

**SIMULASI PENGARUH VARIASI KOMBINASI *SLOT-POLE*
TERHADAP NILAI KARAKTERISTIK GENERATOR PMSG
1000 WATT UNTUK APLIKASI TURBIN ANGIN**

SKRIPSI

Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T)



Disusun Oleh:

ANDHIKA RIZKY ERSANWANI

NPM.3332170091

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
2023**

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya sebagai penulis skripsi berikut:

Judul : Simulasi Pengaruh Variasi Kombinasi *Slot-Pole* Terhadap
Nilai Karakteristik Generator PMSG 1000 Watt Untuk
Aplikasi Turbin Angin
Nama Mahasiswa : Andhika Rizky Ersanwani
NPM : 3332170091
Fakultas / Jurusan : Teknik / Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 16 Oktober 2022



Andhika Rizky Ersanwani

3332170091

LEMBAR PENGESAHAN

Dengan ini ditetapkan bahwa skripsi berikut :

Judul : Simulasi Pengaruh Variasi Kombinasi *Slot-Pole* Terhadap Nilai Karakteristik Generator PMSG 1000 Watt Untuk Aplikasi Turbin Angin
Nama Mahasiswa : Andhika Rizky Ersanwani
NPM : 3332170091
Fakultas / Jurusan : Teknik / Teknik Elektro

Telah diuji dan dipertahankan pada tanggal 9 Januari 2023 melalui Sidang Skripsi di di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon dan dinyatakan LULUS

Dewan Penguji

Tanda Tangan

Pembimbing I : Dr. Ir. Wahyuni Martiningsih, M.T.

Penguji I : Dr. Suhendar, S.Pd., M.T.

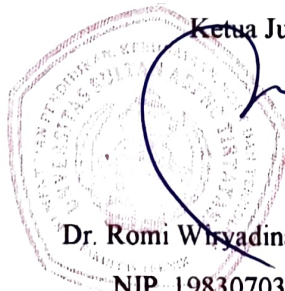
Penguji II : HM. Hartono, S.T., M.T.



Handwritten signatures of the examiners, including a date stamp '24/01/23'.

Mengetahui,

Ketua Jurusan



Dr. Romi Whyadinata, S.T., M.Eng.

NIP. 198307032009121006

PRAKATA

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan berkat dan rahmatNya sehingga terselesaikannya skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dengan rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Maka dari itu dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua dan keluarga besar atas do'a dan dukungannya baik secara moril dan materil.
2. Dr. Romi Wiryadinata, M. Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
3. Ceri Ahendriyanti, ST., M.Eng, selaku dosen pembimbing akademik.
4. Dr. Ir. Wahyuni Martiningsih, M.T, selaku dosen pembimbing skripsi yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi.
5. Sahabat dan teman-teman Teknik Elektro angkatan 2017 yang telah memberi dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap kepada Allah SWT agar berkenan membalas semua kebaikan untuk pihak yang telah membantu dan semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Cilegon, 16 Oktober 2022

Penulis

ABSTRAK

Andhika Rizky Ersanwani
Teknik Elektro

Simulasi Pengaruh Variasi Kombinasi *Slot-Pole* Terhadap Nilai Karakteristik Generator PMSG 1000 Watt Untuk Aplikasi Turbin Angin

Generator merupakan sebuah alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Penggerak generator dapat diperoleh dari energi terbarukan berupa angin atau air. Generator tersebut memiliki banyak variasi desain mulai dari pemilihan jenis lilitan, pemilihan material dan kombinasi jumlah *slot pole*. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui perbandingan pengaruh perubahan kombinasi *slot-pole* tersebut. Pengujian yang dilakukan yaitu mensimulasikan variasi desain *slot-pole* terhadap kurva karakteristik generator. Hasil desain *slot-pole* terbaik yaitu 12S8P dan 15S8P, dengan efisiensi berkisar antara 87% dan 85%, kemudian dengan daya keluaran yaitu 1377,56 W dan 1108,88 W. Nilai arus untuk model 12S8P yaitu 8,26 A dan model 15S8P yaitu 8,86 A. Nilai tegangan untuk model 12S8P yaitu 165,26 V dan model 15S8P yaitu 177,25 V. Nilai torsi untuk model 12S8P yaitu 20,37 Nm dan 15S8P yaitu 17,51 Nm.

Kata Kunci : *Slot, Pole*, Desain Generator

ABSTRACT

Andhika Rizky Ersanwani
Electrical Engineering

Simulation of the Effect of *Slot-Pole* Combination Variations on Characteristic Values for a 1000 Watt PMSG Genrator for Wind Turbine Applications

Generator is a device that can convert mechanical energy into electrical energy. Generator propulsion can be obtained from renewable energy in the form of wind or water. The generator has many design variations ranging from the selection of the type of *winding*, the selection of materials and the combination of the number of *pole* slots. The purpose of this study is to compare the effect of changing the *slot-pole* combination. The tests carried out are simulating the variation of the *slot-pole* design on the generator characteristic curve. The best *slot-pole* design results are 12S8P and 15S8P, with efficiencies ranging between 87% and 85%, then with an output power of 1377.56 W and 1108.88 W. Current values for the 12S8P model are 8.26 A and for the 15S8P model namely 8.86 A. The voltage value for the 12S8P model is 165.26 V and for the 15S8P model is 177.25 V. The *torque* value for the 12S8P model is 20.37 Nm and 15S8P is 17.51 Nm.

Keywords : *Slot, Pole, Generator Design*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PRAKATA	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Sistematika Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Turbin Angin.....	6
2.2. Generator Sinkron.....	6
2.3. <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> (PMSG).....	8
2.4. Jenis Generator Sinkron Magnet Permanen.....	10
2.4.1 Aliran Fluks Magnetik	11
2.4.2 Hubungan Stator dan Rotor.....	11
2.5. Komponen Generator Sinkron Permanen Magnet Radial Flux	12
2.6. Jenis Lilitan.....	13
2.7. Kombinasi <i>Slot</i> dan <i>Pole</i>	14
2.8. Daya dan Efisiensi	15
2.9. Torsi	16
2.10. Metode <i>Finite Element</i>	16
2.11. Kajian Pustaka	17

BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1. Prosedur Percobaan Desain.....	19
3.1.1 Pemilihan Material Stator dan Rotor	19
3.1.2 Pemilihan Material Magnet Permanen.....	20
3.1.3 Pemilihan Material Lilitan	20
3.2 Perancangan Generator	21
3.3 Pengaturan Simulasi Variasi Kecepatan	22
3.4 Pengaturan Simulasi dengan Beban.....	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Hasil Perancangan <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>	26
4.2 Simulasi Variasi Desain <i>Slot</i> dan <i>Pole</i> Generator.....	27
4.2.1 Hasil Desain Model Generator Sinkron 12S8P.....	28
4.2.2 Hasil Desain Model Generator Sinkron 15S8P.....	34
4.2.3 Hasil Desain Model Generator Sinkron 18S10P.....	40
4.3 Pemilihan Model.....	46
BAB V KESIMPULAN	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN A DATA SIMULASI 12S8P	A-1
LAMPIRAN B DATA SIMULASI 15S8P	B-1
LAMPIRAN C DATA SIMULASI 18S10P	C-1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Blok Diagram dari Sistem <i>Variable Speed Generator</i>	6
Gambar 2.2 Generator Sinkron Magnet Permanen	10
Gambar 2.3 Jenis Aliran Fluks Generator.....	11
Gambar 2.4 Hubungan Stator dan Rotor.....	12
Gambar 2.5 Komponen Bagian-Bagian Generator	13
Gambar 2.6 Jenis Lilitan	14
Gambar 3.1 Hasil Desain Geometri PMSG 12 Slot 8 Pole.....	22
Gambar 3.2 Pengaturan <i>Mation</i> pada Perancangan Generator	22
Gambar 3.3 Pengaturan pada Kecepatan 1000 RPM.....	23
Gambar 3.4 Pengaturan pada Waktu Rotor Berputar.....	24
Gambar 3.5 Rangkaian Simulasi dengan Beban	24
Gambar 4.1 Hasil Simulasi Medan Magnet Desain 12S8P	28
Gambar 4.2 Nilai Arus Model Generator 12S8P	29
Gambar 4.3 Nilai Tegangan Model Generator 12S8P	30
Gambar 4.4 Nilai Torsi Model Generator 12S8P.....	31
Gambar 4.5 Nilai Daya Masukan Model Generator 12S8P.....	32
Gambar 4.6 Nilai Daya Keluaran Model Generator 12S8P.....	33
Gambar 4.7 Nilai Efisiensi Model Generator 12S8P	34
Gambar 4.8 Hasil Simulasi Medan Magnet Desain 15S8P	35
Gambar 4.9 Nilai Arus Model Generator 15S8P	35
Gambar 4.10 Nilai Tegangan Model Generator 15S8P.....	36
Gambar 4.11 Nilai Torsi Model Generator 15S8P.....	37
Gambar 4.12 Nilai Daya Masukan Model Generator 15S8P.....	38
Gambar 4.13 Nilai Daya Keluaran Model Generator 15S8P.....	39
Gambar 4.14 Nilai Efisiensi Model Generator 15S8P	40
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Medan Magnet Desain 18S10P.....	41
Gambar 4.16 Nilai Arus Model Generator 18S10P	41
Gambar 4.17 Nilai Tegangan Model Generator 18S10P.....	42
Gambar 4.18 Nilai Torsi Model Generator 18S10P.....	43
Gambar 4.19 Nilai Daya Masukan Model Generator 18S10P.....	44

Gambar 4.20 Nilai Daya Keluaran Model Generator 18S10P.....	45
Gambar 4.21 Nilai Efisiensi Model Generator 18S10P	46

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Tipe karakteristik <i>magnetic</i> Material M250-50A <i>steel</i>	19
Tabel 3.2 Karakteristik Magnet NdFeb 48/11	20
Tabel 3.3 Karakteristik <i>Copper: 5.77e7 Siemens/m</i>	20
Tabel 3.4 Parameter Awal Perhitungan Dimensi Generator	21
Tabel 4.1 Parameter Dimensi Generator	26
Tabel 4.2 Parameter Variasi Kecepatan	27
Tabel 4.3 Data Waktu Variasi Kecepatan	27
Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Variasi Beban dan Kecepatan.....	47

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi mempunyai peranan yang sangat penting dalam kehidupan di muka bumi. Sementara itu jumlah sumber daya energi di dunia ini semakin berkurang, sedangkan populasi penduduk dunia terus bertambah, oleh karena itu pengembangan energi terbarukan semakin penting, untuk mengurangi emisi karbon [1]. Memenuhi kebutuhan energi nasional, maka peran EBT sangat diperlukan. Berdasarkan PP nomor 79 tahun 2014 mengenai Kebijakan Energi Nasional, dimana target bauran EBT sebesar 23% pada tahun 2025, dan 31% pada tahun 2050 [2]. Energi alternatif yang dimaksud yaitu energi terbarukan yang salah satunya merupakan energi angin. Penggunaan energi angin merupakan salah satu contoh dari pemanfaatan energi terbarukan. Eksploitasi energi angin ini sangat baik mengingat angin tidak akan pernah habis dan berkurang [3]. Total potensi energi angin berdasarkan data ESDM tahun 2019, Indonesia memiliki potensi untuk mendapatkan potensi energi sebesar 60,64 GW dari sektor energi angin saja [4]. Telah banyak dilakukan penelitian yang kaitannya dengan energi angin untuk menggantikan penggunaan energi fosil. Pemanfaatan energi angin banyak dilakukan baik dalam skala besar maupun skala kecil. Energi angin tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin atau kincir. Energi kinetik dari kincir kemudian dikonversi menjadi energi mekanik yang nantinya digunakan untuk memutar generator dan dari generator tersebut akan menghasilkan energi listrik [5].

Perancangan generator turbin angin berskala kecil dapat dilakukan dengan berbagai metode antara lain mendesain geometri rotor atau stator generator. Desain *Permanent Magnet* (PM) rotor meliputi *surface-type*, *insert-type* atau *interior* PM dan *solid* PM [6]. *Interior* PM memiliki performa baik dalam regulasi kecepatan ketika memiliki kapasitas yang berlebih tetapi memiliki kekurangan yaitu kekuatan mekanik yang kurang dan memiliki *loss* yang besar [7]. *Surface* PM dapat mengatasi kekurangan dari *interior* PM tetapi memiliki kekurangan berupa konduktivitas *thermal* yang rendah dan demagnetisasi yang tinggi [8].

Perancangan desain generator dapat juga dilakukan dengan mengubah material laminasi, memilih kombinasi *slot-pole* dan merancang inti stator. Desain stator yang tidak memiliki *slot* atau *slotless* memiliki kelebihan yaitu vibrasi yang kecil dan struktur yang lebih sederhana, tetapi terdapat kekurangan berupa torsinya yang kecil [9]. Kekurangan dari desain *slotless* tersebut dapat dihilangkan dengan mendesain generator dengan geometri yang memiliki *slot* karena memiliki kelebihan berupa koefisien *thermal* yang bagus sehingga pendinginan generator lebih baik dan memiliki intensitas arus yang kecil sehingga dissipasi daya kecil [10].

Terdapat beberapa penelitian yang dilakukan untuk merancang generator, penelitian pertama membahas mengenai perancangan *radial flux permanent magnet synchronous* generator 18 *slot* 16 *pole* menggunakan jenis magnet Neodymium Iron Boron [11]. Perancangan *concentrated winding* menggunakan metode *clockwise* dan kombinasi pada PMSG 12 *Slot* 8 *Pole* dilakukan untuk mengetahui perbandingan tegangan keluaran dan *flux linkage* [12]. Studi yang kedua dilakukan bertujuan untuk mengetahui perbandingan kombinasi *slot-pole* mesin multifase terhadap nilai faktor *winding*, rotor *losses* dan *cogging torque* [13]. Perbandingan kombinasi *slot-pole* juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh kombinasi tersebut terhadap nilai tegangan keluaran, arus keluaran dan daya yang dihasilkan [14]. Studi selanjutnya dilakukan untuk membandingkan generator *Interior PM* dengan kombinasi *slot-pole* terhadap nilai *back-EMF*, induktansi dan karakteristik torsinya [15].

Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan, maka penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh kombinasi *slot* dan *pole* pada generator sinkron tipe *radial flux* magnet permanen. Desain yang digunakan sebagai desain referensi ialah desain generator berkapasitas 1000 W yang kemudian dari desain referensi dikembangkan menjadi 8 desain lainnya. Parameter desain yang diteliti dari 9 model yang dibandingkan adalah keluaran berupa tegangan saat menggunakan beban, daya dan efisiensi. Penelitian ini dilakukan sebagai pertimbangan pemilihan kombinasi *slot-pole* untuk desain generator berkapasitas 1 kW. Analisis yang dilakukan menggunakan perhitungan rumus dan menggunakan metode *finite*

element. Software yang digunakan untuk simulasi analisis *Finite Element Method* (FEM) adalah *software Magnet Infolytica*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang masalah, maka dapat diambil rumusan masalah pada skripsi sebagai berikut.

