

RANCANG BANGUN GENERATOR MAGNET PERMANEN FLUKSI AKSIAL *SINGLE STATOR SINGLE ROTOR*

Muldi Yuhendri

Fakultas Teknik, Departemen Teknik Elektro
Universitas Negeri Padang
Email: muldiy@ft.unp.ac.id

Dona Doni

Fakultas Teknik, Departemen Teknik Elektro
Universitas Negeri Padang
Email: donadoni@google.com

Anne Fadia Ikhfa

Fakultas Teknik, Departemen Teknik Elektro
Universitas Negeri Padang
Email: annefadia143@gmail.com

ABSTRAK

Generator sinkron magnet permanen adalah salah satu jenis generator yang banyak digunakan untuk pembangkit tenaga listrik skala kecil, karena dapat dioperasikan dalam kecepatan rendah, sehingga tidak membutuhkan *gearbox* dalam pengoperasiannya. Paper ini mengusulkan pembuatan generator sinkron magnet permanen fluksi aksial kecepatan rendah yang dapat digunakan untuk pembangkit tenaga listrik skala kecil. Generator dirancang dalam bentuk *single stator single rotor*. Stator generator dirancang menggunakan *fiberglass* sebagaiudukan untuk sembilan kumparan, sedangkan rotornya dirancang dalam bentuk piringan dengan menggunakan aluminium sebagaiudukan untuk magnet permanen *Neodymium N52*. Rancangan generator divalidasi melalui simulasi *Finite Element Analysis* menggunakan *solidwork* dan diuji melalui eksperimen dengan menggunakan motor induksi sebagai tenaga penggerak. Pengujian dilakukan dengan celah udara dan kecepatan putaran yang bervariasi. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa generator dapat menghasilkan tegangan sebesar 15,4 Volt saat generator diputar dengan kecepatan 500 rpm. Generator juga dapat menghasilkan daya maksimum sebesar 400 Watt dengan celah udara 2 mm.

Kata kunci: Generator, magnet permanen, fluksi aksial, fiberglass

ABSTRACT

Permanent magnet synchronous generator is one type of generator that is widely used for small-scale power generation, because it can be operated at low speed, so it does not require a gearbox in its operation. This paper proposes the manufacture of a low speed axial flux permanent magnet synchronous generator that can be used for small-scale electric power generation. The generator is designed in the form of a single stator single rotor. The generator stator is designed using fiberglass as the holder for the nine coils, while the rotor is designed in a disc shape using aluminum as the holder for the Neodymium N52 permanent magnet. The generator design was validated through Finite Element Analysis simulation using solidwork and tested through experiments using an induction motor as the driving force. Tests were carried out with varying air gaps and rotational speeds. The experimental results show that the generator can produce a voltage of 15.4 Volts when the generator is rotated at a speed of 500 rpm. The generator can also produce a maximum power of 400 Watts with an air gap of 2 mm

Keywords: generator, permanent magnet, axial flux, fiberglass

1. PENDAHULUAN

Generator adalah mesin listrik yang digunakan untuk menghasilkan daya listrik dengan cara mengkonversikan daya mekanik menjadi daya listrik berdasarkan mekanisme elektromagnetik. Daya mekanik yang menjadi input generator dapat diperoleh dari berbagai sumber tenaga penggerak, seperti turbin angin, turbin air, turbin uap dan sebagainya. Banyak jenis generator yang digunakan untuk pembangkit tenaga listrik. Generator sinkron magnet permanen adalah salah satu jenis generator yang banyak digunakan pada pembangkit tenaga listrik berdaya kecil. Hal ini karena keunggulan yang dimilikinya, antara lain dapat dioperasikan pada kecepatan putaran rendah, sehingga dapat dihubungkan langsung dengan turbin putaran rendah tanpa menggunakan *gearbox* yang akan mengurangi rugi daya pada poros dan akan meningkatkan efisiensi pembangkit [1]. Berdasarkan keunggulan yang dimiliki generator magnet permanen ini, maka diusulkan pembuatan generator magnet permanen kecepatan putaran rendah yang dapat digunakan pada pembangkit putaran rendah tanpa *gearbox*, seperti pembangkit listrik tenaga angin, mikrohidro dan sebagainya. Generator sinkron magnet permanen merupakan generator yang tidak menggunakan kumparan medan sebagai penghasil medan magnet. Untuk mendapatkan medan magnet, generator ini menggunakan magnet permanen yang dipasang pada stator atau rotor mesin tersebut. Banyak jenis magnet permanen yang dapat digunakan untuk generator ini, seperti samarium, *Neodymium*, keramik dan magnet *Alnico* [2]. Magnet permanen jenis *Neodymium* lebih populer digunakan untuk generator, karena tahan lama dan medan magnet yang dihasilkan juga lebih kuat dibandingkan jenis magnet lain [3].

