

PERANCANGAN *RADIAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR* SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT METHOD (FEM)*

Muhammad Ilham Manishe, Arnawan Hasibuan, Raihan Putri

*Jurusan Teknik Elektro Universitas Malikussaleh
Jl. Batam, Bukit Indah, Muara Satu, Lhokseumawe Aceh
E-mail : milhammanishe@gmail.com*

Abstrak— Penelitian ini tentang perancangan desain dan simulasi *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* yang memiliki prospek cerah dalam aplikasi turbin angin skala kecil. Turbin angin sebagai pembangkit listrik yang menjadi kebutuhan yang sangat penting dalam kehidupan manusia. Pembangkit listrik yang murah dan mudah dengan tingkat efisiensi yang tinggi adalah salah satu jawaban atas permasalahan akan kebutuhan listrik. *Metode Fenite Element Method (FEM)* adalah alat untuk mempelajari dan merancang *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*. Penelitian ini bertujuan untuk merancang model *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*, Generator yang dirancang memiliki jumlah 18 slot, 16 pole dan 3 fasa dengan menggunakan *radial flux*. Hasil dari pemodelan dan simulasi PMSG ini dapat membangkitkan daya sebesar 661,234 Watt pada kecepatan 1000 RPM dengan efisiensi mencapai 81 %.

Keywords— *Permanent Magnet Synchronous Generator, FEM, Radial Flux*

I. PENDAHULUAN

Energi angin ialah salah satu energi baru terbarukan yang memiliki potensi yang sangat besar di Dunia termasuk di negara Indonesia dan masih belum dapat dimaksimalkan[1]. Sebagai sumber energi ramah lingkungan, energi angin adalah energi yang banyak menarik perhatian[2]. Penggunaan energi alternatif seperti energi angin ini mampu menjawab permasalahan penggunaan energi listrik yang masih menggunakan bahan Fosil.

Energi listrik merupakan suatu hal yang sangat vital sebagai penunjang kebutuhan masyarakat maupun industri. Umumnya sumber energi listrik didominasi dari bahan fosil[3]. Salah satu cara pemanfaatan energi listrik dari energi baru terbarukan seperti angin yaitu dengan cara membangun dan mengembangkan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), khususnya pada Generator[4].

Generator adalah alat untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Fungsi dari generator adalah merubah energi gerak atau energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan induksi elektromagnetik[5]. Pemanfaatan energi terbarukan seperti angin selalu

memiliki kendala, dimana kecepatan aliran angin bervariasi dan tidak konstan sehingga dibutuhkan jenis generator yang mampu bekerja pada kondisi tersebut[6]. Tipe generator yang mampu bekerja dan cocok digunakan adalah tipe *Permanent Magnet Synchronous Generator*.

Permanent Magnet Synchronous Generator sangat efisiensi untuk digunakan karena mampu bekerja sangat baik pada kecepatan rendah[7]. *Permanent Magnet Synchronous Generator* berdasarkan arah fluks dikategorikan menjadi dua kelompok yaitu *radial flux* dan *axial flux*[8]. *Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator (RFPMG)* memiliki manufaktur sederhana. RFPMG membutuhkan inti besi tunggal pada stator. Dalam hal konfigurasi, RFPMG tidak hanya mudah dimodifikasi untuk menghasilkan tegangan output, tetapi juga dapat menghasilkan torsi yang lebih besar daripada *Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator* [9].

Dari uraian permasalahan diatas, maka perlu perancangan *Permanent Magnet Synchronous Generator* kecepatan rendah dengan arah *radial flux*. Pada penelitian tugas akhir ini membahas tentang perancangan *Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator (RFPMG)* 18 Slot 16 Pole menggunakan jenis magnet *Neodymium Iron Boron*.

Untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi harus dilakukan *Trial-Error* desain. Untuk membantu proses desain maka digunakan software CAD (*Computer Aided Design*) dan Software Desain Elektromagnetik berbasis FEM (*Fenite Element Method*) untuk melakukan simulasi terhadap nilai input dan output daya pada perancangan PMSG.

Adapun *Trial-Error* Desain ini meliputi variasi, diameter, material, ketebalan, jumlah lilitan, dan kecepatan putar generator. Pada simulasi yang dilakukan dengan menggunakan Software berbasis FEM (*Fenite Element Method*) dilakukan beberapa percobaan simulasi dengan kecepatan berbeda pada sistem keluaran disearahkan dengan diode penyearah, karena generator yang disimulasikan merupakan tipe pembangkit tenaga angin.

