

ANALISIS PENGARUH KENAIKAN BEBAN TERHADAP KINERJA PERMANEN MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR 12S8P

Reza Pahlevi¹, Dian Budhi Santoso²

^{1,2} Universitas Singaperbangsa Karawang

^{1,2} Jl. H.S Rongggo Waluyo, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat, 41361, Indonesia

¹reza.pahlevi18126@student.unsika.ac.id

²dian.budhi.ft.unsika.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

diajukan : 06-04-2022
revisi : 12-05-2022
diterima : 27-06-2022
dipublish : 30-06-2022

ABSTRAK

Generator adalah sebuah alat yang mampu merubah energi mekanik menjadi energi listrik, maka dari itu generator adalah sebuah alat yang mampu memberikan kemudahan bagi manusia. Akan tetapi, generator yang ada di pasaran seringkali bekerja tidak sesuai dengan spesifikasi ketika diberikan beban. Oleh karena itu penelitian ini akan dilakukan analisis pengaruh kenaikan beban pada keluaran tegangan, arus, torsi, daya masukan, daya keluaran, dan efisiensi terhadap kecepatan pada PMSG 12 Slot 8 Pole menggunakan Software Design Electromagnetic berbasis Finite Element Method. Penelitian yang dilakukan merupakan sebuah analisis dari desain PMSG 12S8P yang dibuat menggunakan *software design electromagnetic* menggunakan metode *Finite Element Method* untuk mendapatkan pembebanan terbaik pada PMSG 12S8P. Hasil yang didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan bahwa efisiensi terbesar PMSG 12S8P berada pada beban 10 Ohm dengan kecepatan 5000 rpm sebesar 0,93% sedangkan efisiensi terendah berada pada beban 100 Ohm dengan kecepatan 1000 rpm sebesar 0,88%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin besar beban pada generator maka semakin kecil efisiensi yang didapatkan dan pada PMSG 12S8P mendapatkan efisiensi terbaiknya pada beban 10 Ohm dengan kecepatan yang relatif tinggi.

Kata kunci : generator sinkron magnet permanen; metode elemen hingga; pembebanan; perangkat lunak desain elektromagnetik

ABSTRACT

Generator is a device that is able to convert mechanical energy into electrical energy, therefore a generator is a tool that can provide convenience for humans. However, generators on the market often do not work according to specifications when given a load. Therefore, this study will analyze the effect of increasing load on voltage, torque, input power, output power, and efficiency on speed on PMSG 12 Slot 8 Pole using Electromagnetic Design Software based on Finite Element Method. This research is an analysis of PMSG design. 12S8P which is made using electromagnetic design software using the Finite Element Method to get the best loading on PMSG 12S8P. The results obtained from the research that has been carried out show that the highest efficiency of PMSG 12S8P is at a load of 10 Ohms with a speed of 5000 rpm of 0.93% while the lowest efficiency is at a load of 100 Ohms with a speed of 1000 rpm of 0.88%. Thus it can be said that the greater the load on the generator, the smaller the efficiency obtained and the PMSG 12S8P gets the best efficiency at a load of 10 Ohms with a relatively high speed.

Keywords : permanent magnet synchronous generator; finite element method; loading; software design electromagnetic

PENDAHULUAN

Generator merupakan suatu alat yang bisa merubah tenaga mekanik menjadi energi listrik. Tenaga mekanik yang didapatkan oleh generator dapat berasal dari angin, air, uap, dan lain-lain. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator dapat berupa arus bolak-baik (*alternating current*) maupun arus searah (*direct current*) kondisi tersebut berhubungan dengan jenis generator yang dipakai oleh pembangkit tenaga listrik (Sunarliik, 2017).

Generator yang digunakan untuk turbin angin skala mikro adalah berjenis *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), generator jenis ini biasanya digunakan pada pembangkit listrik skala mikro seperti Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Skala Mikro (PLTBSM), Pembangkit

Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), dan lain sebagainya. Selain itu PMSG ini menggunakan permanen magnet pada rotor untuk menciptakan medan elektromagnetik sehingga dapat menciptakan efisiensi yang tinggi pada generator (Buana & Santoso, 2022).

Oleh karena itu pada penelitian ini penulis akan menganalisis pengaruh kenaikan beban pada keluaran tegangan, arus, torsi, daya masukan, daya keluaran, dan efisiensi terhadap kecepatan pada PMSG 12 Slot 8 Pole menggunakan *Software Design Electromagnetic* berbasis *Finite Element Method* (FEM).

