

Perancangan Generator Magnet Permanen dengan Arah Fluks Aksial untuk Aplikasi Pembangkit Listrik

ARDHIANS ABDILLAH WIJAYA, SYAHRIAL, WALUYO

Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Bandung

Email : ardhiansli poet@yahoo.com

ABSTRAK

Salah satu upaya untuk mengatasi krisis energi adalah mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil dengan cara memanfaatkan energi alternatif. Salah satu energi alternatif yang dapat digunakan adalah energi angin. Pembangkit listrik angin ini memiliki komponen penting yaitu sebuah generator yang merupakan suatu mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, dengan memanfaatkan kecepatan yang rendah dan torsi yang tinggi dari sistem penggerak langsung dari turbin angin. Oleh karena itu, dibutuhkan generator kecepatan rendah (aksial flux generator magnet permanen). Pada perancangan ini, desain menggunakan generator tipe aksial double side, dengan jumlah 20 kutub, dan menggunakan sebuah magnet permanen berjenis neodymium (NdFeB) dan dengan jumlah kumparan 15 buah 3 fasa. Tegangan yang dihasilkan generator sebesar 24 volt, dimana ditujukan untuk pengisian akumulator.

Kata Kunci: generator kecepatan rendah, generator aksial fluks, axial flux permanene magnet generator (AFPMG)

ABSTRACT

One effort to overcome the energy crisis is to reduce dependence on fossil energy sources by utilizing alternative energy. One can be used alternative energy is wind energy. The wind power plant has an important component of which is a generator which is an electric machine that converts mechanical energy into electrical energy. By utilizing a low speed and high torque of the direct drive system of the wind turbine, it was required low-speed generator (axial flux permanent magnet generator). In type designing of axial generator, the design was used a double side, where the number of 20 poles was using a permanent magnet neodymium (NdFeB) type and the number of coils were 15 pieces of three phase. The yielded generator voltage was 24 volt, where it was intended for charging the accumulator.

Keywords: low-speed generator, axial flux generator, axial flux permanene magnet generator (AFPMG)

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang semakin pesat mendorong penggunaan energi dalam jumlah yang besar. Hal ini mengakibatkan semakin menipisnya bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama. Selain itu, penggunaan bahan bakar fosil juga mengakibatkan pencemaran lingkungan.

Permasalahan ini berdampak pada ketersediaan energi listrik. Untuk itu diperlukan energi alternatif sebagai pemasok energi listrik tersebut. Hal itu diantaranya adalah pemanfaatan energi angin, dimana sumber energi ini ramah lingkungan dan bisa diperbaharui. Oleh karena itu, solusi yang paling memungkinkan untuk diterapkan saat ini di Indonesia adalah pembangkit listrik tenaga angin atau yang lebih dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

Berdasarkan kondisi kecepatan angin di wilayah Indonesia yang berkisar antara 3 – 6 m/s, dimana nilai tersebut sebenarnya kurang efektif untuk sebuah pembangkit energi listrik tenaga angin, maka perlu dikembangkan sebuah teknologi turbin angin kecepatan rendah yang memanfaatkan angin berkecepatan rendah menjadi energi listrik yang siap digunakan.

Meskipun energi yang dihasilkan tidak sebesar energi yang berasal dari batu-bara ataupun nuklir, tetapi PLTB kecepatan rendah merupakan solusi yang paling murah dan rendah resiko untuk diterapkan di Indonesia. Diharapkan dengan diberdayakannya pembangkit listrik tenaga angin tersebut di Indonesia, akan menjadi satu sumber energi alternatif dalam menyambut datangnya masa krisis energi yang sebenarnya.

Tidak berbeda dengan pembangkit lainnya, pembangkit listrik tenaga angin mempunyai komponen yang paling penting dalam hal pembangkitan listrik, yaitu generator. Dewasa ini telah banyak generator yang dimanfaatkan untuk perkembangan pembangkit listrik tenaga angin, antara lain adalah generator tipe radial fluks dan generator tipe aksial fluks (Rossouw, 2009).

2. METODOLOGI DAN PERANCANGAN GENERATOR

2.1 Perancangan 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 (Piggott, 2009).

Pada perancangan ini, penulis memilih desain aksial fluks permanent generator (AF PMG) dengan konfigurasi stator di dalam (tidak bercelah) diantara dua stator, dengan jumlah koil 15 buah 3 fasa. Inti stator menggunakan bahan non-feromagnetik (resin), dan memakai dua rotor sebagai eksitasi dengan jumlah magnet 20 pole dengan arah magnet tarik-menarik utara-selatan (N-S), rotor terdiri dari bahan feromagnetik agar lebih memudahkan jalu-jalur fluks dengan yang sebelahnya (Jarekson, 2011).

