

DOI <http://dx.doi.org/10.36722/sst.v8i2.1833>

Analisis Perbandingan Pengaruh Material Inti Besi Stator dan Rotor Terhadap Efisiensi pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* 18 Slot 18 Pole

Thopan Maidia Ananda^{1*}, Novi Gusnita¹¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, Jl. HR. Soebrantas No. 155 Panam, Pekanbaru, 28293Penulis untuk Korespondensi/E-mail: 11850512376@students.uin-suska.ac.id

Abstract – A Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) is a generator whose excitation comes from permanent magnets and not from additional external excitation. The efficiency of the current PMSG model is still low at 73%, and it needs to be increased by selecting better materials for the stator and rotor. This study simulated the use of better materials for the stator and rotor, namely TR52: USS transformer, M27: USS Motor, and Carpenter: Silicon Steel materials. The simulation used the Magnet Amphylytic Software, which is based on the Finite Element Method (FEM). The results of the simulation experiment are as follows. Using the TR52: USS Transformers material obtained the highest efficiency of 77.3%, followed by the M27: USS Motor material at 77.1%, and followed last by the Carpenter: Silicon Steel material at 75.8%.

Abstrak - Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) merupakan generator yang eksitasinya berasal dari magnet permanen dan tidak lagi berdasarkan eksitasi tambahan yang berasal dari luar. Pada pemodelan PMSG masih mendapatkan hasil efisiensi yang rendah yaitu di angka 73%, sehingga perlu lagi dilakukan percobaan untuk mendapatkan nilai efisiensi yang lebih tinggi. Untuk itu dilakukan pemilihan material inti besi stator dan rotor yang bagus. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan nilai efisiensi PMSG menggunakan beragam material inti besi stator dan rotor yaitu material TR52: USS transformer, M27: USS Motor, dan Carpenter: Sillicon Steel. Metode penelitian yang dipakai yaitu simulasi menggunakan software Magnet Amphylytic Software yang berbasis Finite Element Method (FEM). Hasil dari simulasinya adalah sebagai berikut. Material TR52: USS Transformers memberikan efisiensi terbesar yaitu 77,3%, diikuti oleh material M27: USS Motor sebesar 77,1%, dan terakhir material Carpenter: Silicon Steel sebesar 75,8%.

Keywords – *Permanent Magnet Synchronous Generator, Finite Element Method, Efisiensi*

PENDAHULUAN

Listrik sudah menjadi kebutuhan yang penting di dalam kehidupan masyarakat. Karena setiap langkah dan kegiatan yang dilakukan masyarakat membutuhkan energi listrik. Salah satu energi terbarukan yang bisa dijadikan listrik yaitu energi angin [1], energi angin adalah pergerakan udara karena adanya tekanan yang berbeda sehingga menyebabkan adanya tiupan. Keberadaan energi angin itu tergantung dari suhu, ketinggian dan cuaca, sehingga energi angin bersifat fluktuatif atau kondisi anginnya berubah ubah [2][3], energi angin

merupakan energi alternatif yang memiliki prospek sangat baik karena keberadaannya akan selalu ada. Dalam mengkonversi energi angin menjadi energi listrik menggunakan generator [4].

Generator adalah komponen utama merupakan komponen utama yang ada di dalam Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang fungsinya merubah energi angin atau energi mekanik menjadi energi listrik. Generator menghasilkan gaya gerak listrik dengan induksi elektromagnetik yang diubah menjadi energi listrik. Oleh sebab itu, generator merupakan suatu komponen utama yang ada di

dalam Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Komponen utama di dalam generator adalah stator dan rotor [5][6], stator adalah bagian dari generator yang tidak bergerak dan tersusun dari beberapa kumparan kawat atau coil yang dilapisi oleh bahan isolator, sedangkan rotor adalah bagian dari generator yang berputar dan di bagian ujungnya tersusun dari sejumlah magnet sebagai penghasil medan magnet pada generator [7].

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) adalah generator yang menggunakan magnet permanen untuk eksitasinya tidak lagi berdasarkan ekstasi tambahan yang berasal dari luar, oleh karena itu generator ini sangat cocok untuk angin yang berkecepatan rendah. Generator jenis ini memiliki efisiensi yang tinggi dibandingkan dengan generator jenis induksi, selain memiliki efisiensi yang tinggi Generator Sinkron Magnet Permanen juga memiliki bentuk yang sederhana sehingga membuat generator ini menjadi lebih rapi, ringan, dan tersusun padat [8][9].

Efisiensi generator adalah perbandingan antara daya keluaran generator (P_{out}) yang dibandingkan dengan daya masukan generator (P_{in}), daya masukan didapatkan dari hasil data torsi atau putaran rotor yang berputar sesuai kecepatan dan sudut yang telah ditentukan. Sedangkan daya keluaran didapatkan dari arus dan tegangan yang dihasilkan akibat perubahan energi mekanik yang berputar pada generator antara rotor dan stator. Semakin tinggi efisiensi maka kualitas dari generator semakin baik, ada banyak hal yang mempengaruhi efisiensi dari generator misalnya material yang digunakan di dalam perancangan generator, beban atau daya yang dipakai terlalu besar, dan juga kecepatan angin rendah yang mengakibatkan turbin tidak bergerak [10][11]. Untuk rugi rugi daya pada generator bisa mengakibatkan efisiensi generator menurun seperti rugi tembaga yang diakibatkan oleh lilitan tembaga pada stator menjadi panas, dan untuk rugi rugi mekanik yang disebabkan oleh gesekan pada bantalan poros generator dan juga rugi rugi besi dikarenakan material generator yang menjadi panas[12].