TEORI

Permanent Magnet Synchronous Generator

Permanent Magnet Synchronous Generator adalah salah satu dari jenis generator yang ada pada umumnya. Generator jenis ini memiliki jumlah putar rotor dan jumlah putar medan magnet pada stator yang sama sehingga disebut dengan generator sinkron atau juga sering disebut dengan alternator. Energi mekanis didapatkan dari pergerakan dari luar yang memutar rotor, sedangkan energi listrik didapatkan melalui proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan yang berada di stator.

Kemudian perbedaan lainnya dengan generator pada umumnya adalah menggunakan permanen magnet pada rotor untuk menghasilkan medan magnet pada *air gap* (celah udara), berbeda dengan generator pada umumnya yang menggunakan kumparan pada rotor dan dialiri dengan dengan penguatan *Direct Current* (DC) untuk membangkitkan medan magnet (Irfan et al., 2021).

Karakteristik generator dibedakan melalui arah fluks yaitu radial dan aksial. Karakteristik yang dimiliki oleh PMSG adalah *low speed induction generator* sehingga generator jenis ini bisa digunakan dengan putaran rendah dengan menggunakan magnet permanen, sedangkan generator yang digunakan pada pusat pembangkit listrik adalah berjenis *high speed induction generator* sehingga membutuhkan putaran yang tinggi untuk membangkitkan arus listrik (Pramono et al., 2015).

Prinsip kerja yang dimiliki generator berdasarkan hukum faraday yaitu apabila sepotong kawat penghantar listrik berada dalam medan magnet yang berubah-ubah, maka dalam kawat tersebut akan terbentuk

Gaya Gerak Listrik (GGL) (Budiman et al., 2012). Hukum Faraday dapat dinyatakan dengan:

$$e = -N \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (1)$$

dengan:

e = GGL induksi yang dibangkitkan

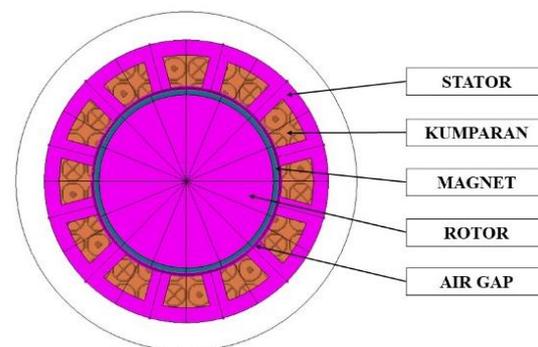
N = banyaknya jumlah lilitan

$\Delta\theta$ = perubahan fluks magnetik (Webber)

Δt = perubahan waktu (detik)

Konstruksi PMSG 12 Slot 8 Pole

PMSG 12 *Slot 8 Pole* ada sebuah generator sinkron 3 fasa yang mempunyai 12 slot pada stator untuk melilitkan kumparan dan mempunyai 8 kutub magnet pada rotor untuk menghasilkan medan elektromagnetik, oleh karena itu konstruksi pada PMSG tidak serumit konstruksi pada generator yang menggunakan kumparan pada rotor dan membutuhkan sumber eksitasi untuk membangkitkan medan elektromagnetik (Azis et al., 2019). Berikut adalah gambar konstruksi PMSG 12S8P.



Gambar 1. Konstruksi PMSG 12S8P (authors)

Stator adalah bagian inti generator yang tidak bergerak, pada stator terdapat kumparan/*coil* yang merupakan tempat

terbentuknya tegangan dan arus hasil perpotongan fluks.

Kumparan/*Coil* adalah konduktor listrik tempat arus listrik berinteraksi dengan medan magnet, dengan medan magnet berubah-ubah terhadap waktu. kumparan ini terletak pada stator.

Magnet adalah penghasil medan elektromagnetik, pada PMSG magnet yang digunakan merupakan magnet permanen. Medan elektromagnetik ini nantinya akan diinterasikan dengan arus listrik yang terdapat pada kumparan. Magnet dapat terletak pada ujung rotor ataupun pada permukaan rotor.

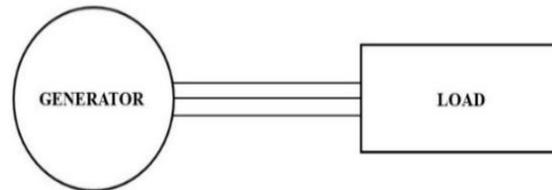
Rotor adalah bagian inti generator yang bergerak, pada rotor PMSG terdapat magnet permanen yang diletakkan pada ujung sehingga dapat membangkitkan medan magnet yang kemudian akan diinduksikan ke stator.