Sebelum dilakukan perhitungan pada sisi elektrik maka perlu diketahui parameter-parameter yang diperlukan pada sistem elektrik generator. Data-data yang didapat adalah sebagai Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Spesifikasi yang di butuhkan dalam perhitungan

1. ukuran koil/Stator :	
jumlah coil (Q)	15
Dimensi koil	
panjang lubang pada coil (La)	61,36 mm
lebar atas lubang pada coil (Lb)	36,83 mm
lebar bawah lubang pada coil (Lc)	15,79 mm
lebar kaki coil (Wc)	10,16 mm
jarak antara coil (Je)	1,65 mm
jarak ujung coil ke pinggiran stator (Lf)	36,12 mm
2. masa jenis fluk magnetik :	
ketebalan magnet (Hm)	5 mm
airgap (g)	3,00 mm
magnet power (Br)	1,38 mT
koersif kekuatan medan magnet (Hc)	923 kA/m
3. jumlah belitan yang dibutuhkan :	
Tegangan AC(Vf)	24 volt
lebar magnet (Wm)	18,01 mm
panjang magnet (la)	40,01 mm
jumlah kutub generator (p)	20
jumlah phasa (Nphasa)	3

2.2 Memilih Frekuensi Generator, Jumlah Kutub Dan Jumlah Koil

Untuk menentukan jumlah kutub p pada persamaan (1) dan dengan demikian didapat jumlah total magnet per kutub. Magnet permanen yang digunakan pada desain ini adalah magnet permanen jenis neodymium (NdFeB) (Fahey, 2006).

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1)$$

$$\frac{2Q}{3 \cdot p} = 0.5 \tag{2}$$

Kumparaan yang terhubung dalam sistem tiga fasa menggunakan koneksi hubung bintang. Jumlah koil Q dapat dihitung dari persamaan (2) dan dengan demikian pasangan kutub yang tepat untuk kombinasi kumparan untuk menciptakan sinyal system tiga fasa, terdapat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kombinasi Kutub-Kumparan

p	Q	p	Q	p	Q	p	Q	p	Q
8	6	12	9	16	12	20	15	24	18

Pada desain ini penulis mendesain generator untuk bekerja dalam frekuensi 50 Hz, dengan jumlah kutub 20 buah.

2.3 Dimensi Generator Aksial

Dimensi aksial ditunjukkan oleh generator Gambar 1, dimana meliputi ketebalan besi cakram rotor, ketebalan magnet h_m , celah udara g dan ketebalan stator t_w . Ketebalan magnet $h_m = 5$ mm dan memiliki *grade* N48. Celah udara dipilih 3 mm dan terdiri dari celah udara mekanik 1 mm, 1 mm dari resin (stator) dan 1 mm dari jarak kumparan ke jarak resin. Pengurangan total celah udara dapat dicapai dengan meminimalkan ketebalan lapisan resin atas magnet dan stator, agar menghasilkan tegangan induksi yang lebih tinggi dan output daya yang lebih tinggi.

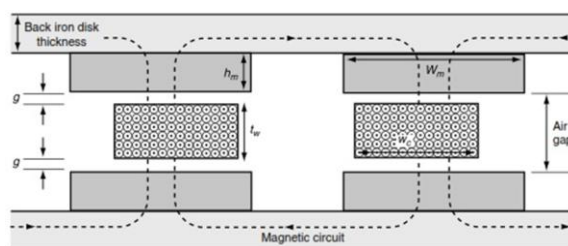
Ketebalan kumparan stator aksial dapat dihitung dengan persamaan (3), yang dihasilkan dari analisis sirkuit magnetic sementara dengan asumsi tidak ada kebocoran fluks magnet. Pada persamaan (3) dimana kerapatan fluks magnetik di dekat permukaan magnet B_{mg} , kerapatan fluks magnet remanent B_r dan koersif kekuatan medan H_c adalah nilai-nilai karakteristik magnet yang terkait dengan *grade* ada pada lembar data magnet neodymium. Variable lainnya adalah faktor saturasi $\beta_{sat} = 1$, karena stator tanpa inti besi dan μ_0 permeabilitas ruang hampa.

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \mu_{rrec} \frac{(g + 0,5 t_w)}{h_m} \beta_{sat}} \tag{3}$$

$$\mu_{rrec} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_r}{H_c} \tag{4}$$

Jika NdFeB magnet N48 dipilih kemudian persamaan (3) dapat ditulis ulang untuk ketebalan stator sebagai.

$$t_w + 2g = 2h_m \rightarrow t_w = 2h_m - 2g \tag{5}$$



Gambar 1. Dimensi generator aksial

Pada perhitungan kerapatan fluks magnetik di dekat permukaan magnet B_{mg} , dibutuhkan nilai dari B_r adalah kerapatan fluks magnet *remanent* yang didapat pada tabel spesifikasi magnet neodmium. Nilai B_r didapat 1,38 Tesla dengan grade N48, koersif kekuatan medan H_c dan μ_0 sama dengan $4\pi * 10^{-7} Wb/Am$.