Pada penelitian ini membahas tentang *PMSG 18 Slot 18 Pole*. Maksud dari *18 Slot 18 Pole* yaitu memiliki 18 ruang tempat *coil* dan memiliki 18 pasang magnet yang saling berpasangan, 9 magnet mengarah ke utara dan 9 magnet mengarah ke arah selatan. Keunggulan dari *PMSG 18S18P* adalah menghasilkan daya keluaran yang tinggi dan menghasilkan efisiensi yang lebih besar dari variasi

slot pole lainnya [13], keunggulan lainnya dari *Permanent Magnet* ini yaitu memiliki *cogging* yang rendah, *cogging* adalah lendutan torsi yang disebabkan oleh interaksi magnet permanen dengan variasi permeansi (kemampuan suatu material meneruskan fluks magnet). Efek dari *cogging* dapat menimbulkan suara yang keras dan juga getaran yang kuat [14][15].

Pada pemodelan *PMSG 18S18P* menggunakan material inti besi *TR 52: USS Transformers 52-29 Gage*, material *M27: USS-Motor – 26 Gage* dan material *Carpenter: Silicon Steel*. Alasan memakai jenis bahan material tersebut karena memiliki nilai permeabilitas material yang bagus, untuk harga jual dari bahan material tersebut juga tidak terlalu mahal dan mudah untuk didapatkan [16].

Untuk jumlah lilitan yang dipakai yaitu sebesar 50 lilitan dengan kecepatan putar 1000 Rpm dan disamakan setiap variasi material, pada proses pembebanan menggunakan beban sebesar 10 ohm setiap variasinya. Kinerja yang dihasilkan pada Generator Sinkron Magnet Permanen bergantung kepada besaran magnet yang dihasilkan dari perputaran rotor, yang mana pada rotor terdapat magnet permanen yang menginduksikan tegangan dalam belitan stator. Oleh karena itu dibutuhkan inti besi pada rotor dan stator kualitas baik agar efisien pada *PMSG* menjadi lebih baik karena inti besi pada rotor dan stator harus di pilih material yang memiliki kemagnetan yang kuat [17].

Penelitian tentang generator permanen magnet sudah cukup banyak dilakukan, seperti penelitian yang berjudul Analisis Pengaruh Ketebalan dan Jenis Inti Besi Rotor Stator terhadap Karakteristik Generator Sinkron Magnet Permanen 18 Slot 16 Pole Fluks Radial. Pada penelitian ini bertujuan untuk mencari nilai arus, tegangan dan daya pada *PMSG 18 Slot 16 Pole* dengan memvariasikan ketebalan dan jenis inti besi menggunakan software berbasis *Finite Element Method* (FEM). Didapatkan hasil nilai arus sebesar 17,44 *Ampere*, tegangan rata-rata sebesar 52,31 *Volt*, Torsi sebesar -24,84 *Nm*, daya masukan sebesar 1.300 *Watt*, daya keluaran sebesar 1.011 *Watt* dan nilai efisiensi tertinggi yaitu 73% [18], penelitian yang berjudul Analisa Permeabilitas Material Stator pada Pemodelan *PMSG 12 slot 8 pole* menggunakan *FEM*. Tujuan dari penelitian ini adalah mencari perbandingan nilai permeabilitas bahan melalui analisa kurva B-H dan bahan tersebut nantinya akan digunakan sebagai bahan material stator dengan desain seperempat model *PMSG 12 Slot 8 Pole*.

Dari penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa nilai permeabilitas bahan besi murni lebih baik dibandingkan campuran baja dan *silicon*, sedangkan nilai konstanta *Back EMF* bahan campuran baja dan *silicon* lebih baik daripada besi murni [16], penelitian yang berjudul Analisis Perbandingan Pengaruh Variasi Material Rotor dan Stator Terhadap Nilai Efisiensi dan *Losses* Pada PMSG Menggunakan FEM. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui perbandingan nilai efisiensi dan *losses* pada material yang terdapat pada rotor dan stator generator dengan tambahan variasi RPM dan beban pada generator dengan menggunakan FEM. Hasil dari penelitian tersebut yaitu nilai keluaran tertinggi dihasilkan oleh material M15A dan disusul dengan material NO 12, dan untuk nilai keluaran terendah di peroleh dari material Arnon 5 [19], selanjutnya penelitian yang berjudul Pengaruh Material Inti Besi Terhadap Nilai Back-EMF dan Ke Pada PMSG 12 Slot 8 Pole Menggunakan *Software* Berbasis FEM. Tujuan penelitian ini adalah menganalisa nilai Back-EMF dan Ke pada PMSG dengan memvariasikan inti besi dengan pola variasi rotor, stator, dan rotor-stator menggunakan aplikasi berbasis FEM. Pada penelitian ini didapatkan hasil bahwa PMSG yang menggunakan material *Carpenter: Silicon Steel* nilai Back-EMF dan Ke lebih besar dibandingkan menggunakan material M19: USS Transformers 72-29 Gage [20].

Penelitian tentang pengaruh material inti besi stator dan rotor pada PMSG sudah pernah dilakukan sebelumnya, namun peneliti sebelumnya hanya mendapatkan hasil efisiensi sebesar 73% dan variasi slot dan pole yang dipakai 18 Slot 16 Pole. Sehingga di dalam penelitian ini dilakukan variasi jumlah slot dan pole yang lebih banyak yaitu 18 Slot 18 Pole dan di dalam penelitian ini mendapatkan hasil efisiensi yang lebih tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan nilai efisiensi PMSG dengan cara memvariasikan material inti besi stator dan rotor yaitu material TR52: USS transformer, M27: USS Motor, dan *Carpenter: Silicon Steel* dengan menggunakan *Software MagNet Infolytica* yang berbasis FEM, data yang diperoleh dari *Software* tersebut akan menjadi sumber data yang akan diolah sehingga dapat diketahui perbandingan nilai efisiensi dari ketiga material tersebut.

FEM adalah sebuah metode numerik yang digunakan dalam menyelesaikan masalah seperti diferensial dan integral dengan menghitung parameter satu persatu ke setiap bagian objek yang akan dianalisa ke bagian yang terkecil. Proses yang ada pada FEM ini adalah diskritis menjadi beberapa elemen, membuat *approximation function* untuk potensial pada elemen, memperkirakan nilai matrik dari elemen, memperkirakan nilai matrik dari sistem dan mendapatkan solusi sistem yang dihitung. *Software MagNet Infolytica* merupakan salah satu *software* yang berbasis FEM, *Software MagNet Infolytica* digunakan untuk melakukan perancangan generator dengan menggunakan material yang diinginkan dan menganalisis masalah medan elektromagnetik dalam generator untuk mendapatkan desain generator seperti yang diinginkan [21].

