

Analisis Pengaruh Posisi Peletakan Magnet Permanen di Rotor Terhadap Kinerja Generator Sinkron Magnet Permanen

Elco Maghfira Arfi Harahap¹⁾, Iswadi Hasyim Rosma²⁾, Amir Hamzah³⁾

¹⁾Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro S1, ^{2,3)}Dosen Teknik Elektro

Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas Km. 12,5 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru 28293

*Email : elco.maghfira2314@student.unri.ac.id

ABSTRACT

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) has the same construction as conventional synchronous generators. The rotor in the synchronous generator requires DC current feeding to produce GGL while the PMSG rotor does not need DC current feeding because the magnetic field is generated from a permanent magnet. With this permanent magnet, it causes a cogging effect which inhibits the rotation of the stator. To reduce the cogging effect, it is necessary to change the position of the magnet in the motor. This scientific paper discusses the effect of the positioning of a Permanent magnet in the rotor on PMSG on the output of cogging voltage and torque from the modeling of PMSG magnets parallel and PMSG magnets of Skew. The PMSG design that was made refers to the specifications of the outer dimensions of 450 mm and a thickness of 150 mm with the Interior Permanent Magnet (IPM) type rotor using a combination of 24 slots 8 Poles with a rotating rotor at 750 rpm. To get the output values, PMSG must first be modeled into the software to be analyzed. When modeling the PMSG, it turns out that the mesh size of the generator constituent materials affects the level of accuracy at solving. So that the calculation results of the generated voltage, output power and torque will be more accurate. However, it takes a long time during the testing process. Based on the calculations and the results of the tests that have been carried out, it can be concluded that the position of the magnetic placement affects the generated output voltage. From the test results, a magnet with a skew position has a lower voltage than a normal / parallel magnet position. This is because the flux from the skew magnet that enters the stator teeth is imperfect plus there is a collision of flux / field direction from two different poles in one stator gear at the same time. As a result, the generated field becomes smaller. Then the second from the test results it is concluded that the positioning of the magnet affects the cogging torque. magnets that are placed in a skew position have a smaller cogging torque than parallel PMSG modeling.

Keywords : Back EMF (Electromotive Force), K_e (Constant Efficiency), flux linkage, cogging

1. PENDAHULUAN

Pada generator sinkron magnet permanen, penggunaan magnet permanen menyebabkan efek *cogging* yang menyebabkan magnet berusaha untuk menyejajarkan dengan gigi stator sehingga diperlukan gaya untuk memutar rotor PMSG. Dengan adanya efek *cogging* tersebut menyebabkan turbin membutuhkan gaya yang lebih besar untuk memutar rotor, oleh sebab itu timbulah gagasan penulis untuk mengurangi efek *cogging* pada PMSG. penulis ingin menganalisa cara peletakan magnet permanen di rotor agar *cogging* dari PMSG menjadi berkurang akan tetapi tidak mempengaruhi kinerja dari PMSG tersebut. Kemudian penulis ingin membandingkan pengaruh posisi peletakan magnet terhadap tegangan keluaran.

Pada penelitian ini, Penulis akan memodelkan dan menguji PMSG fluks radial dengan variasi cara meletakkan magnet pada rotor. untuk mengetahui hasil perbandingan pengaruh cara meletakkan magnet permanen terhadap nilai tegangan keluaran. Salah satu perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat lunak MagNet Infotyca. Perangkat lunak ini digunakan untuk membuat rancangan generator beserta material-material yang ingin digunakan pada generator.