1. Bagaimana mensimulasikan generator PMSG dengan kapasitas 1000W yang digunakan sebagai turbin angin?
2. Bagaimana enam kurva karakteristik pada setiap variasi generator?
3. Bagaimana pengaruh perubahan kombinasi *slot pole* dari variasi generator, untuk membandingkan terhadap tegangan, arus, daya masukan, daya keluaran dan efisiensi generator untuk mencari keluaran yang paling efisien?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian skripsi yang akan dilakukan ini diantaranya yaitu sebagai berikut.

1. Mensimulasikan generator PMSG dengan kapasitas 1000W yang digunakan sebagai turbin angin.
2. Membuat enam kurva karakteristik pada setiap variasi generator.
3. Membandingkan pengaruh perubahan kombinasi *slot-pole*, terhadap hasil keluaran tegangan, arus, daya masukan, daya keluaran dan efisiensi.

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Dapat memahami ilmu tentang *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG).
2. Mampu berkontribusi terhadap perkembangan pembangkit listrik energi baru terbarukan, khususnya pembangkit listrik tenaga angin.
3. Dapat menjadi desain referensi untuk simulasi generator berkapasitas 1kW dan karakteristik dari generator sinkron *radial flux* berdasarkan variasi generator.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah untuk memfokuskan pokok permasalahan ini antara lain sebagai berikut.

1. Pembahasan mengenai jenis rotor yang digunakan adalah jenis bentuk *Surface Permenan Magnet* (SPM).
2. Pembahasan mengenai jenis generator PMSG kapasitas 1000 W.
3. Jumlah *slot* yang digunakan adalah 12 *slot*, 15 *slot*, dan 18 *slot*.
4. Jumlah *pole* yang digunakan adalah 8 *pole* dan 16 *pole*.
5. Parameter keluaran yang dianalisa adalah *flux linkage*, tegangan, daya dan efisiensi yang dihasilkan.
6. Variabel variasi resistansi yang digunakan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm.
7. Variabel kecepatan putar rotor bervariasi mulai dari 350 rpm, 500 rpm, 750 rpm dan 1000 rpm.

1.6. Sistematika Penelitian

Skripsi ini disusun menjadi beberapa bab dan diuraikan dengan pembahasan sesuai daftar isi. Sistematika penyusunannya adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan, BAB ini menjelaskan tentang latar belakang masalah dalam penelitian ini, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka, BAB ini berisikan teori-teori yang dibutuhkan dalam penelitian, yang diantaranya mengenai turbin angin, generator, generator sinkron permanen magnet, generator sinkron permanen magnet *radial flux*.

BAB III Metode Penelitian, BAB ini membahas tentang metode-metode yang digunakan pada penelitian skripsi ini, yaitu meliputi diagram blok, alat dan bahan yang akan digunakan, metode penelitian, prosedur perancangan.

BAB IV Hasil analisa dan pembahasan, BAB ini menjelaskan tentang data yang akan ditampilkan dari hasil simulasi generator dalam bentuk grafis kemudian hasil tersebut akan dibahas dan di analisa dengan metode analisis grafis sesuai dengan teori yang ada, serta parameter-parameter lain yang terkait.

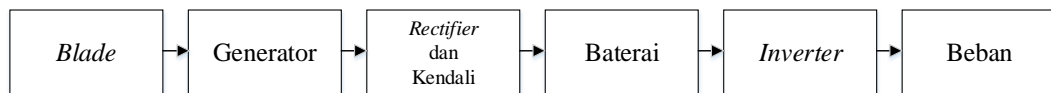
BAB V Penutup, BAB ini membahas tentang kesimpulan dan saran, dimana kesimpulan diperoleh dari uraian-uraian hasil penjelasan laporan penelitian skripsi yang dipaparkan secara singkat, padat dan jelas.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Turbin Angin

Prinsip kerja turbin angin adalah energi angin yang digunakan untuk memutar baling-baling kemudian diteruskan untuk menggerakkan generator dengan memutar rotor pada porosnya. Energi angin merupakan suatu masalah pada PLTB skala mikro, hal ini mengakibatkan generator beroperasi pada kecepatan yang berubah-ubah sehingga energi listrik yang dihasilkan tidak stabil, sehingga untuk mensuplai listrik ke beban dengan stabil, PLTB skala mikro umumnya menggunakan sistem yang disebut dengan *variable speed generator*. Gambar 2.1 menggambarkan blok diagram dari PLTB yang menggunakan sistem *variable speed generator* [16].



Gambar 2.1 Blok Diagram dari Sistem *Variable Speed Generator* [17]

Gambar 2.1 menjelaskan mengenai *variable speed generator* yang terbentuk dari energi angin untuk menggerakkan *blade* pada turbin angin. *Blade* tersebut sebagai *drive* atau penggerak yang terhubung dengan generator. Putaran generator tersebut menghasilkan energi listrik yang digunakan untuk mengisi daya baterai dan menggunakan *inverter* sebagai penyearah tegangan dan terhubung ke suplai beban.

2.2. Generator Sinkron

Generator merupakan sebuah alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik ini berasal dari penggerak utama yang dapat berupa energi angin maupun *engine*. Generator yang biasa digunakan pada pembangkit listrik adalah generator sinkron pemanen magnet. Konstruksi utama pada generator adalah stator, rotor, magnet dan celah udara (*airgap*). Stator merupakan bagian generator yang diam. Stator terdapat *slot* yang merupakan tempat kumparan atau *coil* yang disusun. Rotor merupakan bagian generator yang berputar dan merupakan tempat diletakkannya magnet. *Airgap* atau celah udara

merupakan celah diantara rotor dan stator yang mencegah terjadinya gesekan antara rotor dan stator ketika generator mulai berputar [18].

Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yaitu dengan memutar suatu kumparan dalam medan magnet maka timbul Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi. Putaran dari *prime mover* yang diterima generator akan memutar rotor dan magnet yang terdapat pada rotor. Apabila rotor berputar, magnet sebagai penghasil medan magnet akan menyebabkan fluks magnet pada inti kutub rotor bersirkulasi disekeliling rotor. Fluks magnet dari kutub magnet yang terletak pada rotor akan melewati celah udara atau *airgap* dan mencapai permukaan stator beserta lilitan pada inti stator. Putaran rotor akan menyebabkan fluks magnet yang diterima oleh menyebabkan stator bersifat berubah terhadap waktu. Prinsip kerja generator berdasarkan hukum induksi Faraday yang menyatakan bahwa sebuah magnet yang digerakan dengan cepat melalui suatu konduktor belitan, akan menginduksikan suatu tegangan ke belitan itu, yang besarnya sama dengan kecepatan magnet itu. Bilamana belitan itu merupakan suatu rangkaian tertutup, tegangan induksi itu akan menyebabkan mengalirnya arus listrik. Arah arus listrik itu akan sedemikian rupa, sehingga akan menghasilkan gaya, yang akan berlawanan dengan arah gerakan semula [19].

Generator sinkron adalah mesin pembangkit listrik yang mengubah energi mekanik sebagai masukan menjadi energi listrik sebagai energi keluaran. Tegangan keluaran dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC [20]. Generator sinkron dapat menghasilkan sumber energi, yaitu tegangan bolak-balik, oleh karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga angin atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks putar. Fluks putar ini akan memotong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung

kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena berpengaruh induksi dari fluks putar tersebut [21].

2.3. *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

Permanen Magnet Sinkron Generator (PMSG) adalah salah satu jenis generator sinkron yang medan utamanya dihasilkan oleh magnet permanen. Sama seperti generator pada umumnya, *Permanent Magnet Sinkron Generator (PMSG)* merupakan sebuah perangkat atau alat yang dapat mengubah atau mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik yang dimanfaatkan untuk mengubah keluaran daya mekanik turbin angin, turbin air, dan turbin uap menjadi tenaga listrik untuk *grid* [22].

Generator permanen magnet menghasilkan gaya gerak listrik bolak balik pada ujung stator menghasilkan tegangan induksi. Bagian generator permanen magnet, rotor merupakan tempat tersusunnya magnet permanen sebagai pembangkit medan magnet yang diperlukan untuk pembangkit listrik. Induksi elektromagnetik yang ada pada generator permanen magnet menggunakan hukum faraday yang berbunyi adanya perubahan fluks *magnetic* yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan GGL pada kumparan tersebut. Tidak hanya hukum faraday, pada generator permanen magnet juga digunakan hukum lenz yang berbunyi GGL induksi yang muncul berlawanan arah dengan perubahan fluks menyebabkan arus mengalir [23]. Hukum lenz dijelaskan dalam Persamaan (2.1) berikut.

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Variabel ε merupakan tegangan induksi (v), N merupakan jumlah lilitan kawat, $\Delta\phi$ merupakan perubahan fluks magnet (Wb), Δt merupakan perubahan waktu (s). Persamaan (2.1) menjelaskan mengenai arus listrik yang mengalir melalui kumparan bergantian, maka fluks yang dihasilkan pada cincin besi juga bersifat bolak-balik. Jumlah lilitan pada kawat akan sebanding dengan banyaknya perubahan pada fluks magnetik. Selanjutnya terdapat hubungan antara tegangan DC dengan konstanta EMF yang dinyatakan dalam Persamaan (2.2) berikut.

$$K_e = \frac{V_{dc}}{\omega} \quad (2.2)$$

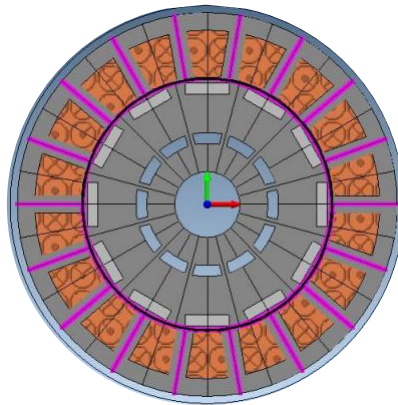
Variabel K_e merupakan konstanta EMF dan V_{dc} merupakan Tegangan DC. Persamaan (2.2) menjelaskan tentang hubungan konstanta EMF dengan tegangan DC. Semakin besar tegangan DC maka akan semakin kecil konstanta EMF yang dihasilkan. Besarnya kerapatan fluks magnet celah udara (B_g) berpengaruh langsung pada EMF yang dibangkitkan. Tegangan induksi yang dibangkitkan, tegangan efektif dan tegangan 3 fasa, didapat dengan rumus pada Persamaan (2.3)

$$E_{ph} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f K_w N_s \Phi \frac{Q_s}{N_{ph}} \quad (2.3)$$

Variabel E_{ph} merupakan tegangan induksi antar fasa (V), f merupakan frekuensi (Hz), K_w merupakan faktor belitan, N_s merupakan jumlah lilitan per *slot*, Φ merupakan fluks medan (Wb), Q_s merupakan jumlah *slot* dan N_{ph} merupakan jumlah fasa. Persamaan (2.3) menjelaskan tentang tegangan induksi yang dihasilkan generator antar fasa. Generator sinkron dengan magnet permanen tidak membutuhkan sistem eksitasi karena sumber eksitasi disediakan oleh magnet permanen pada rotor. Kendali tegangan untuk sistem eksitasi tidak diperlukan, sehingga mengurangi kesulitan dalam sistem kendalinya. PMSG biasanya digunakan untuk membangkitkan listrik pada daya rendah, sehingga penggunaan PMSG sesuai untuk pembangkitan listrik tenaga angin untuk skala kecil. Keuntungan menggunakan sebuah PMSG adalah biaya yang rendah, ketahanan, kesederhanaan, dan lebih mudah mengkopling *grid*, akan tetapi kelemahan utamanya adalah perlunya kompensator faktor daya dan efisiensi yang lebih rendah [24].

PMSG memiliki tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan generator induksi, bentuknya yang lebih sederhana membuat generator magnet permanen menjadi lebih rapih, ringan, dan tersusun padat. Penggunaan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* lebih baik daripada kemampuan *Ceramic* dimana magnet permanen pada *Neodymium Iron Boron* lebih tinggi dari *Ceramic*. Penggunaan magnet permanen menghasilkan medan magnet yang tetap sehingga tidak memerlukan pencatutan arus searah untuk menghasilkan medan magnet. sedangkan fluks diperoleh dari magnet permanen yang telah diberikan perlakuan khusus sehingga arah garis-garis gaya magnet keluar dari kutub magnet secara radial dan *axial* [16].

Generator ini juga memiliki konstruksi umum yang sama yaitu memiliki lilitan stator sebagai tempat terjadinya induksi elektromagnetik, rotor tempat meletakkan magnet permanen sebagai sumber medan magnet, dan celah udara sebagai tempat mengalirnya fluks udara dari rotor ke stator. Magnet permanen merupakan material yang memiliki banyak manfaat terutama dalam bidang konversi energi, yaitu digunakan untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik maupun sebaliknya [17]. Susunan magnet permanen dapat dilihat dalam Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Generator Sinkron Magnet Permanen [25]

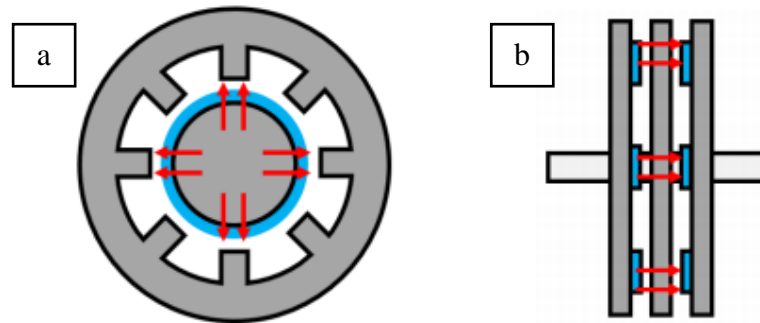
Gambar 2.2 merupakan susunan magnet permanen yang terdapat dalam generator. Magnet permanen akan mengisi di bagian inti stator dan rotor. Magnet permanen jenis *Neodymium Iron Boron* menjadi bahan yang paling baik dari bahan-bahan magnet pemanen lainnya. *Neodymium Iron Boron* mempunyai nilai fluks remanen yang paling besar dibandingkan bahan feromagnetik yang lain [26].

2.4. Jenis Generator Sinkron Magnet Permanen

Jenis-jenis generator terbagi berdasarkan aliran fluks, posisi magnet permanen dan juga hubungan antara stator dan rotor. Aliran fluks magnetik dipengaruhi oleh bentuk dari generator itu sendiri, sedangkan hubungan antara stator dan rotor dapat mempengaruhi karakteristik generator. Jenis generator akan dijelaskan lebih detail pada sub bab berikut.