Tegangan yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen ini ditentukan oleh jumlah lilitan pada kumparan stator dan kuat medan magnet yang mengenai kumparan stator tersebut. Kuat medan magnet yang mengenai kumparan stator ini ditentukan oleh fluksi yang dihasilkan magnet permanen dan jarak antara magnet permanen dengan kumparan stator [4]. Fluksi yang dihasilkan oleh magnet permanen ini ditentukan oleh jenis dan ukuran magnet yang digunakan. Magnet permanen yang digunakan dalam pembuatan generator ini adalah magnet *Neodymium* N52 ukuran 30 x 20 x 4 mm, dimana magnet jenis ini memiliki intensitas medan magnet yang sangat kuat [5], sehingga diharapkan dapat meningkatkan fluksi yang dihasilkan oleh magnet permanen tersebut.

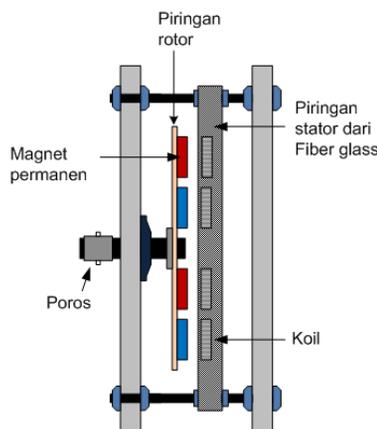
Berdasarkan arah fluksi yang dihasilkan magnet permanen, maka generator magnet permanen dapat dikategorikan atas fluksi aksial dan fluksi radial [1]. Generator fluksi aksial memiliki arah fluksi yang sejajar dengan poros generator, sebaliknya arah fluksi generator fluksi radial tegak lurus terhadap porosnya. Dalam paper ini, generator magnet permanen diusulkan dalam bentuk arah fluksi aksial. Bentuk ini dipilih karena lebih sederhana dan mudah dalam pembuatan [6]. Generator magnet permanen fluksi aksial memiliki struktur rotor dan stator dalam bentuk disk atau lempengan piringan yang saling berhadapan satu sama lainnya [7]. Pada bagian piringan stator dipasang kumparan, sedangkan pada bagian piringan rotor dipasang magnet permanen. Untuk mengurangi torsi awal yang besar, maka inti stator dibuat dari bahan non magnetik, seperti bahan *diamagnetic* atau *paramagnetic* [8]. Hal ini akan mengurangi tarikan medan magnet terhadap stator. Dalam penelitian ini, inti stator dirancang dengan menggunakan fiberglass, sehingga diharapkan dapat mengurangi torsi awal yang besar pada saat generator mulai berputar.

Untuk mendapatkan tegangan generator yang lebih besar pada kecepatan putaran rendah, maka dapat dilakukan beberapa strategi, yaitu memperbanyak jumlah kutub, memperbanyak jumlah lilitan kumparan stator dan memperbanyak jumlah piringan stator dan rotor [9]. Telah banyak jenis generator sinkron magnet permanen yang telah dikembangkan berdasarkan jumlah piringan stator dan rotornya, seperti generator sinkron magnet permanen *single stator single rotor*, *single stator dual rotor* [10], *dual stator single rotor* [11] dan *multistage stator rotor* [12]. Dalam penelitian ini, generator dirancang dalam bentuk *single stator single rotor*. Untuk meningkatkan nilai tegangan yang dihasilkan kumparan stator pada kecepatan rendah, maka generator dirancang dalam jumlah kutub yang banyak, yakni dua belas kutub. Sedangkan kumparan statornya dirancang untuk sistem tiga fasa dengan jumlah kumparan sembilan buah, sehingga masing-masing fasa memiliki tiga buah kumparan. Generator sinkron magnet permanen fluksi aksial yang dibuat dalam penelitian ini diuji dalam berbagai percobaan, yakni percobaan dengan kecepatan yang bervariasi dan percobaan

dengan jarak celah udara yang bervariasi. Untuk mendapatkan hasil yang sesuai tujuan, maka rancangan generator ini juga divalidasi melalui simulasi dengan menggunakan *software solidwork*. Dalam paper ini dipresentasikan perancangan, pembuatan dan pengujian generator magnet permanen fluksi aksial.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian tentang rancang bangun generator sinkron magnet permanen fluksi aksial ini dilakukan dalam bentuk eksperimen dengan beberapa tahapan kegiatan. Tahapan penelitian dimulai dari tahapan perancangan, pembuatan generator dan pengujian. Dalam penelitian ini, generator sinkron magnet permanen fluksi aksial dirancang dalam bentuk satu stator satu rotor. Generator dirancang untuk putaran rendah dengan rating daya 500 Watt dan rating tegangan 12 Volt. Generator dirancang untuk sistem tiga fasa dengan menggunakan 9 kumparan pada stator, dimana setiap fasanya memiliki tiga kumparan yang ditempatkan pada stator. Pada rotor ditempatkan magnet permanen *Neodymium* N52 berukuran 30 x 20 x 4 mm sebanyak 12 buah. Gambar 1 menunjukkan struktur generator sinkron magnet permanen fluksi aksial yang dibuat dalam penelitian ini.