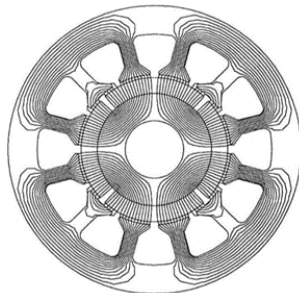
2. LANDASAN TEORI

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) memiliki konstruksi yang hampir sama dengan generator sinkron konvensional pada umumnya yaitu memiliki stator dan rotor. Hanya saja yang membedakan antara PMSG dengan generator sinkron konvensional adalah terletak pada rotornya. Generator magnet permanen fluks radial bisa beroperasi pada putaran rendah dan tinggi selain itu generator ini memiliki keunggulan mudah dalam pemasangan magnet permanen di rotor dan biasa dimanfaatkan pada pembangkit listrik didaerah terpencil. (Pramono, Muliawati and Kuniawan, 2017)

2.1 Prinsip Kerja PMSG

Generator sinkron magnet permanen dibangkitkan melalui magnet permanen sebagai penghasil medan magnet pada rotor dan fluks magnet diperoleh dari magnet permanen kemudian fluks magnet masuk melewati celah udara menuju gigi stator yang sehingga timbul garis-garis gaya magnet keluar dari kutub magnet secara axial atau radial (Strous, 2010). medan eksitasi pada PMSG dihasilkan oleh magnet permanen bukan kumparan sehingga fluks magnetik dihasilkan oleh medan magnet permanen. Generator ini memiliki keunggulan

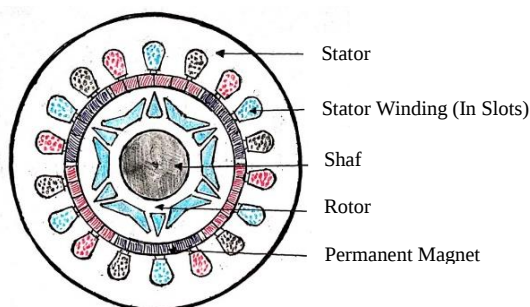
yang signifikan, menarik minat para peneliti dan biasanya digunakan dalam aplikasi wind turbine (Suhada, 2018). fluks yang dihasilkan magnet permanen masuk ke gigi stator melalui celah udara. Berikut adalah gambar lintasan fluks magnet dalam empat kutub seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Arah medan magnet (Hanselman, 2006).

2.2 Konstruksi Generator Magnet Permanen

Generator sinkron magnet permanen merupakan mesin listrik 3 fasa seperti generator induksi pada umumnya. Akan tetapi PMSG menggunakan magnet permanen untuk menghasilkan medan magnet bukan dari kumparan seperti generator sinkron konvensional. Konstruksi pada rotor nya juga tidak serumit dengan generator sinkron konvensional hanya dengan magnet permanen. Magnet permanen pada rotor harus dibuat dengan magnet yang kuat untuk menghasilkan generator yang lebih efisien. konstruksi PMSG seperti terlihat pada gambar 2 dibawah:



Gambar 2. Gambar melintang PMSG.

2.3 Magnet Permanen

Magnet permanen adalah komponen penghasil medan magnet pada generator sinkron magnet permanen yang terletak dibagian rotor. Kekuatan medan magnet yang dihasilkan dari magnet permanen tergantung dengan bahan material yang di pakai serta ketebalan dari magnet permanen tersebut. Semakin kuat jenis magnet permanen yang di pakai atau semakin tebal magnet permanen yang digunakan maka semakin kuat medan magnet yang dibangkitkan dan mempengaruhi nilai tegangan keluaran dari generator.

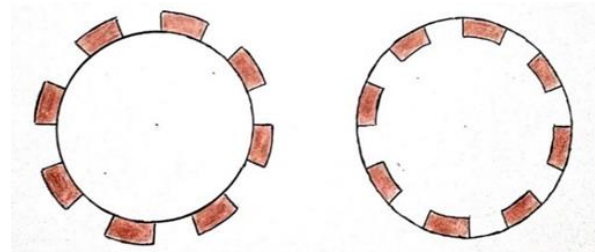
2.4 Rotor Generator Sinkron Magnet Permanen

Rotor pada generator sinkron magnet permanen merupakan bagian yang ikut berputar sekaligus tempat diletakkannya magnet permanen sebagai kutub. Magnet

permanen pada PMSG merupakan penghasil medan magnet pengganti belitan yang menuju ke gigi stator.