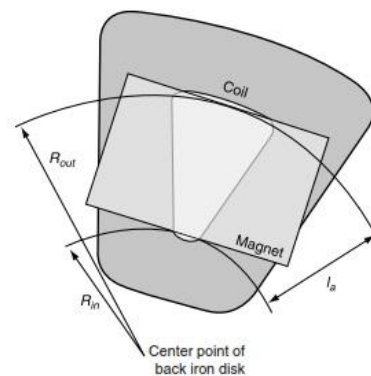
2.4 Dimensi Kumparan Generator

Dengan menggunakan persamaan dasar untuk induksi elektromagnetik dan dengan asumsi sinyal hampir sinusoidal dengan kepadatan fluks magnet B , maka dapat dihitung dengan cara yang disederhanakan. Pada awalnya fluks maksimum per kutub Φ_{max} dapat dihitung menggunakan persamaan (6).

$$\Phi_{max} = B_{mg} * W_m * l_a \quad (6)$$

Dimana W_m adalah lebar dari magnet dan l_a adalah panjang dari magnet dan juga panjang aktif dari generator Gambar 2, maka jumlah belitan per koil N_c dihitung menggunakan persamaan (7), dimana p_w adalah koefisien belitan sama dengan 0,95, q adalah jumlah koil per fasa, n adalah putaran generator pada saat *cut-in* dan E_f adalah tegangan induksi EMF selama *cut-in*.

$$N_c = \frac{\sqrt{2} \cdot E_f}{q \cdot 2\pi \cdot p_w \cdot \Phi_{max} \cdot n \cdot p / 120} \quad (7)$$



Gambar 2. Radius dalam, radius luar dan panjang aktif dari generator

Setelah didapat nilai N_c dan ketebalan stator aksial t_w , maka lebar kaki koil W_c dapat dihitung menggunakan persamaan (8). Untuk nilai panas koefisien cq yaitu sebesar 0,3 W/cm^2 , dan dimana I_{acmax} adalah maksimum arus generator dan ρ_{cu} adalah hambatan jenis dari tembaga.

$$W_c = \frac{I_{acmax} \cdot N_c}{\sqrt{\frac{2 \cdot cq \cdot p_f \cdot t_w}{\rho_{cu}}}} \quad (8)$$

Faktor kumparan yang menandakan rasio daerah tembaga dengan luas total dari penampang melintang dari sebuah kumparan ditunjukkan dengan p_f . Nilai terdekat dengan 0,55 mencukupi untuk factor ini sejauh kumparan dibuat secara manual (Latoufis, 2012).

Pada perhitungan dimensi stator maka lebar kaki koil W_c sudah ditetapkan menggunakan data dari hasil perhitungan desain koil yang digambar sebelumnya menggunakan software autocad dan didapat data koil seperti pada Tabel 1.

Seiring dengan koefisien panas c_q , kepadatan arus maksimum J_{max} dari kumparan harus diperhitungkan seperti pada persamaan (10). Setelah dihitung dari persamaan (9) untuk I_{acmax} . Dari persamaan (11) dapat dihitung untuk luas penampang tembaga S_c .

$$I_{acmax} = \frac{1.1.P_{nom}}{3.E_{f_{nom}} \cdot \eta} \quad (9)$$

$$J_{max} = \frac{I_{acmax}}{S_c} \quad (10)$$

Luas penampang tembaga S_c dan diameter tembaga d_c dapat dihitung dari persamaan (11) dan persamaan (12) :

$$S_c = \frac{A_{reatambaga}}{N_c} = \frac{b_f \cdot W_c \cdot t_w}{N_c} \quad (11)$$

$$d_c = \sqrt{\frac{4.S_c}{\pi}} \quad (12)$$

2.5 Radius Luar Generator

Dari semua variable yang dihitung sebelumnya, diameter dalam dan diameter luar generator, dan dengan demikian diameter luar dari cakram besi Gambar 1, dapat dihitung. Pada awalnya diameter bagian dalamnya dihitung secara geometris dan kemudian diameter luarnya dihitung hanya dengan menambahkan panjang aktif dari generator. Diameter dalam dan luar generator dapat dihitung dalam persamaan (13) dan persamaan (14) :

$$R_{in} = \frac{2Q \cdot W_c + p \cdot W_m}{2\pi} \quad (13)$$

$$D_{out} = D_{in} + 2 \cdot l_a \quad (14)$$

3. HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

3.1 Sistem Pengujian AF PMG

Percobaan AF PMG menggunakan *variable speed drive* (VSD) sebagai penggerak motor listrik sinkron 4 pole dengan kecepatan 1500 RPM. Motor ini digunakan untuk penggerak mula generator turbin angin untuk menirukan karakteristik mekanik dari turbin angin. Gambar 3 menunjukkan AFPMG terhubung pada penggerak motor (Nurhadi, A. 2012)

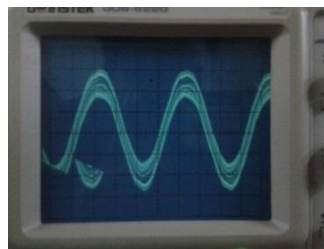


Gambar 3. penggerak generator menggunakan motor listrik

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tegangan dan arus keluaran generator yang digunakan berdasarkan kecepatan putar poros generator. Dari pengujian ini, diperoleh data berupa tegangan dan arus listrik serta bentuk gelombang yang dihasilkan oleh generator saat generator berputar. Setelah generator berputar, maka tegangan dan arus output generator diukur dengan menggunakan voltmeter dan amperemeter.