2.4.1 Aliran Fluks Magnetik

Berdasarkan aliran fluks terbagi menjadi 2, yaitu radial fluks dan *axial* fluks. Jenis radial fluks generator memiliki aliran fluks secara radial, sehingga fluks akan menyebar, sedangkan pada jenis *axial* fluks generator memiliki arah aliran fluks searah dengan poros putar [27]. Perbedaan generator radial dan *axial* dapat dilihat dalam Gambar 2.3 berikut.



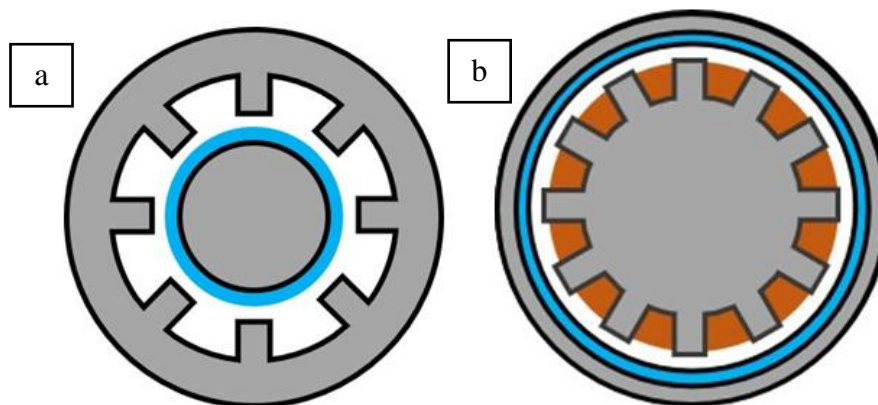
Gambar 2.3 Jenis Aliran Fluks Generator (a) Radial (b) Axial [27]

Gambar 2.3 merupakan perbedaan bentuk generator radial dan generator *axial*. Generator radial merupakan generator permanen magnet yang memiliki arah fluks radial terhadap sumbu putar sehingga arah fluks searah dengan arah putaran rotor, hal ini dikarenakan fluks dihasilkan oleh magnet magnetik *inner-rotor* yang letaknya melingkari lilitan bagian luar, sedangkan lilitan terdapat inti dalam yang terhubung pusat rotor. Generator *axial* merupakan generator permanen magnet yang memiliki arah medan fluks sejajar dengan sumbu putar. Fluks tersebut merupakan hasil dari gaya tarik menarik antara dua buah magnet permanen yang memiliki kutub yang berbeda [18].

2.4.2 Hubungan Stator dan Rotor

Berdasarkan hubungan stator dan rotor generator terbagi 2 jenis, yaitu *outer* rotor dan *inner* rotor. Pembagian ini didasarkan pada posisi dari rotor. Jenis *outer* rotor posisi stator berada didalam sedangkan posisi rotor berada diluar, sedangkan pada *inner* rotor posisi stator berada diluar dan rotor berada didalam. Masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Misalkan saja pada *outer* rotor memungkinkan untuk menambah jumlah *pole* magnet lebih banyak dibandingkan

pada *inner* rotor [27]. Perbedaan hubungan stator dan rotor dapat dilihat dalam Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Hubungan Stator dan Rotor (a) *Inner* Rotor (b) *Outer* Rotor [27]

Gambar 2.4 menjelaskan tentang perbedaan konstruksi rotor. Terdapat dua jenis yaitu *inner* rotor dan *outer* rotor. Inner rotor menggunakan jenis rotor di dalam, sedangkan *outer* rotor menggunakan jenis rotor diluar. Tipe *inner* rotor merupakan yang paling umum digunakan, sedangkan *outer* rotor hanya sedikit penggunaannya [19].

2.5. Komponen Generator Sinkron Permanen Magnet Radial Flux

Perancangan generator perlu diketahui komponen dari generator *Radial Flux*. Seperti stator, rotor dan *airgap*, yang akan dijelaskan dibawah ini dengan sebagai berikut:

1. Stator

Stator merupakan bagian generator yang diam atau tetap. Stator terdapat *teeth* atau gigi dimana berfungsi sebagai melilitkan kawat tembaga atau konduktor. Bentuk dari *teeth* bervariasi dan berpengaruh pada jumlah fluks *magnetic* yang teralirkan pada stator. *Teeth* pada stator berpengaruh terhadap perubahan *flux linkage* [27].

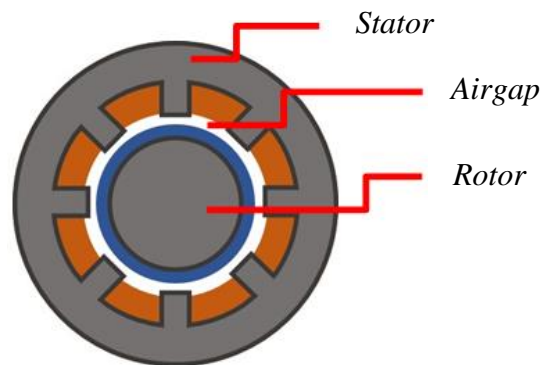
2. Rotor

Rotor merupakan bagian yang berputar. Rotor diletakkan material magnet permanen. Kecepatan putaran rotor akan mempengaruhi jumlah fluks *magnetic* yang terinduksi pada stator. Ada beberapa tipe dalam penempatan magnet permanen pada rotor antara lain, *interior-magnet rotor*, *surface-magnet rotor*,

insert-magnet rotor, bread loaf magnet, decentered magnet, interior double-layer magnet [28].

3. *Airgap*

Airgap merupakan celah udara yang ada diantara stator dan rotor. *Airgap* berfungsi sebagai jalur perpindahan *flux* magnetic dari rotor menuju stator dan juga menghindari gesekan secara langsung antara rotor dan stator. Lebar *airgap* mempengaruhi performa dari generator. Komponen dari generator dapat dilihat dalam Gambar 2.5 berikut.

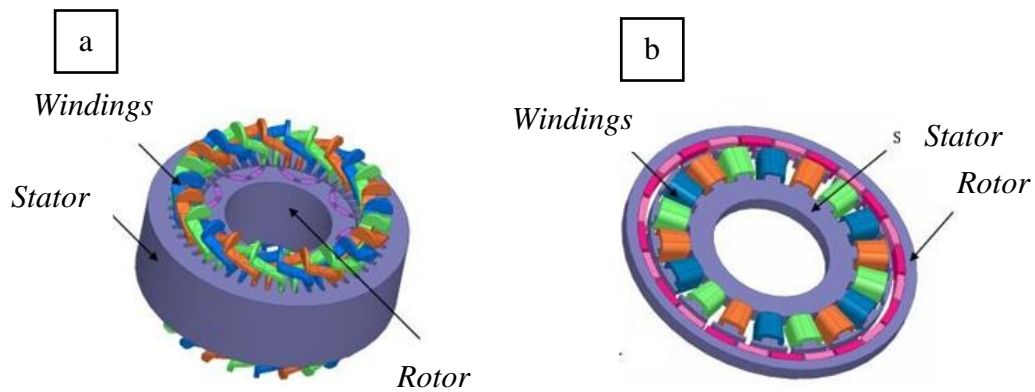


Gambar 2.5 Komponen Bagian-Bagian Generator [29]

Gambar 2.5 menjelaskan mengenai komponen yang terdapat dalam generator seperti stator, rotor dan *airgap*. Stator adalah komponen generator yang diam. Rotor adalah komponen generator yang berada di tengah dan bergerak. *Airgap* adalah celah udara antara rotor dengan stator [20].

2.6 Jenis Lilitan

Generator mempunyai lilitan terbagi menjadi 2 jenis, yaitu *concentrated* dan *distributed*. Kedua jenis ini dibedakan dari metode melilit kawat tembaga pada generator. Jenis *concentrated* tidak ada lilitan yang tumpang tindih sehingga terlihat seperti tumpukan lingkaran yang memiliki bentuk konsentris, sedangkan pada jenis *distributed* terdapat lilitan yang tumpang tindih sehingga belitan ini didistribusikan dengan menutupi seluruh area dan melingkari di sekitar stator dan rotor. Jenis gulungan terkonsentrasi digunakan untuk memberikan tegangan keluaran secara maksimum [27]. Perbedaan jenis lilitan generator dapat dilihat dalam Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Jenis Lilitan (a) *Distributed Winding* (b) *Concentrated Winding* [30]

Gambar 2.6 menjelaskan mengenai jenis lilitan yang umum digunakan pada generator yaitu *distributed winding* dan *concentrated winding*. *Distributed winding* memiliki konstruksi belitan dengan setidaknya dua gigi stator selalu dililitkan, kemudian belitan tumpang tindih di bagian atas dan bawah generator listrik. *Concentrated winding* memiliki konstruksi stator selalu dililitkan tepat di atas satu gigi. Keuntungan belitan ini yaitu memiliki kepala belitan yang sangat kecil di bagian atas dan di bawah generator [21].

2.7 Kombinasi *Slot* dan *Pole*

Kombinasi *slot* dan *pole* pada perancangan generator memiliki pengaruh pada karakteristik generator. Kombinasi *slot* dan *pole* mempengaruhi torsi, tegangan yang dihasilkan, dan juga frekuensi. Beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan. Kombinasi *slot* dan *pole* didalam beberapa penelitian yang lain juga biasa dikenal dengan *slot per pole and phase* (SPP). Dan nilai ini dapat diketahui melalui Persamaan (2.4) berikut [31][32][29].

$$q = \frac{N_s}{2_p \cdot N_\Phi} \quad (2.4)$$

Variabel q merupakan *slot per pole and phase*, 2_p merupakan jumlah *pole*, N_s merupakan jumlah *slot*, dan N_Φ merupakan jumlah fasa. Persamaan (2.4) menjelaskan mengenai hubungan kombinasi *slot* dengan *pole*. Semakin banyak jumlah *slot* pada generator maka *pole* akan semakin sedikit. Jumlah *slot* dan *pole*

akan mempengaruhi karakteristik generator. Karakteristik generator yang dipengaruhi oleh jumlah *slot* dan *pole* yaitu arus dan tegangan [22].

2.8 Daya dan Efisiensi

Besarnya daya masukan suatu generator bergantung pada kecepatan sudutnya. Besarnya kecepatan sudut ini bisa didapatkan dari nilai kecepatan putar suatu generator dengan Persamaan (2.5) berikut [33].

$$V = I \cdot R \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) menyatakan bahwa nilai tegangan berbanding lurus dengan nilai arus (I) dan nilai resistansi (R) semakin besar nilai arus dan nilai resistansi maka akan semakin besar nilai tegangan (V). Generator daya masukan merupakan daya mekanik sedangkan daya keluaran berupa daya elektrik. Daya mekanik dapat dihitung dengan Persamaan (2.6) berikut [23].

$$P_{in} = \tau \cdot n \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (2.6)$$

Variabel P_{in} merupakan daya masukan (Watt), variabel τ merupakan torsi (Nm) dan n merupakan kecepatan (RPM). Persamaan (2.6) menyatakan bahwa generator umumnya menggunakan kata kecepatan putar dengan satuan RPM, sedangkan untuk mencari daya masukan sendiri menggunakan kecepatan sudut atau kecepatan angular dengan satuan rad/s. Mengubah dari kecepatan putar menjadi kecepatan angular yaitu dengan mengkali nilai kecepatan putar dengan $2\pi/60$. Daya keluaran merupakan daya yang dihasilkan oleh generator berupa daya listrik, untuk daya keluaran yang dihasilkan dengan Persamaan (2.7) [33]

$$P_{out} = I \cdot V \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) menyatakan bahwa nilai daya keluaran berhubungan dengan nilai arus dan tegangan. Semakin besar nilai arus dan nilai tegangan maka akan besar pula nilai daya keluaran yang dihasilkan. Efisiensi adalah perbandingan daya masukan dan daya keluaran pada suatu sistem. Efisiensi daya dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.8).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.8)$$

Persamaan (2.8) menyatakan bahwa rasio antara daya masukan dengan daya keluaran semakin besar nilai efisiensi daya maka semakin baik daya yang

dihasilkan oleh generator. Efisiensi yang tinggi menandakan *losses* yang dialami oleh generator kecil [24].

2.9 Torsi

Torsi adalah gaya yang diberikan benda untuk berotasi, karena ini adalah keluaran generator maka torsi bisa dikatakan besar gaya yang diberikan generator untuk memutar rotor. Torsi yang dihasilkan oleh generator adalah ukuran dari titik balik suatu generator dan dinyatakan dalam Persamaan (2.9), Persamaan (2.10), Persamaan (2.11) [25].

$$\omega = \frac{n \cdot 2 \cdot \pi}{60} \quad (2.9)$$

$$K = \frac{V}{\omega} \quad (2.10)$$

$$T = Kt \cdot I \quad Kt = Ke \quad (2.11)$$

Variabel ω merupakan kecepatan sudut (rad/s), variabel N merupakan kecepatan (RPM), variabel Ke merupakan konstanta EMF, Kt merupakan konstanta torsi, T merupakan torsi (Nm), dan I merupakan arus (A). Persamaan (2.9) menyatakan kecepatan sudut rotor, kemudian disubstitusikan ke Persamaan (2.10) untuk menemukan nilai konstanta torsi. Persamaan (2.11) menyatakan bahwa torsi yang didapatkan menjadi representasi dari performa generator dan akan berhubungan dengan besarnya daya masukan dari generator. Kecepatan putaran rotor akan mempengaruhi torsi dan arus dari generator.

2.10 Metode *Finite Element*

Metode ini terbukti secara efektif dapat menghitung distribusi dari medan elektromagnetik adalah metode *Finite Element Method* (FEM) Metode ini dapat dilakukan analisa distribusi fluks magnetik yang berasal dari magnet permanen. Keuntungan dengan menggunakan metode *finite element* dapat menghitung beberapa parameter penting seperti besar torsi *cogging*, *armature effect*, dan nilai induktansi [33]. Metode FEM menggunakan perangkat lunak salah satunya adalah *MagNet Infolytica* dengan menggunakan *software* MagNet maka dapat diketahui parameter keluaran dari desain yang diinginkan.

2.11 Kajian Pustaka

Penelitian ini mendapatkan referensi tentang perancangan generator PMSG dari beberapa penelitian lain yang sudah pernah dilakukan. Referensi ini digunakan sebagai bahan perbandingan mengenai beberapa metode desain variasi *slot pole* generator PMSG. Penelitian yang pertama membahas mengenai merancang desain simulasi *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* untuk aplikasi turbin angin. Generator yang dirancang memiliki jumlah 18 *slot*, 16 *pole* dan 3 fasa dengan menggunakan radial *flux*. Hasilnya yaitu dapat mencapai daya sebesar 661,234 W pada kecepatan 1000 RPM dengan efisiensi sebesar 81% [11].

