

Desain Generator Sinkron Permanen Magnet *Flux Axial* dengan *Umbrella Less Teeth Stator*

Nanang Dwi Hernawan¹, Sutedjo², dan Lucky Pradigta Setiya Raharja³

^{1,2,3}Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Kampus PENS, Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

email: nananghernawan11@gmail.com¹, sutedjo@pens.ac.id², lucky@pens.ac.id³

Abstrak - Kebutuhan akan energi listrik, telah menjadi suatu kebutuhan utama bagi manusia. Banyak cara yang dilakukan agar kebutuhan energi listrik tersebut dapat terpenuhi, baik secara kuantitas maupun kualitas energi listrik. Dari permasalahan yang ada, diperlukan sebuah generator yang dapat mengoptimalkan sistem pembangkitan energi listrik yang ada. Penelitian ini bertujuan pada pendesainan *axial flux permanent magnet synchronous generator* (AFPMSG). AFPMSG merupakan generator sinkron dengan medan eksitasi dihasilkan oleh magnet permanen, sehingga fluks magnetik dihasilkan oleh medan magnet permanen, arah medan fluksnya sejajar dengan sumbu putar, sehingga posisi rotor dan statornya tegak lurus terhadap poros sehingga disebut dengan *flux axial*. Fluks tersebut merupakan hasil dari gaya tarik menarik antara dua buah magnet permanen yang memiliki kutub yang berbeda, dan jika dalam keadaan bergerak akan menghasilkan gaya gerak listrik. Desain AFPMSG pada penelitian ini adalah *umbrella less teeth stator*. Pada desain ini konstruksi geometri *umbrella* pada *teeth* stator akan dihilangkan keseluruhan sehingga *teeth* stator hanya akan berbentuk lurus. Dengan menghilangkan *umbrella* pada *teeth* stator diharapkan untuk memfokuskan aliran fluks saat melewati stator serta mempermudah proses konstruksi dan proses *winding*.

Kata kunci - Generator sinkron, magnet permanen, *flux axial*, *umbrella less*.

Abstract - *The need for electrical energy has become a major need for humans. There are many ways that are done so that the need for electrical energy can be met, both in terms of quantity and quality of electrical energy. From the existing problems, we need a generator that can optimize the existing electrical energy generation system. This research aims at designing axial flux permanent magnet synchronous generator (AFPMSG). AFPMSG is a synchronous generator with an excitation field generated by a permanent magnet, so that the magnetic flux is generated by a permanent magnetic field, the direction of the flux field is parallel to the rotating axis, so that the position of the rotor and stator is perpendicular to the shaft so it is called axial flux. This flux is the result of the attractive force between two permanent magnets that have different poles, and if they are in motion, they will produce an electromotive force. The AFPMSG design in this study is umbrella less teeth stator. In this design the geometric construction of the umbrella on the stator teeth will be completely removed so that the stator teeth will only be straight. By eliminating the umbrella on the stator teeth it is expected to focus the flux flow as it passes through the stator and simplify construction process and winding process.*

Keywords - *Synchronous generator, permanent magnet, axial flux, umbrella less.*

I. PENDAHULUAN

Pada saat ini, penggunaan peralatan elektronik di masyarakat maupun industri dunia sangat meningkat pesat. Peningkatan penggunaan peralatan elektronik tersebut menyebabkan peningkatan pada kebutuhan energi listrik. Oleh karena itu, pada saat ini peran energi terbarukan dibutuhkan untuk mengatasi permasalahan tersebut [1]. Energi terbarukan tersebut digunakan sebagai sumber energi alternatif sehingga ketika terjadi kelangkaan sumber bahan bakar kebutuhan energi listrik tetap tercukupi. Tidak hanya itu, penggunaan energi terbarukan juga memiliki keuntungan pada sisi kelestarian alam karena tidak menimbulkan polusi. Pada

saat ini, salah satu dari pembangkit energi terbarukan adalah pembangkit listrik tenaga bayu [2].

