



---

## ANALISIS PENGARUH KETEBALAN MAGNET DAN JUMLAH LILITAN TERHADAP KARAKTERISTIK GENERATOR MAGNET PERMANEN 18 SLOT 16 POLE

Abdurahman Diar<sup>1)</sup>, Zulfatri Aini<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau  
Jl. HR. Soebrantas Km. 15 Simpang Baru, Pekanbaru  
Email : [abdurahman.diar@gmail.com](mailto:abdurahman.diar@gmail.com)

Received: June 19, 2023 Accepted: July 04, 2023

### Abstrak

Energi angin di Indonesia memiliki potensi yang besar sehingga perlu dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik dalam rangka transisi energi. Namun, kecepatannya yang tergolong menengah-rendah merupakan tantangan untuk memaksimalkan potensinya. Generator yang cocok digunakan adalah Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). Namun, PMSG yang digunakan saat ini memiliki efisiensi dan karakteristik yang masih rendah. Penelitian ini menggunakan parameter-parameter terbaik dari penelitian-penelitian sebelumnya dan menambahkan pembaruan pada ketebalan magnet dan jumlah lilitan agar dapat menghasilkan PMSG berkarakteristik tinggi. Peneliti melakukan perancangan dan pengujian melalui simulasi dengan bantuan software Magnet Infolytica dengan metode Finite Element Method (FEM). Nilai hasil simulasi diolah menggunakan Microsoft Excel untuk menghasilkan nilai daya input, daya output dan efisiensi. Variasi ketebalan magnet yang digunakan adalah 3 mm, 6 mm, dan 9 mm. Variasi jumlah lilitan yang digunakan adalah 20, 30, dan 40 lilitan. Hasil simulasi penelitian menunjukkan bahwa karakteristik tertinggi yang dihasilkan adalah PMSG ketebalan 9 mm dan lilitan 40 dengan arus 26,59 A, tegangan 265,88 V, torsi -73,85 Nm, daya input 7.744,71 W dan daya output 7.266,01 W. Sedangkan efisiensi terbesar adalah PMSG ketebalan 9 mm dan lilitan 30 dengan arus 24,36 A, tegangan 243,58 V, torsi -61,52 Nm, daya input 6.441,46, daya output 6.101,13 dan efisiensi 94,70%.

Kata kunci: Fossil, Angin, Generator, PMSG, FEM.

### Abstract

*Wind energy in Indonesia has great potential so it needs to be utilized to produce electrical energy in the context of energy transition. However, its medium-low speed is a challenge to maximize its potential. A suitable generator for use is a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). However, the PMSG used today has low efficiency and characteristics. This study uses the best parameters from previous studies and adds updates to the magnetic thickness and number of windings to produce high-characteristic PMSG. Researchers design and test through simulation with the help of Magnet Infolytica software with Finite Element Method (FEM) method. The simulated values are processed using Microsoft Excel to produce input power, output power, and efficiency values. The variations in magnetic thickness used are 3 mm, 6 mm, and 9 mm. The variations in the number of windings used are 20, 30, and 40 windings. The results of the research simulation showed that the highest characteristics produced were PMSG thickness of 9 mm and winding 40 with a current of 26,59 A, voltage of 265,88 V, torque of -73,85 Nm, input power of 7.744,71 W and output power of 7.266,01 W. While the greatest efficiency is PMSG thickness of 9 mm and winding 30*

with a current of 24,36 A, voltage of 243,58 V, torque of -61,52 Nm, Input power 6.441,46, output power 6.101,13 and efficiency 94,70%.

Keyword: Fossil, Wind, Generator, PMSG, FEM.

## PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan primer yang menjadi faktor penunjang setiap kegiatan manusia mulai dari kegiatan industri, rumah tangga, pendidikan, bisnis, dan sebagainya. Sampai saat ini kebutuhan energi listrik Indonesia masih ditanggungjawab oleh PLN dengan mayoritas memanfaatkan sumber energi dari bahan bakar fosil. *Outlook Energi Indonesia 2019* menyatakan bahwa 86% sumber energi listrik tahun 2018 berasal dari energi fosil (batubara, minyak bumi dan gas) [1]. Proses terbentuknya energi fosil memerlukan waktu jauh lebih lama dibandingkan waktu untuk menghabiskan ketersediaannya. Energi fosil juga menghasilkan emisi yang berdampak buruk bagi lingkungan dalam proses pembakarannya menjadi energi listrik. Dikarenakan hal tersebut, Indonesia perlu melakukan transisi energi dari energi fosil ke energi baru dan terbarukan (EBT) yang *sustainable* dan ramah lingkungan.

Berdasarkan keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1567K/21/MEM/2018 tentang Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2018 sampai dengan 2027 menyebutkan bahwa target bauran energi pembangkitan akhir tahun 2025 dengan klasifikasi Batu Bara 54,4%, EBT 23%, Gas 22,2%, dan BBM 0,4%[2]. Kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik sampai dengan tahun 2018 mencapai 64,5 GW atau naik sebesar 3% dibandingkan kapasitas tahun 2017, dengan posisi EBT telah mencapai 14% yaitu sebesar 8,8 GW. Indonesia memiliki potensi EBT yang besar untuk meningkatkan bauran EBT dalam pembangkit listrik Indonesia. Tercatat dalam *Indonesia Energi Outlook 2019*, potensi energi terbarukan Indonesia sebagai berikut; Tenaga Air 94,3 GW, Panas Bumi 28,5 GW, Bioenergi 32,6 GW, Surya 207,8 GW, Angin 60,6 GW, dan Energi Laut 17,9 GW[1].

Berdasarkan data tersebut, salah satu potensi EBT terbesar adalah energi angin.

Tercatat dalam Statistik PLN 2020 jumlah unit pembangkit PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) di Indonesia hingga tahun 2020 adalah 5 pembangkit[3]. 2 diantaranya milik PLN yaitu PLTB di daerah Sidrap 75 MW dan PLTB di daerah Jeneponto 60 MW[4]. Kementerian ESDM menilai pembangunan pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia masih kurang ekonomis. Hal tersebut disebabkan oleh kecepatan angin rata-rata di Indonesia berkisar 4 m/s hingga 5 m/s yang tergolong berkecepatan rendah ke menengah. Dikarenakan kecepatan angin yang rendah, maka diperlukan pengotimalisasian pada PLTB agar dapat menghasilkan output yang optimal. Salah satu komponen yang sangat mempengaruhi kinerja dan efisiensi PLTB adalah generator[5].

Pada penggunaan kincir angin dibutuhkan generator kecepatan rendah dengan efisiensi yang baik (*low speed*), maka Permanent Magnet Alternator (Generator yang memakai magnet permanen) memenuhi kualifikasi-kualifikasi tersebut, dan sejauh ini, generator tersebut adalah pilihan yang paling banyak dipilih dalam mendesain kincir angin kecil yang sukses untuk daerah-daerah dengan kecepatan angin rendah[6]. Pada pembangkit listrik tenaga angin, penggunaan *permanent magnet synchronous generator* (PMSG) merupakan salah satu opsi terbaik. Dengan memanfaatkan magnet permanen, generator tidak memerlukan eksitasi awal untuk pembangkitan[7]. PMSG memiliki tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan generator induksi, karena tidak ada rugi-rugi eksitasi yang dihasilkan sehingga banyak digunakan terutama untuk turbin angin[8]. PMSG dapat digerakkan pada rentang kecepatan operasi yang lebih luas dan memiliki fleksibilitas struktur rotor yang lebih besar daripada jenis generator lainnya. Selain itu, PMSG dapat memiliki dimensi yang lebih kecil daripada generator induksi (IG)[9].