Ada dua cara dalam meletakkan magnet permanen di rotor PMSG, yaitu magnet permanen yang di tempatkan di permukaan rotor (Surface Mounted Permanent Magnet) dan magnet permanen yang di letakkan pada bagian dalam stator (Interior Permanent Magnet). (Kenjo and Nagamori, 1985).

Adapun cara meletakkan magnet di rotor dapat dilihat pada gambar 3.



a. Surface Mounted PM b. Interior Permanent Magnet

Gambar 3. Cara meletakkan magnet permanen di rotor.

3. PEMODELAN PMSG DAN VARIASI CARA PELETAKAN MAGNET PERMANEN

Dalam penelitian ini akan di analisa cara peletakkan magnet permanen di rotor sehingga terlebih dahulu harus melakukan tahapan-tahapan perancangan pembuatan PMSG agar dapat dilakukan penelitian terhadap pengaruh tegangan keluaran dari variasi cara peletakkan magnet permanen yang telah dirancang. Perancangan dan pemodelan PMSG dilakukan untuk mengetahui perbandingan pengaruh keluaran tegangan back EMF, Ke dan torsi cogging.

3.1 Perancangan dan pembuatan desain PMSG

Pemodelan PMSG dari keseluruhan dimensi baik material yang digunakan, jenis magnet dan kecepatan putar dibuat dengan ukuran yang sama hanya saja nanti yang membedakan adalah posisi peletakkan magnet. Berikut adalah spesifikasi PMSG terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi PMSG 24 Slot 8 Pole.

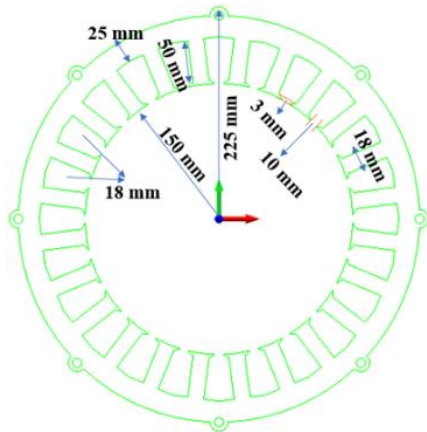
Jumlah fasa, m	3
Jumlah kutub, p	8
Jumlah slot, Q_s	24
Frekuensi, f	50 Hz
Kecepatan, n	750 rpm
Faktor belitan, K_w	0,945
Koneksi Lilitan	Y Connection
Faktor daya, $\cos \theta$	0,85

Kombinasi PMSG 24 slot 8 pole merupakan kombinasi yang paling sering di modelkan pada generator-generator sinkron magnet permanen pada umumnya. Frekuensi yang dipakai mengikuti frekuensi di indonesia yaitu 50 Hz, sedangkan kecepatan putar rotor mengacu pada kombinasi Slot dan Pole dengan frekuensi yang di tentukan.

3.2 Pemodelan dan Perspektif Geometri Stator

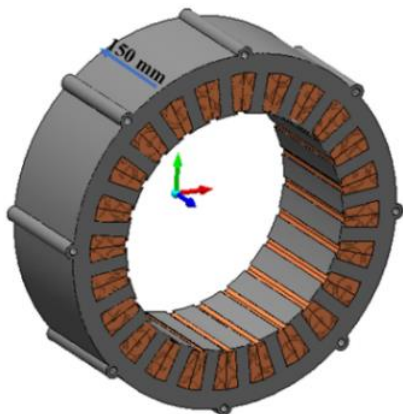
Stator merupakan tempat diletakkan kumparan dan juga sebagai tempat mengalirnya fluks magnet dari magnet permanen yang masuk melalui celah udara melewati gigi stator. Desain stator untuk pemodelan cara peletakan magnet sejajar dan magnet *skew* di rotor harus memiliki dimensi yang sama sehingga nantinya dapat diperoleh perbandingan keluaran dari PMSG.