Gambar 1. Rancangan generator sinkron magnet permanen fluksi aksial

Stator generator sinkron magnet permanen fluksi aksial dirancang dengan sembilan kumparan untuk sistem tiga fasa. Jumlah lilitan tiap kumparan (N) dihitung berdasarkan nilai tegangan yang diinginkan E_{rms} [13], yang dihitung dengan Persamaan :

$$E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N f \phi_{max} \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (1)$$

Dimana

ϕ adalah fluksi yang dihasilkan magnet permanen, f adalah frekuensi, N_{ph} adalah jumlah fasa dan N_s adalah jumlah kumparan perfasa. Fluksi maksimum magnet permanen ditentukan oleh luas area medan magnet (A_{magn}) dan kerapatan medan maksimum (B_{max}) [14], yang dirumuskan dengan :

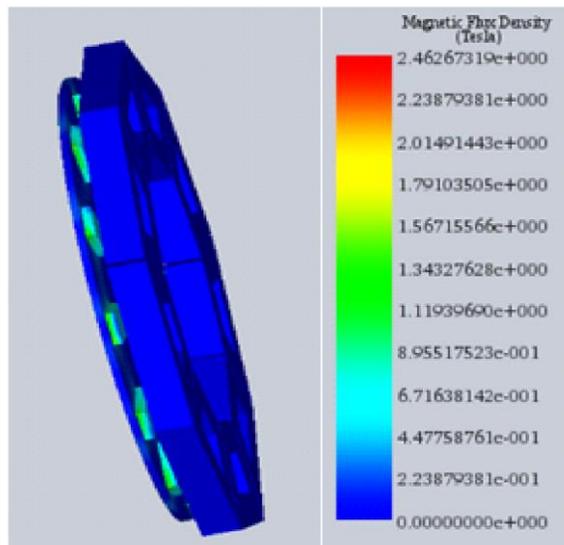
$$\phi_{max} = A_{magn} B_{max} \quad (2)$$

Kerapatan medan maksimum (B_{max}) dan luas area magnet yang dilingkupi oleh rotor (A_{magn}) dan ini dapat dihitung dengan persamaan :

$$B_{\max} = B_r \frac{l_m}{l_m + \delta} \quad (3)$$

$$A_{\text{magn}} = \frac{\pi (r_o^2 - r_i^2) - \tau_f (r_o - r_i) n_m}{n_m} \quad (4)$$

Dimana r_o dan r_i adalah radius luar dan radius dalam magnet permanen, l_f adalah jarak antar magnet dan n_m adalah jumlah magnet. Jumlah lilitan setiap kumparan dihitung berdasarkan Persamaan (1). Nilai fluksi magnet yang mengenai kumparan diperoleh dari hasil simulasi *Finite Element Analysis* menggunakan software solidwork [15]. Dalam simulasi ini dapat dilihat sebaran fluksi magnet yang dihasilkan magnet permanen yang mengenai kumparan stator. Dalam simulasi ini, jarak kumparan stator dengan magnet permanen pada rotor dibuat 0,5 mm. Gambar 2 menunjukkan hasil simulasi densitas fluksi magnet yang mengenai kumparan rotor dengan menggunakan magnet *Neodymium* N52 ukuran 30 x 20 x 4 mm.

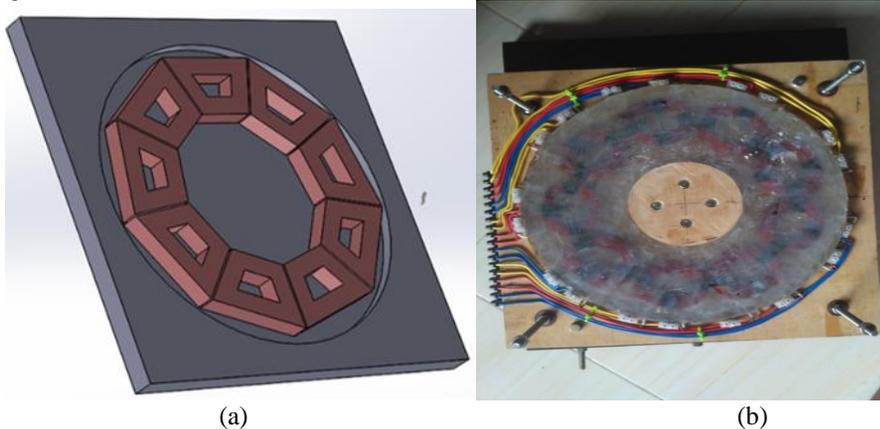


Gambar 2. Hasil simulasi densitas fluksi magnet

Gambar 2 menunjukkan bahwa fluksi magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen sangat rendah. Densitas fluksi magnet yang mengenai rotor hanya berwarna biru dan tidak sampai ke nilai maksimum yang berwarna merah. Warna biru ini merupakan takaran densitas fluksi yang paling rendah dalam grafik Gambar 2 di atas. Rendahnya densitas fluksi magnet yang dihasilkan magnet permanen disebabkan oleh ukuran magnet permanen yang digunakan tergolong kecil, yakni 30 x 20 x 4 mm. Berdasarkan nilai fluksi yang diperoleh dari hasil simulasi ini dan berdasarkan rating tegangan yang diinginkan dan jumlah kumparan yang akan digunakan, maka dengan menggunakan Persamaan (1) diperoleh hasil perhitungan jumlah lilitan setiap kumparan sebesar 235 lilitan. Untuk menentukan ukuran bodi stator, selanjutnya ditentukan diameter kawat yang akan digunakan untuk kumparan stator. Diameter kawat kumparan ini ditentukan dari rating arus dari generator, dimana rating arus ini ditentukan oleh rating daya dan rating tegangan dari generator yang dirancang [16]. Dalam penelitian ini, kawat kumparan dirancang dengan diameter 1 mm.