Air Gap atau celah udara adalah bagian kosong antara rotor dan stator agar tidak terjadi gesekan langsung pada stator saat rotor berputar. Selain itu, celah udara adalah tempat terjadinya perpindahan fluks magnet dari rotor menuju stator.

Pembebanan

Dalam pengoperasian PMSG memiliki masalah pada tegangan keluaran generator yang tidak konstan karena dipengaruhi oleh kecepatan angin yang tidak stabil. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem kontrol untuk mengatur tegangan keluaran generator, dengan menggunakan sistem kontrol maka tegangan yang dihasilkan oleh generator menjadi lebih halus tanpa adanya *ripple* dan lebih stabil. Akan tetapi, pada sistem kontrol tersebut ada hambatan atau

beban yang akan mengurangi performa dari generator tersebut.

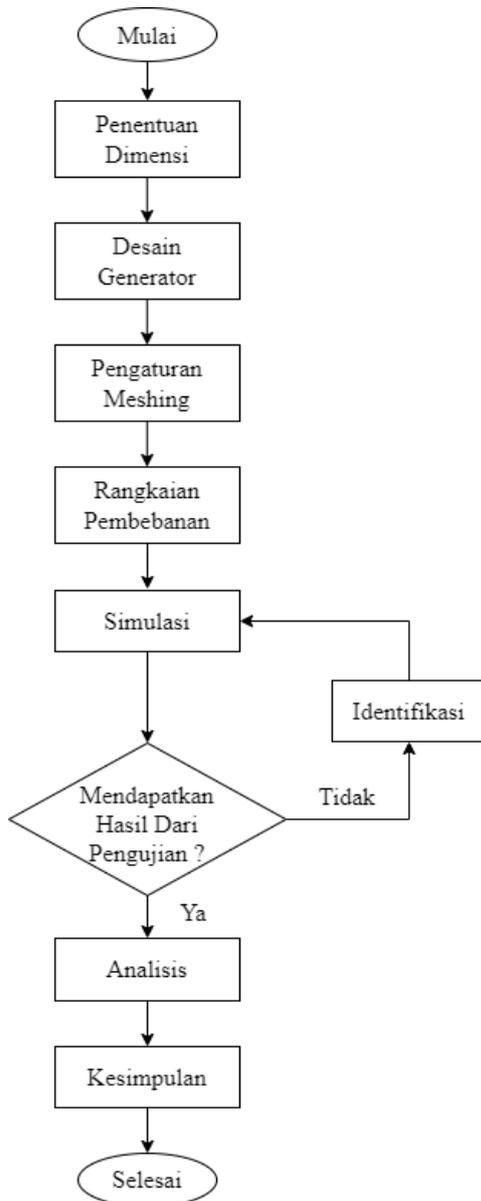


Gambar 2. Diagram beban (authors)

Ketika generator sinkron permanen magnet diberi beban maka akan memberikan sifat yang berbeda sesuai dengan jenis beban yang diterimanya, sehingga dalam pembebanan ini yang akan menentukan nilai faktor daya pada generator tersebut. Maka dari itu, pengaturan pada sistem pembangkit listrik sangat penting untuk menanggulangi perubahan beban yang sewaktu-waktu dapat terjadi seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi sehingga beban yang diterima oleh generator sinkron permanen magnet berubah-ubah yang dapat mempengaruhi tegangan dan daya keluaran dari generator tersebut (Yusniati & Matondang, 2020).

METODOLOGI

Penelitian yang penulis lakukan merupakan sebuah analisis dari desain PMSG 12S8P yang dibuat menggunakan *software design electromagnetic* berbasis FEM. Variasi kecepatan putar generator ada 5, mulai dari 1000 rpm sampai dengan 6000 rpm dengan kelipatan 1000 rpm, untuk pembebanan ada 5 variasi beban yang akan diuji mulai dari 5 Ohm, 10 Ohm, 15 Ohm, 50 Ohm, dan 100 Ohm. Adapun alur penelitian yang akan dilakukan ditunjukkan dalam *flow chart* berikut ini:



Gambar 3. Flowchart metode penelitian

Penelitian dimulai dengan melakukan survei lapangan dan studi literatur pada buku, jurnal, skripsi, artikel, dan lain sebagainya untuk mendapatkan informasi dan pengetahuan dari referensi utama dan pendukung yang sesuai dengan permasalahan yang telah dirumuskan. Setelah mendapatkan literatur yang cukup maka dimensi dari generator ditentukan

dalam perancangan dan dibuatkan desain pada *software* FEM, kemudian dilakukan *meshing* untuk membagi beberapa bagian dari desain generator agar bisa dilakukan proses simulasi, yang terakhir membuat rangkaian pembebanan.