Tampilan dari pemodelan stator generator sinkron magnet permanen dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Desain geometri pemodelan rangkaian stator.

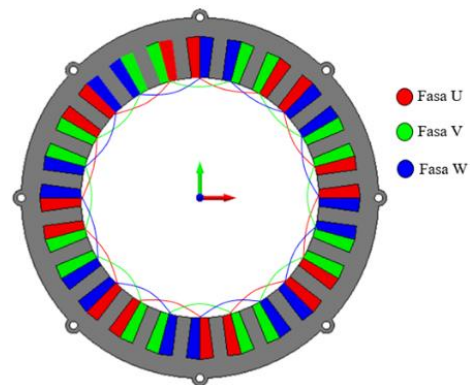
Setelah memodelkan PMSG kedalam bentuk dua dimensi kemudian memberi material bahan kedalam perancangan pemodelan mulai dari stator, coil, air gap, airbox, rotor serta magnet permanen sehingga pemodelan generator membentuk tiga dimensi. Adapun bentuk pemodelan stator dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Bentuk akhir rancangan stator PMSG 24 slot.

Pada pemodelan PMSG 24 slot 8 pole, konfigurasi belitan menggunakan metode *double layer lap winding*. Dalam satu buah slot terdapat dua fasa yang berbeda atau dua belitan fasa. Setiap fasa terdiri dari 8 kumparan yang dihubungkan seri dengan faktor belitan 0,945 (Hendershot JR and Tje Miller, 1989).

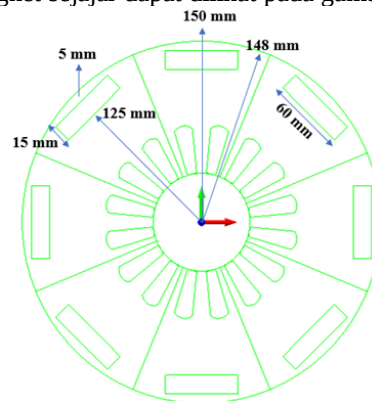
Pada ujung-ujung setiap fasa di hubungkan sehingga membentuk bintang. Untuk metode melilit stator, konfigurasi belitan yang dimodelkan pada perancangan PMSG dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Konfigurasi belitan stator pemodelan PMSG.

3.2 Pemodelan Rotor PMSG

Pada penelitian ini penulis memodelkan rotor dengan dua jenis yang berbeda yaitu meletakkan atau menyusun magnet secara sejajar dan secara *skew*. Tujuannya agar mengetahui pengaruh tegangan keluaran dari PMSG dengan cara meletakkan magnet sejajar dan cara meletakkan magnet secara *skew*. Adapun dimensi rotor dengan magnet sejajar dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Desain geometri rotor magnet sejajar.

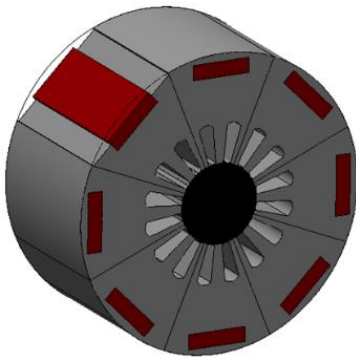
Berdasarkan gambar diatas berikut adalah parameter-parameter desain rotor dengan peletakan magnet sejajar yang di modelkan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Parameter desain rangkaian rotor magnet sejajar.