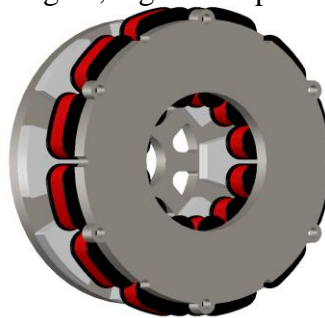
Pada pembangkit listrik tenaga bayu membutuhkan sebuah generator sinkron yang dapat menghasilkan energi listrik pada kecepatan angin yang tidak konstan. Di mana generator sinkron adalah sebuah mesin listrik yang berfungsi untuk mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik secara sinkron yang artinya frekuensi gelombang yang dihasilkan akan sama dengan kecepatan putar dari rotor. Semakin cepat rotor berputar maka frekuensi yang dihasilkan akan semakin besar dan sebaliknya [3].

Pada Penelitian ini generator sinkron yang akan dibuat adalah generator sinkron permanen magnet *flux axial* di mana medan eksitasi dihasilkan oleh magnet permanen [4], sehingga fluks magnetik dihasilkan oleh medan magnet permanen, arah medan fluksnya sejajar dengan sumbu putar sehingga posisi rotor dan stator akan tegak lurus terhadap poros [3]. Serta bagian *umbrella* akan dihilangkan pada bagian *teeth* stator dengan menghilangkan *umbrella* pada *teeth* stator diharapkan untuk memfokuskan aliran fluks saat melewati stator serta untuk mempermudah proses kontruksi dan proses *winding*.

Tujuan dari penelitian ini adalah terbentuknya sebuah desain generator sinkron permanen magnet *flux axial* dengan *umbrella less teeth* stator yang dapat menghasilkan daya generator sebesar 245 watt, dengan tegangan sebesar 45 volt DC dan arus maksimal sebesar 4,5 ampere.

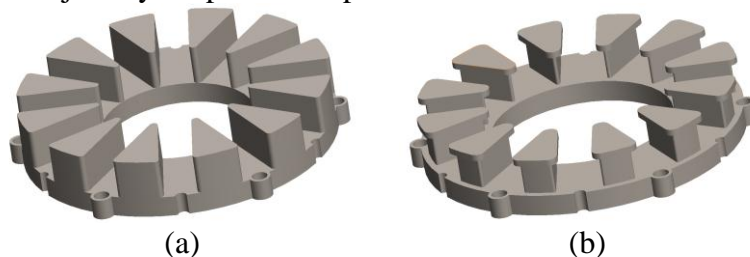
II. METODE

Pada proses pembuatannya, generator sinkron 3 fasa memiliki prinsip dasar yang digunakan, yaitu induksi *electromotive force* (EMF) pada konduktor yang disebabkan oleh medan magnet [5]. Konduktor yang bergerak dengan tegak lurus melewati medan magnet akan menyebabkan lilitan tersebut terinduksi EMF. Pada generator diperlukan medan magnet untuk menghasilkan daya dan juga tegangan terinduksi pada kumparannya [6]. Pada penelitian ini, untuk bisa menghasilkan medan magnet, digunakan permanen magnet seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Generator magnet permanen

Pada generator, *umbrella* mengacu pada bagian *teeth* stator. Di mana pada bagian *teeth* stator terdapat *umbrella* pada umumnya digunakan untuk memperbesar area aliran fluks dari rotor [8]. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. (a) *Umbrella Less* pada *teeth* stator, (b) *Umbrella* pada *teeth* stator

Dalam beberapa penelitian yang lain. kombinasi *slot* dan *pole* biasa dikenal dengan *slot per pole and phase* (spp) [7]. Perhitungan nilai dari *slot* dan *pole* dapat diketahui dengan Persamaan 1 [9].

$$Np = \frac{120f}{n} \tag{1}$$

$$q = \frac{N_s}{2p \cdot N_\phi} \tag{2}$$

Keterangan:

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)