2.1. Rancangan Stator

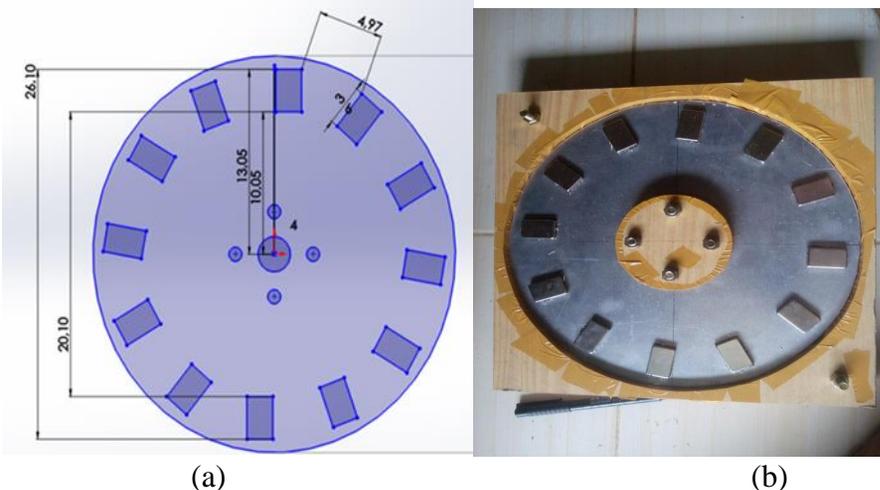
Setelah jumlah kumparan, jumlah lilitan setiap kumparan serta diameter kawat kumparan diketahui, selanjutnya dilakukan perancangan ukuran dan bentuk stator. Inti stator dibuat dari fiberglass untuk mengurangi tarikan magnet permanen terhadap inti. Bahan fiber ini terdiri dari resin dan katalis sebagai pengeras material. Gambar 3(a) menunjukkan rancangan stator generator sinkron magnet permanen fluksi aksial yang dibuat dalam penelitian ini. Bodi stator dirancang dengan diameter luar 34 cm dan diameter dalam 31,6 cm. Gambar 3(b) menunjukkan bodi stator yang telah dibuat menggunakan resin, dimana didalamnya terdapat sembilan kumparan yang terhubung untuk sistem tiga fasa.



Gambar 3. Bentuk stator. (a) Rancangan stator, (b) Hasil pembuatan stator

2.2. Rancangan Rotor

Selanjutnya dilakukan perancangan dan pembuatan rotor. Pada rotor ini dipasang magnet permanen sebagai penghasil medan magnet yang akan melingkupi kumparan stator. Dalam penelitian ini, magnet permanen yang digunakan untuk rotor adalah magnet *Neodymium* (NdFeB) N52 ukuran 30 x 20 x 4 mm sebanyak 12 buah yang dipasang dalam bentuk melingkar, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4(a). Inti rotor dirancang menggunakan plat aluminium dengan diameter 28 cm dan ketebalan 8 mm. Berdasarkan jumlah magnet yang digunakan, maka diperoleh radius luar magnet permanen sebesar 13,05 cm dan radius dalam magnet permanen sebesar 10,05 cm. Sedangkan jarak antara masing-masing magnet permanen adalah sebesar 4,97 cm. Gambar 4(b) menunjukkan piringan rotor yang dibuat dari aluminium.



Gambar 4. Bentuk rotor. (a) Rancangan rotor, (b) Hasil pembuatan rotor

Bagian atas magnet permanen dilapisi dengan resin tipis agar tidak lepas dari inti rotor. Piringan rotor dihubungkan dengan poros yang terbuat dari stainless diameter 1 inchi, sedangkan inti kumparan stator dipasangkan pada bodi generator yang terbuat dari plat besi. Bahan poros dipilih dari stainless yang bersifat diamagnetic dengan untuk menghindari tertariknya magnet permanen dari dudukannya. Gambar 5 menunjukkan hasil jadi rakitan generator sinkron magnet permanen fluksi aksial yang dibuat dalam penelitian ini.