METODE

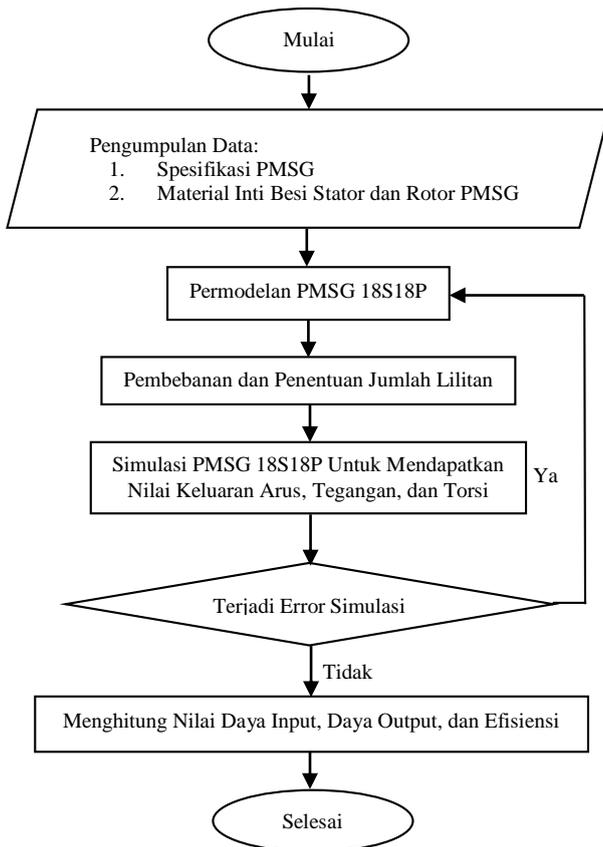
Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen yaitu dengan cara melakukan pemodelan dan mensimulasikan PMSG 18S18P dengan menggunakan *Software MagNet Infolytica*, kemudian dilakukan perhitungan data hasil simulasi untuk mendapatkan nilai efisiensi yang optimal. Gambar 1 merupakan diagram alir atau *flow chart* tahapan penelitian.

Pengumpulan Data

Langkah awal dalam penelitian ini dimulai dengan melakukan pengumpulan data yang sumbernya berasal dari jurnal atau paper yang terkait spesifikasi generator yang akan disimulasikan dengan menggunakan *Software MagNet infolytica*, Tabel 1 merupakan spesifikasi generator yang akan disimulasikan.

Tabel 1. Spesifikasi Generator

No	Spesifikasi	Deskripsi
1	Slot	18
2	Pole	18
3	Dimensi	150x150x40 mm
4	Jumlah Lilitan	50
5	Magnet	PM12: Br 1.2 Mur 1.0
6	Lilitan	Copper: 5.77e7 Siemetens/meter
7	Air Box	Air
8	Air Gap	Air



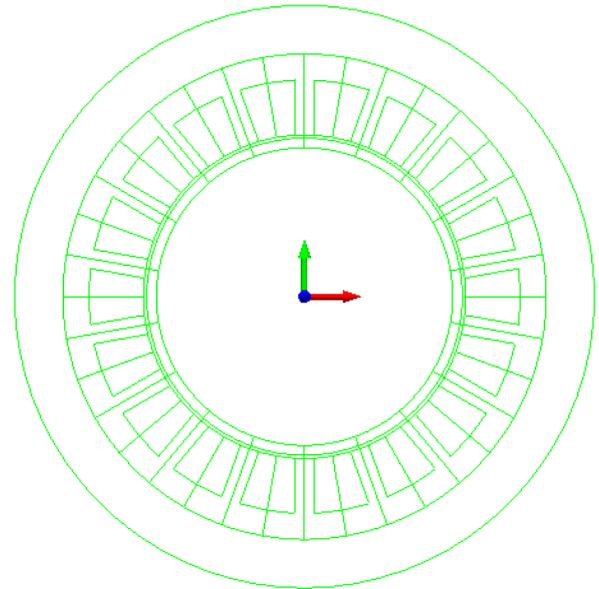
Gambar 1. Flow Chart Penelitian

Pemodelan PMSG 18S18P

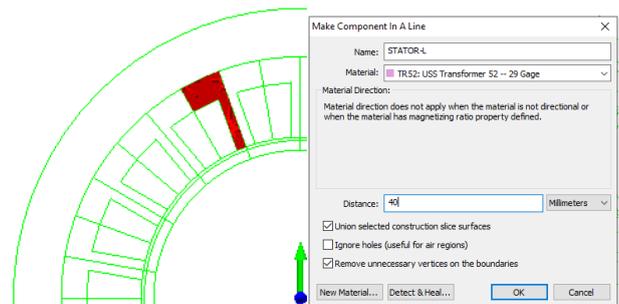
PMSG 18S18P adalah generator yang memiliki 18 *coil* dan kutub magnet sebanyak 18 buah. Pada permodelan ini menggunakan *Software MagNet Infolytica* yang memiliki jumlah lilitan sebanyak 50 lilitan dan beban yang diberikan sebesar 10 *ohm*. Berikut disampaikan langkah-langkah permodelan PMSG 18S18P.

Pemodelan awal PMSG 18S18P dimulai dengan membuat garis line pada gambar 2, untuk membentuk bagian-bagian dari generator yang meliputi bagian dari stator, rotor, lilitan, magnet, *air-gap*, *air-box*. Setelah langkah ini selesai, langkah selanjutnya membuat komponen dengan memasukkan material yang sudah di tentukan sebagaimana pada gambar 3.