3.2 Pengujian Tanpa Beban

Pengujian tanpa beban tegangan dan arus output generator berupa tegangan dan arus AC, bentuk gelombang output generator dilihat dengan menggunakan osiloskop Gambar 4. Pengujian dilakukan dengan putaran generator yang tetap pada 300 rpm.



Gambar 4. Sinyal keluaran generator tanpa beban

Gambar 4 menunjukkan lebar sinyal 4 div dan tinggi sinyal V_p 2,2 div dan pada osiloskop diatur time/div 5 ms, volts/div 2 volt. Dari data sinyal yang didapat maka frekuensi dan tegangan dapat dihitung sebagai berikut.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ Hz}$$

$$T = 4 \text{ div} * (5 * 10^{-3}) = 0,02 \text{ s}$$

$$V_p = 2,2 \text{ div} * 2 \text{ volts} = 4,4 \text{ volt}$$

$$V_{p-p} = 2 * 4,4 \text{ volts} = 8,8 \text{ volt}$$

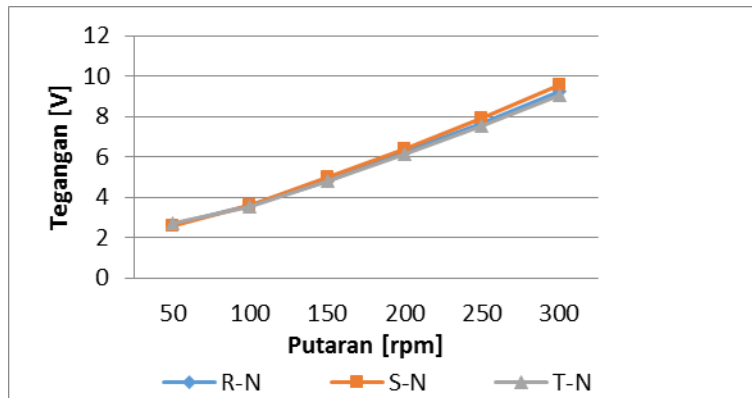
3.2.1 Pengujian Tegangan Fasa-Netral

Pengujian dilakukan terhadap generator 1 fasa. Dengan variasi putaran generator dihasilkan data tegangan keluaran pada generator seperti ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3. Data pengujian tegangan Fasa-Netral terhadap putaran generator tidak berbeban

No	Putaran (rpm)	Tegangan [v]		
		R-N	S-N	T-N
1	50	2,63	2,6	2,69
2	100	3,61	3,62	3,56
3	150	4,81	4,98	4,8
4	200	6,24	6,37	6,14
5	250	7,68	7,92	7,55
6	300	9,27	9,58	9,06

Dari Tabel 3 dapat digambarkan grafik hubungan antara putaran terhadap tegangan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hubungan pengaruh putaran terhadap tegangan fasa-netral

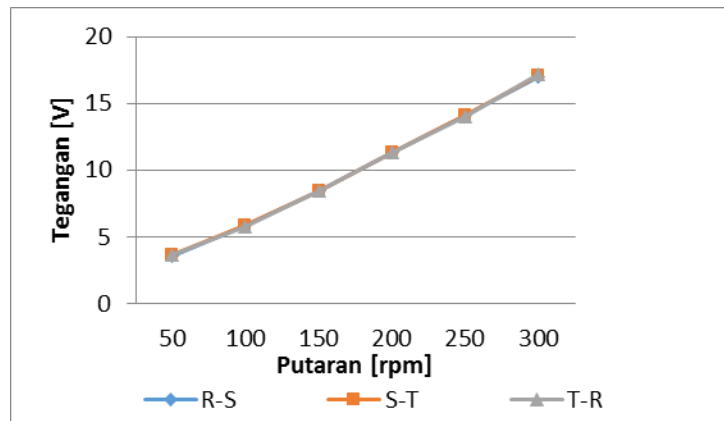
3.2.2 Pengujian Tegangan Fasa-Fasa

Pengujian dilakukan terhadap generator 3 fasa hubungan bintang. Dengan variasi putaran pada generator dihasilkan data tegangan keluaran fasa ke fasa seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data pengujian tegangan Fasa-Fasa terhadap putaran generator tidak berbeban

No	Putaran (rpm)	Tegangan [v]		
		R-S	S-T	T-R
1	50	3,58	3,64	3,65
2	100	5,87	5,81	5,78
3	150	8,43	8,4	8,42
4	200	11,33	11,36	11,34
5	250	14,08	14,11	14,02
6	300	17,03	17,06	17,19

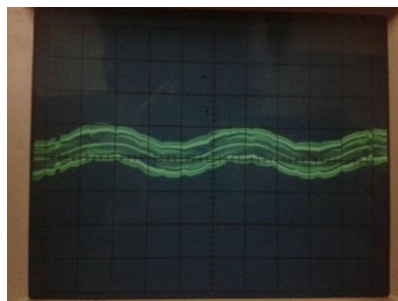
Dari Tabel 4 dapat digambarkan grafik hubungan antara putaran terhadap tegangan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik hubungan pengaruh putaran terhadap tegangan Fasa-Fasa

3.3 Pengujian Berbeban

Dalam pengujian berbeban, beban yang digunakan adalah lampu pijar 18 watt 12 volt, dikalikan 3 lampu menjadi 54 watt 12 volt yang disusun secara paralel. Tegangan dan arus output generator berupa tegangan dan arus AC, bentuk gelombang *output* generator dilihat dengan menggunakan osiloskop sebagaimana ditunjukkan Gambar 7. Pengujian dilakukan dengan putaran generator yang tetap di 300 rpm.