Penelitian yang kedua membahas mengenai perancangan generator berjenis PMSG dengan 18 *slot* dan 8 *pole* dengan menggunakan metode *concentrated winding* variasi arah dua putar yaitu *clockwise* dan kombinasi. Hasil yang didapatkan dari pengujian *concentrated winding* pada generator permanen magnet 18S8P dengan arah putar *clockwise* mendapatkan tegangan sebesar 184.80 volt, sedangkan pada arah putar kombinasi mendapatkan tegangan sebesar 206.05 volt [12]. Penelitian yang ketiga yaitu melakukan perbandingan terhadap desain variasi *slot pole* generator dengan kombinasi 3, 5 dan 7 *fractional slot*. Penelitian ini juga menjelaskan bagaimana mendesain kombinasi *slot pole* berdasarkan faktor *winding* dengan melibatkan faktor harmonisa, rotor *losses* dan keseimbangan gaya radial. Hasilnya yaitu dengan menggunakan desain 3 fase *slot* 18 *pole* 12, 5 fase *slot* 20 *pole* 12 dan 7 fase *slot* 14 *pole* 10 menghasilkan nilai rotor *losses* yang kecil [13].

Penelitian yang keempat membahas mengenai desain rotor PMSG menggunakan *Single Rotor Single Stator (SRSS)*. Pengujian yang dilakukan yaitu dengan melakukan variasi lebar *teeth* 15 mm, 18 mm dan 23 mm. Hasil yang diperoleh yaitu dengan menambah lebar *teeth* dapat meningkatkan tegangan, arus dan daya, dan semakin besar nilai *slot* maka dapat mengurangi tegangan, arus dan daya [14]. Penelitian kelima membahas mengenai pengaruh jumlah *slot* stator terhadap performa interior *permanent magnet motor*. Jumlah *pole* yaitu 6 buah dengan 18, 27 dan 36 *slot* dengan menganalisa nilai torsi *cogging*, *ripple* torsi, induktansi dan harmonisa. Hasilnya yaitu torsi lebih besar untuk *slot* berjumlah 18 [15].

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut maka penelitian dilakukan untuk mensimulasikan generator PMSG dengan variasi *slot pole* terhadap nilai kurva karakteristik. Analisa kurva karakteristik dapat dilihat dengan hasilnya menggunakan *software Magnet Infolytica*. Nilai efisiensi dan daya generator yang terbaik akan dipilih berdasarkan variasi *slot pole* tersebut.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Prosedur Percobaan Desain

Permodelan dan simulasi adalah metode yang digunakan untuk memodelkan dan mensimulasikan model tersebut untuk dilihat apakah model tersebut memberikan hasil yang sesuai dengan yang diinginkan dengan permodelan dan simulasi, riset pembuatan alat dapat dilakukan lebih efektif.

3.1.1 Pemilihan Material Stator dan Rotor

Jenis material laminasi inti yang dipilih haruslah tergolong dalam jenis *soft magnetic* material, yang artinya material yang dipilih hanya akan bersifat kemagnetan ketika ada medan magnet yang mengenainya. Material yang akan dipilih dalam penelitian ini adalah jenis *silicon steel*. Stator dan rotor adalah bagian komponen utama pada generator. Stator merupakan bagian tempat untuk melilit kawat. Dan sedangkan rotor merupakan bagian tempat untuk menempelkan pada magnet. Material *epoxy resin* dan *silicon steel* yang digunakan untuk stator dan rotor. Laminasi inti yang digunakan pada desain generator adalah *silicon iron* tipe M250-50A *steel* dengan ketebalan 0,5 mm. Pemilihan material sangat diperhitungkan dikarenakan akan mempengaruhi pada aliran *flux*. Aliran fluks magnetic yang melalui material harus dijaga agar tidak melampaui titik saturasi. Tipe karakteristik *magnetic* dari material dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Tipe Karakteristik *Magnetic* Material M250-50A *Steel*

Parameter (Simbol)	Besaran	Satuan
<i>Specific total loss</i>	-	-
1,5 T	2,38	W/kg
1,0 T	1,02	W/kg
<i>Anisotropy of loss</i>	10	%
<i>Magnetic polarization</i>	-	-
2.500 A/m	1,55	Tesla
5.000 A/m	1,64	Tesla
10.000 A/m	1,77	Tesla
<i>Coercivity (DC)</i>	30	A/m
<i>Relative permeability at 1,5 T</i>	740	-

Tabel 3.1 menjelaskan mengenai karakteristik magnetik material baja M250-50A yang digunakan sebagai material rotor dan stator. Karakteristik yang diperlukan antara lain total *loss*, polarisasi magnetik, permeabilitas dan *coercivity*. Material ini dipilih ketika mendesain konstruksi generator dalam simulasi.

3.1.2 Pemilihan Material Magnet Permanen

Material magnet permanen yang digunakan adalah NdFeb tipe NdFeb 48/11. Pemilihan material magnet berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Standar yang digunakan adalah standar Cina dengan karakteristik magnet yang ada pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Karakteristik Magnet NdFeb 48/11

Parameter (Simbol)	Besaran	Satuan
Konduktivitas fluks remanensi	1,39	T
<i>Coercive force, H_{cb}</i>	1060650	Oe (A/m)
<i>Intrinsic Coersive Force, H_{cj}</i>	11,0(876)	kOe (kA/m)
<i>Energy Product, BH_{max}</i>	50,53 (398-422)	MGO (kJ/m ³)
<i>Max. Operating temp</i>	20	°C

Tabel 3.2 menjelaskan tentang karakteristik material magnet dengan jenis NdFeb 48/11. Karakteristik yang diperlukan antara lain konduktivitas, *coercivity*, *intrinsic coercivity*, energi dan temperatur operasional. Jenis magnet ini dipilih digunakan dalam perancangan simulasi.

3.1.3 Pemilihan Material Lilitan

Jenis material lilitan yang digunakan adalah *Copper: 5.77e7 Siemens/m*. Material dengan jenis ini sangat sering digunakan karena memiliki nilai konduktivitas yang tinggi. Adapun karakteristik pada material lilitan seperti pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Karakteristik *Copper: 5.77e7 Siemens/m*

Parameter (Simbol)	Besaran	Satuan
Konduktivitas	57700000	M
Konduktivitas <i>Thermal</i>	386	W/m.C
Spesifik Panas	383,1	J/kg.C
Kerapatan	8954	kg/m ³
<i>Max. Operating temp</i>	20	°C

Tabel 3.3 menjelaskan tentang karakteristik material yang digunakan untuk lilitan untuk stator. Karakteristik yang diperlukan antara lain konduktivitas, konduktivitas termal, spesifik panas, kerapatan dan temperatur operasional. Pemilihan material ini digunakan dalam perancangan simulasi.

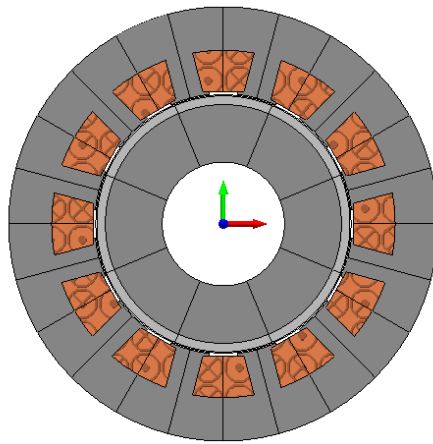
3.2 Perancangan Generator

Generator yang akan dimodelkan pada tugas akhir ini memodelkan 9 desain dengan tipe generator PMSG. Model generator ini dibuat dengan spesifikasi dan material yang sama kemudian disimulasikan pada kombinasi *slot-pole*, kecepatan putar rotor dan beban yang berbeda. Hasil yang keluaran model yang didapatkan pada variasi kecepatan putar rotor dan beban tersebut akan dibandingkan dengan besar *magnetic flux*, tegangan, arus, daya dan efisiensi sehingga dapat dihasilkan desain yang paling optimal. Desain generator PMSG ini, terdapat beberapa parameter yang telah diketahui sebelumnya. Parameter tersebut mengacu pada referensi, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Parameter Awal Perhitungan Dimensi Generator

Parameter	Dimensi
Daya, P	1000 watt
Kecepatan putar, n_s	1000 rpm (16,67 rps)
<i>Specific magnetic loading</i> , B_g	0,9 T
<i>Specific electric loading</i> , a_c	10,000 A/m
Faktor belitan, k_w	0,866
Faktor daya, $\cos \theta$	0,85

Tabel 3.4 menjelaskan tentang parameter perhitungan dimensi generator. Perhitungan ini meliputi daya, kecepatan putar, faktor belitan, faktor daya, *magnetic loading* dan *electric loading*. Parameter ini digunakan ketika merancang konstruksi generator dalam simulasi. Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, dibuatlah desain kerangka dari generator menggunakan *software* MagNet Infolytica, sehingga didapatkan bentuk dimensi dari generator referensi seperti dalam Gambar 3.1 berikut.

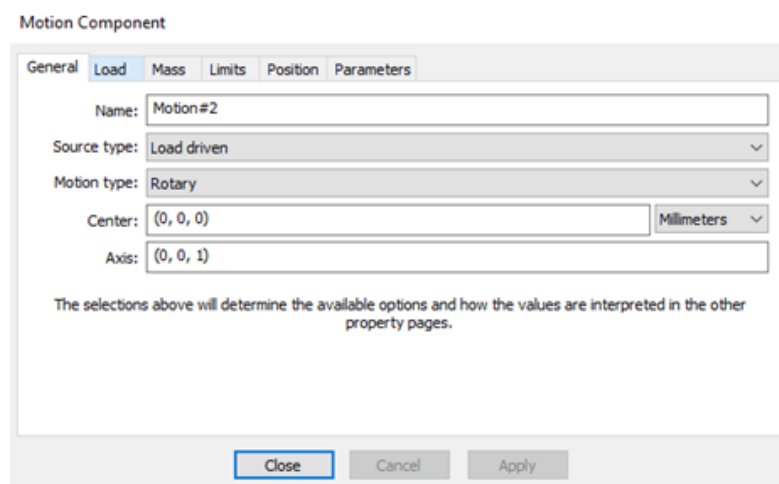


Gambar 3.1 Hasil Desain Geometri PMSG 12 Slot 8 Pole

Gambar 3.1 menjelaskan mengenai dimensi dari generator PMSG 12S8P (12 Slot 8 Pole), tahap selanjutnya adalah memvariasikan desain menjadi jumlah slot dan pole yang berbeda. Desain yang sudah didapatkan divariasikan menjadi 15S8P dan 18S10P.

3.3 Pengaturan Simulasi Variasi Kecepatan

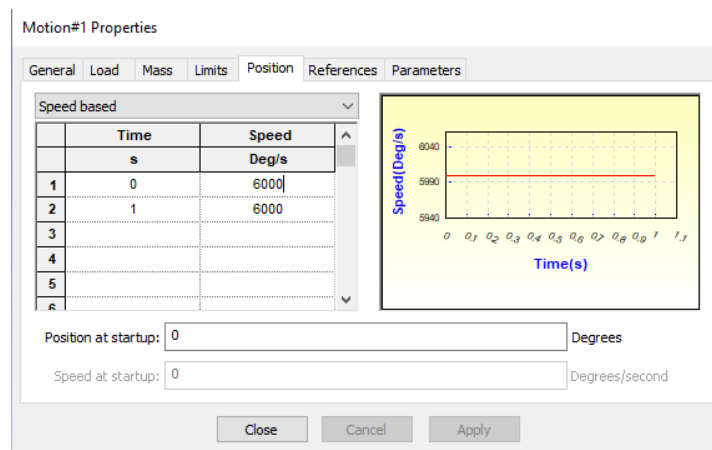
Software *MagNet Infolytica* terdapat *tools Motion* yang dapat digunakan untuk mensimulasikan perputaran bagian rotor pada model generator. Pertama pilih semua komponen rotor, kemudian pada keyboard tekan `Ctrl+Shift+O`, maka akan muncul tampilan seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Pengaturan *Motion* pada Perancangan Generator

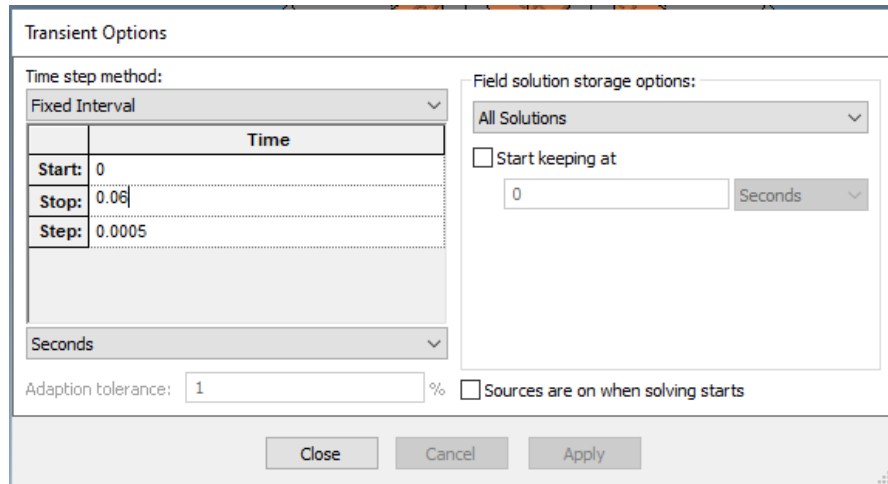
Gambar 3.2 menjelaskan mengenai pengaturan untuk pergerakan rotor dengan memberikan nilai parameter seperti kecepatan putaran rotor, posisi dan massa rotor. Selanjutnya yaitu mengubah *Sourch type* yang awalnya *load driven* menjadi *velocity driven*. Selanjutnya pilih *Position* maka akan muncul seperti pada Gambar 3.3.

Setiap model disimulasikan berputar dalam 4 kecepatan, yaitu pada kecepatan 350 rpm, 500 rpm, 750 rpm dan 1000 rpm. Parameter yang dimasukkan kedalam tabel *Speed* pada *software* memiliki satuan deg/s, maka dari itu terlebih dahulu stauan rpm dirubah menjadi deg/s. Sebagai contoh, jika ingin melakukan simulasi pada kecepatan 1000 rpm, maka dirubah menjadi 6000 deg/s, kemudian nilai tersebut diinputkan pada tabel *Speed* dengan waktu yang dibatasi dari 0 hingga 1s seperti pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Pengaturan pada Kecepatan 1000 RPM

Gambar 3.3 merupakan pengaturan waktu dan posisi untuk simulasi putaran rotor. Waktu tersebut terhitung dari pada saat rotor mulai berputar sampai rotor berhenti berputar. Rotor diputar sebesar 3 derajat per detik dengan waktu yang dimulai dari 0 hingga 1 detik. Selanjutnya yaitu mengatur waktu mulai rotor, waktu berhenti rotor dan langkah putaran motor yang dapat dilihat dalam Gambar 3.4 berikut.