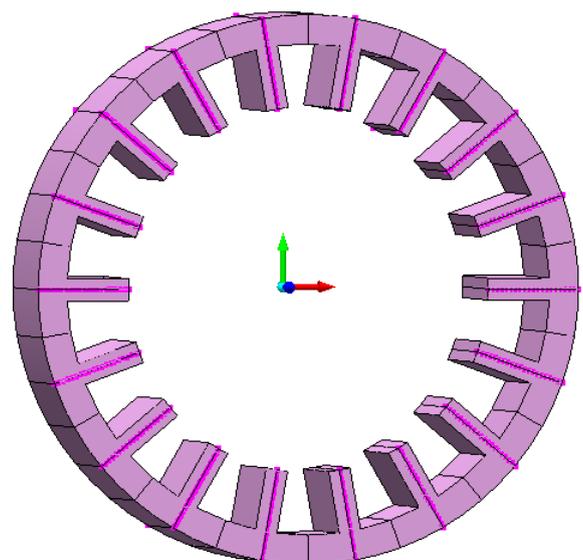
Di dalam tahap ini melakukan pemodelan PMSG 18S18P dengan menggunakan material yang telah ditentukan, material yang digunakan didalam penelitian ini adalah material TR52: USS Transformers 52, material M27: USS Motor, material Carpenter: Silicon Steel.



Gambar 2. Garis Line PMSG 18S18P

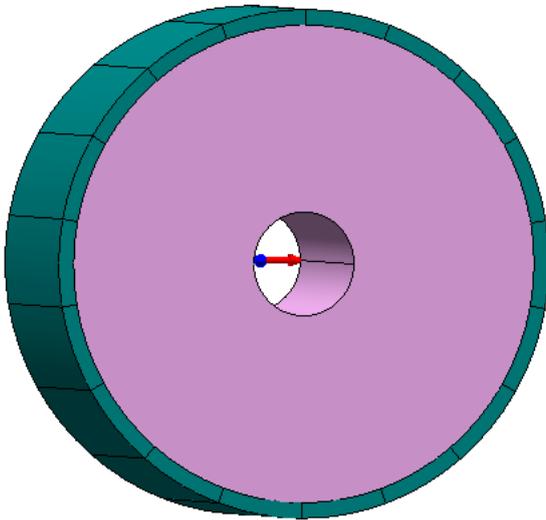


Gambar 3. Pembuatan komponen dengan material inti besi yang sudah di tentukan



Gambar 4. Konstruksi Stator

Gambar 4 merupakan desain stator yang akan digunakan, jumlah Slot yang digunakan yaitu 18 Slot dimana pada Slot tersebut nantinya akan di pasang coil atau lilitan dengan menggunakan kawat tembaga dengan ukuran dan jumlah yang sudah ditentukan [7].

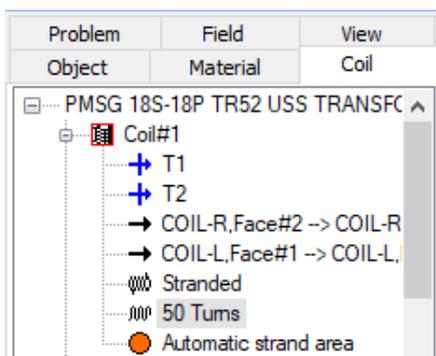


Gambar 5. Kontruksi Rotor

Dapat dilihat desain rotor dan bentuk rotor yang akan digunakan (Gambar 5). Rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet pada generator karna rotor yang berputar di porosnya pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Pada rotor terdiri inti kutup (*pole core*), kumparan medan, slip ring dan poros. Pada sekeliling rotor terdapat magnet permanent yang ikut berputar dengan poros dan rotor [7].

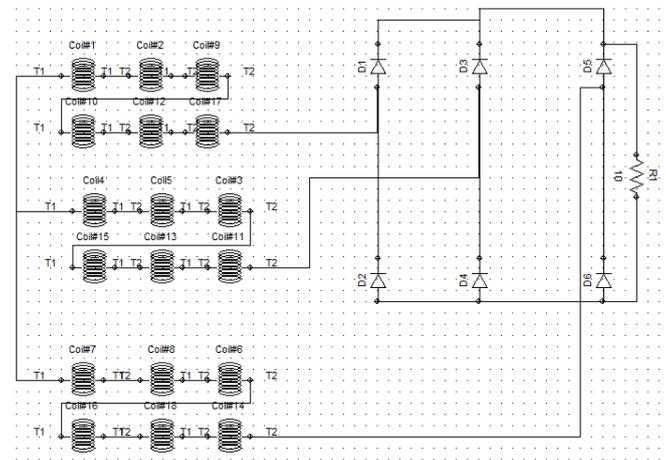
Pembebanan dan Penentuan Jumlah Lilitan

Setelah pemodelan PMSG 18S18P selesai dilakukan maka dilanjut dengan menentukan jumlah lilitan, pada penelitian ini akan memakai jumlah lilitan sebesar 50 lilitan di setiap *coil*.



Gambar 6. Penentuan Jumlah Lilitan Pada PMSG18S18P

Langkah selanjutnya setelah penentuan jumlah lilitan adalah merangkai *circuit* diagram fasa *coil* yang diberi beban sebesar 10 ohm untuk mendapatkan hasil keluaran dari generator, rangkaian *circuit* dan pembeban PMSG 18S18P seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Rangkain *Circuit* dan Pembebanan PMSG 18S18P

Setelah proses perangkaian *circuit* yang diberi beban sebesar 10 ohm selesai dilakukan, maka rancangan PMSG 18S18P siap untuk disimulasikan dengan uji coba *solving transien with 2d motion*.

Simulasi Pemodelan PMSG 18S18P

Setelah pemodelan PMSG 18S18P selesai dilakukan, selanjutnya masuk ke tahap simulasi dan pengambilan data hasil simulasi. Data hasil simulasi meliputi arus, tegangan, dan torsi dipindahkan ke *Microsoft Excel* untuk dilakukan pengolahan data secara manual, setelah itu dilakukan analisis perbandingan efisiensi yang terjadi akibat perbedaan material inti besi yang dipakai pada PMSG 18S18P. Berikut data keluaran simulasi yang di ambil:

Arus

Arus Listrik didapatkan dari hasil perbandingan tegangan input dan hambatan. Nilai arus bergantung pada kecepatan putar generator, semakin bertambah kecepatan putar maka akan semakin bertambah pula nilai keluaran arus [22].