Gambar 5. Hasil perakitan generator

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah pembuatan generator selesai dilakukan, selanjutnya dilakukan pengujian. Dalam pengujian ini, generator sinkron magnet permanen fluksi aksial diuji dengan kecepatan yang yang bervariasi dan jarak celah udara yang bervariasi. Dalam eksperimen ini, generator digerakan dengan motor induksi tiga fasa, dimana kecepatan motor induksi ini dibuat bervariasi dengan mengatur tegangannya menggunakan autotrafo tiga fasa. Gambar 6 menunjukkan instalasi pengujian generator yang dilakukan dilaboratorium.



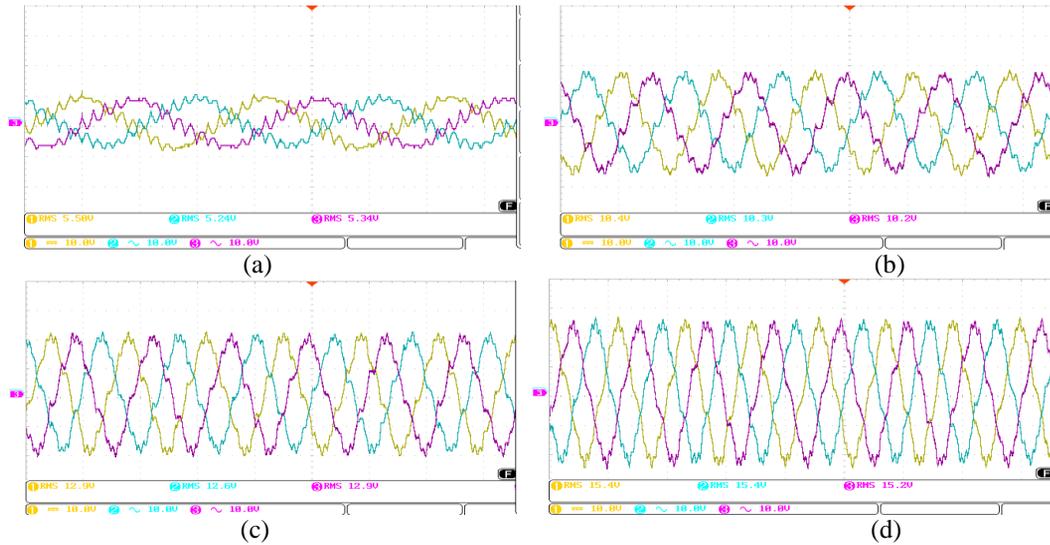
Gambar 6. Pengujian generator

Pengujian dilakukan untuk operasi tanpa beban dan operasi berbeban dengan menggunakan resistor variabel tiga fasa. Pengujian pertama dilakukan operasi tanpa beban dengan jarak celah udara 2 mm. Generator dioperasikan dengan kecepatan bervariasi mulai dari 100 rpm sampai 500 rpm. Tabel 1 menunjukkan tegangan yang dihasilkan generator ketika celah udara 2 mm dalam kondisi tanpa beban.

Tabel 1. Tegangan generator dengan celah udara 2 mm

<i>Putaran (Rpm)</i>	<i>Tegangan rms (Volt)</i>		
	V_{RN}	V_{SN}	V_{TN}
100	5,58	5,24	5,34
200	7,97	7,77	7,72
300	10,4	10,3	10,2
400	12,9	12,6	12,9
500	15,5	15,3	15,2

Hasil pengujian pertama dalam operasi tanpa beban dengan celah udara sebesar 2 mm yang diuraikan dalam Tabel 1 menunjukkan bahwa generator sinkron magnet permanen fluksi aksial yang dibuat dalam penelitian ini telah dapat menghasilkan tegangan sekitar 5 Volt pada saat generator diputar dengan kecepatan 100 rpm. Sedangkan pada saat kecepatan 500 rpm, generator dapat menghasilkan tegangan sekitar 15 Volt. Hasil ini menunjukkan bahwa generator sinkron magnet permanen fluksi aksial yang dibuat dalam penelitian ini telah menghasilkan tegangan mendekati nilai tegangan yang dirancang. Generator ini dirancang untuk rating tegangan 12 Volt, dimana nilai tersebut dapat diperoleh dalam kecepatan rendah, yakni sekitar 400 rpm. Hasil ini menunjukkan bahwa generator telah bekerja dengan baik sesuai dengan perencanaan. Dalam pengujian ini juga dilakukan pengamatan bentuk gelombang tegangan generator dengan menggunakan osiloskop portabel yang ditampilkan pada komputer. Gambar 7 menunjukkan bentuk gelombang tegangan ketika celah udara 2 mm.