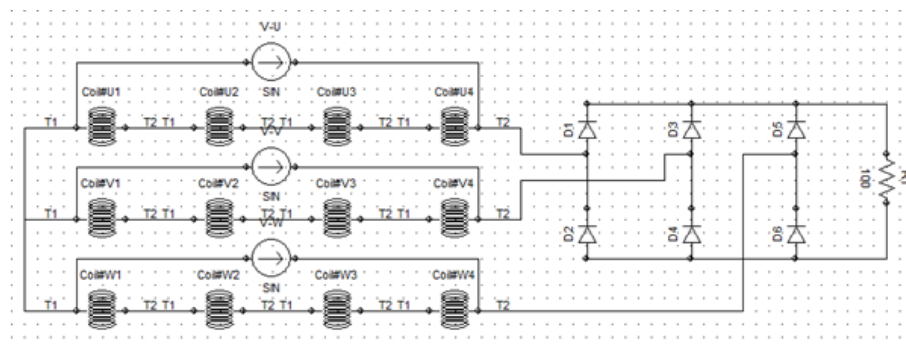


Gambar 3.4 Pengaturan pada waktu rotor berputar

Gambar 3.4 merupakan pengaturan dalam simulasi untuk menentukan waktu rotor berputar. Waktu mulai rotor yaitu pada saat 0 detik dan waktu berhenti rotor yaitu pada saat 0,06 detik. Terdapat waktu *step* rotor untuk menentukan langkah waktu yaitu bernilai 0,0005 detik.

3.4 Pengaturan Simulasi dengan Beban

Data simulasi berupa tegangan dengan beban, arus, dan daya maka perlu membuat rangkaian agar data tersebut dapat dihasilkan. pada menu *Windows* pilih *New Circuit Window*. Diperlukan rangkaian tambahan berupa dioda yang berfungsi untuk menyearahkan gelombang pada setiap fasa, dan hambatan berupa resistor yang berfungsi sebagai beban. Nilai resistor yang digunakan bervariasi dari 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm pada menu *Windows* pilih *New Circuit Window*, kemudian bentuk sebuah rangkaian seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Rangkaian Simulasi Dengan Beban

Rangkaian Gambar 3.5 merupakan rangkaian tiga fasa yang masing-masing fasanya dihubungkan secara *Wye-Connection* dengan masing-masing fasa tersusun atas 12 *coil* yang disusun secara seri untuk dioda merupakan rangkaian penyearah. Selanjutnya menganalisis hasil nilai keluaran dari PMSG yaitu arus, tegangan, torsi, daya masukan, daya keluaran, efisiensi, dan data keluaran dari simulasi kemudian akan diolah dengan menggunakan *software* Microsoft Excel.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan *Permanent Magnet Synchronous Generator*

Bab ini membahas tentang analisa data dari hasil simulasi yang telah dilakukan menggunakan *software Magnet Infolytica*. Tidak hanya itu pada bab ini membahas tentang perbandingan hasil simulasi dari 9 model yang telah dibuat. Data yang diperoleh dari *software Magnet Infolytica* diolah menggunakan *Microsoft Excel*. Berikut parameter yang didapatkan akan dijabarkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Parameter Dimensi Generator

No	Parameter	Keterangan
1	Diameter luar stator	200 mm
2	Diameter dalam stator	120 mm
3	Diameter dalam <i>slot</i>	174 mm
4	Diameter rotor	118 mm
5	Diameter luar area magnet	118 mm
6	Diameter dalam area magnet	110 mm
7	Tebal magnet	4 mm
8	Lebar <i>teeth</i>	13 mm (12 <i>slot</i>) 10 mm (15 <i>slot</i>) 9 mm (18 <i>slot</i>)

Tabel 4.1 merupakan ukuran yang digunakan untuk membuat *design* PMSG. Data hasil simulasi ditampilkan setiap model dengan rincian hasil simulasi dalam keadaan dengan beban. Pengukuran tegangan pada setiap model dilakukan dengan membuat rangkaian seperti yang sudah dijelaskan pada bab 3. Setiap model pada empat kecepatan putar rotor yang berbeda-beda dan lima variasi resistansi. Sebagaimana yang ditampilkan pada Tabel 4.2 merupakan data variasi kecepatan, sedangkan untuk variasi resistansi disimulasikan dari resistansi 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm.

Tabel 4.2 Parameter Variasi Kecepatan

RPM	deg/s
1000	6000
750	4500
500	3000
350	2100

Parameter dalam Tabel 4.2 memiliki satuan *deg/s* digunakan sebagai masukan *Motion* pada *software* Magnet *Infolytica*. Rotor berputar dengan kecepatan yang sama, sehingga dibutuhkan waktu perputaran rotor per setiap derajat supaya rotor bergerak konstan. Selanjutnya data yang diambil untuk setiap simulasi kecepatan yaitu sebanyak 120 data, untuk dapat mensimulasikan rotor berputar 360° maka dibutuhkan masukan data berupa waktu setiap kecepatan yang ditampilkan pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Data Waktu Variasi Kecepatan

Deg/s	Start (s)	Stop (s)	Step (s)
6000	0	0,06	0,0005
4500	0	0,08	0,00067
3000	0	0,12	0,001
2100	0	0,17	0,00142

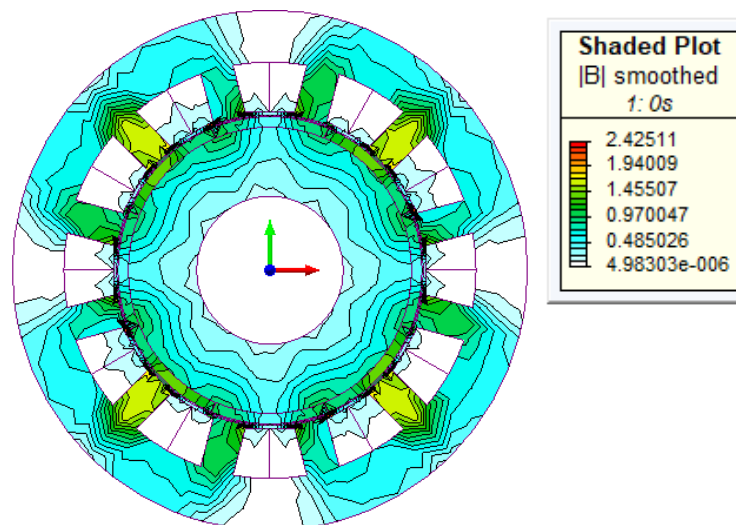
Data waktu dalam Tabel 4.3 selanjutnya dijadikan parameter masukan data pada menu *Solve Transient Optionc* di *software* Magnet *Infolytica*. Parameter yang telah diperoleh berupa kecepatan dalam satuan *deg/s* dan waktu tempuh dalam satuan *second* (s) kemudian dimasukkan kedalam pengaturan *software*. Selanjutnya mengatur rangkaian untuk pengukuran tegangan pada *software*. Selanjutnya melakukan proses *solving* untuk memperoleh karakteristik generator.

4.2 Simulasi Variasi Desain Slot dan Pole Generator

Sub bab kali ini akan membahas mengenai simulasi dari beberapa dimensi generator antara lain 12S8P, 15S8P, dan 18S10P. Hasil simulasi akan menampilkan arah pergerakan fluks magnet dan kurva karakteristik dari keluaran generator. Kurva karakteristik tersebut antara lain arus, tegangan, torsi, daya masukan, daya keluaran dan efisiensi. Berikut merupakan variasi dimensi generator yang telah dibuat.

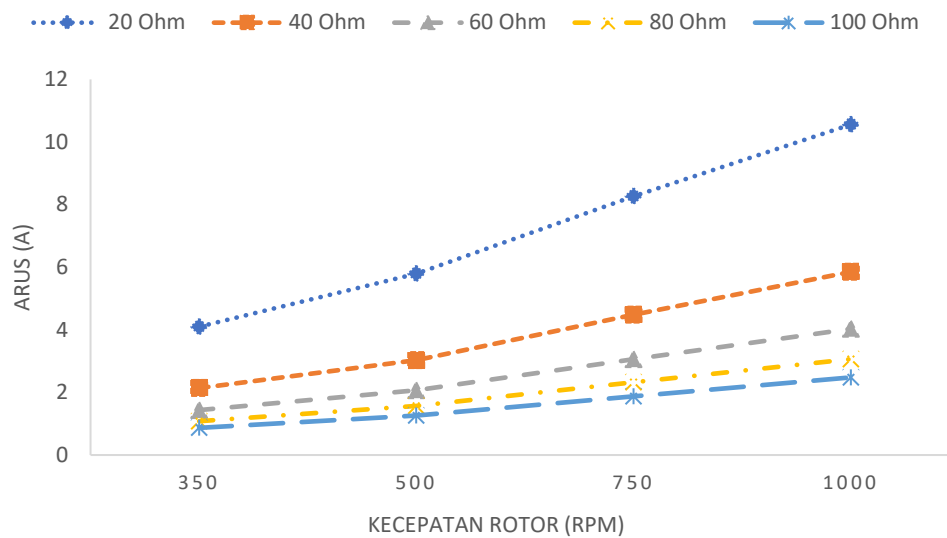
4.2.1 Hasil Desain Model Generator Sinkron 12S8P

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dengan membuat desain generator sinkron 12S8P, maka akan terlihat dari hasil arah fluks magnet yang berada di stator akibat induksi magnet permanen yang ada pada rotor. Nilai intensitas fluks magnet paling besar berada di antara *teeth* dengan nilai 1,455 T dan intensitas fluks magnet terkecil berada di pusat inti besi rotor dengan nilai $4,98 \times 10^{-6}$ T. Garis medan magnet dan arah fluks model generator 12S8P dapat dilihat dalam Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Hasil Simulasi Medan Magnet Desain 12S8P

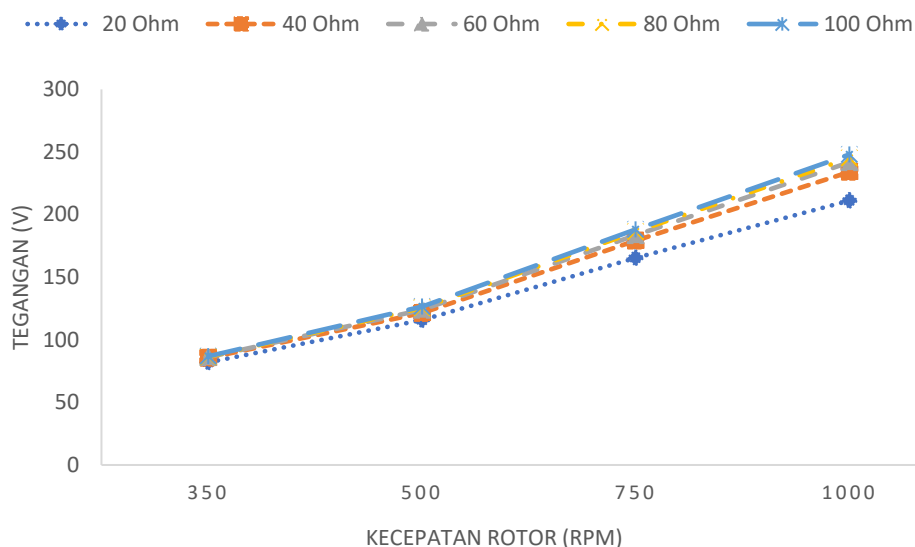
Gambar 4.1 menunjukkan pergerakan fluks yang terjadi dalam *rotor*, *stator* dan *airgap* generator. Terlihat sebaran fluks dimulai dari magnet permanen pada rotor sebagai pusat kerapatan fluks tertinggi dikarenakan magnet adalah sumber dari fluks tersebut, kemudian fluks mengalir melalui *teeth* dan masuk ke inti stator dikarenakan pada bagian *teeth* tersebut dililit oleh kumparan sehingga fluks masuk melalui *teeth* kemudian menyebar ke stator dengan perputaran yang berlangsung secara terus menerus seiring perputaran magnet pada rotor. Langkah selanjutnya yaitu dengan mensimulasikan PMSG untuk mendapatkan nilai arus dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Hasil nilai pada model generator 12S8P dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4.2 Nilai Arus Model Generator 12S8P

Berdasarkan Gambar 4.2 menunjukkan hasil nilai arus pada model generator 12S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran arus tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 10,55 A. Nilai keluaran arus terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 0,86 A. Semakin tinggi kecepatan rotor maka akan menghasilkan medan arus yang semakin tinggi karena apabila arus yang dibangkitkan dalam rotor semakin besar maka menghasilkan gaya tangensial yang semakin besar juga, sehingga torsi yang dihasilkan oleh generator juga meningkat. Gaya tangensial tersebut terjadi akibat interaksi antara arus dan medan magnet yang saling berpotongan.

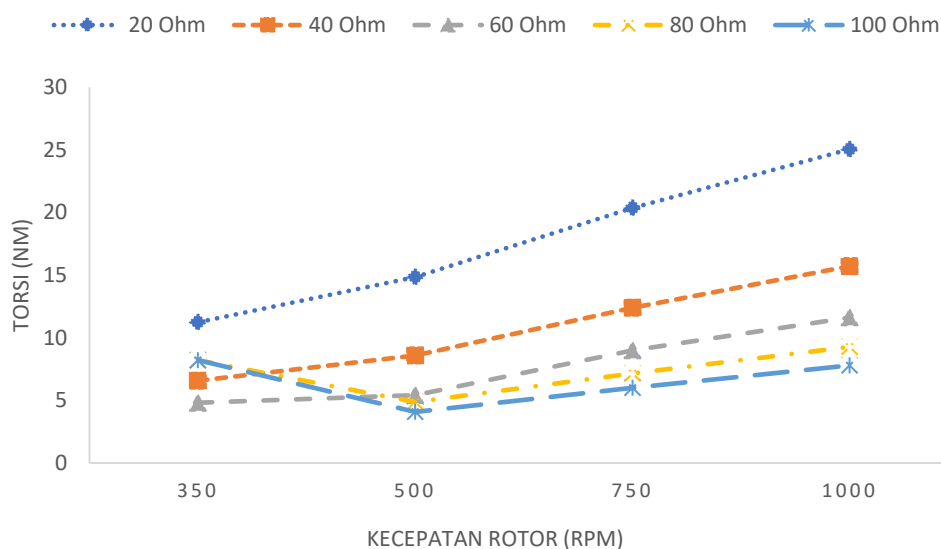
Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai tegangan dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai tegangan pada model generator 12S8P dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini.



Gambar 4.3 Nilai Tegangan Model Generator 12S8P

Berdasarkan Gambar 4.3 menunjukkan hasil nilai tegangan pada model generator 12S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran tegangan tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm yaitu 248,04 V. Nilai keluaran tegangan terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm dengan nilai 81,98 V. Semakin tinggi kecepatan rotor maka akan menghasilkan tegangan yang semakin tinggi karena apabila tegangan yang dibangkitkan dalam rotor semakin besar, maka menghasilkan gaya tangensial yang semakin besar juga, sehingga torsi yang dihasilkan oleh generator juga meningkat. Gaya tangensial tersebut terjadi akibat interaksi antara tegangan dan medan magnet yang saling berpotongan.