Diharapkan hasil dari perancangan *Permanent Magnet Synchronous Generator* dapat diimplementasikan di Indonesia dengan berbagai variasi geometri untuk mendukung perkembangan penelitian teknologi generator

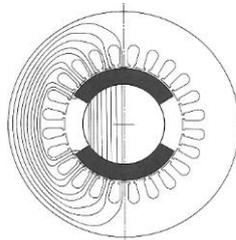
dan dapat di implementasikan pada pembangkit listrik tenaga angin skala kecil.

II. DASAR TEORI

2.1 Permanent Magnet Synchronous Generator

Prinsip kerja dari *Permanent Magnet Synchronous Generator* tidak jauh beda dengan prinsip kerja dari generator sinkron. Penggunaan Magnet Permanent menghasilkan medan magnet.

Radial flux Permanent Magnet Synchronous Generator merupakan mesin yang konsep arah fluks magnetiknya dalam arah radial yang tegak lurus terhadap sumbu putar, sehingga arah fluks searah dengan putaran rotor menuju stator yang berada pada sisi luar rotor, seperti pada Gambar 2.4 yang terjadinya induksi elektromagnetik [10].



Gambar 2. 1 Aliran Radial Flux pada Generator

Sumber : Hendershot and Miller, 1994

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

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

$$e = - \frac{d(N\Phi)}{dt} = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.5)$$

Keterangan :

e = Tegangan induksi (Volt)

N = Banyaknya Lilitan

$d\Phi$ = Perubahan fluks magnet(Wb)

dt = perubahan waktu (s)

Tanda (-) merupakan hasil dari hukum Lenz yang menyatakan bahwa arah polaritas dari tegangan/arus yang terinduksi pada kumparan akan menghasilkan arah fluks yang berlawanan dengan arah fluks yang menginduksikan tegangan tersebut. Sedangkan λ merupakan hasil perkalian dari banyaknya lilitan dengan besar fluks yang ditangkap tiap lilitan untuk suatu saat.

Faraday mengemukakan hukum dasar sebagai Hukum (induktansi) Faraday sebagai berikut : “ Gaya gerak listrik yang diimbaskan dalam suatu rangkaian sama dengan negative dari laju perubahan fluks magnetic yang menembusny terhadap waktu”.

2.2 Perhitungan Matematis Desain Generator

2.8.1 Kombinasi Slot dan Pole

Kombinasi *slot* dan *pole* dalam perancangan generator memiliki pengaruh pada karakteristik generator. Kombinasi *pole* dan *slot* mempengaruhi torsi cogging, tegangan yang dihasilkan dan juga frekuensi. Beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan.

Kombinasi *pole-slot* didalam beberapa penelitian yang lain juga biasa dikenal dengan *slot per pole and phase* (SPP)[14]. Dan nilai ini dapat diketahui melalui persamaan dibawah ini [14]:

$$Np = \frac{120f}{n} \quad (2.6)$$

$$q = \frac{Ns}{2p.N\phi} \quad (2.7)$$

Dimana :

q = Slot per pole and phase

Np = Jumlah pole

Ns = Jumlah slot

$N\phi$ = Jumlah fasa

n = Kecepatan putar generator (rpm)

f = Frekuensi generator (hz)

$$\theta_s = \frac{(2.\pi)}{Ns} \quad (2.8)$$

Dimana :

θ_s = Derajat slot (°)

Ns = Jumlah slot

π = 180°

$$\theta_p = \frac{(2.\pi)}{Np} \quad (2.9)$$

Dimana :

θ_p =derajat slot (°)

Np =jumlah pole

Np =180°

$$Dr = D - 2. lg \quad (2.10)$$

Dimana:

Dr = Diameter rotor (m)

D = Diameter dalam stator (m)