Permanen magnet yang terletak pada rotor akan berfungsi sebagai medan eksitasi untuk membangkitkan medan magnet. Pada perancangan ukuran magnet akan mempengaruhi besarnya magnet yang akan digunakan [10]. Untuk mengetahui luasan magnet dapat digunakan Persamaan 2 [1]:

$$A_{mag} = \frac{\pi(r_o^2 - r_i^2) - \tau_f(r_o - r_i)N_m}{N_m} \tag{3}$$

Keterangan:

A_{mag} = Luasan magnet (m²)

r_o = Radius luar magnet (m)

r_i = Radius dalam magnet (m)

τ_f = Jarak antar magnet (m)

N_m = Jumlah magnet

Untuk kerapatan fluks magnet maksimal yang digunakan agar tidak melebihi nilai fluks saturasi bahan dapat diketahui dengan Persamaan 4 [1].

$$B_{max} = B_r \frac{l_m}{l_m + \delta} \tag{4}$$

Keterangan:

B_{max} = Kerapatan fluks maksimal (T)

B_r = Remanensi magnet (T)

l_m = Tebal magnet (m)

δ = Jarak cela udara (m)

Dengan diketahui nilai luasan dari permanen magnet dan nilai kerapatan fluks maksimum yang dihasilkan maka nilai fluks maksimum dapat diketahui dengan Persamaan 5 [2].

$$\phi_{max} = A_{mag} B_{max} \tag{5}$$

Keterangan:

ϕ_{max} = Fluks maksimal (Wb)

A_{mag} = Luasan magnet (m²)

B_{max} = Kerapatan fluks maksimal (T)

Untuk tegangan *output* merupakan tegangan elektrik yang dihasilkan dari gaya gerak listrik. Untuk parameter tegangan dapat diketahui dengan Persamaan 6 [1].

$$E_{ph} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot f \cdot \phi_{max} \cdot \frac{N_s}{N_{ph}} \tag{6}$$

Keterangan:

- E_{ph} = Tegangan induksi antar fasa (V)
- N = Jumlah lilitan
- f = Frekuensi (Hz)
- ϕ_{max} = Flux maksimum (Wb)
- N_s = Jumlah slot
- N_{ph} = Jumlah fasa

Untuk arus *output* merupakan arus yang dihasilkan dari generator pada saat terdapat beban. Untuk parameter arus dapat diketahui dengan Persamaan 7 [11].

$$I_{out} = \frac{V}{Z} \tag{7}$$

Keterangan:

- I_{out} = Arus keluaran yang dihasilkan (A)
- V = Tegangan *output* (V)
- Z = Besar nilai beban yang digunakan (Ω)

Sedangkan untuk daya *output* atau daya elektrik dari generator dapat ditentukan dengan Persamaan 8 [11].

$$P_{out} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi \tag{8}$$

Keterangan:

- P_{out} = Daya *output* generator (W)
- V = Tegangan *output* antar fasa (V)
- I = Arus *output* generator (A)
- $\cos\phi$ = Faktor daya

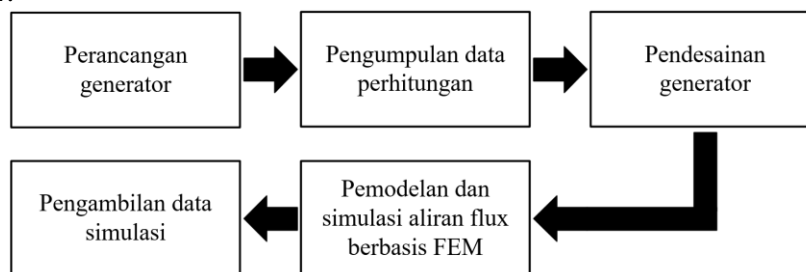
Untuk mendapatkan parameter generator perlu dilakukan pengujian dan untuk membatasi pengujian tersebut maka diperlukan regulasi tegangan didapatkan dari Persamaan 9.

$$\%Reg = \left| \frac{V_{load\ rectifier} - V_{load\ R}}{V_{load\ rectifier}} \right| \times 100\% \tag{9}$$

Keterangan:

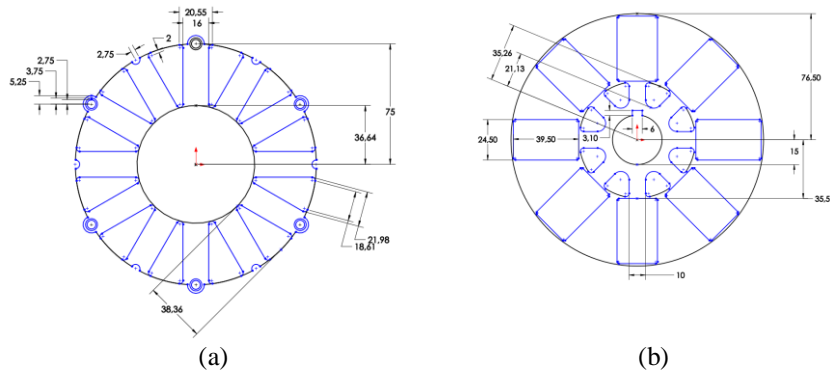
- $\%Reg$ = Regulasi tegangan dalam prosentase
- $V_{load\ rectifier}$ = Tegangan *output* setelah *rectifier* 3 fasa tanpa resistor
- $V_{load\ R}$ = Tegangan *output* setelah dipasang resistor pada *output rectifier*

Tahapan perancangan desain generator sinkron permanen magnet *flux axial*, dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Tahapan mendesain generator

Generator yang dibuat dalam penelitian ini adalah generator sinkron permanen magnet *flux axial*, dengan kombinasi slot sebanyak 12 dan pole sebanyak 8. Pada bagian *teeth* stator digunakan model *umbrella less* untuk geometri generator dapat dilihat pada Gambar 4 (a) untuk desain stator dan Gambar 4 (b) untuk desain rotor.



Gambar 4. (a) Perencanaan geometri stator, (b) Perencanaan geometri rotor

Untuk pemodelan awal adalah pemilihan jumlah *slot* dan *pole* diperoleh dari beberapa referensi seperti pada “*Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*” sudah menyediakan beberapa referensi kombinasi *slot* dan *pole* yang memungkinkan. Pemilihan *pole* berdasarkan frekuensi kerja generator yang diinginkan yaitu $f = 50$ Hz pada kecepatan $n = 750$ RPM maka dapat dihitung menggunakan Persamaan 10.

$$Np = \frac{120f}{n}$$

$$Np = \frac{120 \cdot 50}{750} = 8 \text{ pole} \tag{10}$$

Pada perancangan magnet permanen, dapat dihitung untuk luasan magnet sesuai dengan persamaan (3), maka untuk perhitungan luasan magnet dapat dihitung dengan Persamaan 11.

$$A_{mag} = \frac{\pi(r_o^2 - r_i^2) - \tau_f(r_o - r_i)N_m}{N_m}$$

$$A_{mag} = \frac{\pi(0.0015^2 - 0.035^2) - 0.057(0.0015 - 0.035)8}{8} = 1.42 \times 10^{-3} m^2 \tag{11}$$

Setelah didapatkannya parameter luasan magnet maka berikutnya adalah mendapatkan parameter fluks maksimal, untuk perhitungan besar fluks maksimal dapat dihitung dengan Persamaan 12.

$$B_{max} = B_r \frac{l_m}{l_m + \delta}$$

$$B_{max} = 1.2 \times \frac{0.01}{0.01 + 0.007} = 0.706 T \tag{12}$$

Dengan diketahui nilai dari fluks magnet maksimal dan nilai dari luasan magnet maka untuk besar fluks maksimal yang didapatkan dapat dihitung dengan Persamaan 13.

$$\phi_{max} = A_{mag} B_{max}$$

$$\phi_{max} = 1.42 \times 10^{-3} \times 0.706 = 1.003 \times 10^{-3} Wb \tag{13}$$