Generator sinkron dapat bekerja dengan maksimal jika memiliki nilai efisiensi di atas 90% [10]. Disamping itu, hal lain yang dipertimbangkan untuk memilih dan menggunakan generator ialah spesifikasi atau karakteristik lain berupa tegangan, arus, dan daya output. Penelitian mengenai karakteristik PMSG 18S16P telah dilakukan sebelumnya oleh [11] yang menghasilkan nilai efisiensi tertinggi yaitu 73%, Tegangan 40,72 V, Arus 13,57 A, Daya Input 766,1 W dan Daya Output 606,9 W. Dan daya output tertinggi yang dihasilkan mencapai 1 KW. Penelitian [11] ini dilanjutkan oleh [12] untuk meningkatkan efisiensi dengan hasil efisiensi tertinggi sebesar 91%, Tegangan 25,26 V, Arus 5,05 A, Daya input 140,5 W dan Daya Output 131,22 W. Dari kedua penelitian tersebut dapat dilihat bahwa penelitian [12] memiliki efisiensi yang lebih tinggi dari pada penelitian [11], namun nilai tegangan, arus dan daya output pada penelitian [12] jauh lebih rendah daripada penelitian [11]. Efisiensi yang rendah disebabkan daya output yang dihasilkan tidak sebanding dengan daya input. Efisiensi pada penelitian [12] yang cukup besar memiliki nilai daya yang kecil, dikarenakan efisiensi adalah perbandingan daya output dan daya input tanpa memperhatikan besarnya nilai daya tersebut. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan yang bukan hanya dapat menghasilkan nilai karakteristik yang besar namun dengan efisiensi yang juga tinggi.

Dalam rangka menghasilkan peningkatan karakteristik dan efisiensi, telah dilakukan penelitian sebelumnya oleh [13]. Penelitian ini melakukan pengujian terhadap perbedaan jumlah kutub dan ukuran teeth. Penelitian ini menghasilkan generator optimal yaitu 18 slot 16 pole (18S16P) dan ukuran teeth 11 mm dengan efisiensi 73%, tegangan 204,65 V, dan torsi cogging yang kecil dengan nilai 9,07 Nm. Penelitian lainnya dilakukan oleh [9]. Penelitian ini melakukan pengujian terhadap struktur rotor yang berbeda untuk menghasilkan struktur rotor yang sesuai untuk PMSG turbin angin skala kecil. Penelitian ini menghasilkan bahwasanya struktur IPM (*Inset Permanent Magnet*) termagnetisasi tangensial dengan lebar magnet 33,9 mm paling sesuai untuk

mencapai ukuran yang kompak. Di sisi lain, struktur SPM (*Surface Permanent Magnet*) dengan *pole pitch* 90% ditemukan paling cocok untuk efisiensi tinggi, tegangan rendah, dan daya output tinggi. Penelitian PMSG lainnya juga dilakukan oleh [14]. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan metode *winding* lilitan stator untuk melihat metode *winding* yang dapat menghasilkan tegangan yang lebih maksimal pada PMSG 18 Slot 8 Pole. Pada penelitian ini, metode *winding* Kombinasi CW (*Clockwise*) - CCW (*Counter Clockwise*) menghasilkan tegangan terbesar yaitu 206,05 V dan metode *winding* Searah CW - CW hanya menghasilkan tegangan sebesar 184,8 V.

Untuk meningkatkan performa serta keluaran generator, peneliti lainnya melakukan percobaan pada fenomena induksi elektromagnetik pada PMSG. Pada penelitian [15] dilakukan pengujian pengaruh perbedaan material dan ketebalan magnet permanen terhadap *Back EMF* (*Electromotive Force*) dan KE (Konstanta EMF) pada PMSG 12 Slot 8 Pole. Pada penelitian ini jenis material magnet PM12 Br 1.2 mur 1.0 dengan ketebalan 6 mm mendapatkan nilai tertinggi yaitu *Back EMF* sebesar 21,13 V dan nilai KE sebesar 0,20 Vs/rad. Penelitian yang melakukan percobaan pengaruh penambahan jumlah lilitan dan kecepatan putar rotor terhadap karakteristik PMSG 18 Slot 16 Pole juga telah dilakukan [16]. Penelitian ini mendapatkan nilai tertinggi yaitu Efisiensi 80,9 %, Tegangan 138,3 V, Arus 13,83 A, Daya Input 2.392,37 W, dan Daya Output 1.956,04 W dengan jumlah lilitan sebanyak 75 dan kecepatan putar 1.500 rpm. Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, ketebalan magnet dan jumlah lilitan sangat berpengaruh terhadap karakteristik dan efisiensi PMSG. Hal ini disebabkan efisiensi dan keluaran generator dipengaruhi oleh tegangan induksi yang bergantung kepada fluks magnet [5][12][17]. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang dapat menghasilkan nilai karakteristik yang besar dan memiliki efisiensi yang tinggi dengan melakukan percobaan variasi ketebalan magnet dan jumlah lilitan.

Beberapa metode yang digunakan dalam penelitian generator diantaranya *Try and Error*, EMCM

(*Equivalent Magnetic Circuit Method*) dan FEM (*Finite Element Method*). *Try and Error* merupakan metode dalam meneliti generator dengan cara membuat secara manual *prototype* generator dan diberikan perilaku variabel yang ditentukan. Pengukuran dan pengujian pada metode ini juga dilakukan secara manual menggunakan alat ukur [18]. Kekurangan metode ini adalah memerlukan biaya, bahan material, dan alat ukur. Disamping itu metode ini tidak dapat memperhatikan sebaran fluks atau fenomena elektromagnetik pada jenis material yang diinginkan secara presisi. EMCM merupakan metode yang menggunakan sistem perhitungan cepat dan sederhana. Namun metode ini terlalu bergantung pada pengalaman desain empiris, seperti koefisien kebocoran fluks, faktor reaksi jangkar, dan lain-lain. Sementara itu, dalam keadaan tertentu, EMCM tidak kompeten untuk analisis dan desain PMSG. Misalnya, EMCM tidak dapat digunakan untuk mempelajari torsi *cogging* PMSG dengan *slot* stator fraksional [19]. Dibandingkan kedua metode tersebut, metode yang cocok digunakan pada penelitian ini adalah *Finite Element Method* (FEM). FEM merupakan metode yang dapat digunakan untuk menghitung distribusi dari medan elektromagnetik secara kompleks dan sudah terbukti secara efektif. Metode ini dapat melakukan analisa distribusi fluks magnet yang berasal dari magnet permanen seperti menghitung beberapa parameter seperti *torsi cogging*, *armature*, dan nilai induktansi [20]. Dengan menggunakan FEM, banyak kurva dan data desain seperti tegangan output PMSG, koefisien fluks kebocoran tanpa beban, torsi *cogging*, dan lainnya dapat diperoleh dan digunakan untuk mendesain PMSG. Oleh karena itu, penelitian ini akan menganalisis pengaruh dari ketebalan magnet dan jumlah lilitan terhadap karakteristik PMSG 18 Slot 16 Pole menggunakan metode FEM dengan bantuan aplikasi *MagNet Infolytica*.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan melakukan studi pustaka, yaitu mengkaji jurnal-jurnal dari penelitian

terkait yang telah dikumpulkan. Setelah melakukan studi literatur, lanjutkan dengan pengumpulan data. Mulai dari data material hingga data dimensi agar dapat membuat model generator magnet permanen. Hal ini dilakukan agar bagian-bagian generator seperti stator, rotor, kumparan, magnet, celah udara, dan kotak udara dapat dimodelkan secara spesifik. Langkah selanjutnya adalah mendesain PMSG 18 slot 16 pole dengan bantuan software *Magnet Infolytica*. Pada tahap desain, parameter variasi yang akan dipelajari, yaitu ketebalan magnet dan jumlah belitan, juga dimasukkan. Pada tahap ini, pembuatan *circuit* juga dilakukan termasuk membuat 3 fasa, membuat penyearah gelombang penuh, dan pembebanan.