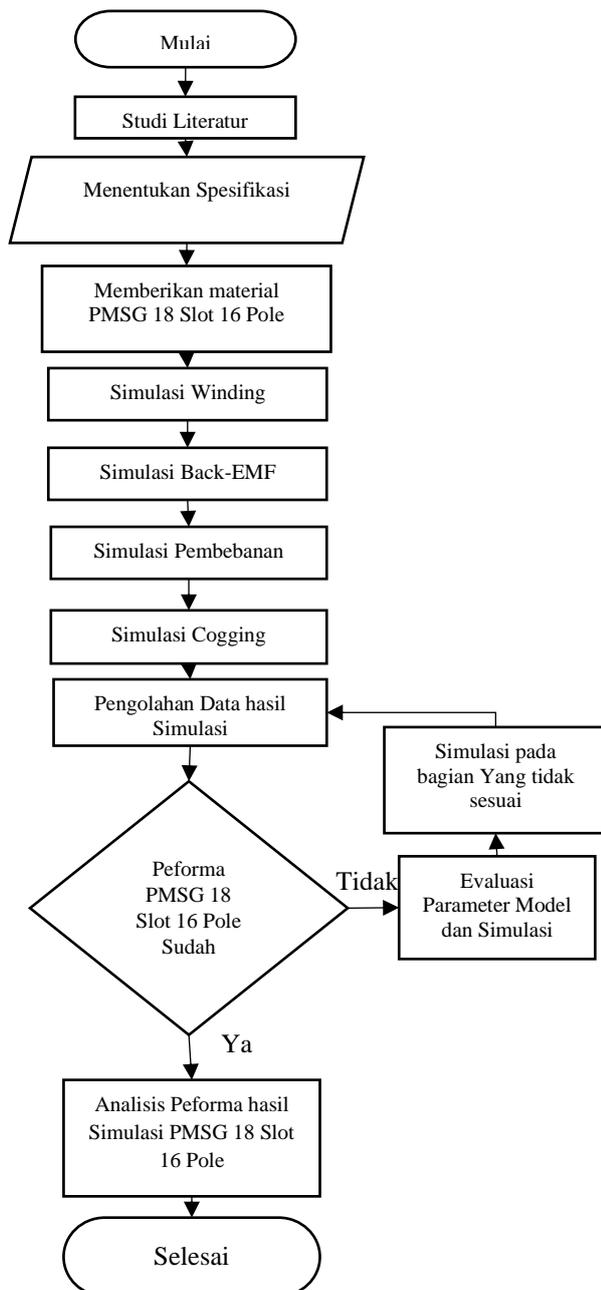
lg = Lebar *airgap* (m)

III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini membahas tentang perancangan *Permanent Magnet Synchronous Generator* tiga fasa. Software CAD digunakan untuk mendesain bagian-bagian *Permanent Magnet Synchronous Generator* berupa bagian stator dan rotor, kemudian Software Elektromagnetik berbasis FEM

digunakan untuk mensimulasikan *Permanent Magnet Synchronous Generator* untuk mengetahui hasil *output* yang diinginkan berupa data tegangan, arus, torsi, daya *input*, daya *output*, efisiensi, dan torsi *cogging*.

Penelitian *Permanent Magnet Synchronous Generator* dengan jenis magnet *Neodymium Iron Boron* untuk mendapatkan daya *output* sebesar 661 Watt, Metode penelitian ini meliputi alat dan bahan penelitian. Langkah-langkah mendesain *Permanent Magnet Synchronous Generator* dengan *software CAD* dan *software* elektromagnetik berbasis FEM (*Fenite Element Method*) dan diagram alir penelitian. Dalam proses penelitian perancangan dan pembuatan terdapat beberapa tahapan untuk merancang diantaranya sebagai berikut:

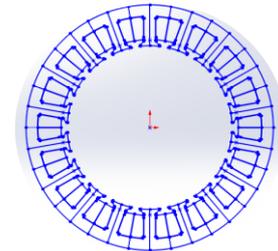


IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

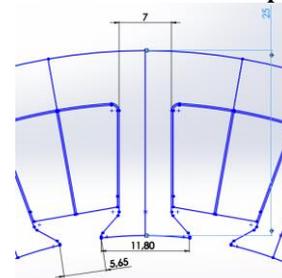
4.1 Desain *Permanent Magnet Synchronous Generator*

4.1.1 Desain *Permanent Magnet Synchronous Generator* menggunakan *Software CAD*

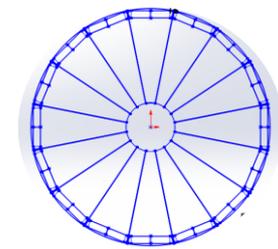
Software CAD digunakan untuk mendesain *Permanent Magnet Synchronous Generator*, seperti bagian stator yang terdiri dari inti stator, stator air, teeth, slot stator, dan bagian rotor yang terdiri dari inti rotor, *permanent magnet*, rotor air, dan shaft.