Diameter luar rotor, D_i	296 mm
Diameter dalam rotor, D_a	250 mm
Diameter dalam stator, D_c	300 mm
Tebal rotor, L_a	150 mm
Tebal magnet, L_m	15 mm
Lebar magnet, W_d	60 mm
Celah udara, σ_g	2 mm
Panjang magnet L_h	150 mm
Tebal rotor yoke, Y_a	5 mm

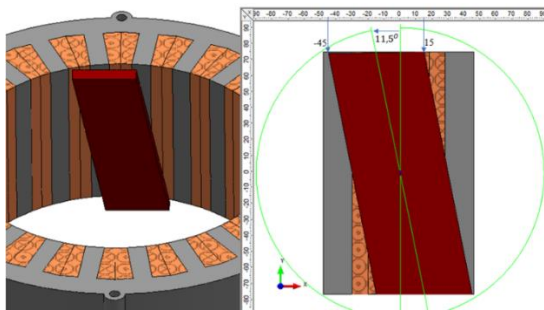
Cara pemberian material magnet langkah-langkahnya juga sama dengan pemberian material pada Stator. Adapun material magnet permanen yang di modelkan menggunakan bahan PM12: Br 1.2 mur 1.0.

Adapun bentuk pemodelan PMSG magnet dapat dilihat pada gambar 8.



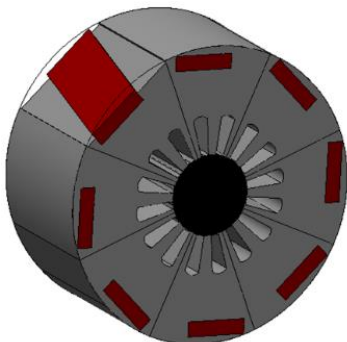
Gambar 8. Rotor PMSG Magnet sejajar 8 Pole.

Perancangan dan ukuran dimensi rotor magnet skew sama dengan perancangan rotor magnet sejajar hanya saja posisi peletakan magnetnya yang berbeda. Desain rotor yang telah dimodelkan pada gambar 7 dalam bentuk 2D selanjutnya di beri material. Bedanya magnet yang di susun pada rotor dengan posisi miring. Adapun dimensi magnet skew pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Perspektif geometri rotor magnet skew.

Pada pemodelan rotor PMSG dengan posisi magnet skew. Magnet permanen di modelkan dengan tingkat kemiringan 11.5° . Adapun bentuk akhir dari pemodelan rotor dengan peletakan magnet secara skew dapat dilihat pada gambar 10.

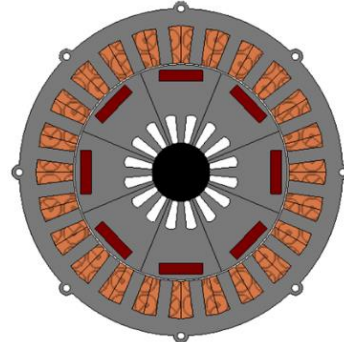


Gambar 10. Rotor PMSG magnet skew 8 pole.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mendapatkan hasil nilai keluaran dari PMSG dengan posisi magnet sejajar dan magnet skew maka harus melakukan perancangan PMSG terlebih dahulu. Mulai dari

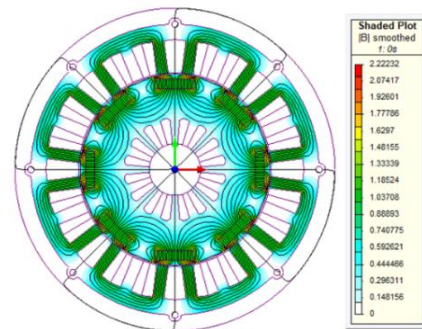
pembuatan stator, pembuatan rotot, peletakan magnet permanen sampai melakukan perhitungan terkait dimensi PMSG yang dirancang seperti yang sudah di jelaskan pada bab sebelumnya. Hasil dari rancangan terlihat pada gambar.



Gambar 11. Hasil desain PMSG 24 slot 8 pole.

4.1 Hasil keluaran PMSG Magnet Sejajar

Setelah melakukan proses *solving* menggunakan *software* magnet maka akan terlihat arah fluks magnet yang berada pada stator akibat induksi dari magnet permanen yang ada pada rotor. Adapun bentuk garis-garis medan pada rancangan PMSG magnet sejajar seperti terlihat pada gambar 12.