Gambar 7. Bentuk gelombang tegangan generator. (a) kecepatan 100 rpm, (b) kecepatan 300 rpm, (c) kecepatan 400 rpm, (d) kecepatan 500 rpm

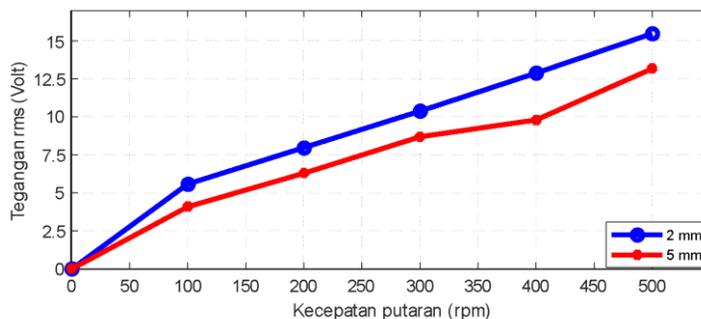
Gambar 7 menunjukkan bahwa generator sinkron magnet permanen fluksi aksial yang dibuat dalam penelitian ini juga telah menghasilkan gelombang tegangan mendekati sinusoidal yang simetris antar fasa. Hasil ini menunjukkan bahwa susunan kumparan stator dan magnet permanen yang ditempatkan pada rotor sudah simetris, sehingga gelombang tegangan yang dihasilkan juga simetris antar fasanya. Gambar 9 menunjukkan bahwa gelombang tegangan yang dihasilkan generator ini belum sepenuhnya berbentuk sinusoidal murni. Cacat gelombang tegangan mungkin disebabkan oleh bentuk kumparan stator atau sebaran fluksi dari magnet permanen yang tidak merata pada kumparan akibat struktur magnet permanen dalam bentuk persegi.

Selanjutnya dilakukan pengujian dengan jarak celah udara antara kumparan stator dengan magnet permanen yang terdapat pada rotor sebesar 5 mm. Dalam pengujian kedua ini, generator magnet permanen fluksi aksial dioperasikan tanpa beban dengan kecepatan yang bervariasi mulai dari 100 rpm sampai 500 rpm sesuai dengan kecepatan generator yang dibuat pada pengujian dengan celah udara 2 mm. Tabel 2 menunjukkan tegangan setiap fasa generator dalam pengujian ini..

Tabel 2. Tegangan generator dengan celah udara 5 mm

Putaran (Rpm)	Tegangan rms (Volt)		
	V_{RN}	V_{SN}	V_{TN}
100	4,1	4,05	4,1
200	6,3	6,2	6,3
300	8,7	8,7	8,8
400	9,8	10,1	10
500	13,2	13,2	13,1

Hasil pengujian kedua dalam operasi tanpa beban dengan celah udara 5 mm yang diuraikan dalam Tabel 2 menunjukkan bahwa generator sinkron magnet permanen fluksi aksial dapat menghasilkan tegangan sekitar 4 Volt ketika kecepatan putaran generator 100 rpm dan sekitar 13 Volt saat kecepatan generator 500 rpm. Hasil ini menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan generator pada saat celah udara 5 mm lebih rendah dari tegangan yang dihasilkan generator ketika celah udara dibuat 2 mm. Perbandingan tegangan yang dihasilkan generator sinkron magnet permanen fluksi aksial pada kedua percobaan ini dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Tegangan generator dengan celah udara 2 mm dan 5 mm

Gambar 8 menunjukkan bahwa celah udara antara kumparan stator dengan magnet permanen pada rotor berbanding terbalik dengan nilai tegangan yang dihasilkan generator. Generator menghasilkan tegangan yang lebih besar ketika jarak celah udaranya diperkecil. Hasil ini menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh generator dipengaruhi oleh densitas fluksi magnet yang mengenai kumparan rotor, dimana nilai tegangan yang dihasilkan kumparan stator berbanding lurus dengan nilai fluksi yang mengenai kumparan tersebut, sedangkan densitas fluksi magnet yang mengenai kumparan stator ini berbanding terbalik dengan jarak celah udara antara kumparan stator dengan magnet permanen. Densitas fluksi yang mengenai kumparan stator akan semakin besar jika jarak antar sumber medan magnet semakin dekat dengan objek yang akan dikenainya [4]. Hasil ini sesuai dengan hasil simulasi densitas fluksi magnet menggunakan solidwork yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Densitas fluksi magnet terkuat berada pada sumber medan magnet. Oleh sebab itu, untuk mendapatkan nilai fluksi yang maksimal untuk meningkatkan tegangan output generator, maka jarak celah udara antara kumparan stator dengan magnet permanen pada rotor perlu diperkecil. Selain dipengaruhi celah udara, kuat medan magnet yang mengenai kumparan stator ini juga ditentukan oleh jenis magnet yang digunakan serta dimensi dari magnet tersebut. Dalam penelitian ini, magnet permanen yang digunakan adalah magnet *Neodymium* N52 yang merupakan jenis magnet permanen dengan medan magnet terkuat dibandingkan jenis magnet yang lain. Dimensi magnet permanen *Neodymium* N52 yang digunakan dalam pembuatan generator ini adalah 30 x 20 x 4 mm. Dimensi ini relative kecil, sehingga fluksi yang dihasilkan mengenai kumparan stator relatif rendah, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Oleh sebab itu, salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan nilai tegangan yang dihasilkan kumparan stator adalah dengan memperbesar dimensi magnet permanen yang digunakan ini. Selain ditentukan oleh jenis dan dimensi magnet permanen, nilai tegangan yang dihasilkan kumparan stator juga dipengaruhi oleh panjang kawat kumparan stator, dimana Panjang kawat kumparan ini ditentukan oleh ukuran kumparan dan jumlah lilitan setiap kumparan. Sesuai dengan Persamaan (1), nilai tegangan yang dihasilkan kumparan stator berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan stator. Dalam penelitian ini, kumparan stator memiliki jumlah lilitan 235 lilitan setiap kumparannya. Jika ingin menaikkan tegangan yang dihasilkan kumparan stator, maka jumlah lilitan ini bisa ditambah dengan cara memperkecil diameter kawat, sehingga dapat diperoleh jumlah lilitan yang lebih banyak dengan ukuran kumparan yang sama [12].