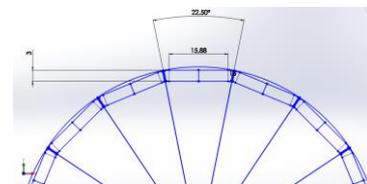
Gambar 4. 1 Desain Stator PMSG 18 Slot pada *Software CAD*



Gambar 4. 2 Dimensi Stator dan bentuk Teeth PMSG pada *Software CAD*



Gambar 4. 3 Desain Rotor PMSG 16 Pole pada *Software CAD*



Gambar 4. 4 Desain Dimensi Rotor 16 Pole Pada *Software CAD*

Adapun parameter input atau spesifikasi dari 18 slot 16 pole model sebagai berikut

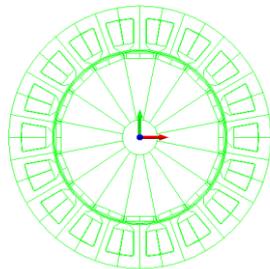
Tabel 4. 1 Dimensi PMSG 18 Slot 16 Pole

No.	Dimensi	Unit	Nilai
1	Jumlah slot (Ns)	-	18

2	Jumlah <i>pole</i> (N_p)	-	16
3	Diameter luar stator (D_b)	mm	150
4	Diameter dalam stator (D_c)	mm	100
5	Diameter luar rotor (D_d)	mm	98
6	Air gap	mm	1
7	Diameter luar magnet (D_i)	mm	98
8	Tebal inti stator/rotor (L_a)	mm	40
9	Panjang magnet (L_h)	mm	15.88
10	Tebal magnet (L_m)	mm	3
11	Tinggi umbrella (L_t)	mm	18
12	Jarak antar slot (L_{rg})	mm	5.65
13	Lebar <i>teeth</i> (L_w)	mm	7
14	Lebar umbrella (L_w)	mm	11.8

4.1.2 Inisialisai desain Permanent Magnet Synchronous Generator menggunakan software elektromagnetik berbasis FEM

Desain *Permanent Magnet Synchronous Generator* di-import pada software berbasis FEM untuk masing-masing file *stator* dan *rotor*. Hasil Import desain pada Software FEM dapat dilihat pada gambar 4.6.



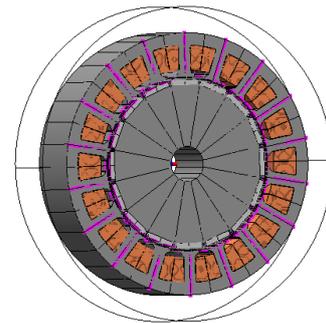
Gambar 4. 5 Inisialisasi Desain PMSG 18 Slot 16 Pole Pada Software FEM

Adapun spesifikasi dari material *Permanent Magnet Synchronous Generator 18 slot 16 pole* adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Spesifikasi PMSG 18 Slot 16 Pole

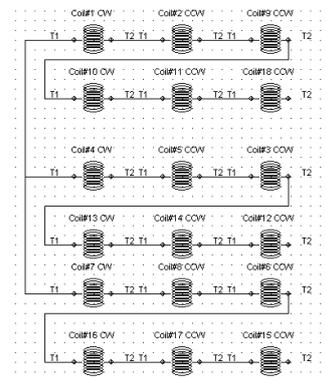
No.	Nama	Material
1	Inti Stator dan Rotor	M270-50A
2	Magnet Material	Neodymium Iron Boron 48/11
3	Magnet Topology	IPM
4	Coil specs	1.60 mm / 22 turns
5	Coil connections	Y- 6 Seri
6	Airgap	Air
7	Shaft	Virtual air
8	Airbox	Air
9	Coil	Copper: 5.77e7 Siemens/meter

Model secara keseluruhan Ketika diberikan komponen dapat ditampilkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 6 Full Model PMSG 18 Slot 16 Pole pada Software FEM

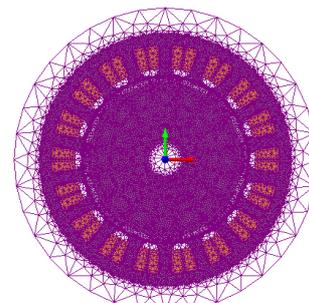
4.1.3 Winding



Gambar 4. 7 Rangkaian Winding Pada Software FEM

4.1.4 Pengaturan Mesh

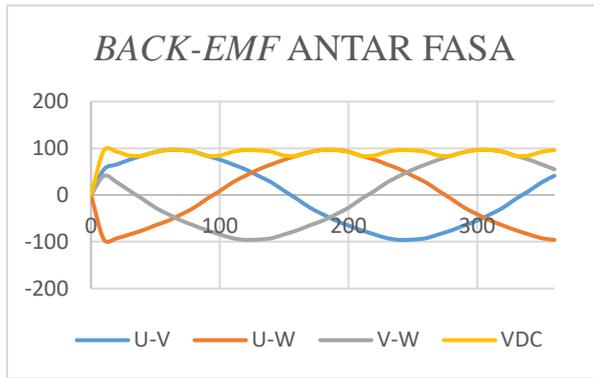
Pada gambar dapat dilihat tampilan mesh pada seluruh bagian *Permanent Magnet Synchronous Generator*.