Gambar 7. Sinyal keluaran generator tanpa beban

Gambar 7 menunjukkan lebar sinyal 4 div dan tinggi sinyal V_p 0,8 div dan pada osiloskop diatur time/div 5 ms, volts/div 2 volt. Dari data sinyal yang didapat maka frekuensi dan tegangan dapat dihitung sebagai berikut.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ Hz}$$

$$T = 4 \text{ div} * (5 * 10^{-3}) = 0,02 \text{ s}$$

$$V_p = 0,8 \text{ div} * 2 \text{ volts} = 1,6 \text{ volt}$$

$$V_{p-p} = 2 * 1,6 \text{ volts} = 3,2 \text{ volt}$$

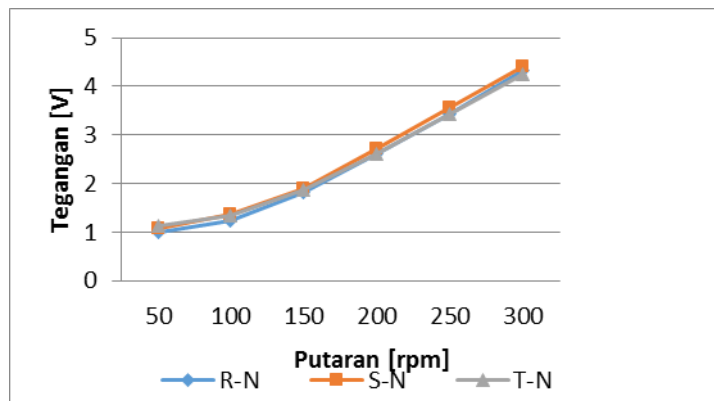
3.3.1 Pengujian Tegangan Fasa-Netral

Pengujian dilakukan terhadap generator 1 Fasa. Beban yang digunakan adalah lampu pijar 18 watt 12 volt dikalikan 3 lampu menjadi 54 watt 12 volt disusun secara paralel. Dengan variasi putaran generator, maka dihasilkan data seperti ditunjukkan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Data pengujian tegangan Phasa-Netral terhadap putaran generator berbeban

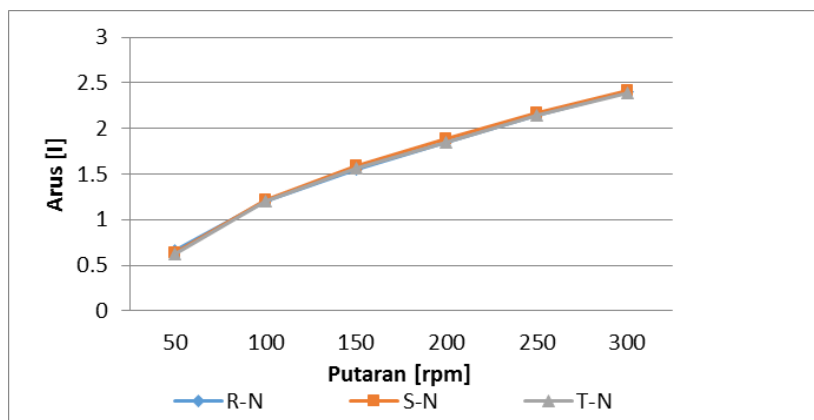
No	Putaran (rpm)	Tegangan [v]			Arus [I]			Daya [watt]		
		R-N	S-N	T-N	R-N	S-N	T-N	R-N	S-N	T-N
1	50	0,99	1,09	1,14	0,66	0,64	0,62	0,65	0,70	0,71
2	100	1,23	1,37	1,34	1,2	1,22	1,2	1,48	1,67	1,61
3	150	1,82	1,91	1,87	1,55	1,59	1,56	2,82	3,04	2,92
4	200	2,6	2,73	2,62	1,85	1,89	1,85	4,81	5,16	4,85
5	250	3,42	3,55	3,42	2,14	2,17	2,14	7,32	7,70	7,32
6	300	4,33	4,42	4,24	2,4	2,42	2,39	10,39	10,70	10,13

Dari Tabel 5 tersebut dapat digambarkan grafik hubungan antara putaran terhadap tegangan pada Gambar 8.