Setelah desain selesai, tahap selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan FEM. Agar simulasi dapat dijalankan, perlu dilakukan penyesuaian *motion* dengan kecepatan putar 1.000 rpm. Simulasi dijalankan dengan *Solving 2D with Motion*. Simulasi menghasilkan nilai tegangan, arus, dan torsi. Selanjutnya, data simulasi diolah menggunakan persamaan yang ada untuk mendapatkan nilai karakteristik lainnya, yaitu daya input, daya output, dan efisiensi. Selanjutnya melakukan analisis hasil yang diperoleh dilakukan untuk melihat apakah eksperimen dapat mencapai tujuan penelitian. Pembahasan juga dilakukan untuk melihat kesesuaian eksperimen dengan teori-teori yang ada dalam memperoleh solusi dari penelitian. Tahap menarik kesimpulan adalah yang terakhir dalam penyelidikan ini.

### 1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yang bersumber dari jurnal atau penelitian yang terkait dengan spesifikasi PMSG. Data pada penelitian ini terbagi menjadi dua yaitu data parameter desain PMSG dan data variasi yang akan dilakukan pada penelitian ini. Data spesifikasi PMSG yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

#### a. Spesifikasi PMSG

Tabel 1. Spesifikasi PMSG

No	Elemen	Keterangan
1	<i>Slot</i>	18
2	<i>Pole</i>	16
3	Dimensi Generator	220 mm x 220 mm x 80 mm
4	Lebar <i>Teeth</i> Stator	11 mm
5	Jenis Struktur Rotor	<i>Surface Permanent Magnet (SPM)</i>
6	Material Inti Besi Stator dan Rotor	<i>Carpenter : Silicon Steel</i>
7	Material Magnet	<i>PM 12: Br 1.2 mur 1.0</i>
8	Material Lilitan	<i>Copper: 5.77e7 Siemens/meter</i>
9	Material <i>Air Box</i>	<i>Air</i>
10	Material <i>Air Gap</i>	<i>Air</i>

Penggunaan 18 *Slot* 16 *Pole* didasari oleh penelitian sebelumnya seperti [21]. Hal ini dikarenakan kombinasi 18 *Slot* 16 *Pole* memiliki faktor belitan paling tinggi dibandingkan dengan kombinasi 18 *Slot* dan jumlah *pole* lainnya, yaitu sebesar 0,945 [22]. Faktor belitan dapat berfungsi untuk memaksimalkan efisiensi generator dan meminimalkan rugi-rugi yang disebabkan oleh harmonisa. Kombinasi 18 *Slot* dan 16 *Pole* juga mencapai nilai keluaran tertinggi pada penelitian [13] dengan lebar *teeth* stator yang digunakan sebesar 11 mm. Dimensi yang digunakan penelitian ini berdasarkan penelitian [11] yaitu 220 mm x 220 mm dengan ketinggian 80 mm, dimana ukuran tersebut menghasilkan keluaran terbaik dengan material inti besi stator rotor yang digunakan yaitu *Carpenter : Silicon Steel*. Jenis Struktur yang digunakan pada penelitian ini adalah SPM yaitu permanen magnet terletak pada permukaan inti besi rotor [9]. Material magnet yang digunakan pada penelitian ini adalah PM 12: Br 1.2 mur 1.0 dikarenakan material ini menghasilkan tegangan induksi (Back EMF) tertinggi pada penelitian [15] dengan ketebalan 6 mm dan menghasilkan efisiensi terbesar pada penelitian [12]. Konfigurasi lilitan yang digunakan adalah dengan kombinasi variasi arah lilitan dengan nilai terbaik pada penelitian [23][24]. Data variasi ketebalan magnet dan jumlah lilitan yang digunakan ditunjukkan pada tabel 2.

Penggunaan variasi ketebalan magnet didasari dengan penelitian [15]. Pada penelitian tersebut dilakukan pengujian PMSG 12S8P dengan variasi jenis material dan ketebalan magnet sebesar 3 mm dan 6 mm. Namun pada penelitian ini generator yang digunakan PMSG 18S16P dengan

penambahan variasi ketebalan magnet 9 mm. Sedangkan penggunaan variasi jumlah lilitan didasari oleh penelitian [16]. Penelitian tersebut menunjukkan setiap penambahan jumlah lilitan akan memperbesar nilai keluaran generator termasuk efisiensi. Pada penelitian tersebut dilakukan pengujian PMSG 18S16P dengan variasi kecepatan putar dan jumlah lilitan sebanyak 50, 75 dan 100 lilitan. Namun, pada penelitian ini PMSG 18S16P yang digunakan memiliki dimensi yang berbeda. Untuk mendapatkan jumlah lilitan yang cocok dengan generator yang digunakan, agar dapat menghasilkan nilai terbaik, peneliti menguji jumlah lilitan yang berbeda yaitu sebanyak 20, 30, 40 lilitan. Selain untuk mendapatkan keluaran terbaik, hal ini dilakukan untuk menghindari ketidakcocokan jumlah lilitan pada generator yang digunakan. Akan tetapi, percobaan jumlah lilitan penelitian [16] akan tetap dilakukan juga.

## 2. Perancangan PMSG 18S16P

Langkah berikutnya pada penelitian ini adalah melakukan perancangan PMSG 18S16P. Dalam melakukan perancangan PMSG, diperlukan alat, bahan dan tahapan sebagai berikut:

### a. Alat dan Bahan

Dalam menjalankan penelitian ini, dibutuhkan alat yaitu sebuah Laptop yang telah terpasang didalamnya *Software Magnet Infolytica 7.5 Trial Edition*, yang berguna untuk memudahkan proses perancangan dan juga memudahkan proses simulasi generator dengan menggunakan metode FEM. *Software Microsoft Excel* juga digunakan untuk menghitung hasil simulasi sehingga dapat menghasilkan nilai karakteristik lainnya. Bahan yang digunakan pada penelitian ini

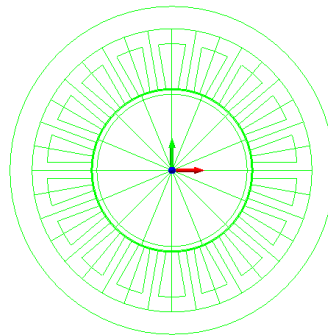
yaitu data yang didapatkan dari proses pengumpulan data yaitu spesifikasi generator, variasi ketebalan magnet dan variasi jumlah lilitan termasuk data materialnya.

b. Perancangan PMSG

Generator yang akan dirancang ialah PMSG 18S16P yaitu generator yang memiliki 18 buah kumparan pada stator dan 16 buah kutub magnet permanen pada rotor. Perancangan ini dilakukan menggunakan *Software MagNet Infolyca* dengan 9 kombinasi variasi ketebalan magnet dan jumlah lilitan yang berbeda sehingga akan 9 desain generator yang berbeda pula. Generator diberikan beban

sebesar 10 ohm dan dijalankan simulasinya dengan cara *Solve 2D with Motion* dengan kecepatan putar 1.000 rpm, sehingga dapat menghasilkan nilai arus. Berikut langkah-langkah perancangan PMSG 18S16P:

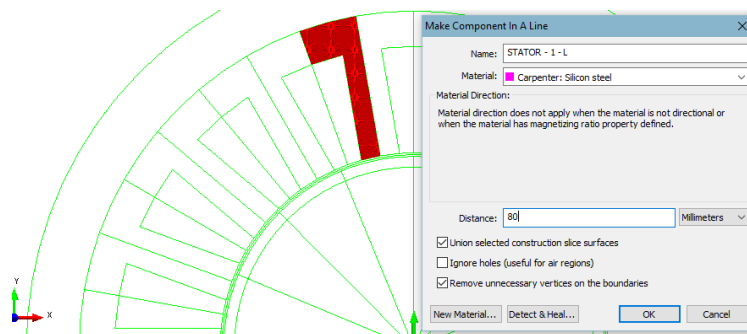
- 1) Langkah awal dalam melakukan perancangan PMSG ialah dengan membuat garis desain. Garis desain yang dibuat meliputi *air box*, stator, ruang lilitan, *air gap*, magnet permanen dan rotor. Pembuatan garis desain bertujuan untuk memudahkan proses definisi material. Pada tahapan ini, variasi ketebalan magnet juga digambarkan.