Hasil pengujian tanpa beban yang diuraikan dalam Tabel 1 dan 2 juga menunjukkan bahwa generator sudah dapat menghasilkan tegangan sesuai dengan rating tegangan yang dirancang pada kecepatan rendah. Hasil ini dapat diperoleh karena generator dirancang dengan jumlah kutub yang banyak, yakni 12 kutub, sehingga dapat dioperasikan dengan kecepatan rendah. Hasil ini juga menunjukkan bahwa generator sudah dapat digunakan untuk pembangkit dengan kecepatan putaran rendah, seperti pembangkit listrik tenaga angin yang dihubungkan secara langsung dengan turbin tanpa *gearbox*. Konfigurasi ini lebih efisien dari generator putaran tinggi yang menggunakan *gearbox* yang akan menambah rugi daya pada *gearbox* tersebut.

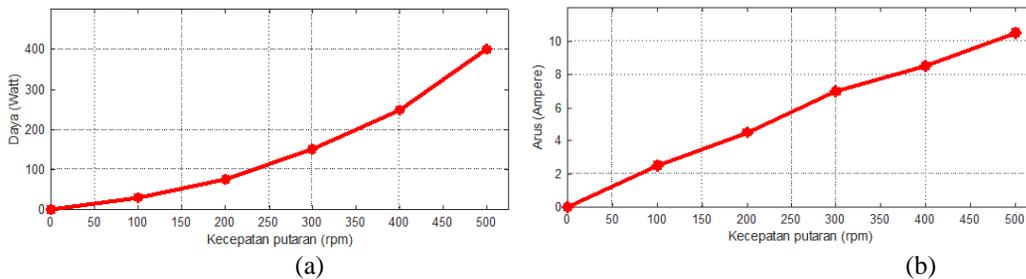
Setelah pengujian tanpa beban selesai, selanjutnya dilakukan pengujian berbeban. Dalam pengujian ini, generator magnet permanen fluksi aksial yang dibuat dalam penelitian ini

dihubungkan dengan beban resistor variabel tiga fasa seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6, dimana beban resistor tersebut dirangkai dalam bentuk hubungan bintang. Pengujian berbeban ini dilakukan dengan jarak celah udara antara kumparan stator dengan magnet permanen yang terdapat pada rotor sebesar 2 mm dan kecepatan bervariasi mulai dari 100 rpm sampai 500 rpm sesuai dengan kecepatan generator yang dibuat pada pengujian pertama dan kedua. Tabel 3 menunjukkan data tegangan fasa R (V_{RN}) dan arus fasa R (I_R) serta daya yang dihasilkan generator pada setiap percobaan berbeban ini.

Tabel 3. Pengujian berbeban

<i>Putaran (Rpm)</i>	<i>Tegangan V_{RN} (Volt)</i>	<i>Arus I_R (Ampere)</i>	<i>Daya P (Watt)</i>
100	5,2	2,4	30
200	7,5	4,2	75
300	10	6,7	150
400	12,5	8,3	250
500	15	10,5	400

Perubahan arus fasa R (I_R) dan daya yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen fluksi aksial (P) dalam setiap percobaan berbeban ini ditunjukkan oleh grafik yang terdapat dalam Gambar 9. Hasil pengujian ketiga dengan operasi berbeban yang diuraikan dalam Tabel 3 dan Gambar 9 menunjukkan bahwa generator sinkron magnet permanen yang dibuat dalam penelitian ini telah dapat menghasilkan daya sebesar 400 Watt ketika generator dioperasikan dengan kecepatan 500 rpm dan celah udara 2 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa rating daya generator sudah mendekati rating daya yang direncanakan. Gambar 9 menunjukkan bahwa arus yang mengalir ke beban sampai 10 Ampere ketika generator dioperasikan pada kecepatan 500 rpm. Nilai arus ini masih aman bagi kumparan stator yang menggunakan kawat kumparan dengan diameter 1 mm. Hasil ini juga menunjukkan bahwa diameter kawat kumparan yang digunakan sudah sesuai dengan rating arus dari generator tersebut.



Gambar 9. Hasil pengujian berbeban. (a) Daya output generator, (b) Arus fasa R

Semua hasil pengujian menunjukkan bahwa generator sinkron magnet permanen fluksi aksial dalam bentuk satu piringan rotor dan satu piringan stator yang dibuat dalam penelitian ini telah bekerja dengan baik sesuai dengan yang direncanakan.