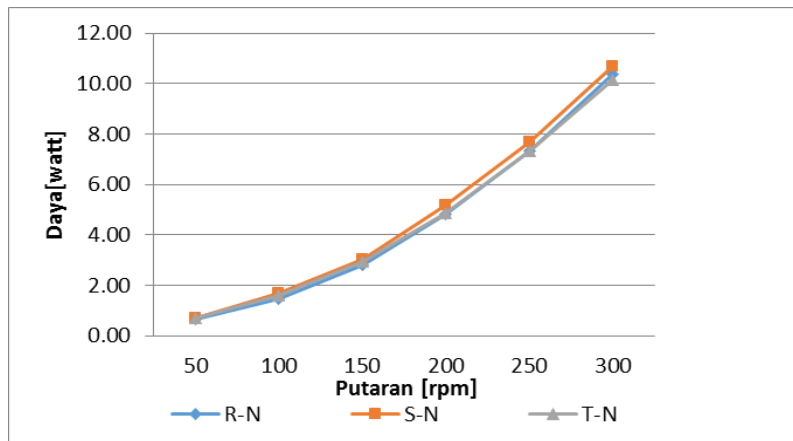
Gambar 8. grafik hubungan pengaruh putaran terhadap tegangan Phasa-Netral berbeban

Dari Tabel 5 tersebut dapat juga digambarkan grafik hubungan antara putaran terhadap arus pada Gambar 9.



Gambar 9. grafik hubungan pengaruh putaran terhadap arus Phasa-Netral berbeban

Dari Tabel 5 tersebut dapat digambarkan juga grafik hubungan antara putaran terhadap daya pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik hubungan pengaruh putaran terhadap daya Phasa-Netral berbeban

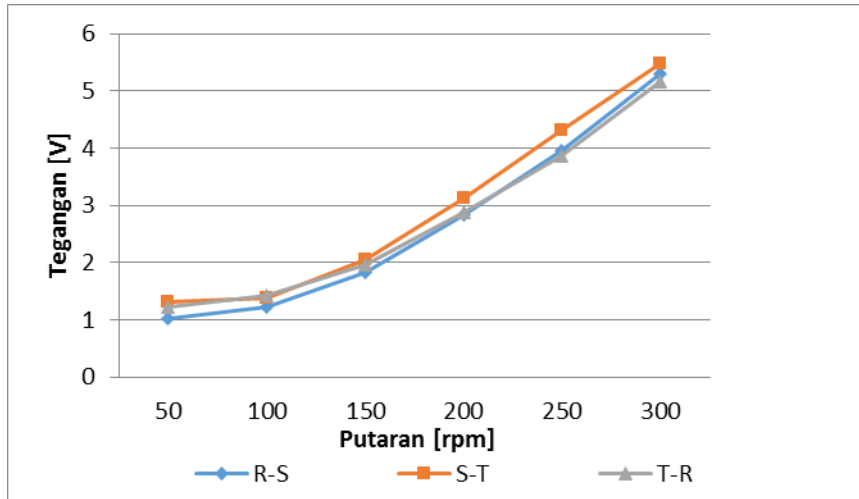
3.3.2 Pengujian Tegangan Fasa-Fasa

Pengujian dilakukan terhadap generator 3 fasa hubung bintang. Beban yang di berikan adalah lampu pijar 18 watt 12 volt dikalikan 3 lampu menjadi 54 watt 12 volt disusun secara parallel. Dengan variasi putaran generator dihasilkan data seperti ditunjukkan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Data pengujian tegangan Phasa-Phasa terhadap putaran generator berbeban

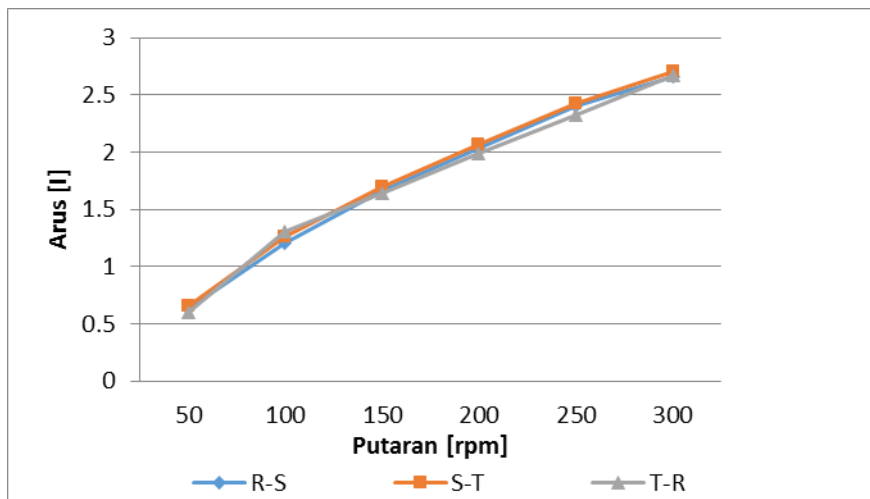
No	Putaran (rpm)	Tegangan [v]			Arus [I]			Daya [watt]		
		R-S	S-T	T-R	R-S	S-T	T-R	R-S	S-T	T-R
1	50	1,02	1,31	1,22	0,63	0,66	0,6	1,11	1,50	1,27
2	100	1,23	1,37	1,42	1,18	1,26	1,55	2,51	2,99	3,81
3	150	1,83	2,05	1,97	1,66	1,7	1,64	5,26	6,04	5,60
4	200	2,84	3,12	2,89	2,03	2,07	1,99	9,99	11,19	9,96
5	250	3,95	4,32	3,87	2,4	2,42	2,32	16,42	18,11	15,55
6	300	5,3	5,48	5,17	2,66	2,71	2,67	24,42	25,72	23,91

Dari Tabel 6 tersebut dapat digambarkan grafik hubungan antara putaran terhadap tegangan pada Gambar 11.