Gambar 1. Garis Desain PMSG 18S16P ketebalan magnet 3mm

- 2) Setelah membuat garis desain, area yang ingin didefinisikan materialnya dipilih. Lalu material dibuat seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Area stator dimasukkan materialnya menggunakan

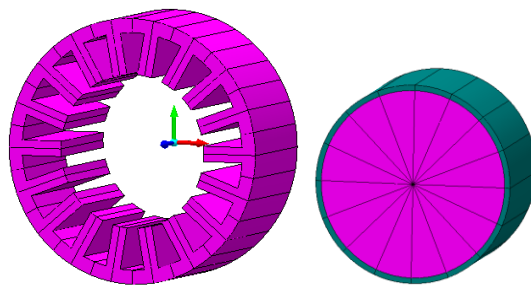
*Carpenter: Silicon Steel*. Selanjutnya pembuatan material yang digunakan disesuaikan dengan spesifikasi PMSG yang telah ditentukan.



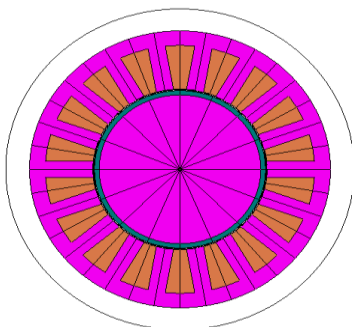
Gambar 2. Pembuatan Komponen Stator

Gambar 3 dan gambar 4 menunjukkan struktur stator dan rotor yang dihasilkan setelah pembuatan komponen. Setelah itu,

pada slot stator diberikan material *coil* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.

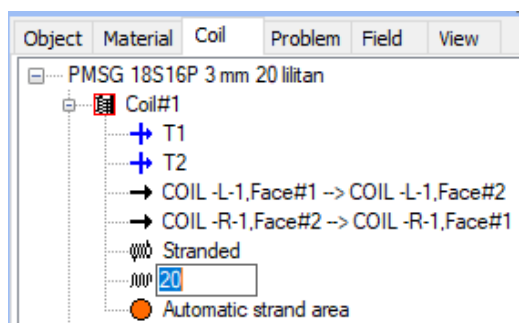


Gambar 3. Struktur Stator (kiri) dan Struktur Rotor dengan ketebalan magnet 3 mm (kanan)



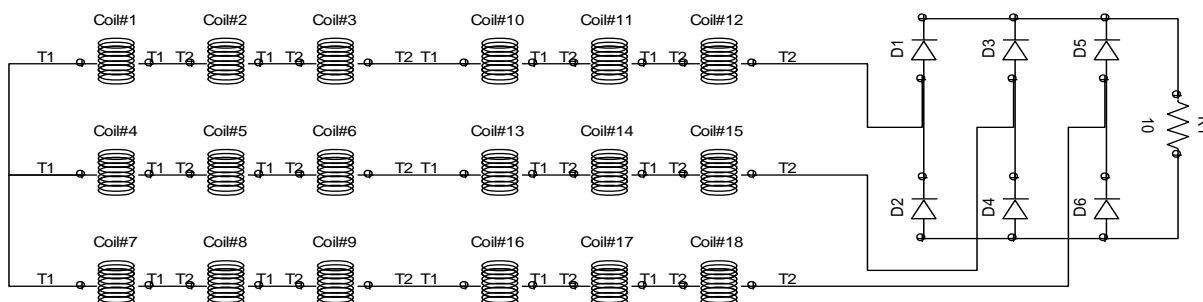
Gambar 4. PMSG dengan Komponen Coil

- 3) Tahapan berikutnya ialah mengatur jumlah lilitan yang digunakan sesuai variasi yang telah ditentukan. Lilitan yang digunakan berjumlah 20, 30 dan 40 lilitan.



Gambar 5. Mengatur Coil 20 Lilitan

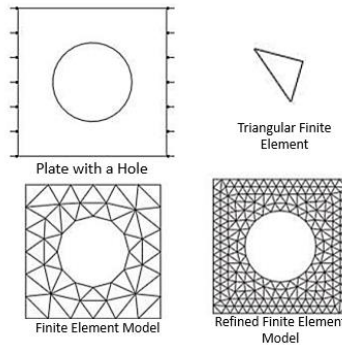
- 4) Dikarenakan penelitian ini membutuhkan data karakteristik seperti arus, daya dan efisiensi maka rangkaian pembebanan perlu dibuat agar karakteristik PMSG 18S16P didapatkan. Hambatan yang digunakan pada rangkaian ini yaitu sebesar 10 ohm.



Gambar 6. Circuit / Rangkaian Pembebanan PMSG 18S16P

5) Tahapan terakhir pada perancangan dan perancangan PMSG 18S16P menggunakan FEM dengan bantuan aplikasi *MagNet Infolytica* adalah pengaturan *Finite Element Mesh*. Dalam metode analisis elemen hingga, model akan dibagi menjadi jaring-jaring elemen (*Element Mesh*). Bidang

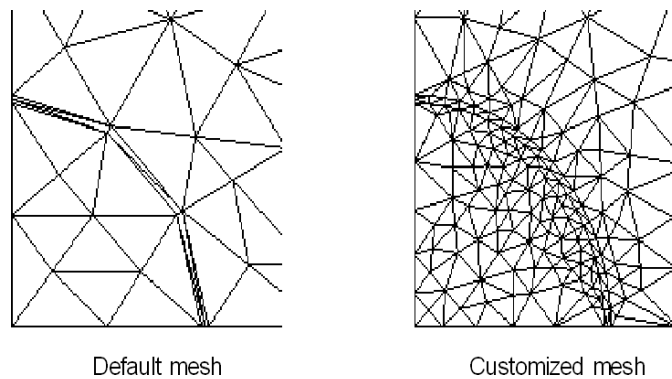
(*field*) di dalam setiap elemen direpresentasikan oleh persamaan polinomial dengan koefisien yang tidak diketahui. Analisis elemen hingga adalah solusi dari himpunan persamaan untuk koefisien yang tidak diketahui.



Gambar 7. Contoh *Element Mesh* pada sebuah pelat dengan lubang ditengahnya[14]

Keakuratan solusi bergantung pada sifat *field* dan ukuran jaring elemen. Pada bidang atau *field* dimana arah atau besarnya bidang berubah dengan cepat, akurasi tinggi membutuhkan elemen kecil atau orde polinomial tinggi (atau kombinasi

keduanya) [25]. Semakin banyak jaring elemen atau bagian-bagian kecil pada sebuah bidang yang dianalisis, maka tingkat akurasinya akan semakin presisi [14][26].

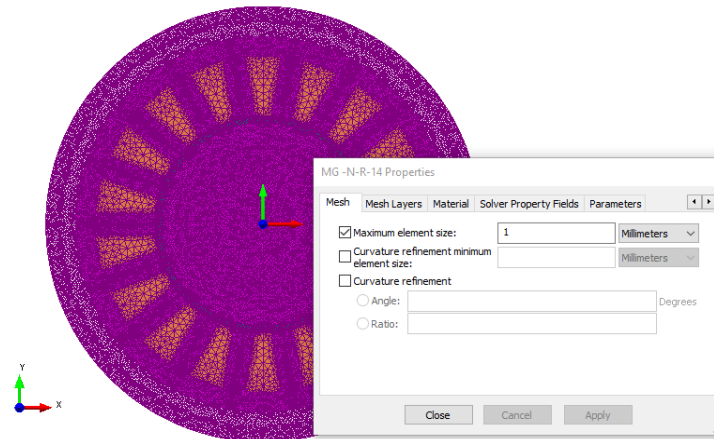


Gambar 8. Perbandingan jaring bawaan dan jaring yang diatur untuk akurat[25]

Pada penelitian ini, untuk mendapatkan jaring elemen yang kecil sehingga dapat menghasilkan jumlah jaring elemen yang banyak, peneliti mengatur mesh pada setiap

bidang material sebesar 1 mm. *Meshing* PMSG 18S16P pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 9.