Gambar 12. Lintasan garis-garis medan magnet pada PMSG magnet sejajar.

Gradasi warna menunjukkan besar medan magnet dititik tersebut. Medan magnet terbesar ditandai dengan titik merah sampai medan magnet terkecil ditandai dengan warna putih. Sedangkan garis-garis menunjukkan lintasan fluks magnet. Adapun untuk hasil gelombang keluaran tegangan dari pemodelan PMSG magnet sejajar dapat dilihat pada gambar 13.

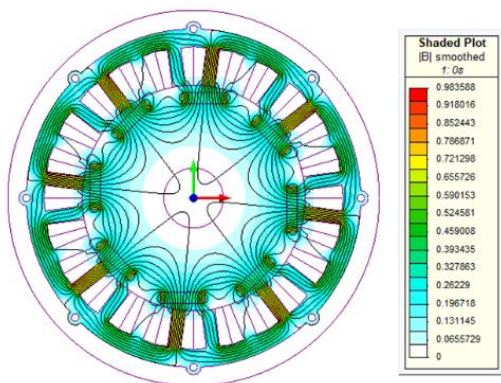


Gambar 13. Hasil gelombang tegangan magnet sejajar.

Tegangan keluaran dari generator sinkon magnet permanen dengan magnet sejajar adalah 433,45 volt. Titik puncak gelombang tegangan adalah 446,27 volt. Dan waktu yang dibutuhkan untuk satu gelombang sinusida adalah 20 ms. Bentuk gelombang tegangan keluaran PMSG sangat bagus.

4.2 Hasil keluaran PMSG Magnet Skew

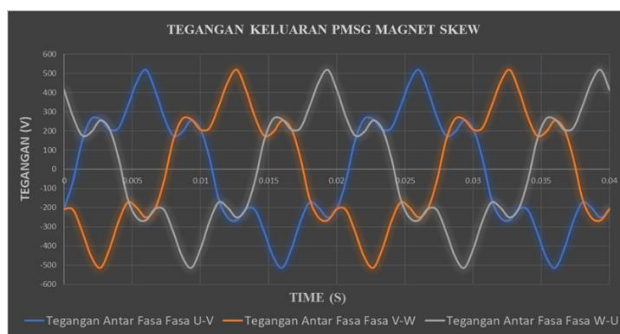
Setelah melakukan proses *solving* menggunakan *software* magnet maka akan terlihat arah fluks magnet yang berada pada stator akibat induksi dari magnet permanen yang ada pada rotor. Adapun bentuk garis-garis medan pada rancangan PMSG magnet skew seperti terlihat pada gambar 14.



Gambar 14. Lintasan garis-garis medan magnet pada PMSG magnet skew.

Terlihat bahwa sebaran fluks magnet lebih *random* atau tidak sebagus PMSG magnet sejajar. Hal ini dikarenakan posisi peletakan magnet yang dibuat miring. Pada saat magnet skew berada pada satu garis lurus dengan gigi stator anggap aja kutub tersebut magnet utara maka garis-garis magnet akan masuk ke gigi stator melalui celah udara. Akan tetapi dengan seiring berputarnya rotor,

pada saat kutub utara itu akan meninggalkan gigi stator, kutub yang lain (magnet selatan) sudah masuk pada gigi stator yang sama. Sehingga dalam satu gigi stator terdapat dua kutub yang berbeda, akibatnya fluks magnet yang melewati gigi stator tidak merata. Adapun untuk hasil gelombang keluaran tegangan dari pemodelan PMSG magnet sejajar dapat dilihat pada gambar 15.



Gambar 15. Hasil gelombang tegangan magnet skew.