Gambar 4. 8 Pengaturan Mesh pada PMSG 18 Slot 16 Pole

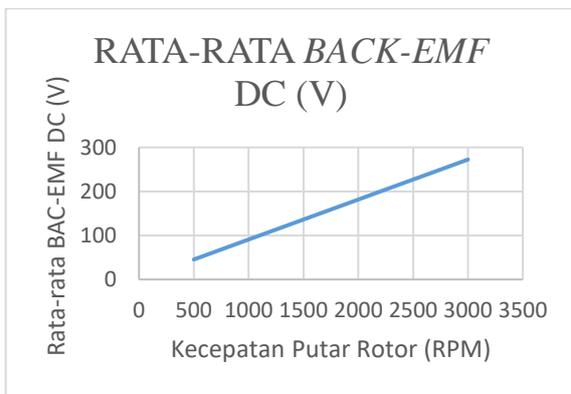
4.2 Simulasi Back-EMF dan Konstanta Back-EMF

Dengan menggunakan software pengolah data dan kalkulasi dengan mengamati bentuk gelombang backEMF antar fasa pada kecepatan rotor 1000 RPM yang ditampilkan pada Gambar 4.13. Dikarenakan PMSG ini akan diaplikasikan sebagai generator pada PLTB dengan system *Variable Speed Generator*, maka nilai back-EMF antar fasa perlu di absolutkan agar seolah-olah membentuk gelombang back-EMF DC (V).



Gambar 4. 9 Gelombang *Back-EMF* Antar Fasa

Adapun nilai-nilai puncak *back-EMF* pada masing-masing kecepatan putar rotor ditampilkan pada gambar 4.14

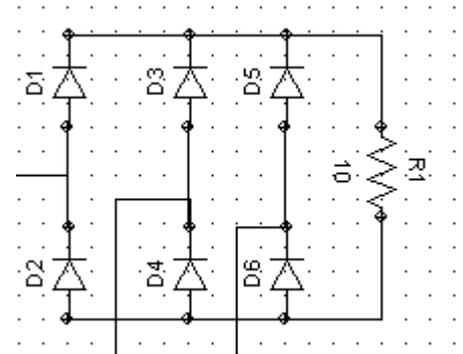


Gambar 4. 10 Grafik Rata-Rata *Back-EMF*

Berdasarkan data pada gambar, didapatkan bahwa nilai puncak *back-EMF* antar fasa adalah 96.26 V dan *back-EMF* dc adalah 90.79 V. Kemudian berdasarkan data pada Gambar 4.14 , nilai *back-EMF* akan meningkat seiring bertambahnya kecepatan putar rotor.

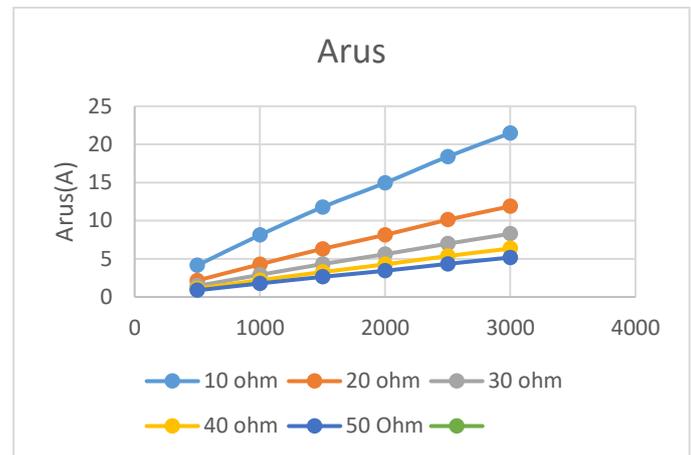
4.3 Analisa Performa Dalam Kondisi Berbeban

Pada simulasi pembebanan kecepatan putar rotor divariasikan dari 500 RPM hingga 3000 RPM. Karena PMSG yang diujikan akan diaplikasikan sebagai generator pembangkit pada PLTB dengan system *variable speed generator*, maka pada sisi terminal dihubungkan dengan penyearah tiga fasa agar dapat menghasilkan listrik DC. Kemudian sisi output dari penyearah tiga fasa dihubungkan dengan beban resistif yang di tampilkan seperti pada Gambar 4.15.