Tegangan

Tegangan merupakan hasil dari induksi elektromagnetik pada *coil* generator.

$$\varepsilon = -N \left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right) \tag{1}$$

Dimana:

ε = GGL induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan

$\Delta\phi$ = Perubahan Fluks Magnet (Wb)

Δt = Selang Waktu (s)

Torsi

Torsi dihasilkan dari gaya tangensial dan jari-jari tempat motor yang bekerja, tergantung pada besarnya gaya yang diberikan dan jarak antar sumbu rotasi/sumbu putar [23].

$$T = F \times r \quad (2)$$

Dimana:

F = Gaya sentrifugal dari benda yang berputar (N)

r = Jari-jari (m)

Terjadi Error Pada Simulasi

Jika terjadi error pada proses simulasi PMSG 18S18P dengan solving *transient 2d with motion*, maka kembali ke tahap pemodelan PMSG dan melakukan perbaikan pada komponen yang error. Error yang terjadi pada proses simulasi bisa terjadi karena kesalahan inputan material dan pembebanan pada pemodelan PMSG. Setelah melakukan perbaikan pada bagian yang error maka lakukan proses simulasi solving *transient 2d with motion* kembali, jika simulasi berhasil maka lanjut ke tahap perhitungan nilai daya input, daya output dan efisiensi.

Perhitungan Daya Input, Daya Output, Efisiensi

Langkah selanjutnya setelah melakukan simulasi solving *transient with 2d motion* menghitung nilai input, nilai output, dan efisiensi dari PMSG 18S18P yang dilakukan secara manual di *Microsoft Excel*. Berikut langkah-langkah perhitungan nilai daya input, daya output, dan efisiensi:

Daya Input (P_{in})

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan daya masuk (P_{in}) adalah sebagai berikut:

$$P_{in} = T \times Rpm \times 2\pi/60 \quad (3)$$

Dimana:

T = Torsi (Nm)

Rpm = Kecepatan Putar

Daya Output (P_{out})

Untuk mendapatkan nilai daya keluar (P_{out}) menggunakan persamaan berikut:

$$P_{out} = V \times I \quad (4)$$

Dimana:

V = Tegangan

I = Arus

Efisiensi

Nilai efisiensi didapatkan dari hasil perbandingan daya keluaran (P_{out}) dengan daya masuk (P_{in})[24]. Dengan persamaan sebagai berikut:

$$n = P_{out} / P_{in} \quad (5)$$

Dimana:

P_{out} = Daya Keluaran

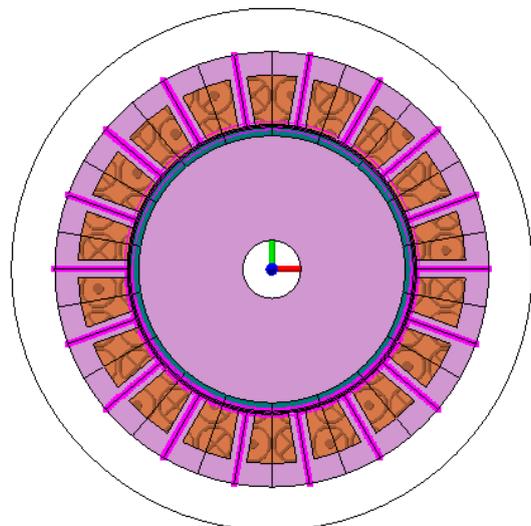
P_{in} = Daya Masukan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian PMSG 18S18P yang memvariasikan material inti besi rotor dan stator dengan menggunakan beban 10 *ohm* yaitu untuk nilai dari arus, tegangan, dan torsi didapat dari simulasi yang dilakukan pada *Software MagNet Infolytica*. Sedangkan untuk nilai daya input, daya output dan efisiensi diperoleh dari perhitungan manual menggunakan *Microsoft Excel*. Berikut hasil pemodelan PMSG 18S18P dan nilai keluaran dari simulasi.

Hasil Pemodelan PMSG 18S18P

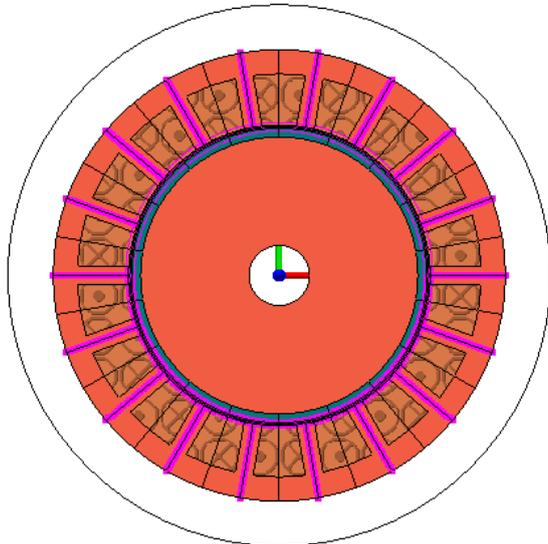
Pemodelan PMSG 18S18P Material TR52: USS Transformers



Gambar 8. PMSG 18S18P Material TR52: USS Transformers

Gambar 8 merupakan hasil dari pemodelan PMSG 18S18P dengan menggunakan material inti besi TR52: USS Transformer.