Tegangan keluaran dari generator sinkon magnet permanen dengan magnet skew adalah 397,76 volt. Titik

puncak gelombang tegangan adalah 514,7 volt. Dan waktu yang dibutuhkan untuk satu gelombang sinusida adalah 20 ms. Bentuk gelombang tegangan keluaran PMSG magnet skew tidak seperti gelombang keluaran tegangan PMSG magnet sejajar, terdapat beberapa lekukan yang disebabkan oleh pengaruh posisi peletakan magnet.

4.3 Hasil Pengaruh Keluaran PMSG Berdasarkan Posisi Peletakan Magnet Sejajar Dan Skew

Berdasarkan gambar 14 terlihat bahwa garis-garis medan magnet saling bertabaran akibat dari dua kutub yang berbeda pada satu gigi stator yang sama sehingga lintasa fluks magnet tidak beraturan. Akibatnya medan magnet yang dihasilkan dari magnet skew tidak maksimal. Adapun perbandingan tegangan keluaran antara PMSG magnet sejajar dan magnet skew terlihat pada gambar 16.



Gambar 16. Kurva karakteristik tegangan PMSG.

Berdasarkan hasil simulasi, pemodelan PMSG magnet skew didapatkan tegangan 397,19 Volt sedangkan pemodelan PMSG magnet sejajar mempunyai tegangan keluaran 433,45 Volt. terjadi pengurangan tegangan 36,26 volt.

Hal ini disebabkan fluks magnet yang masuk ke gigi stator tidak sempurna, dikarenakan posisi magnet skew sehingga terjadi tabaran fluks dari dua kutub yang berbeda dalam satu gigi stator dalam waktu yang sama saat rotor diputar sehingga medan magnet yang dihasilkan tidak sebesar medan magnet dengan posisi magnet sejajar. berikut adalah data-data nilai keluaran dari dari pemodelan PMSG magnet sejajar seperti terlihat pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil pemodelan PMSG magnet sejajar.

Nilai Keluaran PMSG	Hasil Perhitungan	Hasil Simulasi
Tegangan	433,45 Volt	436,34 Volt
Daya input	5684,18 Watt	5687,2 Watt
Daya output	2288.62 Watt	2303,81 Watt
Efisiensi	40,2 %	40,5 %
Arus	5,28 Amp	5,28 Amp
Resistansi	80 ohm	80 ohm
Kecepatan	750 Rpm	750 Rpm
Frekuensi	50 Hz	50 Hz

Adapun nilai keluaran dari perancangan PMSG magnet skew dapat dilihat pada tabel 4.

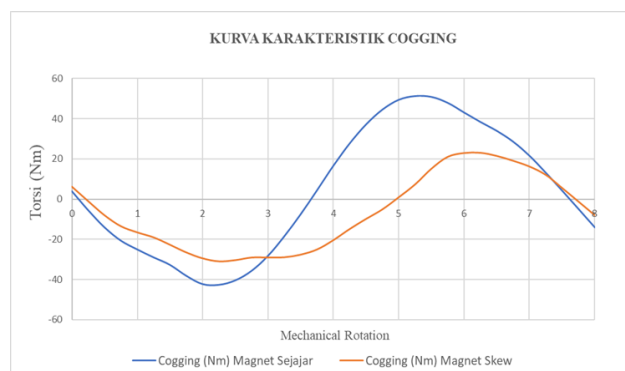
Tabel 4. Hasil pemodelan PMSG *skew*.

Nilai Keluaran PMSG	Hasil Perhitungan	Hasil Simulasi
Tegangan	397,78 Volt	397,19 Volt
Daya input	4521,6 Watt	4526,9 Watt
Daya output	2008,79 Watt	2009,09 Watt
Efisiensi	45 %	44,3 %
Arus	5,05 Amp	5,05 Amp
Resistansi	80 Ohm	80 Ohm
Kecepatan	750 Rpm	750 Rpm
Frekuensi	50 Hz	50 Hz

4.4 Hasil Torsi Cogging

Adanya gaya tarik antara magnet permanen dengan gigi stator menyebabkan munculnya torsi *cogging*. Akibatnya PMSG memiliki kecenderungan rotor untuk mensejajarkan diri dengan stator pada beberapa posisi (terjadi efek tarik menarik), meskipun dalam kondisi tidak bergerak. Sehingga bila rotor diputar maka akan merasakan lendutan torsi.