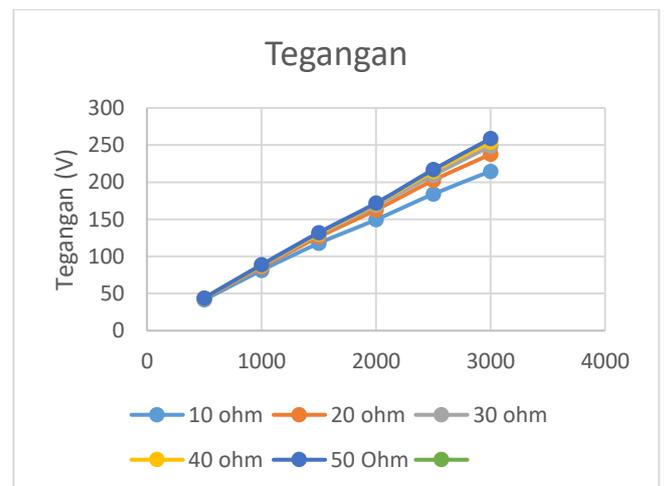


Gambar 4. 11 Rangkaian Pembebanan PMSG 18 Slot 16 Pole

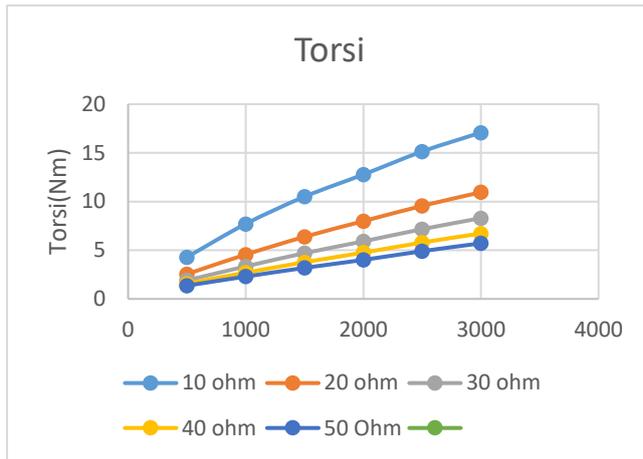
Pada simulasi pembebanan, nilai resistansi divariasikan pada nilai 10 ohm, 20 ohm, 30 ohm, 40 ohm, dan 50ohm. Variasi nilai resistansi bertujuan untuk mensimulasikan pengaturan tegangan output yang dilakukan oleh *Controller*. Karakteristik yang diamati pada simulasi pembebanan adalah tegangan , arus , torsi, daya *input*, daya *output*, dan efisiensi, hal ini ditampilkan pada Gambar 4.16 berikut.



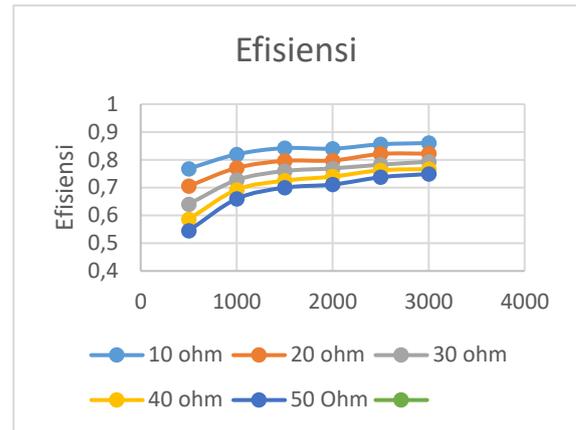
Gambar 4. 12 Kurva Arus Pada Variasi Kecepatan dan Beban PMSG 18 Slot 16 Pole



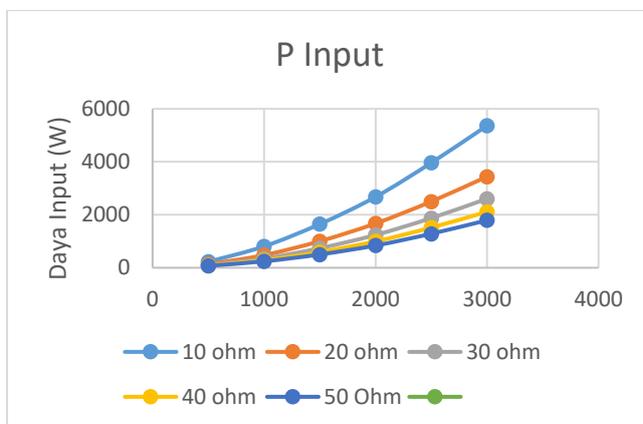
Gambar 4. 13 Kurva Tegangan Pada Variasi Kecepatan dan Beban PMSG 18 Slot 16 Pole