Dari data yang didapatkan ketika melakukan simulasi akan diolah menggunakan *software* Microsoft Excel sehingga mendapatkan hasil yang diinginkan dan bisa dianalisis untuk mendapatkan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

Penentuan Dimensi

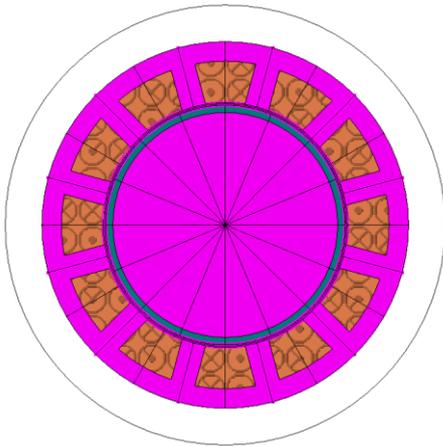
Langkah awal dari penelitian ini adalah menentukan dimensi PMSG 12S8P untuk membuat mendesain generator yang diinginkan dan mendapatkan hasil simulasi terbaik. Dimensi generator mulai dari stator, rotor, dan magnet permanen akan menentukan seberapa efisien generator dalam menghasilkan listrik. Berikut adalah dimensi yang digunakan dalam mendesain PMSG 12S8P.

Tabel 1. Data Dimensi PMSG

Data Dimensi PMSG 12S8P		
No	Keterangan	Ukuran
1	Jumlah Slot	12 slot
2	Jumlah Pole	8 pole
3	Tebal Core	40 mm
4	Jumlah Lilitan	100 lilitan
5	Lebar Magnet	40 mm
6	Diameter Stator	75 mm
7	Diameter Rotor	49 mm
8	Lebar Celah Udara	1 mm
9	Material Stator	Carpenter: Silicon steel
10	Material Rotor	Carpenter: Silicon steel
11	Material Coil	Copper: 5.77e7 Siemens/meter
12	Material Magnet	PM12: Br1.2 mur 1.0

Gambar Desain Generator

Gambar desain generator adalah tahapan untuk membuat bentuk geometri stator, rotor, lebar celah udara, magnet, jumlah slot, dan jumlah pole. Desain PMSG 12S8P dibuat menggunakan *software design electromagnetic*, berikut adalah desain yang telah dibuat:



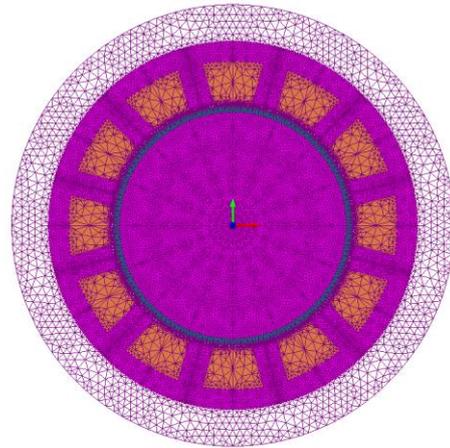
Gambar 4. Desain PMSG 12S9P

Pada desain generator yang telah dibuat didapatkan sudut *slot* sebesar 30 *deg/mech* dengan jumlah *slot* sebanyak 12 dan sudut *pole* sebesar 45 *deg/mech* dengan jumlah *pole* sebanyak 8.

Pengaturan Meshing

Pembagian terhadap suatu bidang (*meshing*) merupakan hal yang paling utama untuk dipertimbangkan dalam penerapan FEM. Dalam melakukan *meshing* semakin bidang yang diteliti dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil maka hasil yang

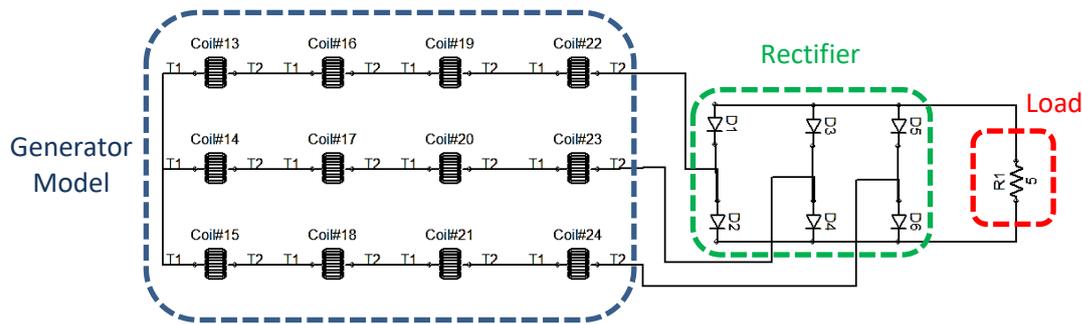
didapatkan akan semakin akurat. Setiap bagian desain PMSG memiliki besaran *mesh* yang sama yaitu 3mm. Hasil yang didapatkan setelah melakukan *meshing* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 5. Meshing pada desain PMSG

