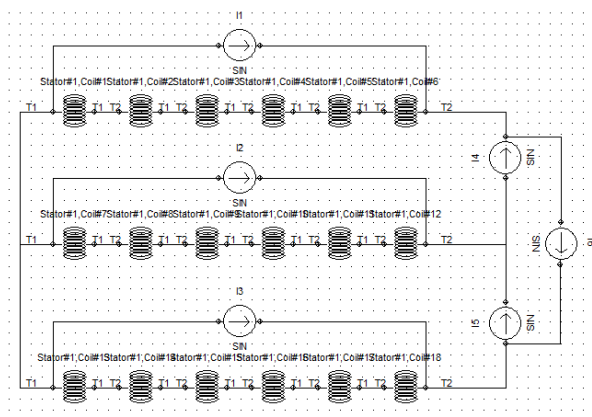
Gambar 2. Desain 2D generator sinkron magnet permanen pada *software* Autocad 2007

Selanjutnya, file 2D tersebut akan di *import* ke *software* MagNet Infolytica untuk dilakukan inialisasi komponen. Berikut tampilan rancangan dari generator yang sudah diinisialisasi pada *software* MagNet :



Gambar 3. Model Geometri Generator sinkron magnet permanen setelah pemberian material

Umunya belitan pada masing-masing slot akan dirangkai secara digunakan adalah hubungan bintang, hal ini berguna untuk meningkatkan daya output dan menghindari tegangan harmonik, sehingga tegangan line tetap sinusoidal dalam kondisi beban berbeda-beda. Berikut bentuk rangkaian yang digunakan :



Gambar 4. Rangkaian simulasi tanpa beban

Setelah dilakukan inialisasi komponen pembentuk generator hingga menjadi tampilan 3D, langkah selanjutnya adalah proses *solving*.

Parameter Input

Pada simulasi kali ini, akan dilakukan beberapa variasi kecepatan sudut putar generator. Parameter-parameter yang diatur dalam simulasi ini adalah kecepatan sudut rotor (ω) dan waktu. Variasi kecepatan

yang akan disimulasikan adalah kecepatan 100 rpm, 200 rpm, 300 rpm, 400 rpm dan 500 rpm.

Pada perhitungan kecepatan putar derajat per detik, untuk membentuk satu gelombang didapatkan dari jumlah derajat putaran rotor dibagi sebanyak jumlah pasang kutub. Sehingga pada penelitian kali ini didapatkan putaran sebesar $360^\circ / 6 = 60^\circ$. Untuk dapat menghasilkan gelombang sinusoidal maka ketika simulasi, pergerakan rotor akan dibagi kedalam 30 titik pergerakan, maka akan ada 30 data untuk dapat membentuk gelombang sinusoidal (meggy octa, 2018). Berikut contoh perhitungan settingan yang digunakan untuk proses *solving* pada *software* MagNet :

Kecepatan putar rotor 500 rpm

$$(500 \text{ rpm} \times 360^\circ) / (60 \text{ s}) = 3000 \text{ rps}$$

Waktu pada kecepatan 3000 rps

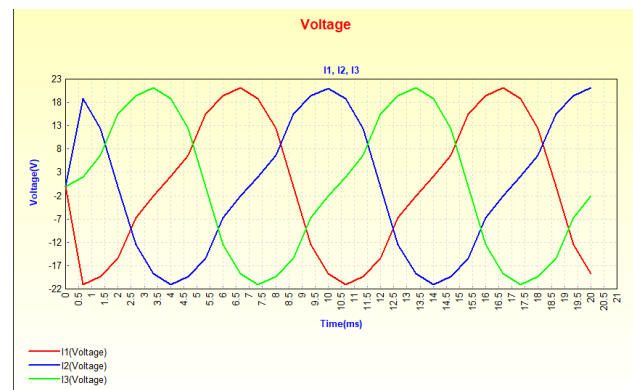
$$60 / (3000^\circ) = 0,02 \text{ s}$$

Waktu per *step* kecepatan 3000 rps

$$0,02 / 30 = 0,000667 \text{ s}$$

Output Generator

Pada saat simulasi tanpa beban didapatkan bentuk output sinusoidal dari generator adalah sebagai berikut :



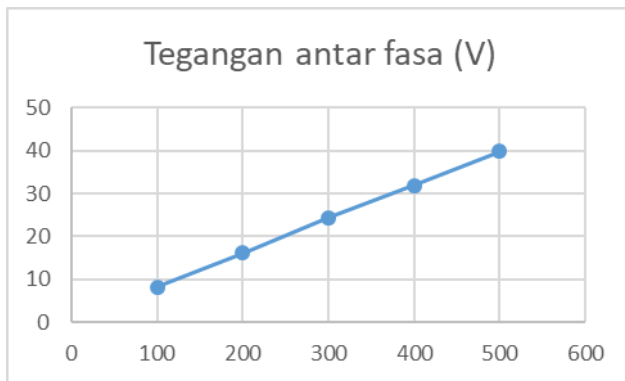
Gambar 5. Bentuk sinyal sinusoidal tegangan fasa