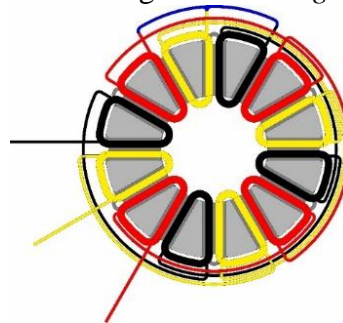
Pada perancangan jumlah lilitan yang akan digunakan dapat digunakan Persamaan 6 yang merupakan persamaan yang digunakan untuk mendapatkan tegangan induksi antar fasa, dengan diketahuinya nilai tegangan sebesar 45 V maka jumlah lilitan dapat ditentukan dengan Persamaan 14.

$$E_{ph} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot f \cdot \phi_{max} \cdot \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$N = \frac{45}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \times 50 \times 0.001003 \times \frac{12}{3}} = 50.5 \text{ lilitan} \tag{14}$$

Jumlah lilitan yang didapatkan adalah 50,5 lilitan, untuk mendapatkan tegangan sebesar 45 V maka jumlah lilitan yang digunakan akan dibulatkan menjadi 50 lilitan per *slot* dari stator.

Pada perencanaan *winding* akan menggunakan tipe *concentrated* di mana setiap *slot* akan terdapat satu belitan. Kemudian untuk konfigurasi *winding* akan sesuai dengan Gambar 5.



Gambar 5. Konfigurasi *winding*

Untuk menentukan besar dari kumparan/*coil*, maka diperlukan perhitungan daya *output* dan arus *output*. Dengan diketahui nilai beban sebesar 10 Ohm, maka nilai dari arus nantinya akan digunakan untuk menentukan besar kumparan yang digunakan. Perhitungan arus dapat dilihat pada Persamaan 15.

$$I_{out} = \frac{V}{Z}$$

$$I_{out} = \frac{45}{10} = 4.5 \text{ Ampere} \tag{15}$$

Dengan nilai arus yang telah didapatkan sebesar 4,5 A, maka nilai dari daya *output* yang dihasilkan dengan asumsi faktor daya dari generator sebesar 0,7 dapat diketahui dengan Persamaan 16.

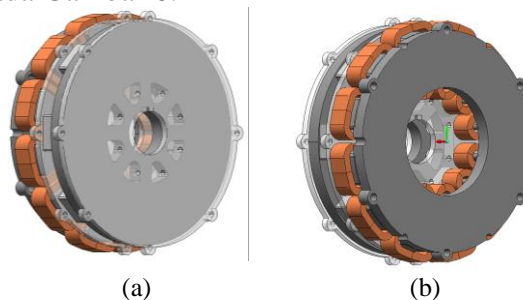
$$P_{out} = \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \varphi$$

$$P_{out} = \sqrt{3} \times 45 \times 4.5 \times 0.7 = 245 \text{ Watt} \tag{16}$$

Dengan nilai dari daya *output* sebesar 245 watt, dan nilai arus yang dihasilkan sebesar 4,5 A. Mempertimbangkan banyaknya lilitan yang telah ditargetkan yaitu sebanyak 50 lilitan dengan besar *slot* sebesar 75 mm², maka akan digunakan kumparan/*coil* diameter sebesar 1 mm² dengan AWG 2,93.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

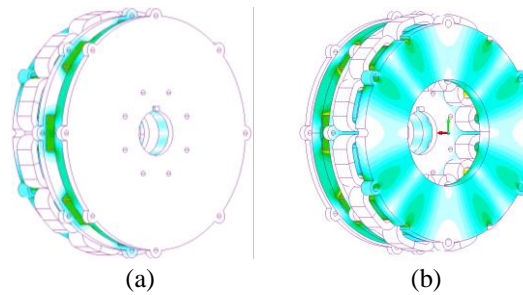
Dari perencanaan geometri menggunakan *software* desain yang telah dilakukan, kemudian dibuat desain model generator *axial* pada *software* berbasis FEM. Hasil pemodelan dari generator dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. (a) Pemodelan *software* berbasis FEM tampak depan,
(b) Pemodelan *software* berbasis FEM tampak belakang