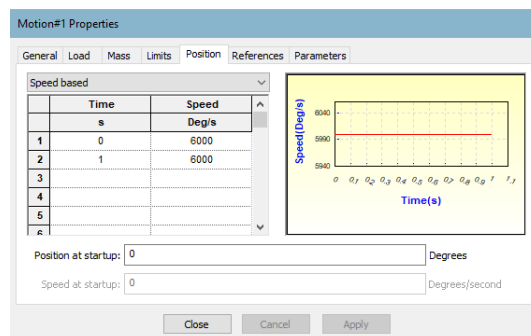
Gambar 9. Element Mesh PMSG 18S16P

c. Simulasi PMSG 18S16P

Penelitian ini dilanjutkan dengan menjalankan simulasi dari rancangan PMSG 18S16P yang sudah diselesaikan. Simulasi berguna untuk mendapatkan nilai tegangan, arus dan torsi. Nilai-nilai karakteristik akan diolah melalui perhitungan untuk menghasilkan nilai

karakteristik lainnya seperti daya input, daya output dan efisiensi.

Simulasi akan dijalankan dengan menu *Transient 2D with Motion* pada aplikasi *MagNet Infolytica*. Oleh karena itu, kecepatan putar dari rotor perlu diatur dengan cara mengatur *motion* dengan kecepatan putar 1.000 rpm atau 6.000 deg/s.



Gambar 10. Pengaturan Motion

*MagNet* menggunakan metode elemen hingga untuk memecahkan persamaan medan elektromagnetik. Ini membagi model 2D menjadi elemen segitiga kecil, membentuk jaring yang menutupi seluruh wilayah. Bidang sebenarnya dalam setiap elemen didekati dengan polinomial dalam bentuk nilai bidang pada sejumlah kecil titik, dan *MagNet* memecahkan nilai bidang yang tidak diketahui pada titik ini untuk semua elemen. Misalnya, polinomial orde pertama hanya memberikan interpolasi linier antara nilai bidang di simpul segitiga [27].

Aplikasi *MagNet* memecahkan persamaan Maxwell untuk menemukan medan magnet di dalam rancangan. Solusinya dapat berupa Magnetostatik, Transient atau Transient dengan gerakan untuk model 2D atau 3D. *MagNet* juga menawarkan proses adaptasi yang secara otomatis mengidentifikasi dan menyempurnakan area *mesh* yang paling membutuhkan penyempurnaan untuk meningkatkan kualitas solusi [25].

Persamaan Maxwell adalah serangkaian empat persamaan diferensial parsial yang menjelaskan fenomena elektromagnetik, seperti medan listrik dan medan magnetik, dan

bagaimana mereka berinteraksi dengan benda-benda bermuatan listrik dan arus listrik. Metode elemen hingga adalah teknik numerik yang digunakan untuk memecahkan persamaan diferensial parsial dalam berbagai disiplin ilmu sehingga persamaan maxwell digunakan dalam metode ini [27][28].

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times H - \frac{\partial D}{\partial t} = J \quad (4)$$

Pada penelitian ini akan melihat pengaruh dari variasi jumlah lilitan stator dan variasi ketebalan magnet permanen terhadap karakteristik PMSG 18S16P. Berikut adalah persamaan terkait variasi yang digunakan pada penelitian ini:

- 1) Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi [29]

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

$\varepsilon$  = GGL induksi (Volt)

$N$  = Jumlah Lilitan

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

$\Delta t$  = Perubahan Waktu (s)

- 2) Flux Linkage [11]

$$\lambda = N \cdot \Phi \quad (6)$$

$\lambda$  = Flux Linkage / Tautan Fluks (Wb)

$N$  = Jumlah Lilitan

$\Phi$  = Fluks Magnet (Wb)

- 3) Densitas Magnet Maksimum [30]

$$B_{max} = Br \cdot \frac{lm}{lm + \delta}$$

$Br$  = Medan Magnet Maksimum (Tesla)

$lm$  = Tebal Magnet (cm)

$\delta$  = Jarak antara rotor dan stator (cm)

- 4) Kerapatan Fluks Magnetik [30]

$$\Phi_{max} = B_{max} \cdot Am \quad (8)$$

$\Phi_{max}$  = Fluks Maksimum (Wb)

$B_{max}$  = Medan Magnet Maksimum (Tesla)

$$Am = \text{Luas Magnet (cm}^2\text{)}$$

Simulasi PMSG 18S16P dijalankan untuk mendapatkan nilai tegangan, arus dan torsi. Karakteristik lainnya seperti daya input, daya output, dan efisiensi didapatkan dengan cara mengolah hasil keluaran simulasi menggunakan bantuan aplikasi *Microsoft Excel*. Berikut adalah persamaan rumus karakteristik generator.

- 1) Tegangan (GGL atau EMF) [11]

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} \quad (9)$$

$\varepsilon$  = Tegangan Induksi (Volt)

$\Delta\lambda$  = Perubahan Flux Linkage (Wb)

$\Delta t$  = Perubahan waktu (s)

- 2) Arus [31]

$$I = \frac{V}{R} \quad (10)$$

$I$  = Arus (A)

$V$  = Tegangan (Volt)

$R$  = Beban ( $\Omega$ )

- 3) Torsi [11][29]

$$\tau = F \cdot r \quad (11)$$

$\tau$  = Torsi (Nm)

$F$  = Gaya sentrifugal dari benda yang berputar (Nm)

$r$  = Jari-jari (m)

- 4) Daya Input [32]

$$Pin = \tau \cdot \omega \quad (12)$$

$Pin$  = Daya Input (Watt)

$\tau$  = Torsi (Nm)

$\omega$  = Kecepatan Putar (rad/s)

- 5) Daya Output [31]

$$Pout = V \cdot I$$

$Pout$  = Daya Output (Watt)

$V$  = Tegangan (Volt)

$I$  = Arus (A)

- 6) Efisiensi [31] (7)

$$\eta = \frac{Pout}{Pin} \times 100\%$$

$\eta$  = Efisiensi (%)

$Pout$  = Daya Output (Watt)

$Pin$  = Daya Input (Watt)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Hasil

Penelitian ini melakukan simulasi eksperimental pengaruh variasi ketebalan magnet 3 mm, 6 mm dan 9 mm dikombinasikan dengan jumlah lilitan 20 lilitan, 30 lilitan, dan 40 lilitan pada PMSG 18S16P. Simulasi yang dilakukan menggunakan hambatan 10 ohm dengan kecepatan putar 1.000 rpm. Dari simulasi PMSG yang dilakukan peneliti mendapatkan nilai tegangan, arus dan torsi. Namun, untuk karakteristik generator lainnya yaitu daya input, daya output dan efisiensi didapatkan dari perhitungan manual menggunakan rumus yang ada dengan bantuan software *Microsoft Excel*.

Pengujian PMSG 18S16P pada penelitian ini dengan variasi jumlah lilitan lainnya [16] yaitu sebanyak 50, 75 dan 100 lilitan menghasilkan nilai karakteristik yang semakin menurun dikarenakan terjadinya kejenuhan/saturasi magnetis pada *coil*

stator. Pada lilitan 50, daya output yang dicapai sebesar 3.878 W dengan efisiensi 91%. Pada lilitan 75, daya output yang dicapai hanya sebesar 2.200 W dan efisiensi sebesar 86%. Pada jumlah lilitan 100, daya output yang dicapai hanya sebesar 1.391 W dengan efisiensi 74%. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah lilitan yang digunakan pada penelitian tersebut tidak cocok diaplikasikan pada generator penelitian ini. Dikarenakan tujuan penelitian ini untuk mendapatkan PMSG 18S16P terbaik untuk menjawab masalah, dan mengingat batasan masalah, maka peneliti hanya akan melanjutkan penelitian dengan jumlah lilitan 20, 30, dan 40. Dan menganggap pengujian lainnya sebagai *error* pada percobaan. Hasil penelitian ditampilkan pada Tabel 3-5.