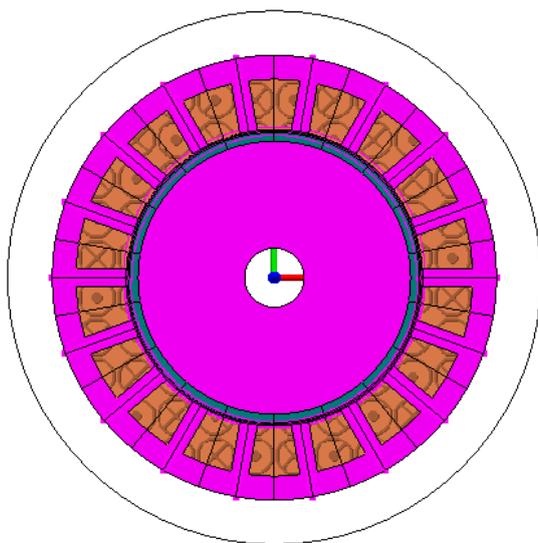
Pemodelan PMSG 18S18P Material M27: USS: Motor



Gambar 9. PMSG 18S18P Material M27: USS Motor- 26 Gage

Gambar 9 merupakan hasil pemodelan PMSG 18S18P dengan menggunakan material inti besi M27: USS Motor

Pemodelan PMSG 18S18P Material Carpenter: Silicon Steel



Gambar 10. PMSG 18S18P material Carpenter: Silicon Steel

Pada gambar 10 merupakan hasil dari pemodelan PMSG 18S18P dengan menggunakan material inti besi Carpenter: Silicon Steel

Perhitungan Nilai Keluaran Simulasi

Data Nilai Keluaran PMSG 18S18P Material TR52: USS Transformers

Tabel 2 Data Nilai Keluaran PMSG 18S18P Material TR52: USS Transformers

Waktu (Detik)	Arus (Ampere)	Tegangan (Volt)	Torsi (Nm)
0,001	4,8	48,2	-27,46
0,002	12,1	121,0	-12,99
0,003	7,7	77,2	6,71
0,004	1,4	13,7	-24,25
0,005	10,8	108,0	-17,15
0,006	10,6	105,8	11,70
0,007	1,5	15,2	-13,28
0,008	8,0	80,0	-18,11
0,009	12,1	121,0	4,42
0,01	4,6	45,5	-2,54
0,011	4,6	45,7	-27,18
0,012	12,07	120,7	-12,95
0,013	7,71	77,1	6,71
0,014	1,37	13,7	-24,25
0,015	10,80	108,0	-17,15
0,016	10,58	105,8	11,70
0,017	1,52	15,2	-13,28
0,018	8,0	80,0	-18,11
0,019	12,10	121,0	4,42
0,02	4,55	45,5	-2,54
0,021	4,57	45,7	-27,18
0,022	12,07	120,7	-12,95
0,023	7,71	77,1	6,71
0,024	1,37	13,7	-24,25
0,025	10,80	108,0	-17,15
0,026	10,58	105,8	11,70
0,027	1,52	15,2	-13,28
0,028	8,0	80,0	-18,11
0,029	12,10	121,0	4,42
0,03	4,55	45,5	-2,54
0,031	4,57	45,7	-27,18

Data nilai keluaran dari proses simulasi PMSG 18S18P yang menggunakan material inti besi stator dan rotor TR52: USS Transformers. Jika dikalkulasikan menjadi nilai keluaran rata-rata akan di peroleh nilai sebagai berikut:

Arus rata-rata (A)

Arus rata-rata berdasarkan tabel adalah sebesar 7,21 A.

Tegangan rata-rata (V)

Tegangan rata-rata berdasarkan tabel di atas adalah sebesar 72,11 V.

Torsi rata-rata (Nm)

Torsi rata-rata berdasarkan table di atas adalah sebesar -9,15 Nm.

Daya Input (W)

$$Pin = -9,15 \times 1000 \times 2 \times 3,14/60 = 1429,77 \text{ W}$$

Daya Output (W)

$$Pout = 7,21 \times 72,11 = 679,24 \text{ W}$$

Efisiensi (%)

$$n = 679,24 / 1429,77 = 77,3\%$$

Data Nilai Keluaran PMSG 18S18P Material M27: USS Motor

Tabel 3. Data Nilai Keluaran PMSG 18S18P Material M27: USS Motors

Waktu (Detik)	Arus (Ampere)	Tegangan (Volt)	Torsi (Nm)
0,001	4,88	48,83	-27,49
0,002	12,11	121,09	-13,07
0,003	7,68	76,81	6,76
0,004	1,31	13,13	-24,21
0,005	10,78	107,75	-17,14
0,006	10,55	105,50	11,77
0,007	1,56	15,64	-13,30
0,008	7,98	79,85	-18,06
0,009	12,11	121,07	4,41
0,01	4,56	45,57	-2,54
0,011	4,54	45,39	-27,12
0,012	12,07	120,66	-13,01
0,013	7,67	76,75	6,76
0,014	1,31	13,13	-24,21
0,015	10,78	107,75	-17,14
0,016	10,55	105,50	11,77
0,017	1,56	15,64	-13,30
0,018	7,98	79,84	-18,05
0,019	12,11	121,07	4,41
0,02	4,56	45,57	-2,54
0,021	4,54	45,39	-27,12
0,022	12,07	120,66	-13,01
0,023	7,68	76,75	6,76
0,024	1,31	13,13	-24,21
0,025	10,78	107,75	-17,14
0,026	10,55	105,50	11,77
0,027	1,56	15,64	-13,30
0,028	7,98	79,85	-18,05
0,029	12,11	121,07	4,41
0,03	4,56	45,57	-2,54
0,031	4,54	45,39	-27,12

Data nilai keluaran dari proses simulasi PMSG 18S18P yang menggunakan material inti besi stator

dan rotor M27: USS Motor. Sehingga jika dikalkulasikan menjadi nilai keluaran rata-rata akan diperoleh nilai sebagai berikut:

Arus rata-rata (A)

Arus rata-rata berdasarkan tabel diatas adalah sebesar 7,19 A

Tegangan rata-rata (V)

Tegangan rata-rata berdasarkan tabel diatas adalah sebesar 71,99 V

Torsi rata-rata (Nm)