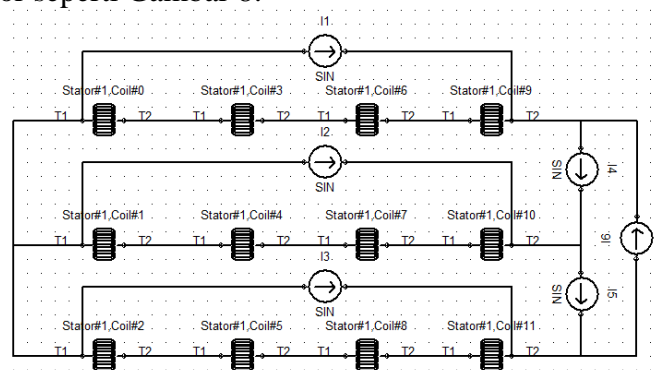
Setelah melakukan pemodelan kemudian dilanjutkan dengan mensimulasikan model yang telah dibuat untuk mendapatkan gambaran penyebaran fluks magnet pada *core* stator dan rotor serta data karakteristik generator. Simulasi yang dilakukan adalah simulasi berbasis FEM pada karakteristik generator tanpa beban, karakteristik generator dengan beban *rectifier*, dan

karakteristik generator dengan beban *rectifier* dan resistor. Penyebaran fluks pada generator dapat dilihat pada Gambar 7.



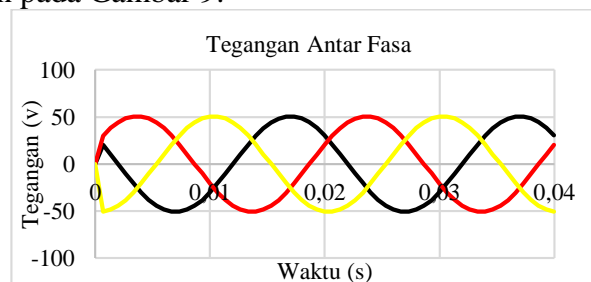
Gambar 7. (a) Distribusi fluks magnet pada *core* tampak depan, (b) Distribusi fluks magnet pada *core* tampak belakang

Untuk mendapatkan data tegangan generator tanpa beban pada simulasi bagian *winding* generator disusun atau dirangkai sesuai dengan Gambar 5. Kemudian tegangan diukur antar fasa *winding* generator seperti Gambar 8.



Gambar 8. Susunan *winding* simulasi generator tanpa beban

Pada simulasi ini didapatkan gelombang tegangan pada saat generator dalam keadaan tanpa beban yang ditunjukkan pada Gambar 9.



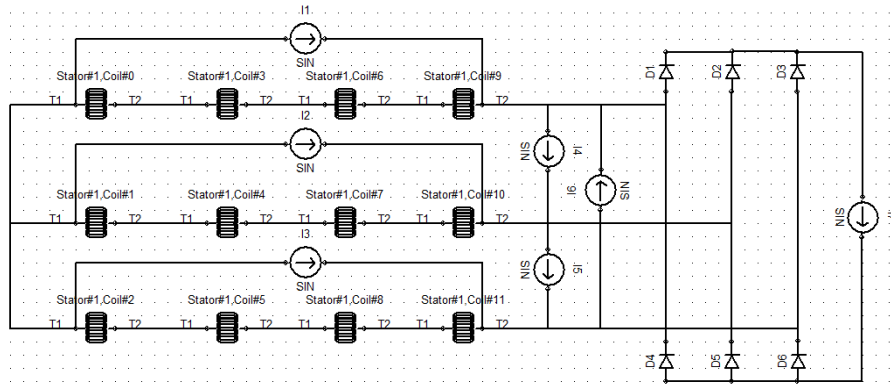
Gambar 9. Gelombang tegangan output antar fasa pada kecepatan 750 RPM

Generator menghasilkan tegangan maksimal 50,62865 volt (35,79986 V_{rms}). Setelah itu dilakukan simulasi lainnya dengan memvariasi kecepatan putar generator. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL 1. HASIL SIMULASI GENERATOR TANPA BEBAN DENGAN VARIASI RPM