- a. Hasil simulasi variasi jumlah lilitan pada ketebalan magnet 3 mm.

**Tabel 3. Hasil simulasi dan perhitungan variasi jumlah lilitan pada ketebalan 3 mm**

Jumlah Lilitan (N)	Arus (A)	Tegangan (V)	Torsi (Nm)	Daya (W)		Efisiensi (%)
				Input	Output	
20	15,84	158,40	-27,26	2.855,17	2.575,04	90,19%
30	20,56	205,57	-44,67	4.678,17	4.358,83	93,17%
40	20,80	207,99	-45,72	4.787,98	4.430,97	92,54%

- b. Hasil simulasi variasi jumlah lilitan pada ketebalan magnet 6 mm

**Tabel 4. Hasil simulasi dan perhitungan variasi jumlah lilitan pada ketebalan 6 mm**

Jumlah Lilitan (N)	Arus (A)	Tegangan (V)	Torsi (Nm)	Daya (W)		Efisiensi (%)
				Input	Output	
20	17,83	178,29	-34,44	3.606,66	3.268,19	90,62%
30	23,73	237,34	-58,61	6.137,23	5.792,95	94,39%
40	25,59	255,87	-68,96	7.221,91	6.730,76	93,20%

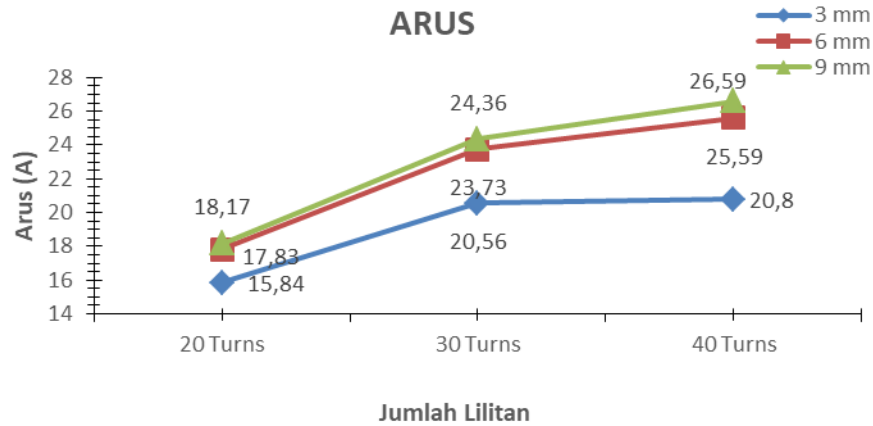
- c. Hasil simulasi variasi jumlah lilitan pada ketebalan magnet 9 mm

**Tabel 5. Hasil simulasi dan perhitungan variasi jumlah lilitan pada ketebalan 9 mm**

Jumlah Lilitan (N)	Arus (A)	Tegangan (V)	Torsi (Nm)	Daya (W)		Efisiensi (%)
				Input	Output	
20	18,17	181,66	-35,75	3.743,31	3.396,23	90,73%
30	24,36	243,58	-61,52	6.442,46	6.101,13	94,70%
40	26,59	265,88	-73,85	7.733,71	7.266,01	93,95%

### 2. Pembahasan

- a. Arus

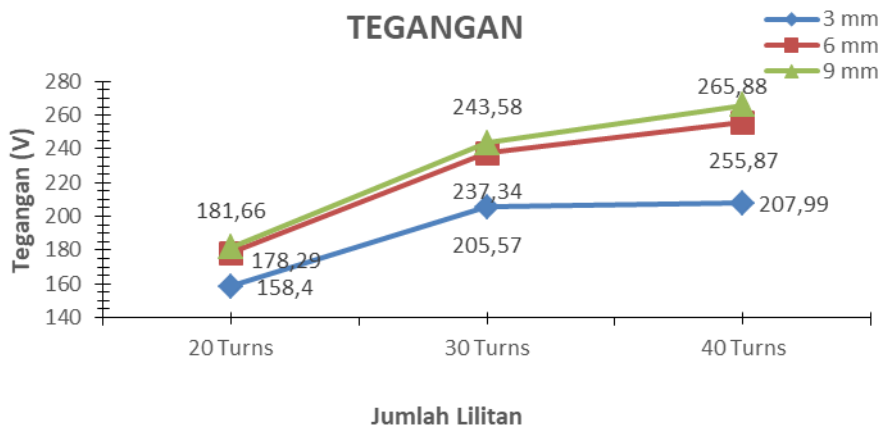


Gambar 11. Pengaruh Perubahan Ketebalan Magnet dan Jumlah Lilitan terhadap Nilai Arus

Berdasarkan simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 11 bahwa semakin tebal magnet permanen yang digunakan maka semakin besar nilai arus yang dihasilkan. Dan semakin banyak jumlah lilitan maka semakin besar pula nilai arus yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan hukum induksi faraday, peningkatan lilitan akan membuat tegangan

induksi semakin besar. Peningkatan tegangan induksi menjadikan arus semakin besar pula setelah dilakukannya pembebanan terhadap generator. Semakin tebal magnet permanen juga mempengaruhi densitas magnet dan kerapatan fluks sehingga berpengaruh juga terhadap keluaran arus.

b. Tegangan



Gambar 12. Pengaruh Perubahan Ketebalan Magnet dan Jumlah Lilitan terhadap Nilai Tegangan

Dapat diperhatikan pada gambar 12 bahwa nilai tegangan yang ditimbulkan akan semakin meningkat ketika nilai ketebalan magnet semakin besar. Begitu juga dengan jumlah lilitan, setiap bertambah jumlah lilitan yang digunakan akan menimbulkan tegangan yang semakin besar pula. Peningkatan nilai tegangan ini sesuai dengan hukum induksi faraday, dimana penambahan jumlah lilitan akan membuat tegangan induksi semakin

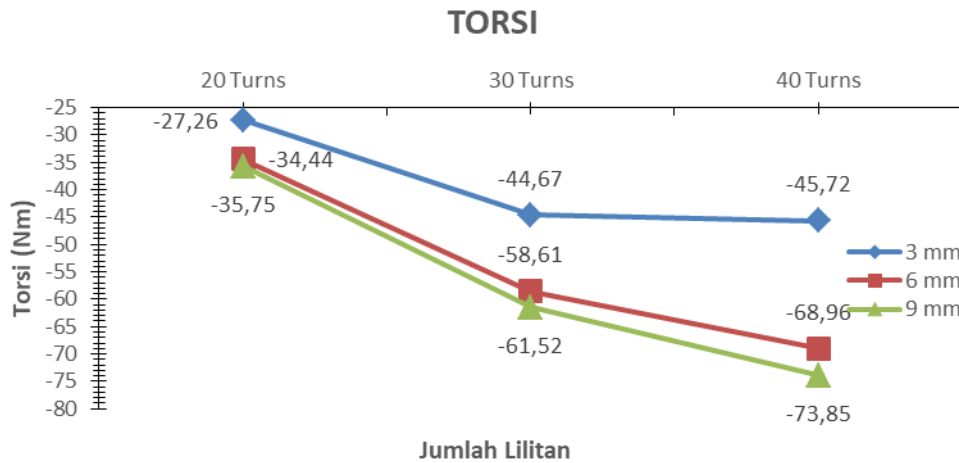
besar. Semakin tebal magnet permanen juga mempengaruhi densitas magnet dan kerapatan fluks sehingga berpengaruh juga terhadap tegangan yang dihasilkan.

c. Torsi

Torsi pada generator adalah besar torsi yang dibutuhkan untuk memutar poros. Berbeda halnya pada motor listrik. Pada motor listrik, torsi ialah kekuatan yang dihasilkan untuk

memutar poros. Perbedaan tersebut juga dapat dilihat dari positif atau negatifnya nilai torsi. Nilai torsi positif berarti torsi tersebut

dihasilkan layaknya motor, dan torsi bernilai negatif berarti torsi tersebut dibutuhkan untuk memutar generator.