Rangkaian Pembebanan

Untuk melakukan pengujian pembebanan PMSG pada *software desain electromagnetic* terlebih dahulu harus membuat rangkaian *wiring* pada generator untuk menentukan jumlah fasa yang diinginkan dan arah putar dari setiap lilitan apakah *clockwise*, *counter clockwise*, maupun lilitan kombinasi gabungan antara *clockwise* dan *counter clockwise*. Pada penelitian yang penulis lakukan menggunakan *wiring* 3 fasa dengan 1 fasanya memiliki 4 kumparan tembaga yang disusun secara seri seperti gambar dibawah ini:



Gambar 6. Rangkaian pembebanan

Setelah melakukan *wiring* sebelum melakukan pengujian pembebanan terlebih dahulu harus ditambahkan rangkaian penyearah menggunakan dioda, karena tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator adalah *Alternating Current* (AC) sedangkan untuk melakukan pengujian pembebanan dibutuhkan rangkaian *Direct Current* (DC).

Langkah selanjutnya adalah memberikan beban berupa resistor pada rangkaian, nilai hambatan yang akan diuji mulai dari 5 Ohm, 10 Ohm, 15 Ohm, 50 Ohm, sampai 100 Ohm.

Selain menentukan variabel besaran beban yang akan dilakukan uji coba, langkah terakhir adalah menentukan kecepatan putar generator, ada 6 kecepatan yang akan digunakan untuk melakukan pengujian mulai dari 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm, 4000 rpm, 5000 rpm, sampai 6000 rpm. Generator diputar dengan kecepatan yang berbeda dimulai dari yang putarannya rendah hingga yang paling tinggi untuk mendapatkan kurva karakteristik yang bervariasi sehingga banyak data yang bisa dianalisis untuk dijadikan bahan penelitian.

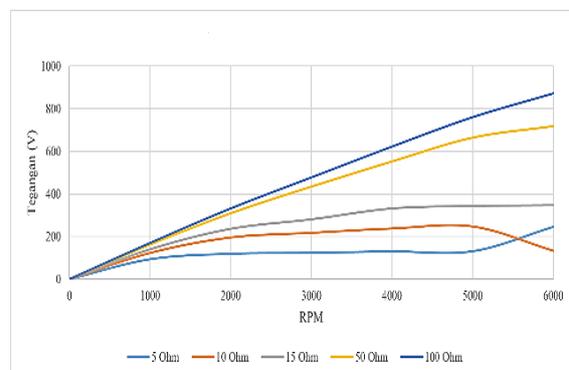
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pada pembahasan penelitian ini didapatkan setelah melakukan simulasi pada *software design electromagnetic*

menggunakan 5 variabel pembebanan dan 6 variabel kecepatan seperti yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah semua data didapatkan dari hasil simulasi selanjutnya akan diolah menggunakan *software* Microsoft Excel sehingga didapatkan grafik pembebanan.

Tegangan Terhadap Kecepatan

Hasil pertama yang didapatkan adalah nilai tegangan yang dihasilkan oleh generator dengan diberikan beban mulai dari 5 Ohm sampai 100 Ohm dengan kecepatan 1000 rpm sampai 6000 rpm. Nilai tegangan yang didapatkan kemudian diolah menggunakan *software* Microsoft Excel untuk dikelompokkan dan dijadikan diagram grafik seperti gambar dibawah ini:



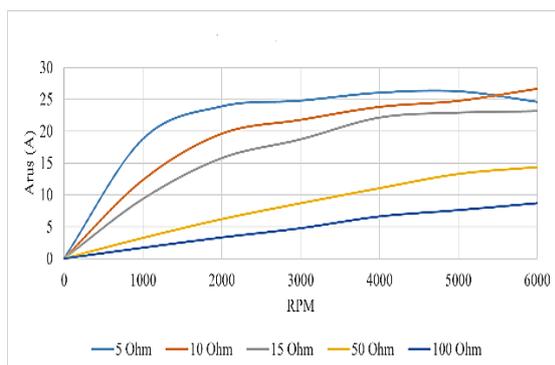
Gambar 7. Grafik tegangan terhadap kecepatan

Setelah dibuatkan grafik maka akan terlihat kemampuan PMSG dalam menghasilkan tegangan yang telah diberi beban berdasarkan kecepatan putar rotor.