Torsi rata-rata berdasarkan tabel diatas adalah sebesar -9,13 Nm

Daya Input (W)

$$Pin = -9,13 \times 1000 \times 2 \times 3,14/60 = 1429,46 \text{ W}$$

Daya Output (W)

$$Pout = 7,19 \times 71,99 = 677,21 \text{ W}$$

Efisiensi (%)

$$n = 677,21 / 1429,46 = 77,1\%$$

Data Nilai Keluaran PMSG 18S18P Material Carpenter: Silicon Steel

Tabel 4. Data Nilai Keluaran PMSG 18S18P Material Carpenter: Silicon Steel

Waktu (Detik)	Arus (Ampere)	Tegangan (Volt)	Torsi (Nm)
0,001	5,00	50,03	-27,71
0,002	12,13	121,31	-12,99
0,003	7,64	76,41	6,86
0,004	1,26	12,57	-24,30
0,005	10,86	108,56	-17,20
0,006	10,48	104,77	11,95
0,007	1,64	16,38	-13,38
0,008	8,07	80,65	-18,19
0,009	12,06	120,57	4,54
0,01	4,58	45,75	-2,54
0,011	4,56	45,61	-27,22
0,012	12,08	120,78	-12,92
0,013	7,63	76,34	6,86
0,014	1,26	12,58	-24,30
0,015	10,86	108,56	-17,20
0,016	10,48	104,77	11,95
0,017	1,64	16,38	-13,38
0,018	8,07	80,65	-18,19
0,019	12,06	120,57	4,54
0,02	4,58	45,75	-2,54
0,021	4,56	45,61	-27,22
0,022	12,08	120,78	-12,91

Waktu (Detik)	Arus (Ampere)	Tegangan (Volt)	Torsi (Nm)
0,001	5,00	50,03	-27,71
0,002	12,13	121,31	-12,99
0,023	7,63	76,34	6,86
0,024	1,26	12,58	-24,30
0,025	10,86	108,56	-17,20
0,026	10,48	104,77	11,95
0,027	1,64	16,38	-13,38
0,028	8,07	80,65	-18,19
0,029	12,06	120,57	4,54
0,03	4,58	45,75	-2,54
0,031	4,56	45,61	-27,22

Data nilai keluaran dari proses simulasi PMSG 18S18P yang menggunakan material inti besi stator dan rotor *Carpenter: Silicon Steel*. Sehingga jika dikalkulasikan menjadi nilai keluaran rata-rata akan diperoleh nilai sebagai berikut:

Arus rata-rata (A)

Arus rata-rata berdasarkan tabel diatas adalah sebesar 7,20 A

Tegangan rata-rata (V)

Tegangan rata-rata berdasarkan tabel diatas adalah sebesar 72,08 V

Torsi rata-rata (Nm)

Torsi rata-rata berdasarkan data adalah sebesar 9,14 Nm

Daya Input (W)

$$Pin = -9,14 \times 1000 \times 2 \times 3,14/60 = 1437,97 \text{ W}$$

Daya Output (W)

$$Pout = 7,20 \times 72,08 = 677,83 \text{ W}$$

Efisiensi (%)

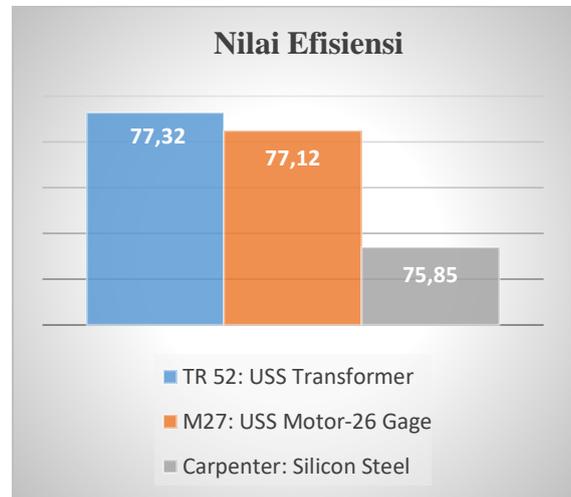
$$n = 677,83 / 1437,97 = 75\%$$

Perbandingan Nilai Efisiensi PMSG 18S18P

Setelah didapatkan hasil dari penelitian, langkah selanjutnya melakukan perbandingan nilai efisiensi yang didapatkan dari hasil permodelan dan simulasi PMSG18S18P. Berikut diagram nilai efisiensi PMSG 18S18P pada gambar 11.

Efisiensi tertinggi dihasilkan dari material inti besi *TR 52: USS Transformer* yakni menghasilkan nilai efisiensi sebesar 77,3%. Diikuti dengan material *M27: USS Motor* yang menghasilkan nilai efisiensi sebesar 77,12%. Sedangkan nilai efisiensi terendah

dihasilkan oleh material *Carpenter: Silicon Steel* yang hanya menghasilkan nilai efisiensi sebesar 75,8%. Dari hasil perbandingan nilai efisiensi tersebut membuktikan bahwa material inti besi stator dan rotor berpengaruh terhadap nilai efisiensi yang dihasilkan pada generator.



Gambar 11. Diagram Nilai Efisiensi

KESIMPULAN

Pada penelitian analisis pengaruh material inti besi stator dan rotor terhadap efisiensi pada PMSG 18 Slot 18 Pole dapat disimpulkan bahwa variasi hasil dari setiap pemodelan pada penelitian ini menunjukkan bahwa adanya pengaruh dari material inti besi pada stator dan rotor pada PMSG 18 slot 18 pole. Variasi material inti besi stator dan rotor berpengaruh terhadap nilai keluaran arus, tegangan, dan torsi yang dihasilkan pada simulasi. Untuk nilai efisiensi tertinggi dari simulasi ini dihasilkan oleh material inti besi *TR 52: USS Transformer* yaitu sebesar 77,3% dan nilai efisiensi terendah dihasilkan oleh material *Carpenter: Silicon Steel* yaitu sebesar 75,8%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan Terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu di dalam penelitian ini, mulai dari bimbingan, saran, kritik dan support sehingga penelitian ini dapat diselesaikan secara lancar.