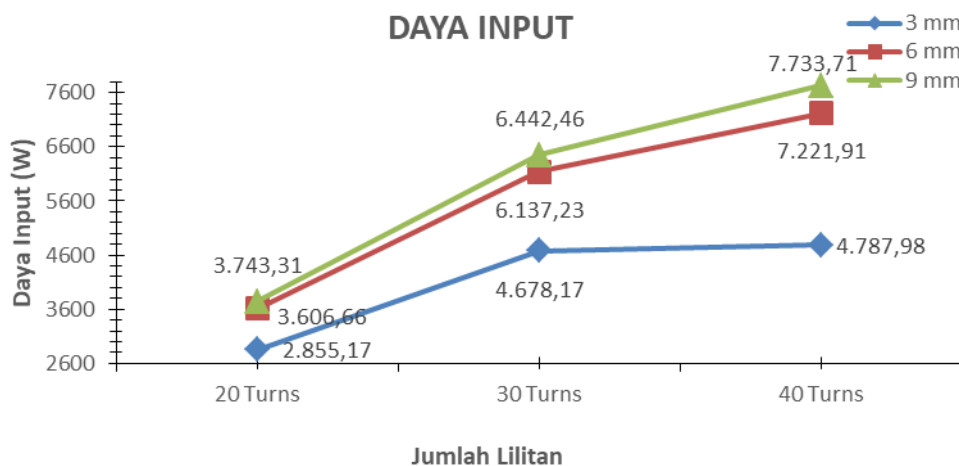


Gambar 13. Pengaruh Perubahan Ketebalan Magnet dan Jumlah Lilitan terhadap Nilai Torsi

Perbedaan besar nilai torsi dapat dilihat pada gambar 13. Gambar tersebut menunjukkan semakin tebal magnet yang digunakan generator maka nilai torsi juga akan semakin besar. Nilai torsi juga akan meningkat setiap penambahan jumlah lilitan yang digunakan pada PMSG. Bertambahnya lilitan dan semakin tebal magnet permanen mengakibatkan torsi yang dibutuhkan meningkat. Medan magnet yang semakin besar

akibat bertambah tebal magnet, akan semakin menimbulkan tarikan gaya magnet terhadap stator dan jumlah konduktor lilitan yang juga bertambah. Dikarenakan gaya tarikan magnet semakin besar, maka gaya sentrifugal yang dibutuhkan untuk memutar poros juga semakin besar. Oleh karena itu, torsi yang dibutuhkan pun semakin besar.

d. Daya Input



Gambar 14. Pengaruh Perubahan Ketebalan Magnet dan Jumlah Lilitan terhadap Nilai Daya Input

Pada gambar 14, grafik menunjukkan peningkatan pada nilai daya input setiap

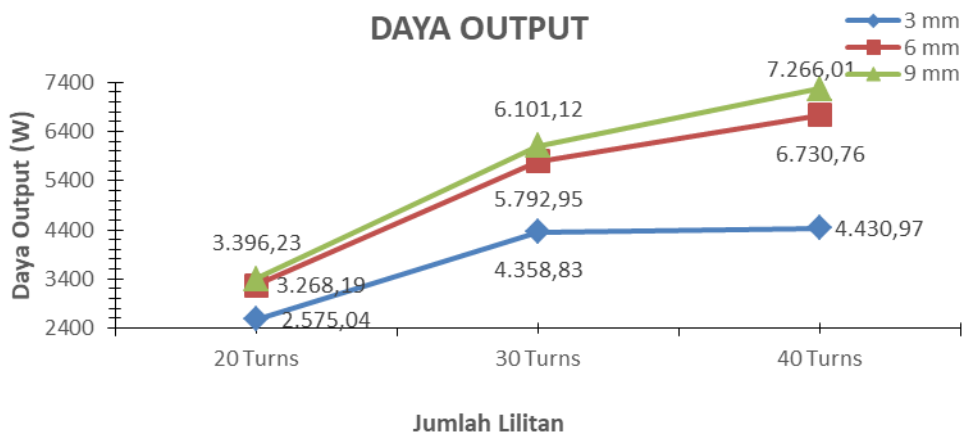
penggunaan magnet permanen yang lebih tebal. Jumlah lilitan yang diaplikasikan juga

mempengaruhi daya input. Yaitu setiap bertambahnya jumlah lilitan menambah nilai daya output sehingga lebih besar. Berdasarkan teori persamaannya, daya input dipengaruhi oleh torsi. Semakin besar torsi yang dibutuhkan, maka daya input PMSG juga semakin besar.

e. Daya Output

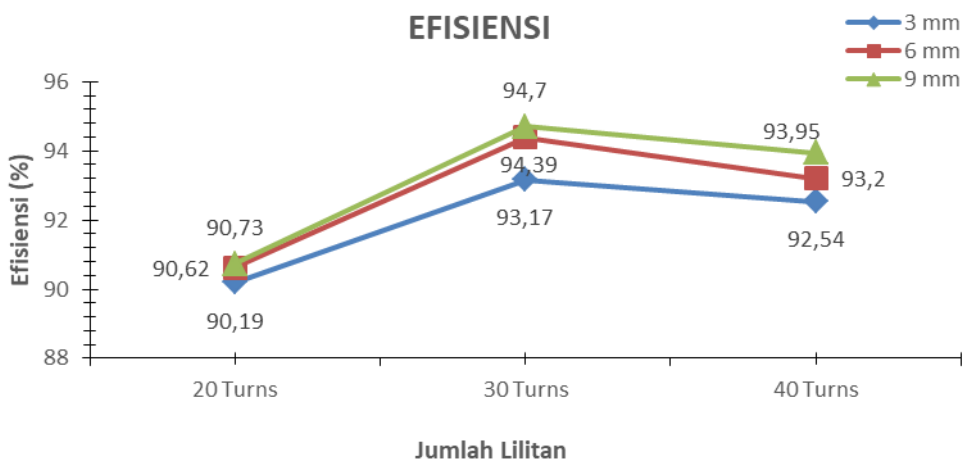
Ketebalan magnet dan jumlah lilitan mempengaruhi besarnya keluaran generator daya output seperti yang ditunjukkan pada

gambar 15. Nilai ketebalan magnet yang lebih besar, menyebabkan daya output yang lebih besar. Sama halnya dengan variasi jumlah lilitan, setiap jumlah lilitan bertambah maka daya output yang dihasilkan juga meningkat. Berdasarkan persamaannya, besar nilai daya output dipengaruhi oleh nilai tegangan dan arus. Jika nilai tegangan semakin besar, daya output akan meningkat. Begitupula dengan nilai arus, semakin besar nilai arus, maka akan semakin besar nilai daya output.