Pada beban 5 Ohm grafik konstan sampai 5000 rpm dan mulai naik pada 6000 rpm dengan tegangan 246,4 *olt*. Pada beban 10 Ohm tegangannya konstan sampai 5000 rpm tetapi turun di 6000 rpm menjadi 133,4 volt. Pada beban 15 Ohm, 50 Ohm, dan 100 Ohm memiliki grafik yang hampir sama yaitu konstan sampai 6000 rpm dengan tegangan maksimal yang dihasilkan 347,3 volt pada 15 Ohm, 718,3 volt pada 50 Ohm, dan 871,9 volt pada 100 Ohm.

Arus Terhadap Kecepatan

Hasil grafik arus terhadap kecepatan yang didapatkan oleh PMSG setelah melakukan simulasi ditampilkan seperti Gambar 8. Dimana grafiknya hampir sama dengan grafik tegangan hanya saja nilainya berbeda, untuk arus yang paling besar berada pada pembebanan 5 Ohm dan arus yang terendah pada pembebanan 100 Ohm. Hal ini karena beban yang dipasangkan pada generator adalah paralel.

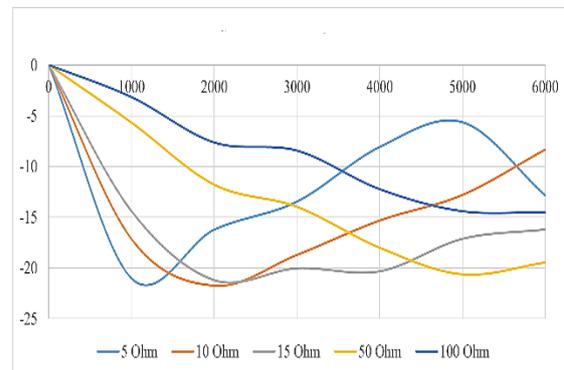


Gambar 8. Grafik arus terhadap kecepatan

Dengan beban yang dipasangkan secara paralel akan menghambat arus yang masuk sehingga untuk pembebanan 5 Ohm akan dengan mudah mencapai arus maksimalnya pada kecepatan 2000 rpm dengan arus 23,9 A, sedangkan untuk beban 100 Ohm membutuhkan kecepatan 6000 rpm untuk mencapai arus maksimalnya sebesar 8,7 A.

Torsi Terhadap Kecepatan

Nilai yang didapatkan dari simulasi PMSG selanjutnya adalah nilai torsi/momen gaya terhadap kecepatan dimana nilai torsi yang diperoleh bernilai negatif karena torsi merupakan nilai ekuivalen dari rotasi pada gaya linier seperti bilah, kincir air, maupun diesel yang mampu memberikan energi mekanik untuk memutar rotor. Semakin tinggi beban maka nilai torsi akan semakin tinggi dan sebaliknya semakin rendah beban maka nilai torsi akan semakin rendah (Ramadhan & Tamam, 2021).



Gambar 9. Grafik torsi terhadap kecepatan

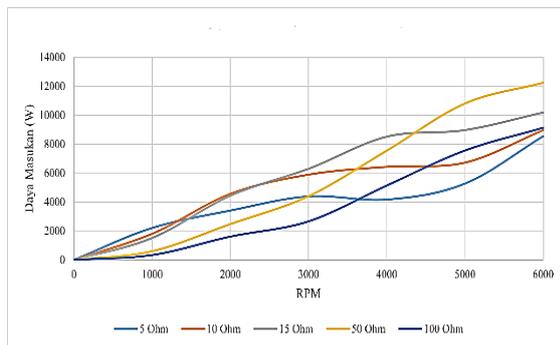
Pada beban 5 Ohm grafik torsi sangat fluktuatif dimana pada kondisi awal sampai kecepatan 1000 rpm generator membutuhkan torsi sebesar 21 Newton meter (Nm) untuk memutar rotor, sedangkan dari kecepatan 1000 rpm sampai 5000 rpm torsi perlahan berkurang sampai dengan 5,6 Nm, torsi naik lagi di kecepatan 6000 rpm sebesar 12,8 Nm.