4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini dirancang dan dibuat generator sinkron magnet permanen fluksi aksial dalam bentuk single stator single rotor dengan menggunakan magnet *Neodymium* N52 ukuran 30 x 20 x 4 mm. Generator dirancang untuk system tiga fasa dengan menggunakan 9 kumparan pada stator dan 12 magnet permanen pada rotor. Generator yang dibuat divalidasi melalui pengujian dengan kecepatan putaran dan celah udara yang bervariasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa generator sinkron magnet permanen yang dibuat dalam penelitian ini telah bekerja dengan baik

sesuai dengan yang direncanakan. Generator dapat menghasilkan tegangan sekitar 12 Volt pada kecepatan 400 rpm dan dapat menghasilkan daya sekitar 400 Watt ketika generator diputar dengan kecepatan 500 rpm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sun, F. Jiang, and T. Li, "Design and optimization of a of a Novel Axial-Radial Flux Permanent Magnet Machine," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 4, pp. 1–11, 2020.
- [2] P. Eklund, J. Sjolund, M. Berg, M. Leijon, and S. Eriksson, "Experimental Evaluation of a Rare Earth-Free Permanent Magnet Generator," *IEEE Trans. Energy Conversion.*, vol. 36, no. 1, pp. 3–10, 2021.
- [3] K. Zhang, X. Huang, L. Wu, Y. Fang, and W. Cao, "Stator design aspects for permanent magnet superconducting wind power generators," *IEEE Trans. Appl. Superconductor.*, vol. 29, no. 2, pp. 1–5, 2019.
- [4] Bangun Giri Pamungkas, Suyitno, Daryanto, and Perdamean Sebayang, "Pengaruh Dimensi Magnet Permanen Ndfcb dan Jarak Celah Udara Terhadap Kinerja Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Satu Fasa," *J. Electr. Vocat. Educ. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 32–36, 2020.
- [5] B. Prasetyo and T. H. Mulud, "Rancang Bangun Motor – Generator Magnet Permanen Jenis NdFeB," *Eksergi*, vol. 15, no. 2, p. 60, 2019.
- [6] M. Yuhendri, M. Muskhir, Taali, and Ahyanuardi, "Implementation of Three Phase Axial Flux Disc Permanent Magnet Generator for Low-Speed Horizontal Axis Wind Turbine," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 1388–1394, 2021.
- [7] L. Noprizal, M. Syukri, and S. Syahrizal, "Perancangan Prototype Generator Magnet Permanen 1 Fasa Jenis Fluks Aksial Pada Putaran Rendah," *Kitekro*, vol. 1, no. 1, pp. 40–44, 2019.
- [8] O. Shariati, A. Behnamfar, and B. Potter, "An Integrated Elitist Approach to the Design of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Wind Generators (AFPMWG)," *Energies*, vol. 15, no. 9, 2022.
- [9] S. J. Arand and M. Ardebili, "Multi-objective design and prototyping of a low cogging torque axial-flux PM generator with segmented stator for small-scale direct-drive wind turbines," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 10, no. 9, pp. 889–899, 2016.
- [10] M. F. Khatib, Z. Zhu, H. Li, and Y. Liu, "Comparative study of axial flux magnetically geared machine with conventional axial flux YASA machine," *2018 IEEE Int. Magn. Conf. INTERMAG 2018*, vol. 2, no. 4, pp. 392–398, 2018.
- [11] G. A. Haqq, T. Hardianto, and B. Sujanarko, "Rancang Bangun Generator Permanen Magnet Satu Fasa Dengan Daya 50 Watt Tipe Fluks Aksial Dual Rotor," *J. Arus Elektro Indones.*, vol. 6, no. 1, p. 6, 2020.
- [12] F. Angriawan and M. Yuhendri, "Rancang Bangun Multistage Generator Magnet Permanen Fluksi Aksial," *JTEIN J. Tek. Elektro Indonesia.*, vol. 2, no. 2, pp. 245–249, 2021.
- [13] H. Qiu, W. Yu, B. Tang, Y. Mu, W. Li, and C. Yang, "Study on the Influence of Different

Rotor Structures on the Axial-Radial Flux Type Synchronous Machine,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 7, pp. 5406–5413, 2018.

- [14] M. C. Gardner, M. Johnson, and H. A. Toliyat, “Comparison of Surface Permanent Magnet Coaxial and Cycloidal Radial Flux Magnetic Gears,” *2018 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2018*, vol. 33, no. 4, pp. 5005–5012, 2018.
- [15] J. Hou, W. Geng, Q. Li, and Z. Zhang, “3-D Equivalent Magnetic Network Modeling and FEA Verification of a Novel Axial-Flux Hybrid-Excitation In-wheel Motor,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, no. 7, pp. 1–12, 2021.
- [16] A. A. Wijaya, Syahril, and Waluyo, “Perancangan Generator Magnet Permanen dengan Arah Fluks Aksial untuk Aplikasi Pembangkit Listrik,” *Reka Elkomika*, vol. 4, no. 2, pp. 93–108, 2016.