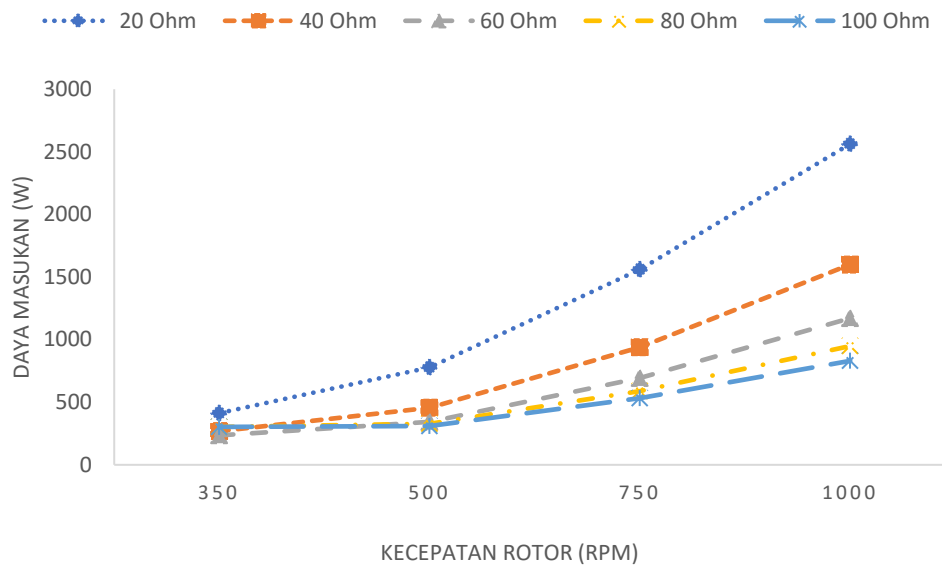
Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai torsi dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai torsi pada model generator 12S8P dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Nilai Torsi Model Generator 12S8P

Berdasarkan Gambar 4.4 menunjukkan hasil nilai torsi pada model generator 12S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran torsi tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 25,06 Nm. Nilai keluaran torsi terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 500 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 4,07 Nm. Semakin tinggi kecepatan rotor maka akan menghasilkan torsi yang semakin tinggi karena apabila torsi yang dibangkitkan dalam rotor semakin besar, maka menghasilkan gaya tangensial yang semakin besar juga, sehingga torsi yang dihasilkan oleh generator juga meningkat. Torsi yang dihasilkan ini menjadi sebanding dengan kecepatan putar rotor pada generator.

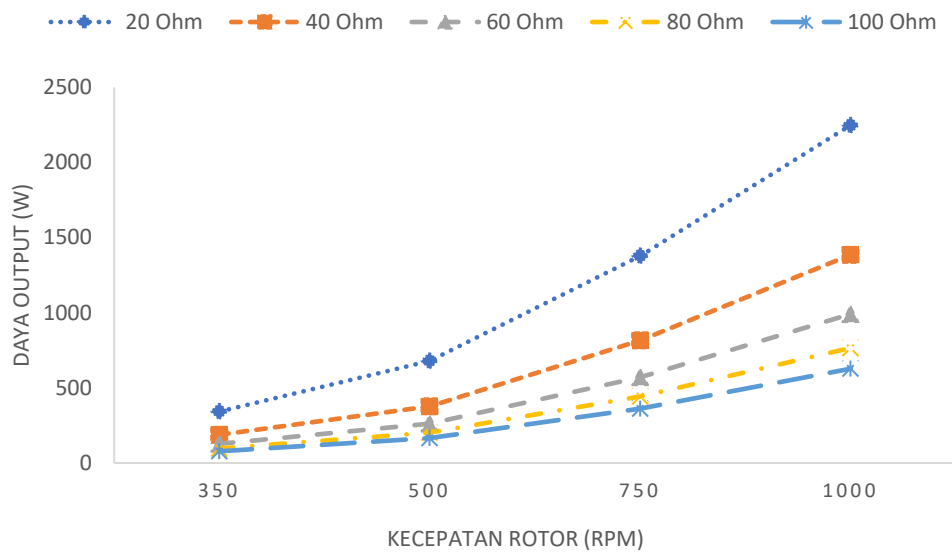
Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai daya masukan dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai daya masukan pada model generator 12S8P dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.5 Nilai Daya Masukan Model Generator 12S8P

Berdasarkan Gambar 4.5 menunjukkan hasil nilai daya masukan pada model generator 12S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran daya masukan tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 2562,84 W. Nilai keluaran daya masukan terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 60 Ohm dengan nilai 235,39 W. Semakin tinggi kecepatan rotor maka akan menghasilkan tegangan dan arus yang semakin tinggi karena apabila torsi yang dibangkitkan dalam rotor semakin besar, maka menghasilkan gaya tangensial yang semakin besar juga, sehingga daya yang dihasilkan oleh generator juga meningkat. Daya yang dihasilkan ini menjadi sebanding dengan kecepatan putar rotor pada generator.

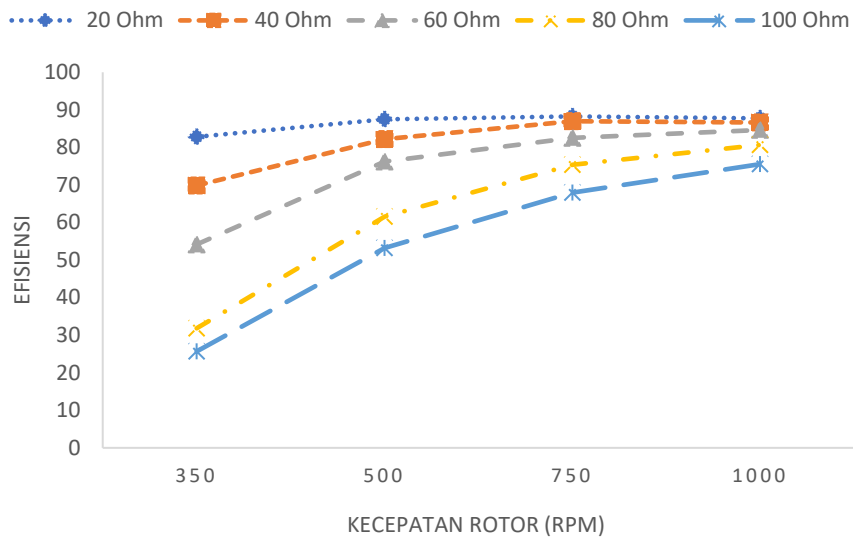
Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai daya keluaran dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai daya keluaran pada model generator 12S8P dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut ini.



Gambar 4.6 Nilai Daya Keluaran Model Generator 12S8P

Berdasarkan Gambar 4.6 menunjukkan hasil nilai daya keluaran pada model generator 12S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran daya keluaran tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 2248,12 W. Nilai keluaran daya keluaran terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 77,81 W. Semakin tinggi kecepatan rotor maka akan menghasilkan tegangan dan arus yang semakin tinggi karena apabila torsi yang dibangkitkan dalam rotor semakin besar, maka menghasilkan gaya tangensial yang semakin besar juga, sehingga daya yang dihasilkan oleh generator juga meningkat. Daya yang dihasilkan ini menjadi sebanding dengan kecepatan putar rotor pada generator.

Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai efisiensi dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai efisiensi pada model generator 12S8P dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut ini.

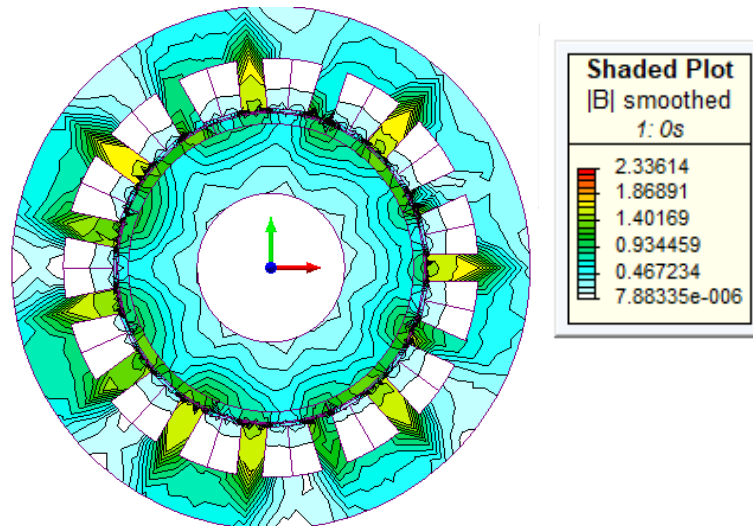


Gambar 4.7 Nilai Efisiensi Model Generator 12S8P

Berdasarkan Gambar 4.7 menunjukkan hasil nilai efisiensi pada model generator 12S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran efisiensi tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 750 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 88,24 %. Nilai keluaran efisiensi terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 25,67 %. Semakin besar nilai resistansi maka semakin kecil nilai efisiensi generator. Semakin kecil putaran rotor, maka semakin kecil nilai efisiensi generator.

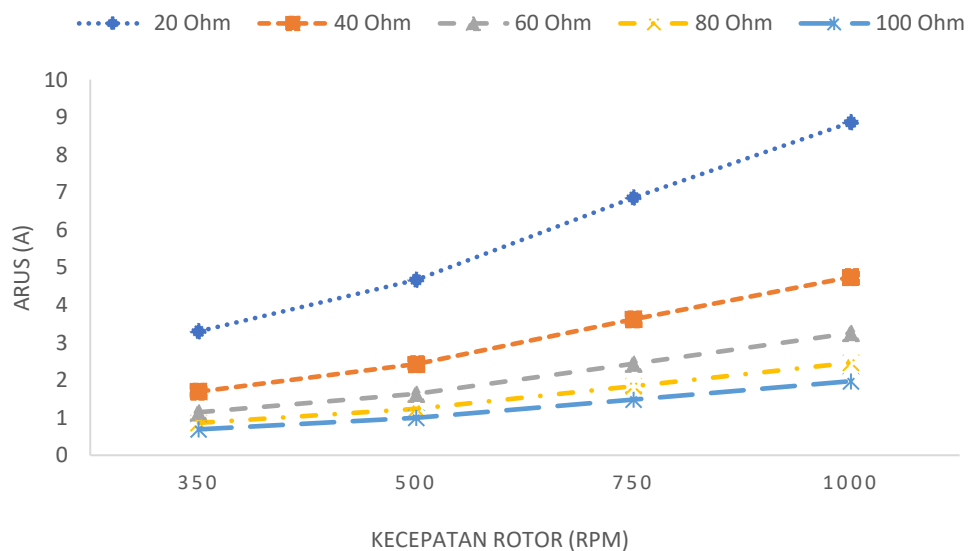
4.2.2 Hasil Desain Model Generator Sinkron 15S8P

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dengan membuat desain generator sinkron 15S8P, maka akan terlihat dari hasil arah fluks magnet yang berada di stator akibat induksi magnet permanen yang ada pada rotor. Nilai intensitas fluks magnet paling besar berada di antara *teeth* dengan nilai 2,3361 T dan intensitas fluks magnet terkecil berada di pusat inti besi rotor dengan nilai $7,8833 \times 10^{-6}$ T. Garis medan magnet dan arah fluks model generator 15S8P dapat dilihat dalam Gambar 4.8 berikut.



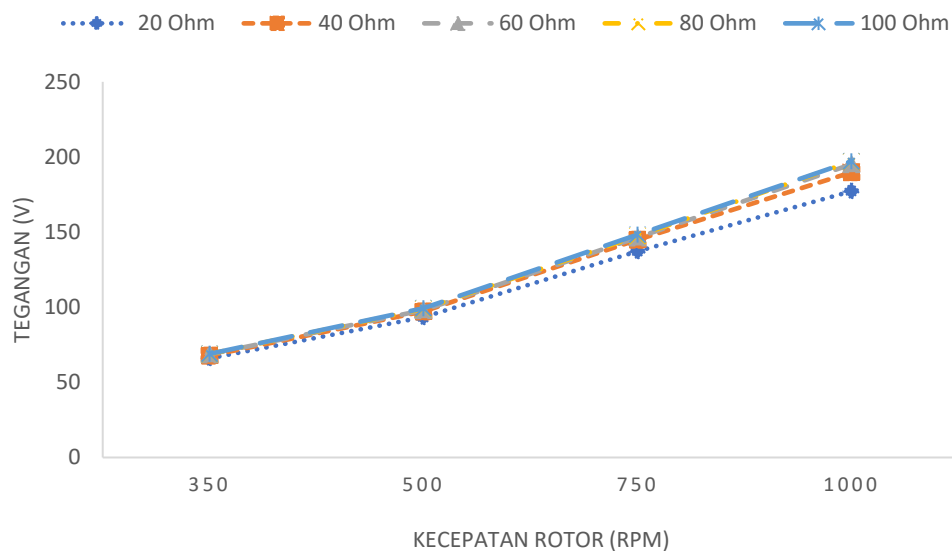
Gambar 4.8 Hasil Simulasi Medan Magnet Desain 15S8P

Gambar 4.8 menunjukkan pergerakan fluks yang terjadi dalam *rotor*, *stator* dan *airgap* generator. Langkah selanjutnya yaitu dengan mensimulasikan PMSG untuk mendapatkan nilai arus dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Hasil nilai arus pada model generator 15S8P dapat dilihat pada Gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.9 Nilai Arus Model Generator 15S8P

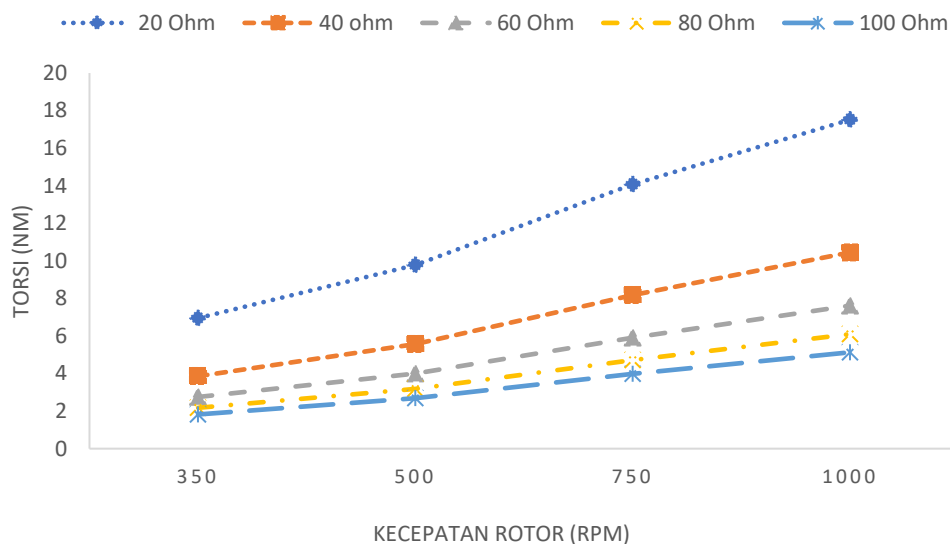
Berdasarkan Gambar 4.9 menunjukkan hasil nilai arus pada model generator 15S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran arus tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 8,86 A. Nilai keluaran arus terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 0,68 A. Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai tegangan dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Hasil nilai tegangan pada model generator 15S8P dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut ini.