Untuk beban 10 Ohm dan 15 Ohm karakteristik grafik tidak jauh berbeda dengan beban 5 Ohm, pada start awal sampai kecepatan 2000 rpm dibutuhkan torsi sebesar 21,7 Nm untuk beban 10 Ohm dan 21,2 untuk beban 15 Ohm kemudian perlahan turun sampai 8,3 Nm untuk beban 10 Ohm dan 16,2 Nm untuk beban 15 Ohm pada kecepatan 6000 rpm

Untuk beban 50 Ohm, dan 100 Ohm memiliki karakteristik grafik yang hampir sama, dari start awal sampai kecepatan 6000 rpm torsi yang dibutuhkan naik perlahan sampai 19,4 Nm untuk beban 50 Ohm dan 14,5 Ohm untuk beban 100 Ohm.

Daya Masukan Terhadap Kecepatan

Daya masukan adalah daya yang didapatkan dari nilai torsi dan kecepatan putar rotor yang masuk kedalam generator.

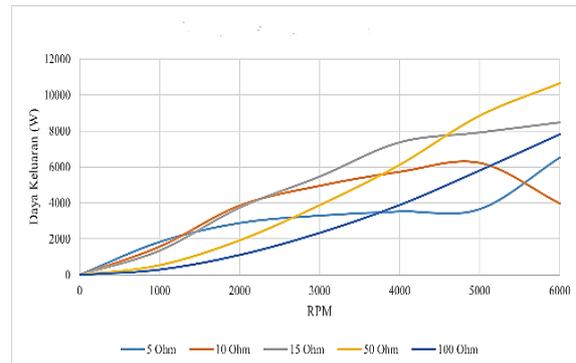


Gambar 10. Grafik daya masukan terhadap kecepatan

Dari grafik yang telah didapatkan bisa dilihat bahwa semua beban hampir memiliki pola yang sama yang dimana pengaruh pembebanan kepada daya masukan tidak terlalu signifikan, akan tetapi pada beban 100 Ohm di kecepatan tertinggi tidak mendapatkan performa maksimalnya, daya-nya ada di 9113,2 watt. Sedangkan daya tertinggi adalah 12226 watt pada beban 50 Ohm.

Daya Keluaran Terhadap Kecepatan

Daya keluaran adalah energi yang dihasilkan dari daya masukan yang telah dikonversi oleh generator menjadi energi yang dapat dimanfaatkan. Tegangan yang didapatkan dapat berupa Tegangan AC maupun DC tergantung jenis generator yang digunakan.

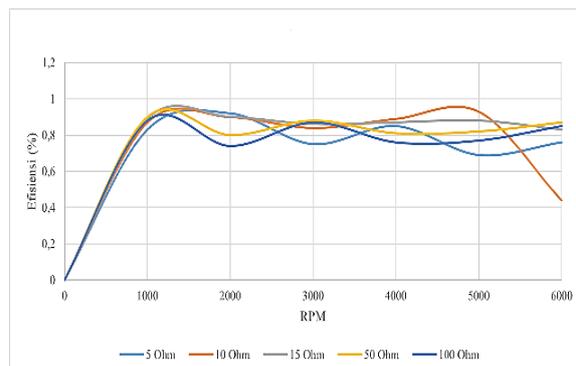


Gambar 11. Grafik daya keluaran terhadap kecepatan

Grafik yang dihasilkan oleh tegangan keluaran terhadap kecepatan tidak jauh berbeda dengan tegangan masukan, grafiknya relatif sama dan pada beban 100 Ohm tidak mendapatkan hasil maksimal hanya mendapatkan 7806,3 watt sedangkan daya terbesar adalah 10652,7 pada beban 50 Ohm.

Efisiensi Terhadap Kecepatan

Efisiensi adalah variabel yang sangat penting bagi generator, semakin efisiensi generator tinggi maka tingkat kehandalan generator tidak akan diragukan lagi. Banyak sekali faktor yang menyebabkan generator tidak efisien mulai dari panas yang berlebih, konfigurasi rotor dan stator tidak tepat, pemilihan bahan yang salah, dan lain sebagainya. Nilai efisiensi sempurna dari generator sinkron adalah 1% (Arifianto & Hs, 2018).