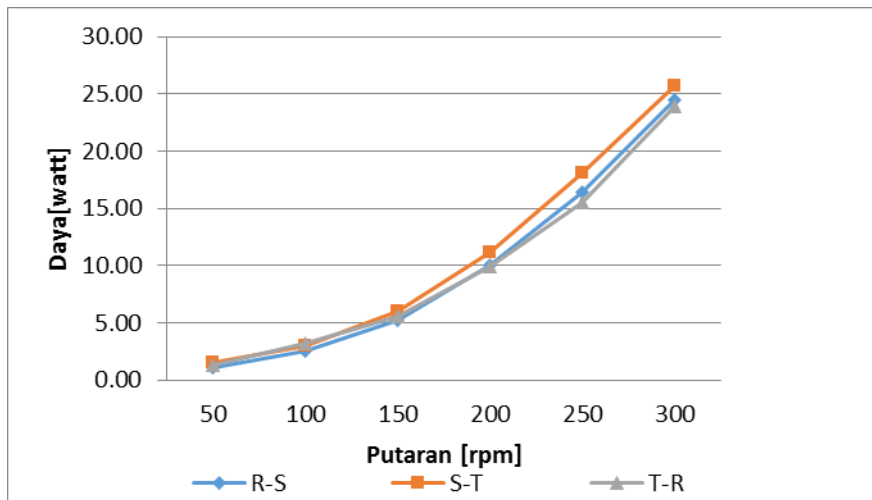
Gambar 11. Grafik hubungan pengaruh putaran terhadap tegangan Fasa-Fasa berbeban

Dari Tabel 6 tersebut dapat digambarkan juga grafik hubungan antara putaran terhadap arus seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik hubungan pengaruh putaran terhadap arus Phasa-Phasa berbeban

Dari Tabel 6 tersebut dapat digambarkan juga grafik hubungan antara putaran terhadap daya pada seperti Gambar 13.



Gambar 13. Grafik hubungan pengaruh putaran terhadap daya Fasa-Fasa berbeban

3.4 Analisis Perhitungan Dan Pengujian

Dari hasil pengujian didapat data data yang akan dianalisis dan dihitung menurut rumus persamaannya

3.4.1 Nilai Regulasi Tegangan

Dari data pengujian generator dapat dihitung besarnya faktor regulasi tegangan. Persamaan yang digunakan adalah :

$$\% \text{ reg} = \frac{V_{\text{no load}} - V_{\text{load}}}{V_{\text{no load}}} * 100\% \quad (15)$$

Pada sistem satu fasa diperoleh nilai regulasi dengan data tegangan yang telah dirata-rata seperti ditunjukkan oleh Tabel 7.

Tabel 7. Nilai regulasi tegangan satu fasa

No	Putaran (rpm)	Tegangan		% Regulasi
		No load	Load	
1	50	2,64	1,07	59,34
2	100	3,60	1,31	63,48
3	150	4,86	1,87	61,62
4	200	6,25	2,65	57,60
5	250	7,72	3,46	55,12
6	300	9,30	4,33	53,46

Pada sistem tiga fasa diperoleh nilai regulasi dengan data tegangan yang telah dirata-ratakan seperti ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai regulasi tegangan tiga fasa

No	Putaran (rpm)	Tegangan		% Regulasi
		No load	Load	
1	50	3,62	1,18	67,34

2	100	5,82	1,34	76,98
3	150	8,42	1,95	76,83
4	200	11,34	2,95	73,99
5	250	14,07	4,05	71,24
6	300	17,09	5,32	68,90

Dari data Tabel 7 diketahui bahwa nilai regulasi untuk sistem satu fasa pada variasi kecepatan putar 50 sampai 300 rpm adalah berkisar antara 53,46% sampai 63,48%. Tabel 8 menunjukkan nilai regulasi untuk sistem tiga fasa pada variasi kecepatan putar 50 sampai 300 rpm adalah berkisar antara 67,34 % sampai 76,98%.

Dari data-data pengujian dengan kecepatan yang variatif maka untuk menghasilkan frekuensi 50Hz persamaan 1 maka putaran dijaga konstan (asumsi putaran stabil) pada 300 rpm. Dari persamaan 7 didapat perhitungan tegangan dengan jumlah belitan tiap koil N_c sama dengan 50 belitan, nilai fluks maksimum per kutub Φ_{max} sama dengan $4,536 * 10^{-4} (Wb)$ jumlah koil N_s sama dengan 15, dan jumlah fasa 3 maka didapat perhitungan sebagai berikut.

$$E_{rms} = 4,44 * N_c * f * \Phi_{max} * \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (16)$$

$$E_{rms} = 4,44 * 50 * 50 * (4,536 * 10^{-4}) * \frac{15}{3} = 25,1748 \text{ volt}$$

Dari pengujian generator dengan sistem 1 fasa tanpa beban yang dikopel dengan motor induksi sebagai penggerak mula, didapat hasil keluaran tegangan generator yang telah di rata-ratakan pada putaran 300 rpm adalah 9,30 volt.