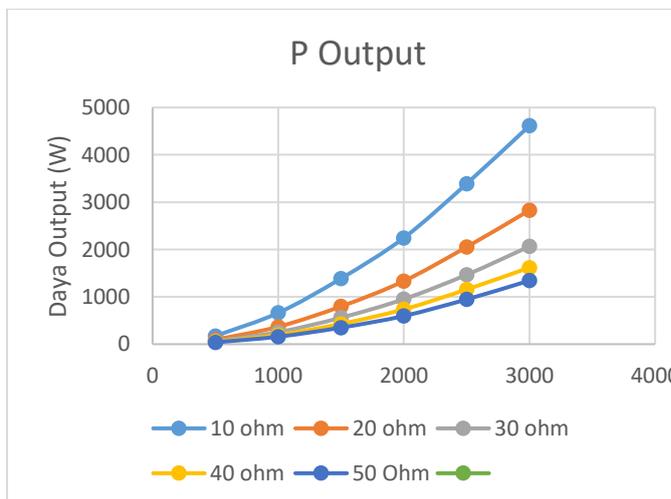
Gambar 4. 14 Kurva Torsi Pada Variasi Kecepatan dan Beban PMSG 18 Slot 16 Pole



Gambar 4. 17 Kurva Efisiensi pada Variasi Kecepatan dan Beban PMSG 18 Slot 16 Pole



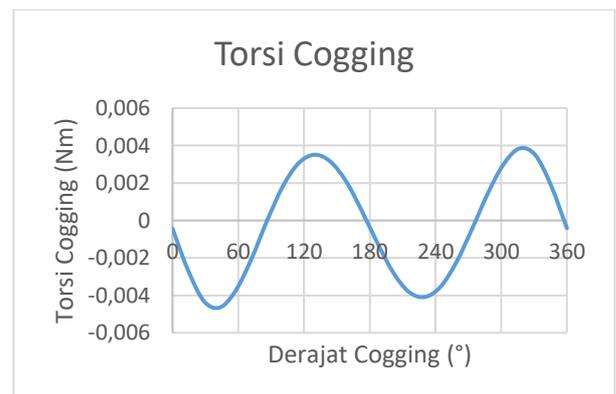
Gambar 4. 15 Kurva Daya Input pada Variasi Kecepatan dan Beban PMSG 18 Slot 16 Pole



Gambar 4. 16 Kurva Daya Output pada Variasi Kecepatan dan Beban PMSG 18 Slot 16 Pole

Berdasarkan data pada gambar grafik kurva didapatkan bahwa nilai arus, tegangan, *torsi*, daya *input*, daya *output*, dan efisiensi akan meningkat seiring bertambahnya kecepatan putar rotor. Saat generator berhasil mengeluarkan output sebesar 500 W- 600 W saat mencapai kecepatan putar rotor di 1000 RPM, 1500 RPM, dan 3000 RPM pada nilai resistansi 10 ohm, 30 ohm, 50 ohm. Dapat dilihat bahwa saat berbeban 10 ohm dapat menghasilkan daya *output* sebesar 661.234 W pada kecepatan yang lebih rendah Atau 1000 RPM. Saat berbeban 30 ohm dapat menghasilkan daya *output* sebesar 560.589 pada kecepatan 1500 RPM dan pada pembebanan 50 ohm menghasilkan daya *output* sebesar 596.380 W. Namun, jika dilihat berdasarkan efisiensi maka performa saat dihubungkan dengan beban 10 ohm memiliki efisiensi lebih baik jika dibanding performa saat dihubungkan dengan beban 30 ohm dan 50 ohm pada kecepatan 1500 RPM dan 3000 RPM.