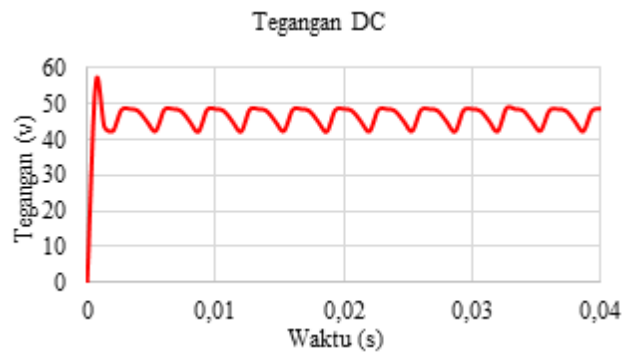
RPM	Frekuensi (Hz)	V_{LLMax} (V)	V_{LLRMS} (V)
300	20	20.25	14.31
450	30	30.39	21.49
600	40	40.50	28.63
750	50	50.62	35.79
900	60	60.79	42.98

Simulasi dilanjutkan dengan keadaan generator dibebani *rectifier* 3 fasa untuk mendapatkan nilai tegangan DC pada simulasi. Pada susunan *winding* sebelumnya ditambahkan rangkaian *rectifier* 3 fasa yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Susunan *winding* simulasi generator beban *rectifier* 3 fasa

Hasil simulasi generator pada *software* simulasi berbasis FEM tersebut dapat dilihat pada Gambar 11.



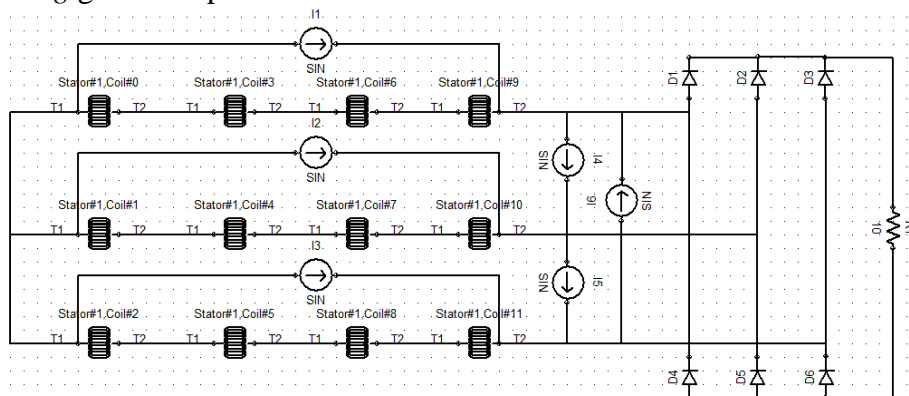
Gambar 11. Gelombang hasil simulasi tegangan DC *output*

Dari Gambar 11. pada gelombang hasil simulasi pada keadaan generator dibebani *rectifier* 3 fasa. Kemudian dilakukan kembali simulasi pada variasi kecepatan yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.

TABEL 2. HASIL SIMULASI GENERATOR BEBAN *RECTIFIER* DENGAN BEBAN KOSONG

RPM	Frekuensi (Hz)	Tegangan DC (V)
300	20	17.54
450	30	26.88
600	40	36.33
750	50	45,78
900	60	55.13

Kemudian dilanjutkan dengan simulasi generator pada keadaan berbeban *rectifier* dan resistor pada kecepatan 750 RPM untuk mendapatkan regulasi tegangan pada generator dengan susunan *winding* generator pada Gambar 12.



Gambar 12. Susunan *winding* simulasi generator beban *rectifier* 3 fasa dan resistor

Dari susunan *winding* generator pada Gambar 12. Kemudian dilakukan simulasi dengan memvariasi nilai resistor pada beban dan didapatkan data pada Tabel 3.