Untuk output tegangan antar fasa, pada kecepatan putar rotor yang berbeda adalah sebagai berikut :

Tabel 3. Output tegangan antar fasa

No	Kecepatan (RPM)	Tegangan puncak Antar Fasa
1	100	8.14
2	200	16.06
3	300	24.39
4	400	31.83
5	500	39.77

Data diatas menjelaskan bahwa semakin meningkat kecepatan putar rotor generator, maka semakin besar tegangan keluaran. Hasil simulasi variasi kecepatan putar rotor akan disederhanakan dengan tampilan grafik berikut ini :

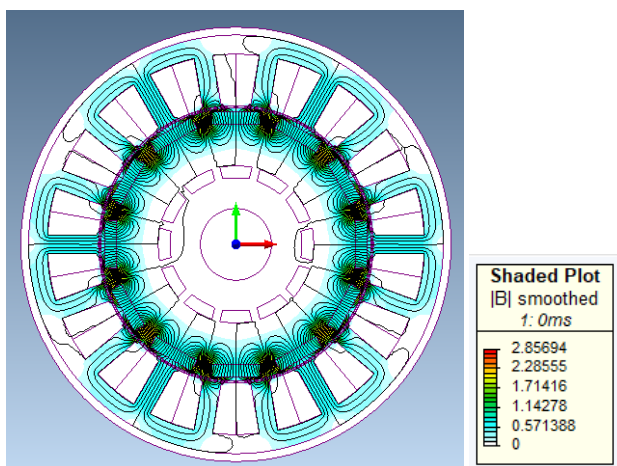


Gambar 6 Perbandingan kecepatan putar rotor dengan tegangan antar fasa

Hasil perbandingan simulasi dan rancangan dapat dilihat pada tabel berikut :

No	Tegangan	Rancangan (Volt)	Simulasi (Volt)	Error (%)
1	Tegangan puncak Antar fasa	41.5	39.8	1.7
2	Tegangan RMS	24	21.1	2.8

Data pada tabel diatas menunjukkan bahwa terjadi selisih tegangan efektif dan tegangan antar fasa antara rancang dengan simulasi yang tidak begitu jauh. Tegangan antar fasa memiliki error sebesar 1.73 % sedangkan pada tegangan efektif terjaaid error sebesar 1,81%. Pada software Magnet selain tegangan kita juga difasilitasi untuk melihat tampilan dari output gelombang fluks seperti yang terlihat dari gambari berikut ini



Kesimpulan

Berdasarkan simulasi rancangan generator magnet permanen 3 fasa 500 watt yang memiliki 18 slot dan 12 kutub dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Rancangan generator sinkron magnet permanen 18 slot 12 kutub, menghasilkan tegangan keluaran antar fasa sebesar 39,77 volt , pada pengujian tanpa

beban dengan jumlah 15 lilitan per slot dan putaran 500 rpm.

2. Selisih output tegangan puncak antara perhitungan dengan simulasi adalah 1.62 Volt, dan selisih output tegangan rms antara hitungan dan simulasi adalah sebesar 2,8 volt.
3. Kinerja motor akan berkurang jika terdapat aliran flux yang bisa mencapai ke bagian shaft.

Saran

Dalam penyempurnaan dan pengembangan dari pembahasan ini, langkah selanjutnya yang sebaiknya dilakukan adalah :

1. Mengaplikasikan rancangan kedalam bentuk *prototype* sesuai dengan rancangan yang sama dengan penelitian ini.
2. Melanjutkan ke perancangan bilah yang sesuai dengan kebutuhan rancangan generator tersebut agar dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga angin.
3. Membuat kontroler (MPPT) untuk mengontrol keluaran generator.

Daftar Pustaka

Hendershot JR, J.R., and Miller, T., 1994, *Design Of Brushless Permanent Magnet Motors*, Magna Physics Publishing and Oxford University Press, New York, USA.

Irasari, P., Alam, H.S., Kasim, M., 2013. *Analytical Design Method of 3 Kw, 200 RPM Permanent Magnet Generator for Renewable Energy Power Plant Applications*. Research Center for Electrical Power and Mechatronics, Indonesian Institute of Sciences 12.

Datassheet, *Neodymium Iron Boron Datasheet*, Eclipse Magnetics Ltd, England, www.eclipsemagnetics.com.

Pramono, B.W., Warindi, Hidayat, A., 2015. Perancangan Mini Generator Turbin Angin 200 W Untuk Energi Angin Kecepatan Rendah.

Irsyadul, U,M. Nrartha, A, M, I. Zubaidah, T. 2017. Desain Generator Sinkron Magnet Permanen Jenis Neodymium Iron Boron Untuk PLTB Daya 500 Watt Menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica

Suhada, O, M. 2018. Analisa Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah Berbasis MagNet 7.5