Gambar 12. Grafik efisiensi terhadap kecepatan

Dari grafik yang telah disajikan dapat dilihat bahwa tingkat efisiensi dari semua beban hampir sama ada di *range* 0,76% sampai 0,87% di kecepatan 6000 rpm. Tetapi pada beban 10 Ohm dikecepatan 5000 rpm efisiensinya sangat tinggi di 0,93% tetapi turun sangat signifikan dikecepatan 6000 rpm sebesar 0,44%.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa dapat disimpulkan bahwa pembebanan yang dikonfigurasi secara paralel tidak akan mempengaruhi hasil tegangan yang dihasilkan oleh generator dimana tegangan tertinggi ada pada beban 100 Ohm di kecepatan 6000 rpm sebesar 871,9 volt. Terbalik dengan hasil tegangan, pada nilai arus beban yang lebih kecil akan mendapatkan arus yang maksimal karena pada beban besar arus akan terhambat sesuai dengan besaran beban, arus maksimal yang didapatkan ada pada beban 5 Ohm di kecepatan 2000 rpm sebesar 32,9 ampere. Pada nilai torsi beban 5 Ohm mempunyai hasil yang fluktuatif pada kecepatan 1000 rpm torsinya sangat besar di angka 27 Nm, di kecepatan 5000 rpm torsinya turun menjadi 5,6 Nm, dan di kecepatan 6000 rpm torsinya naik lagi menjadi 12,8 Nm. Pada nilai daya masukan dan daya keluaran hasilnya hampir sama karena selisih dari daya masukan dan daya keluaran akan menjadi nilai efisiensi generator. Pada beban 5 Ohm efisiensi terbesar ada di kecepatan 2000 rpm dengan 0,92%, beban 10 Ohm ada di kecepatan 5000 rpm dengan 0,93%, beban 15 Ohm ada dikecepatan 2000 rpm dengan 0,9%, beban 50 Ohm ada di kecepatan 1000 rpm dengan 0,9%, dan beban 100 Ohm ada di kecepatan 1000 rpm dengan 0,88%. Dengan demikian dapat disimpulkan secara garis besar dari 5 variasi hambatan yang dilakukan pengujian rata-rata efisiensi terbesar ada diputaran rendah.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada PT. Lentera Bumi Nusantara (LBN) yang telah menerima penulis untuk melakukan penelitian di Site Ciheras serta dosen pembimbing yang telah membina dan memberikan masukan yang membangun dalam melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifianto, I., & Hs, R. (2018). *Analisa Efisiensi dan Rancang Generator Permanent Magnet 12 Slot 8 Pole Menggunakan Software Magnet 7.5*. 43–48.
- Azis, H., Pawenary, P., & Sitorus, M. T. B. (2019). Simulasi Pemodelan Sistem Eksitasi Statis pada Generator Sinkron terhadap Perubahan Beban. *Energi & Kelistrikan*, 11(2), 46–54. <https://doi.org/10.33322/energi.v11i2.483>
- Buana, U. C., & Santoso, D. B. (2022). Analisis Pengaruh Lebar Teeth Terhadap Penurunan Nilai Cogging Torque pada PMSG 18S16P. *Electrician*, 16(1), 1–8. <https://doi.org/10.30595/jrre.v3i2.11516>
- Budiman, A., Asy'ari, H., & Hakim, A. R. (2012). Desain Generator Magnet Permanen Untuk Sepeda Listrik. *Emitor*, 12(01), 59–67.
- Irfan, M., Erwin, E., & Wiyono, S. (2021). Perancangan Permanent Magnet Synchronous Generator Sultan Wind Turbine V-5. *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, 131-142.
- Pramono, G. E., Muliawati, F., & Kurniawan, N. F. (2017). Desain dan Uji Kinerja Generator AC Fluks Radial Menggunakan 12 Buah Magnet Permanen Tipe Neodymium (NdFeB) Sebagai Pembangkit Listrik. *Juteks*, 4,

34–40.

- Ramadhan, A., & Tamam, M. T. (2021). Perancangan Permanent Magnet Synchronous Generator Kapasitas 22 KVA Menggunakan Metode Finite Element Method. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, 3(2), 83–90. <https://doi.org/10.30595/jrre.v3i2.11516>
- Sunarlik, W. (2017). Prinsip Kerja Generator. *Prinsip Kerja Generator Sinkron*, 6.
- Wibowo, B. C., Winardi, I. B., Kom, M., & Belakang, L. (2020). Simulasi Perubahan Tegangan Keluaran Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) 12s8p Terhadap Variasi Kecepatan Putar Rotor Dengan Software Berbasis Finite Element Method (FEM). *J. Tek. Elektro*, 2(1), 1-9.
- Yusniati, & Matondang, N. N. S. (2020). Analisis Sistem Pembebanan Pada Generator Diesel Titi Kuning. *Semnastek UISU*, 3(1), 59–64.