Adapun kurva karakteristik pemodelan PMSG dengan magnet sejajar dan pemodelan PMSG dengan magnet *skew* berdasarkan data-data diatas seperti terlihat pada gambar 17.



Gambar 17. Kurva karakteristik cogging pemodelan PMSG.

Dari hasil simulasi cogging yang telah dilakukan dan berdasarkan data-data yang telah diperoleh ternyata PMSG dengan magnet *skew* memiliki torsi *cogging* yang lebih kecil dibandingkan dengan PMSG magnet sejajar. Torsi *cogging* yang dihasilkan magnet sejajar adalah 93,7 Nm sedang torsi *cogging* PMSG dengan magnet *skew* adalah 53,85 Nm terjadi perbedaan 39 Nm.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil Pengujian dan perhitungan matematis pengaruh posisi peletakan magnet permanen di rotor secara sejajar dan *skew* terhadap kinerja generator sinkron magnet permanen dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Posisi peletakan magnet mempengaruhi tegangan keluaran yang dibangkitkan. Dari hasil pengujian, magnet dengan posisi *skew* memiliki tegangan lebih

rendah dibanding dengan posisi magnet normal/sejajar. Hal ini disebabkan fluks dari magnet *skew* yang masuk ke gigi stator tidak sempurna ditambah lagi adanya tabrakan fluks/arahan medan dari dua kutub yang berbeda dalam satu gigi stator di waktu yang sama. Sehingga medan yang dibangkitkan menjadi lebih kecil.

2. Posisi peletakan magnet mempengaruhi torsi *cogging*. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, magnet yang diletakkan dengan posisi *skew* memiliki torsi *cogging* yang lebih kecil dibanding pemodelan PMSG magnet normal/sejajar
3. Pada saat memodelkan PMSG ternyata ukuran *mesh* dari material penyusun generator mempengaruhi tingkat keakurasian pada saat *solving*. Sehingga hasil perhitungan tegangan yang dibangkitkan, daya output maupun torsi menjadi lebih teliti. Akan tetapi dibutuhkan waktu yang lama pada saat proses pengujian.

5.1 Saran

Dalam penyempurnaan dan pengembangan berdasarkan penelitian ini, langkah selanjutnya yang sebaiknya dilakukan adalah :

1. Dalam pembuatan *prototype*, jika ingin mengurangi torsi *cogging* dapat memodelkan posisi magnet secara *skew*
2. Melakukan analisa lebih lanjut terkait nilai keluaran PMSG jika peletakan magnet permanen di rotor menggunakan metode *surface mounted*.

DAFTAR PUSTAKA

- Hanselman, D. (2006). *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. Magna Physics Publishing.
- Hendershot JR, and Tje Miller. (1994). *Design of Brushless Permanent-Magnet Motor*. Magna Physics Publishing.
- Kenjo, T. and Nagamori, S. (1985) *Permanent-Magnet and Brushless DC Motor*. Oxford Scine Publication.
- Pramono, G. E., Muliawati, F. and Kuniawan, N. F. (2017). *Desain Dan Uji Kinerja Generator AC Fluks Radial Menggunakan 12 Buah Magnet Permanen Tipe Neodymium (NdFeB) Sebagai Pembangkit Listrik*, JUTEKS, 4, pp. 34–40.
- Strous, I. T. D. (2010) *Design of a permanent magnet radial flux concentrated coil generator for a range extender application*, Electrical Energy Conversion, Delft University of Technology.
- Suhada, Megi Octa (2018). *Aspek Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah*. ,5,pp.1-7