REFERENSI

[1] M. N. Fikri, U. C. Buana, and D. B. Santoso, "Desain Permanent Magnet Synchronous

- Generator Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Daya 500 Watt Dengan Kecepatan Angin Rendah,” *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 8, no. 2, p. 200, 2022, doi: 10.24036/jtev.v8i2.116750.
- [2] T. P. Zaputra and N. Gusnita, “Analisis Pengaruh Jumlah Lilitan dan Kecepatan Putar Terhadap Efisiensi Pada Permanent Magnet Synchronous Generator 18 Slot 16 Pole,” *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 8, no. 2, p. 411, 2022, doi: 10.24036/jtev.v8i2.117875.
- [3] M. Irfan and E. Erwin, “Perancangan Permanent Magnet Synchronous Generator Sultan Wind Turbine V-5 Sultan Wind Turbine V-5 Permanent Magnet Synchronous Generator Design,” vol. 3, pp. 131–142, 2021.
- [4] A. Bachtiar and W. Hayyatul, “Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras,” *J. Tek. Elektro ITP*, vol. 7, no. 1, pp. 34–45, 2018, doi: 10.21063/jte.2018.3133706.
- [5] M. A. Irawan, “Perancangan Generator Dengan Variasi Slot , Pole , Dan Lilitan Menggunakan Software Magnet,” pp. 0–8, 2019.
- [6] M. Rangga Hadisiswoyo, I. Arifianto, S. Rahmatia, and R. Elson, “Variasi Geometri Pemodelan PM Generator Sinkron 12 Slot 8 Pole ¼ Model,” *Semin. Nas. Microw.*, pp. 48–52, 2018.
- [7] H. Prasetyo, Ropiudin, and B. Dharmawan, “Generator magnet permanen sebagai pembangkit listrik putaran rendah,” *Din. Rekayasa*, vol. 8, no. 2, pp. 70–77, 2012.
- [8] M. I. Umami, I. M. A. Nnatha, and T. Zubaidah, “Desain Generator Sinkron Magnet Permanen Jenis Neodymium Iron Boron Untuk PLTB Daya 500 Watt Menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica,” *Dr. Diss. Univ. Mataram*, pp. 1–7, 2018.
- [9] Liliana, Z. Aini, A. Wenda, and T. D. Putri, “Effect of Thickness and Type of Magnet against EMF Back PMSG 12S8P with FEM,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 990, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/990/1/012006.
- [10] M. Yusup and S. Nuryadi, “Analisa Kinerja Generator Magnet Permanen Ditinjau dari Tegangan Output Efisiensi dan Torsi Cogging Berdasarkan Variasi Geometri Stator dan Jumlah Kutub Menggunakan Software MagNet Infolytica,” pp. 1–8, 2019, [Online]. Available: <http://eprints.uty.ac.id/id/eprint/3351>
- [11] I. Refaldi, Y. Basir, and D. U. Yusa Wardhani, “Analisis Fluktuasi Beban Terhadap Efisiensi Generator Sinkron di PT. PEMBANGKIT LISTRIK PALEMBANG JAYA,” *J. Ampere*, vol. 6, no. 2, p. 91, 2022, doi: 10.31851/ampere.v6i2.7293.
- [12] P. Ilmiah, M. Renate, P. Studi, T. Elektro, F. Teknik, and U. M. Surakarta, “Analisa Pengaruh Perubahan Beban terhadap Rugi Daya pada Stator dan Rotor Generator PT . Indonesia Power UPJB Kamojang,” 2020.
- [13] M. Sumantri and S. Nuryadi, “Analisis Pengaruh Variasi Slot Dan Pole Terhadap Tegangan Dan Efisiensi Daya Pada Perancangan Generator Magnet Permanen Menggunakan Software Magnet,” pp. 1–8, 2019.
- [14] L. A. Nusantara, *Tutorial Perancangan Motor Dengan Software Magnet*. 2015. [Online]. Available: Lentera Angin Nusantara %7C Perancangan Motor/Generator
- [15] J. F. Gieras, “Analytical approach to cogging torque calculation in PM brushless motors,” *IEMDC 2003 - IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf.*, vol. 2, no. 5, pp. 815–819, 2003, doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210329.
- [16] M. I. Yasyak, P. Studi, T. Elektro, F. Teknik, and U. M. Surakarta, “Naspub FIX_Muhamad Ibnu Yasyak_D400170137 (1),” 2021.
- [17] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery Fundamentals - 6th ed.* 2003.
- [18] R. Saputra and Z. Aini, “Analisis Pengaruh Ketebalan dan Jenis Inti Besi Rotor Stator terhadap Karakteristik Generator Sinkron Magnet Permanen 18S16P Fluks Radial,” *J. Sains, Teknol. dan Ind.*, vol. 18, no. 2, pp. 220–227, 2021.
- [19] A. Mandala, W. Martiningsih, and C. Ahendyarti, “Analisa Perbandingan Pengaruh Variasi Material Rotor dan Stator Terhadap Nilai Efisiensi dan Losses Pada Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Menggunakan Finite Element Method (FEM),” *J. Ilm. Setrum*, vol. 11, no. 2, pp. 60–68, 2022, doi: 10.36055/setrum.v11i2.17996.
- [20] M. I. Fadillah and I. A. Bangsa, “Pengaruh Material Inti Besi Terhadap Nilai Back-EMF dan KE Pada Permanent Magnet Synchronous Generator 12S8P Menggunakan Software Berbasis Finite Element Method,” vol. 4, no. 2, pp. 100–106, 2022.
- [21] *Finite Elements for Electrical*. 2006.
- [22] T. D. Putri and Liliana, “Analisis Pengaruh Material Magnet Permanen Terhadap Karakteristik Generator Sinkron Radial 18 Slot 16 Pole,” *J. Power Elektron.*, vol. 11, no. 1, pp. 45–50, 2022.

- [23] I. Arifianto and M. R. HS, “Analisa Efisiensi dan Rancang Generator Permanent Magnet 12 Slot 8 Pole Menggunakan Software Magnet 7 . 5,” *Semin. Nas. Microwave, Antena dan Propagasi*, pp. 43–48, 2018, [Online]. Available: Seminar Nasional Microwave, Antena dan Propagasi (SMAP) 2018 Unpak, ID #11%0AAnalisa
- [24] W. Hidayat, “Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Pada PLTA Wonogiri,” pp. 1–16, 2021.