TABEL 3. HASIL SIMULASI GENERATOR BEBAN *RECTIFIER* DENGAN RESISTOR

Tegangan Beban <i>Rectifier</i> (V)	Beban R (Ω)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Regulasi Tegangan (%)
45,78	10	41,54	4,15	172,60	9,26
45,78	20	44,23	2,21	97,81	3,39
45,78	30	45,00	1,50	67,52	1,69
45,78	40	45,59	1,13	51,98	0,40
45,78	50	45,99	0,91	42,31	0,46
45,78	60	46,29	0,77	35,71	1,10
45,78	70	46,51	0,66	30,91	1,60
45,78	80	46,55	0,58	27,08	1,66
45,78	90	46,53	0,51	24,05	1,62
45,78	100	46,50	0,46	21,62	1,56

Parameter *output* yang dihasilkan pada simulasi generator keadaan berbeban untuk nilai regulasi tegangan digunakan untuk menentukan seberapa besar penurunan tegangan ketika dibebani sampai mendekati titik arus nominal atau KHA dari kumparan. Dengan demikian dapat ditentukan beban maksimal dari generator ketika memperhatikan penurunan tegangan yang terjadi pada generator.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari simulasi dan analisa pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa desain generator sinkron permanen magnet *flux axial* mampu menghasilkan tegangan V_{LLMAX} sebesar 50,62 volt dengan tegangan DC sebesar 45,78 volt dan daya maksimum sebesar 172,60 watt pada frekuensi 50 Hz. Jika dibandingkan dengan perancangan daya *output* generator sebesar 245 watt maka pada simulasi ini memiliki *error* sebesar 29,5% dari perancangan awal desain. Hal ini disebabkan dari keterbatasan pengisian parameter yang dapat dipilih pada simulasi, sehingga harus menggunakan nilai yang mendekati dari perancangan awal. Dengan daya yang dihasilkan generator mampu untuk menyalakan lampu maupun dijadikan sumber pengisian baterai atau *accu*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan banyak terima kasih atas terselesaikannya penelitian ini yang diharapkan dapat membantu dalam perkembangan generator pada pembangkit energi listrik yang ramah lingkungan untuk ke depannya.

REFERENSI

- [1] F. D. Wijaya, "Perancangan Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Putaran Rendah," p. 6, 2014.
- [2] M. F. Alqodri, C. E. Rustana, and H. Nasbey, "Rancang Bangun Generator Fluks Aksial Putaran Rendah Magnet Permanen Jenis Neodymium ($NdFeB$) Untuk Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Double-Stage Savonius," p. 8, 2015.
- [3] J. F. Gieras, R.-J. Wang, and M. J. Kamper, *Axial flux permanent magnet brushless machines*, 2nd ed. New York: Springer, 2008.
- [4] Q. A. S. Syed, H. Kurtovic, and I. Hahn, "New Single-Phase Flux Switching Axial Flux Permanent Magnet Motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, pp. 1–5, Nov. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2704659.
- [5] Q. A. S. Syed, H. Kurtovic, and I. Hahn, "Double stator and single rotor type single-phase flux switching axial flux permanent magnet motor," in *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, Australia, Aug. 2017, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056172.

- [6] T. F. Chan and L. L. Lai, "An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 86–94, Mar. 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.889546.
- [7] Hendertshot, J. R., Miller, T. J. E. Berlin "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", 1994." .
- [8] M. W. Kurniawan, R. F. Iskandar, and S. Pd, "STUDY OF THE EFFECT OF UMBRELLA GEOMETRY ON OUTPUT POWER IN 12S8P GENERATORS FOR WIND TURBINE USING MAGNET SOFTWARE," p. 8,2019.
- [9] M. O. Suhada and I. Yasri, "Aspek Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah," vol. 5, p. 7, 2018.
- [10] M. F. H. Khatab, Z. Q. Zhu, H. Y. Li, and Y. Liu, "Comparative study of novel axial flux magnetically geared and conventional axial flux permanent magnet machines," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 2, no. 4, pp. 392–398, Dec. 2018, doi: 10.30941/CESTEMS.2018.00050.
- [11] S. J. Chapman, "Electric machinery fundamentals", 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.