4.4 Analisa Cogging



Gambar 4. 18 Gelombang Torsi Cogging pada PMSG 18 Slot 16 Pole

Berdasarkan data pada gambar didapatkan bahwa nilai puncak atas cogging sebesar 0.0038 Nm dan nilai puncak bawah sebesar -0.0038. Maka nilai torsi cogging dapat dikalkulasikan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$T_{cog} = 0.0038 - (-0.0038)$$

$$T_{cog} = 0.0076 \text{ Nm}$$

Didapatkan bahwa untuk menggerakkan rotor setidaknya dibutuhkan torsi sebesar 0.0076 Nm. Nilai ini tergolong kecil, sehingga hanya dengan torsi sebesar 0.0076 Nm, rotor sudah dapat diputar.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan yang dilakukan didapatkan kesimpulan, sebagai berikut:

1. Pada perancangan dari hasil pemodelan *Permanent Magnet Synchronous Generator* yang dilakukan mempunyai spesifikasi 18 Slot 16 Pole, dengan jumlah lilitan tiap coil pada stator yaitu 22 lilitan dan diameter kawat tembaga 1,6 mm, pole dengan jumlah 16 buah magnet dengan jenis Neodymium Iron Boron, serta bahan dari stator dan rotor menggunakan material Non-Oriented Silicon Steel M270-50 dengan ketebalan bahan rotor dan stator yaitu 40mm .
2. Pada perancangan *Permanent Magnet Synchronous Generator* ini mendapatkan hasil konstanta Back-EMF antar fasa 96,26 V dan Back-EMF dc yaitu 90,79 Volt, arus sebesar 8,11 A , daya Output yaitu 661,234 Watt dengan efisiensi 81% pada nilai resistansi 10 ohm dengan nilai torsi cogging mencapai 0,0076 Nm

VI. REFERENSI

- [1] D. Rohi, "Alternatif Pembangkit Tenaga Listrik yang Ramah Lingkungan di Indonesia." *Pros. EECCIS*, 2008.
- [2] Z. Guo and L. Chang, "FEM study on permanent magnet synchronous generators for small wind turbines," in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005.*, 2005, pp. 641–644.
- [3] I. Kholiq, "Analisis Pemanfaatan Sumber Daya Energi Alternatif Sebagai Energi Terbarukan untuk Mendukung Substitusi BBM," *J. Iptek*, vol. 19, no. 2, pp. 75–91, 2015.
- [4] D. N. Anwar, S. D. Ramdani, M. Fawaid, H. Abdillah, and M. Nurtanto, "PENGEMBANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU TIPE HAWT 3 PROPELER SEBAGAI MEDIA PEMBELAJARAN: KONSEPTUAL KONVERSI ENERGI," *Steam Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 65–72, 2021.
- [5] M. A. Nurhidayat, "MINI GENERATOR AS A SIMPLE ELECTRICAL ENERGY GENERATOR," 2019.
- [6] T. Rovio, H. Vihriälä, L. Söderlund, J. Kriikka, and M. Hyppönen, "Axial and radial flux generators in small-scale wind power production," *Energy (kWh)*, vol. 30, p. 40, 2001.
- [7] B. J. Chalmers and E. Spooner, "An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 2, pp. 251–257, 1999.
- [8] G.-C. Lee, S.-M. Kang, and T.-U. Jung, "Permanent magnet structure design of outer rotor radial flux permanent magnet generator for reduction cogging torque with design of experiment," in *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2013, pp. 315–319.
- [9] P. Taufiqur Rahman and others, "Rancang Bangun Permanent Magnet Synchronous Generator 1 Fasa Fluks Radial."
- [10] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, *Design of brushless permanent-magnet machines*. Motor Design Books Venice, Florida, USA, 2010.
- [11] D. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design 2nd," *Magna Phys. Pub., Lebanon*, 2006.

- [12] M. Razzaq and others, "ANALISA PENGARUH KOMBINASI SLOT-POLE PADA SURFACE PERMANENT MAGNET (SPM) GENERATOR UNTUK APLIKASI TURBIN ANGIN," University of Muhammadiyah Malang, 2019.
- [13] R. L. Naufal, "Analisis Performa Brushless DC (BLDC) Motor 24 Slot 8 Pole Dalam Aplikasi Sebagai Generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Skala Mikro Menggunakan Finite Element Method (FEM)," 2020.
- [14] M. R. Faqih, S. Sutedjo, and E. Wahjono, "Design and Fabrication of a Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator," in *2019 International Electronics Symposium (IES)*, 2019, pp. 644–649.
- [15] F. Edition and S. J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals." McGraw-Hill Sci, 2004.
- [16] D. Iskandar, "PENGARUH ADITIF FERRO BORON (FeB) TERHADAP KARAKTERISTIK SERBUK HEMATIT ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (Skripsi) Oleh. Suci Pangestuti."
- [17] N. Idayanti, A. Manaf, and D. Dedi, "Magnet Nanokomposit Sebagai Magnet Permanen Masa Depan [Nanocomposite Magnets as Future Permanent Magnets]," *Metalurgi*, vol. 33, no. 1, pp. 1–18, 2018.