Gambar 4.10 Nilai Tegangan Model Generator 15S8P

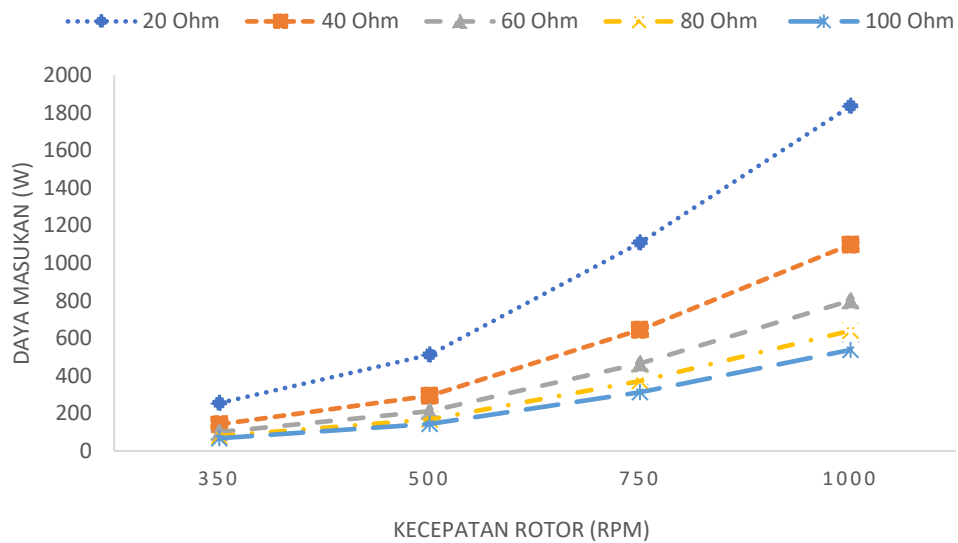
Berdasarkan Gambar 4.10 menunjukkan hasil nilai tegangan pada model generator 15S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran tegangan tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm yaitu 197,23 V. Nilai keluaran tegangan terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm dengan nilai 65,99 V. Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai torsi dengan variasi kecepatan

putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Hasil nilai torsi pada model generator 15S8P dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut ini.



Gambar 4.11 Nilai Torsi Model Generator 15S8P

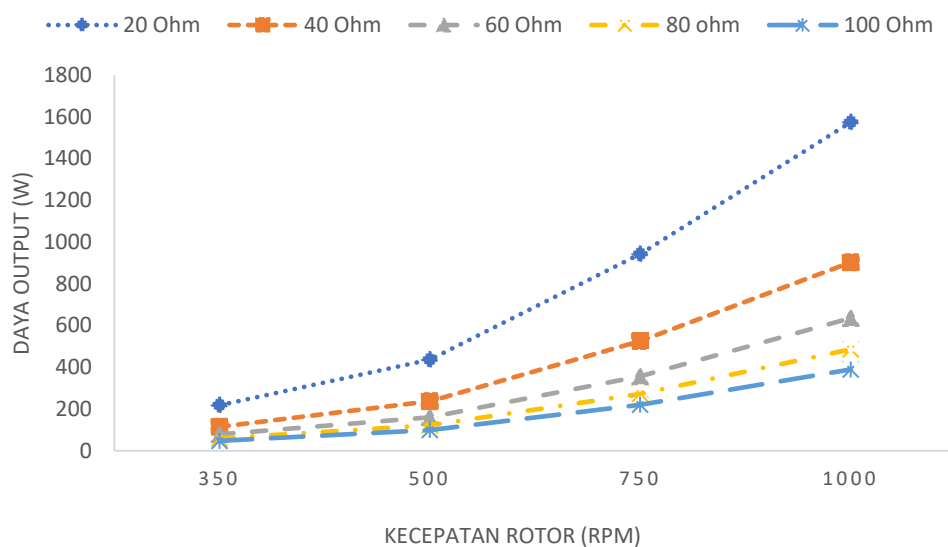
Berdasarkan Gambar 4.11 menunjukkan hasil nilai torsi pada model generator 15S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran torsi tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 17,51 Nm. Nilai keluaran torsi terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 1,82 Nm. Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai daya masukan dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai daya masukan pada model generator 15S8P dapat dilihat pada Gambar 4.12 berikut ini.



Gambar 4.12 Nilai Daya Masukan Model Generator 15S8P

Berdasarkan Gambar 4.12 menunjukkan hasil nilai daya masukan pada model generator 15S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran daya masukan tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 1835,83 W. Nilai keluaran daya masukan terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 67,42 W. Semakin tinggi kecepatan rotor maka akan menghasilkan tegangan dan arus yang semakin tinggi karena apabila torsi yang dibangkitkan dalam rotor semakin besar, maka menghasilkan gaya tangensial yang semakin besar juga, sehingga daya yang dihasilkan oleh generator juga meningkat. Daya yang dihasilkan ini menjadi sebanding dengan kecepatan putar rotor pada generator.

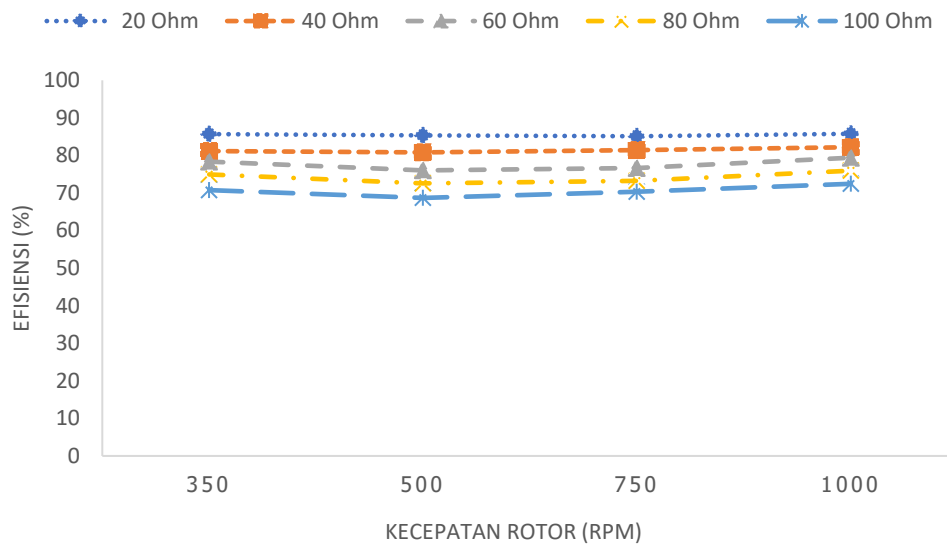
Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai daya keluaran dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai daya keluaran pada model generator 15S8P dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut ini.



Gambar 4.13 Nilai Daya Keluaran Model Generator 15S8P

Berdasarkan Gambar 4.13 menunjukkan hasil nilai daya keluaran pada model generator 15S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran daya keluaran tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 1574,50 W. Nilai keluaran daya keluaran terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 47,69 W. Semakin tinggi kecepatan rotor maka akan menghasilkan tegangan dan arus yang semakin tinggi karena apabila torsi yang dibangkitkan dalam rotor semakin besar, maka menghasilkan gaya tangensial yang semakin besar juga, sehingga daya yang dihasilkan oleh generator juga meningkat. Daya yang dihasilkan ini menjadi sebanding dengan kecepatan putar rotor pada generator.

Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai efisiensi dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai efisiensi pada model generator 15S8P dapat dilihat pada Gambar 4.14 berikut ini.

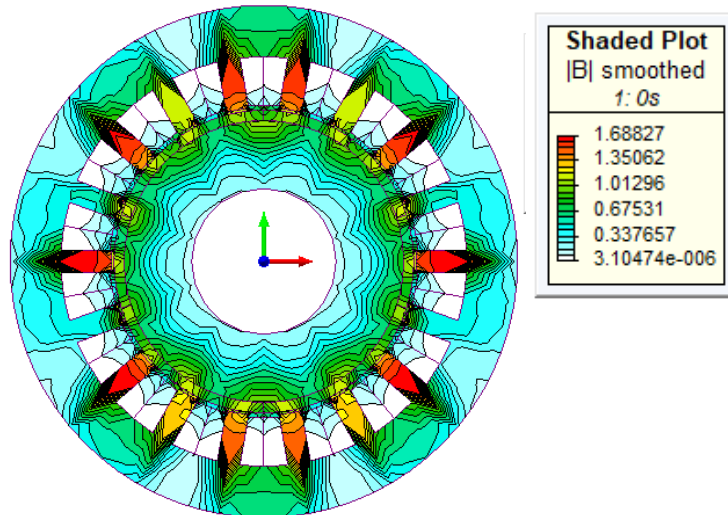


Gambar 4.14 Nilai Efisiensi Model Generator 15S8P

Berdasarkan Gambar 4.14 menunjukkan hasil nilai efisiensi pada model generator 15S8P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran efisiensi tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 85,76 %. Nilai keluaran efisiensi terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 500 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 68,69 %. Semakin besar nilai resistansi maka semakin kecil nilai efisiensi generator. Semakin kecil putaran rotor, maka semakin kecil nilai efisiensi generator.

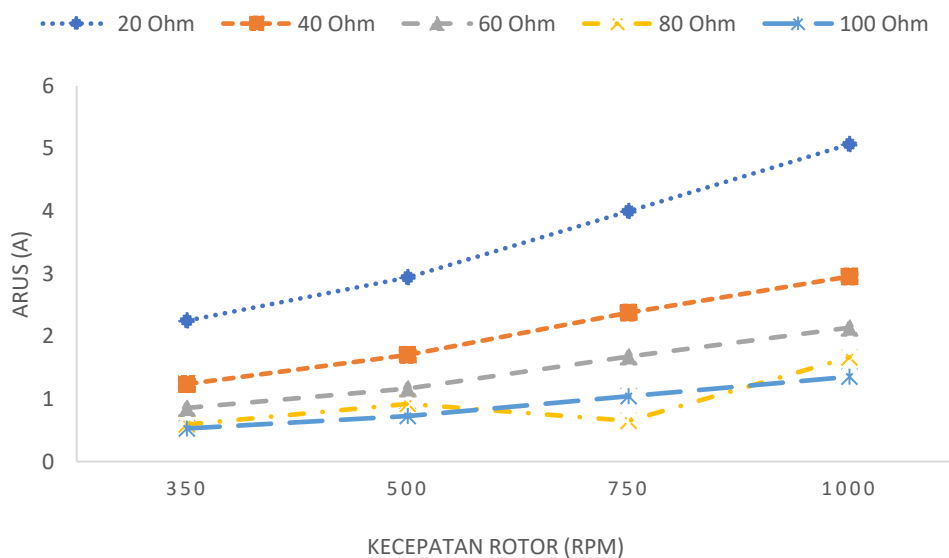
4.2.3 Hasil Desain Model Generator Sinkron 18S10P

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dengan membuat desain generator sinkron 18S10P, maka akan terlihat dari hasil arah fluks magnet yang berada di stator akibat induksi magnet permanen yang ada pada rotor. Nilai intensitas fluks magnet paling besar berada di antara *teeth* dengan nilai 1,6882 T dan intensitas fluks magnet terkecil berada di pusat inti besi rotor dengan nilai $3,1047 \times 10^{-6}$ T. Garis medan magnet dan arah fluks model generator 18S10P dapat dilihat dalam Gambar 4.15 berikut.



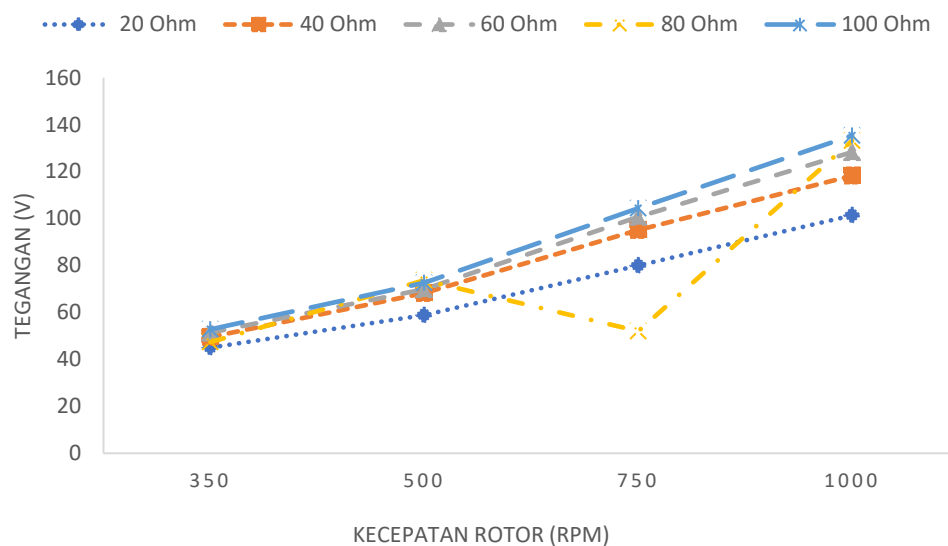
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Medan Magnet Desain 18S10P

Gambar 4.15 menunjukkan pergerakan fluks yang terjadi dalam *rotor*, *stator* dan *airgap* generator. Langkah selanjutnya yaitu dengan mensimulasikan PMSG untuk mendapatkan nilai arus dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Hasil nilai arus pada model generator 18S10P dapat dilihat pada Gambar 4.16 berikut ini.



Gambar 4.16 Nilai Arus Model Generator 18S10P

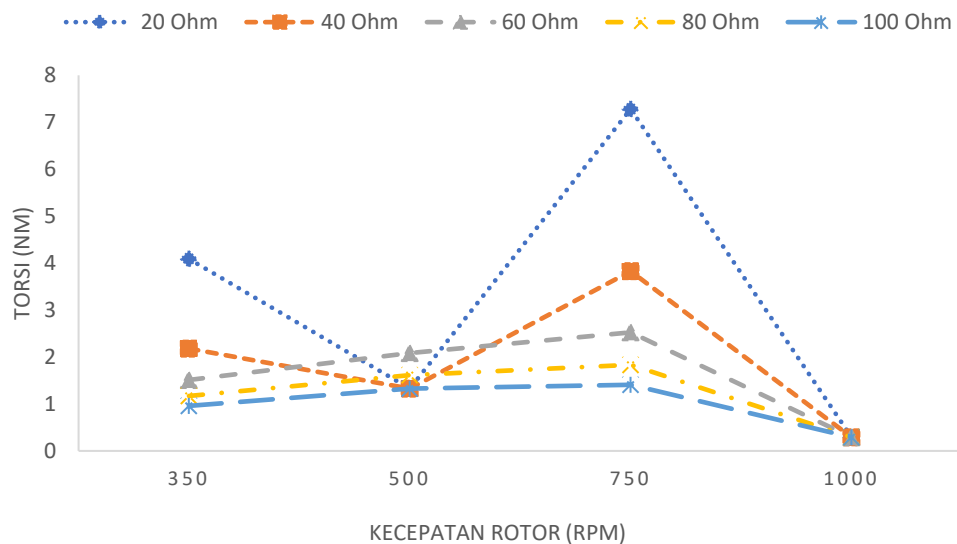
Berdasarkan Gambar 4.16 menunjukkan hasil nilai arus pada model generator 18S10P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran arus tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 5,06 A. Nilai keluaran arus terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 0,52 A. Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai tegangan dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Hasil nilai tegangan pada model generator 18S10P dapat dilihat pada Gambar 4.17 berikut ini.