Gambar 15. Pengaruh Perubahan Ketebalan Magnet dan Jumlah Lilitan terhadap Nilai Daya Output

f. Efisiensi



Gambar 16. Pengaruh Perubahan Ketebalan Magnet dan Jumlah Lilitan terhadap Efisiensi

Nilai efisiensi didapatkan dari perhitungan daya output ( $P_{out}$ ) dibagi dengan nilai daya input ( $P_{in}$ ) lalu dikalikan dengan 100%. Gambar 16

menunjukkan nilai efisiensi PMSG dengan perubahan ketebalan magnet dan jumlah lilitan bervariasi. Untuk variasi ketebalan magnet,

semakin tebal magnet permanen yang digunakan PMSG, maka nilai efisiensi akan meningkat. Namun kenaikan tersebut tidak menjamin selalu terjadi pada kenaikan variasi yang digunakan. Hal ini disebabkan rugi-rugi yang terdapat pada generator. Disamping itu, variasi lilitan juga mempengaruhi nilai keluaran. Nilai efisiensi meningkat dengan signifikan dengan jumlah lilitan sebanyak 30 lilitan. Pada penelitian ini, efisiensi tertinggi diperoleh dari PMSG dengan ketebalan magnet 9 mm dan jumlah lilitan sebanyak 30 lilitan yaitu sebesar 94.70%.

### KESIMPULAN

Setelah melakukan simulasi dengan memvariasikan ketebalan magnet dan jumlah lilitan pada *Permanent Magnet Synchronous Generator 18 Slot 16 Pole* didapatkan hasil bahwa semakin tebal magnet dan semakin banyak jumlah lilitan maka semakin tinggi nilai keluaran. Berdasarkan hasil simulasi penelitian nilai akhir tertinggi yang dihasilkan adalah PMSG dengan ketebalan 9 mm dan lilitan 40 dengan arus 26,59 A, tegangan 265,88 V, torsi -73,85 Nm, daya input 7.744,71 W dan daya output 7.266,01 W. Sedangkan efisiensi terbesar adalah PMSG dengan ketebalan 9 mm dan lilitan 30 dengan arus 24,36 A, tegangan 243,58 V, torsi -61,52 Nm, daya input 6.442,46, daya output 6.101,13 dan efisiensinya sebesar 94,70%.

### DAFTAR RUJUKAN

- [1] Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, *Indonesia Energy Out Look 2019*. Jakarta: Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019.
- [2] Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik Nasional (RUPTL) 2018-2027*. Jakarta, 2018.
- [3] PT. PLN (Persero), *Statistik PLN 2021*. Jakarta: PT. PLN (Persero), 2021.
- [4] P3TKEBT ESDM, "Potensi Energi Angin Indonesia 2020," *Balai Besar Survei dan Pengujian Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi*, 2021.
- [5] I. B. F. Citarsa and I. A. S. Andyani, "Pengaruh Ketebalan Magnet Rotor terhadap Back EMF dan Efisiensi Permanent Magnet Synchronous Generator 12S8P," *Dielektrika*, vol. 9, no. 1, pp. 11–17, 2022.
- [6] H. Piggott, *Windpower Workshop: Building Your Own Wind Turbine*. 1997.
- [7] A. M. Soedjanaatmadja, F. C. A. Puspanegara, H. Hardiansyah, B. Nainggolan, and J. Marpaung, "Pengaruh Kecepatan Putar Terhadap Back emf Pada Permanent Magnet Synchronous Generator," *Pros. Semin. Nas. Tek. Mesin Politek. Negeri Jakarta*, pp. 123–128, 2019, [Online]. Available: <http://semnas.mesin.pnj.ac.id>.
- [8] M. O. Suhada and I. Yasri, "Aspek Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah," *Univ. Riau*, vol. 5, pp. 1–7, 2018.
- [9] H. Haraguchi, S. Morimoto, and M. Sanada, "Suitable Design of A PMSG for A Small-Scale Wind Power Generator," *Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, 2009, doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382892.
- [10] D. A. Fauzi, "Analisa Efisiensi Generator Pltu Pulang Pisau Pada Saat Pembebanan," *Univ. Kalimantan Muhammad Arsyad Al Banjari*.
- [11] 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.
- [12] T. D. Putri and Liliana, "Analisis Pengaruh Material Magnet Permanent Terhadap Karakteristik Generator Sinkron Radial 18 Slot 16 Pole," *J. POLEKTRO*, vol. 11, no. 1, pp. 45–50, 2022.
- [13] 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,” *Univ. Teknol. Yogyakarta*.
- [14] R. Pahlevi and D. B. Santoso, “Analisis Concentrated Winding Menggunakan Metode Clockwise dan Kombinasi pada PMSG 12S8P,” *Electr. - J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 16, no. 2, pp. 223–231, 2022.
- [15] 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.*, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/990/1/012006.
- [16] 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.
- [17] A. N. Hidayat, Suyitno, Daryanto, and P. S., “Pengaruh Jumlah Lilitan Kumbaran Stator Terhadap Kinerja Generator Magnte Permanen Fluks Aksial Satu Fasa,” *J. Electr. Vocat. Educ. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 28–31, 2020, doi: 10.21009/jevet.0022.06.
- [18] A. Indriani, “Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Kutub dan Jarak Celah Magnet Rotor Terhadap Performan Generator Sinkron Fluks Radial,” *Electr. - J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 62–71, 2015.
- [19] Z. Guo and L. Chang, “Fem Study On Permanent Magnet Synchronous Generators For Small Wind Turbines,” *IEEE*, no. May, pp. 641–644, 2005.
- [20] M. N. Kholis, “Rancangan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) 12 Slot 8 Pole dengan Menggunakan Software Magnet Infolytica 7.5,” *Univ. Muhammadiyah Surakarta*, pp. 5–19, 2020.
- [21] G. S. Budiman, “Desain Mini Generator Magnet Permanen Fluks Radial,” Pekanbaru, 2018. [Online]. Available: <http://repository.uin-suska.ac.id/15845/>.
- [22] J. R. Hendershot and T. Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors (Hendershot and Miller)*, vol. 37. Magna Physics Publications, 1994.
- [23] I. A. Albarohin and U. Latifa, “Analisa Pengaruh Perbedaan Winding terhadap Back EMF dan Ke pada PMSG 18s16p,” *CIRCUIT J. Ilm. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 2, p. 189, 2021, doi: 10.22373/crc.v5i2.9401.
- [24] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design Second Edition*, vol. 26, no. 3. USA: University of Maine, 1978.
- [25] D. Parrish, S. T. Schneider, J. Healey, K. Lunde, J. O. Conner, and S. Compton, *Getting Started Guide MagNet Version 7.5*. Canada: Documentation Department Infolytica Corporation, 2014.
- [26] S. Ningsih, “Metode Elemen Hingga Untuk Perpindahan Panas Konduksi Steady State pada Domain 2D dengan Menggunakan Elemen Segitiga,” *Saintifik*, vol. 7, no. 2, pp. 146–156, 2021, doi: 10.31605/saintifik.v7i2.336.
- [27] J. D. Edwards, *An Introduction to Magnet for Static 2D Modeling*. Canada: Documentation Department Infolytica Corporation, 2014.
- [28] D. A. Abibintar, Warindi, and W. B. Pramono, “Simulasi Medan Magnet Pada Generator Magnet Permanen Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *Univ. Islam Indones.*, 2019.
- [29] A. Nurdin, A. Azis, and R. A. Rozal, “Peranan Automatic Voltage Regulator Sebagai Pengendali Tegangan Generator Sinkron,” *J. Ampere*, vol. 3, no. 1, p. 163, 2018, doi: 10.31851/ampere.v3i1.2144.
- [30] H. Prasetijo, Ropiudin, and B. Dharmawan, “Generator Magnet Permanen Sebagai



Pembangkit Listrik Putaran Rendah Permanent,” *Din. Rekayasa*, vol. 8, no. 2, pp. 70–77, 2012.

- [31] N. Priyaningsih, “Analisis Efisiensi Generator Pada Wind Turbine,” *J. Edukasi Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 157–168, 2017, doi: 10.21831/jee.v1i2.17420.
- [32] A. M. Lestari, G. Jatisukamto, and A. Z. Muttaqin, “Analisis Efisiensi Pada Generator 12 Slot 8 Pole,” *J. Rotor*, vol. 11, no. April, pp. 35–38, 2018, [Online]. Available: <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/RTR/article/view/9098>.