Tabel 9. Hasil perbandingan perhitungan dan pengukuran

Tegangan hasil pengukuran (volt)	Tegangan hasil perhitungan (volt)	Persentase (%)
9.30	25,17	63,05%

Dari hasil perbandingan pada Tabel 9 terdapat jatuh tegangan yang besar yang diakibatkan oleh struktur generator yang tidak ideal. Faktor-faktor yang mempengaruhi susut tegangan sebagai berikut :

- Pemasangan magnet pada rotor tidak sesuai dengan desain. Pada desain generator, magnet dipasang dengan posisi beda 18° .
- Pada saat rotor diputar terjadi celah udara yang berubah-ubah yang dikarenakan bidang plat besi pada rotor tidak datar atau bergelombang. Oleh karena itu, efeknya induksi medan magnet ke stator/belitan tidak stabil mengakibatkan fluksimagnet naik dan turun
- Panjang kawat tiap koil tidak sama panjang maka terjadi berbeda tegangan antara fasa
- Reaksi jangkar, bila generator dibebani maka pada penghantar jangkar timbul arus jangkar. Arus jangkar ini menyebabkan timbulnya fluks pada penghantar jangkar

tersebut dan biasa disebut fluks medan jangkar. Munculnya medan jangkar akan memperlemah medan utama (magnet permanen)

Dari faktor-faktor yang mempengaruhi susut tegangan didapat bentuk sinyal keluaran generator seperti Gambar 4 untuk generator pada saat tidak berbeban dan Gambar 7 untuk generator pada saat berbeban

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan pengujian terhadap generator tipe aksial fluks 3 fasa kecepatan rendah yang digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga angin yang telah di uji, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dalam desain rotor, generator arus eksitasi dihasilkan dari 40 magnet yang disusun berhadapan (utara-selatan) sehingga didapat 20 kutub dengan kecepatan 300 rpm untuk menghasilkan frekuensi 50 Hz.
2. Dalam desain stator koil/kumparan didesain 15 buah untuk system 3 phasa untuk masing masing phasanya koil/kumparan disusun seri sebanyak 5 buah. Tegangan keluaran generator didesain 24 volt ditujukan untuk pengisian baterai.
3. Pengujian generator satu fasa tanpa beban dalam putaran 300 rpm menghasilkan tegangan 9,27 volt dan percobaan satu fasa berbeban dalam putaran 300 rpm menghasilkan tegangan 4,33 volt dengan arus sebesar 2,4 ampere dengan daya sebesar 10,13 watt.
4. Pengujian generator tiga fasa tanpa beban dalam putaran 300 rpm menghasilkan tegangan 17,03 volt dan pada percobaan tiga fasa berbeban dalam putaran 300 rpm menghasilkan tegangan 5,3 volt dengan arus sebesar 2,66 ampere dan daya sebesar 24,42 watt.
5. AFPMG (*axial flux permanent magnet generator*) sudah dapat dijadikan alternatif baru sebagai pembangkit listrik tenaga angin dengan kecepatan rendah yang menghasilkan keluaran frekuensi 50 hz untuk kecepatan 300 rpm.

4.2 Saran

1. Untuk mengatasi susut tegangan maka desain generator harus lebih ideal agar menghasilkan tegangan dan arus yang konstan terutama dari tinggi celah udara, semakin kecil celah udara maka semakin mendekati dengan tegangan yang diinginkan (Nick dkk, 2013).
2. Untuk menambah tegangan keluaran dari generator maka jumlah lilitan harus di perbanyak untuk menghasilkan tegangan yang diinginkan seperti untuk tegangan 220 volt maka jumlah lilitan sebanyak 459 belitan atau 460 belitan per koil.
3. Untuk menambah arus keluaran dari generator maka *grade* magnet neodymium harus diperbesar dan lebar dari magnet harus lebih besar agar mendapatkan maksimum fluks magnet yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Piggott, H. (2009). *A Wind Turbine Recipe Book-The Axial Flux Windmill Plans*.
- Latoufis, K. C. (2012). *Axial Flux Permanent Magnet Generator Design for Low Cost Manufacturing of Small Wind Turbines*. WIND ENGINEERING VOLUME 36, NO. 4
- Rossouw, F. G. (2009). *Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications*.
- Jarekson, R. (2011). *Studi Jarak Antar Rotor Magnet Permanen Pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator*. Indonesia : FT Universitas.
- Nick, B., Jimmy, D. & Erin, C. (2013). *Axial Flux Permanent Magnet Generator*. University of Washington.
- Nurhadi, A. (2012). *Perancangan Generator Putran Rendah Magnet Permanen Jenis FE Fluks Aksial*. Universitas Diponegoro.
- Fahey, S. (2006). *Basic Principles of the Homemade Axial Flux Alternator*.