Gambar 4.17 Nilai Tegangan Model Generator 18S10P

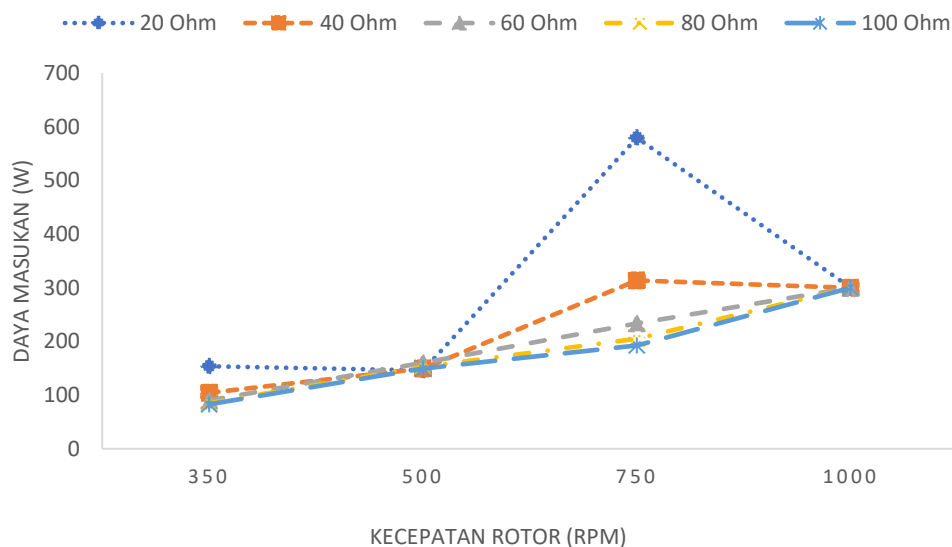
Berdasarkan Gambar 4.17 menunjukkan hasil nilai tegangan pada model generator 18S10P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran tegangan tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm yaitu 135,35 V. Nilai keluaran tegangan terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm dengan nilai 45,02 V. Selanjutnya yaitu

melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai torsi dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Hasil nilai torsi pada model generator 18S10P dapat dilihat pada Gambar 4.18 berikut ini.



Gambar 4.18 Nilai Torsi Model Generator 18S10P

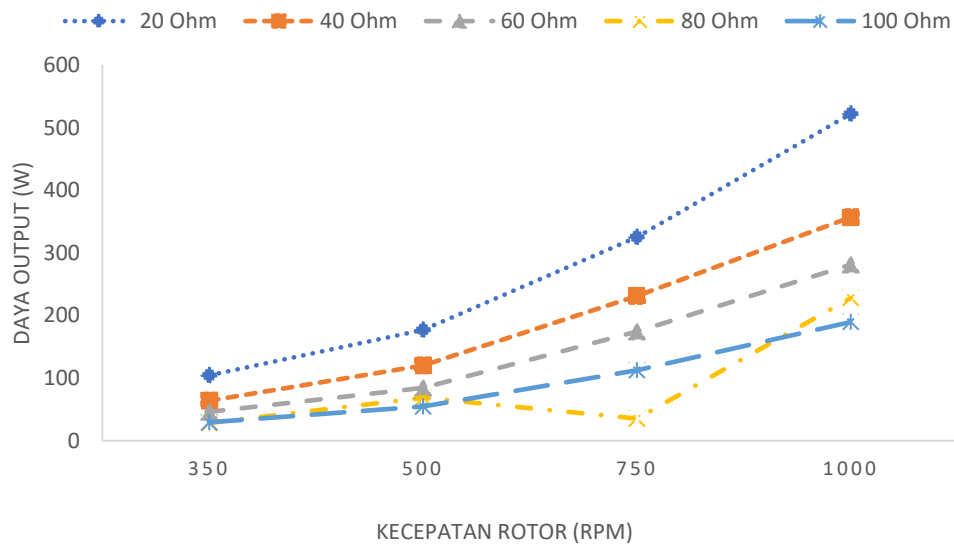
Berdasarkan Gambar 4.18 menunjukkan hasil nilai torsi pada model generator 18S10P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran torsi tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 750 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 7,28 Nm. Nilai keluaran torsi terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 0,2912 Nm. Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai daya masukan dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Hasil nilai daya masukan pada model generator 18S10P dapat dilihat pada Gambar 4.19 berikut ini.



Gambar 4.19 Nilai Daya Masukan Model Generator 18S10P

Berdasarkan Gambar 4.19 menunjukkan hasil nilai daya masukan pada model generator 18S10P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran daya masukan tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 750 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 579,56 W. Nilai keluaran daya masukan terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 100 Ohm dengan nilai 82,93 W. Semakin tinggi kecepatan rotor maka akan menghasilkan tegangan dan arus yang semakin tinggi karena apabila torsi yang dibangkitkan dalam rotor semakin besar, maka menghasilkan gaya tangensial yang semakin besar juga, sehingga daya yang dihasilkan oleh generator juga meningkat. Daya yang dihasilkan ini menjadi sebanding dengan kecepatan putar rotor pada generator.

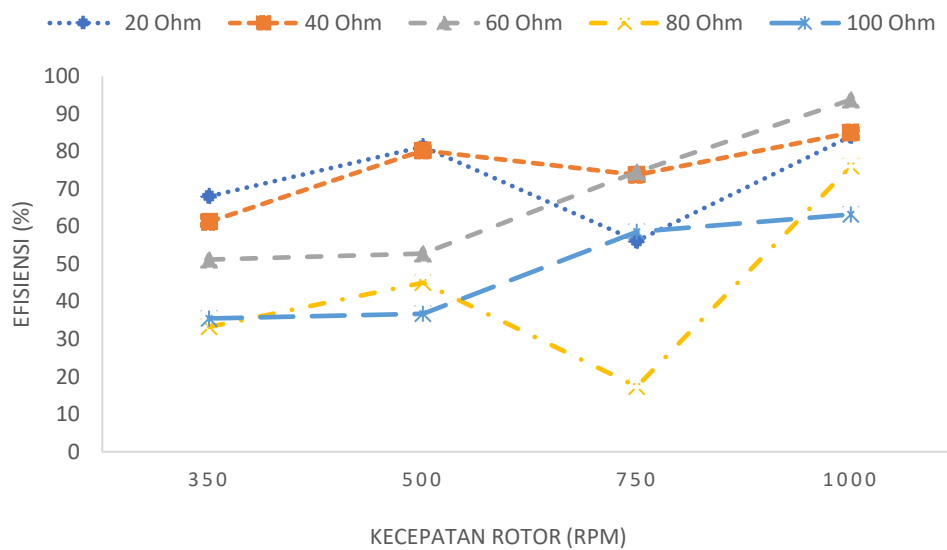
Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai daya keluaran dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai daya keluaran pada model generator 18S10P dapat dilihat pada Gambar 4.20 berikut ini.



Gambar 4.20 Nilai Daya Keluaran Model Generator 18S10P

Berdasarkan Gambar 4.20 menunjukkan hasil nilai daya keluaran pada model generator 18S10P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran daya keluaran tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 522,31 W. Nilai keluaran daya keluaran terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 350 RPM dan resistansi yang diberikan 80 Ohm dengan nilai 28,35 W. Semakin tinggi kecepatan rotor maka akan menghasilkan tegangan dan arus yang semakin tinggi karena apabila torsi yang dibangkitkan dalam rotor semakin besar, maka menghasilkan gaya tangensial yang semakin besar juga, sehingga daya yang dihasilkan oleh generator juga meningkat. Daya yang dihasilkan ini menjadi sebanding dengan kecepatan putar rotor pada generator.

Selanjutnya yaitu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai efisiensi dengan variasi kecepatan putaran rotor sebesar 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM dan variasi nilai resistansi yang diberikan sebesar 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Variasi nilai resistansi tersebut dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan apabila dilakukan simulasi terhadap nilai beban yang berbeda. Hasil nilai efisiensi pada model generator 18S10P dapat dilihat pada Gambar 4.21 berikut ini.



Gambar 4.21 Nilai Efisiensi Model Generator 18S10P

Berdasarkan Gambar 4.21 menunjukkan hasil nilai efisiensi pada model generator 18S10P dengan parameter variasi kecepatan putar rotor yaitu 350 RPM, 500 RPM, 750 RPM dan 1000 RPM, dengan variasi resistansi yaitu 20 Ohm, 40 Ohm, 60 Ohm, 80 Ohm dan 100 Ohm. Nilai keluaran efisiensi tertinggi pada saat kecepatan putar rotor 1000 RPM dan resistansi yang diberikan 20 Ohm yaitu 174,01 %. Nilai keluaran efisiensi terkecil yaitu pada saat kecepatan putar 750 RPM dan resistansi yang diberikan 80 Ohm dengan nilai 17,36 %. Semakin besar nilai resistansi maka semakin kecil nilai efisiensi generator. Semakin kecil putaran rotor, maka semakin kecil nilai efisiensi generator.

4.3 Pemilihan Model

Berdasarkan analisa data yang telah dipaparkan dalam sub bab sebelumnya, maka langkah selanjutnya yaitu dengan melakukan pemilihan model generator berdasarkan karakteristiknya. Hasil tersebut dibandingkan terhadap nilai efisiensi, torsi, daya keluaran dan arus. Perbandingan nilai dari setiap desain generator dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Variasi Beban dan Kecepatan

12S8P				
RPM	Beban (Ohm)	Arus (A)	Torsi (Nm)	Efisiensi Rata-Rata (%)
1000	20 s.d. 100	2,48 s.d. 10,55	7,78 s.d. 25,06	83,02
750	20 s.d. 80	2,32 s.d. 8,26	7,14 s.d. 20,37	83,25
500	20 s.d. 60	2,06 s.d. 5,79	5,42 s.d. 14,84	81,98
350	20 s.d. 40	2,13 s.d. 4,09	6,57 s.d. 11,24	76,32
15S8P				
RPM	Beban (Ohm)	Arus (A)	Torsi (Nm)	Efisiensi Rata-Rata(%)
1000	20 s.d. 80	2,46 s.d. 8,86	6,09 s.d. 17,51	80,82
750	20 s.d. 80	1,84 s.d. 6,86	4,71 s.d. 14,07	79,1
500	20 s.d. 80	1,23 s.d. 4,66	3,19 s.d. 9,77	78,67
350	20 s.d. 80	0,86 s.d. 3,29	2,17 s.d. 6,95	80,03
18S10P				
RPM	Beban (Ohm)	Arus (A)	Torsi (Nm)	Efisiensi Rata-Rata(%)
1000	40 s.d. 60	2,13 s.d. 2,99	0,29 s.d. 0,3	89,34
750	40 s.d. 60	1,67 s.d. 2,37	2,52 s.d. 3,82	74,13
500	20 s.d. 40	1,7 s.d. 2,94	1,32 s.d. 1,33	80,73
350	20	2,25	4,08	68,01

Berdasarkan Tabel 4.4 dapat dilihat perbandingan arus, torsi dan efisiensi rata-rata dari setiap model generator dengan variasi kecepatan dan variasi beban. Model yang memiliki efisiensi tertinggi pada kecepatan 1000 RPM yaitu 18S10P dengan nilai 89,34%, sedangkan untuk nilai torsi terendah dimiliki oleh model yang sama yaitu 18S10P dengan nilai 0,3 Nm. Model yang memiliki efisiensi tertinggi pada kecepatan 750 RPM yaitu 18S8P dengan nilai 94,21%, sedangkan untuk nilai torsi terendah dimiliki oleh model 18S10P dengan nilai 2,52 Nm.

Model yang memiliki efisiensi tertinggi pada kecepatan 500 RPM yaitu 12S8P dengan nilai 81,98 %, sedangkan untuk nilai torsi terendah dimiliki oleh model 18S10P dengan nilai 1,32 Nm. Model yang memiliki efisiensi tertinggi pada kecepatan 350 RPM yaitu 15S8P dengan nilai 80,03 %, sedangkan untuk nilai torsi terendah dimiliki oleh model yang sama yaitu 15S8P dengan nilai 2,17 Nm. Terdapat model yang tidak menghasilkan daya keluaran sebesar 1000W yaitu 15S10P dan 18S8P.

Model yang memiliki nilai efisiensi rata-rata tertinggi yaitu 12S8P dan 15S8P. Nilai torsi yang dihasilkan dari model tersebut juga memiliki rentang yang jauh dengan nilai 5,42 sampai 25,06 untuk model 12S8P dan 2,17 sampai

17,51 untuk model 15S8P. Daya keluaran yang dihasilkan sebesar 1377,56 W untuk model 12S8P dan 1108,88 W untuk model 15S8P.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis terhadap simulasi dan pengujian terhadap desain *slot* dan *pole* generator pada kecepatan dan beban yang berbeda dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil desain simulasi generator PMSG berhasil mencapai keluaran yang paling optimal yaitu 12S8P dengan daya 1377,56 W dan 15S8P dengan daya 1574,5 W.
2. Kurva karakteristik generator berupa arus, tegangan, torsi, daya masukan, daya keluaran dan efisiensi generator memiliki nilai yang berbeda berdasarkan kombinasi desain geometri *slot-pole* generator. Nilai arus untuk model 12S8P yaitu 8,26 A dan model 15S8P yaitu 8,86 A. Nilai tegangan untuk model 12S8P yaitu 165,26 V dan model 15S8P yaitu 177,25 V. Nilai torsi untuk model 12S8P yaitu 20,37 Nm dan 15S8P yaitu 17,51 Nm.
3. Kenaikan jumlah *pole* dengan jumlah *slot* yang sama dapat mempengaruhi penurunan efisiensi generator, penurunan yang signifikan untuk jumlah *slot* 12 dari 10 ke 16 *pole* yaitu dari 75,52 % ke 37,08 %, kemudian terjadi penurunan yang signifikan untuk jumlah *slot* 15 dari 8 *pole* ke 10 *pole* yaitu 80,82 % ke 79,14 % dan penurunan yang signifikan untuk jumlah *slot* 18 dari 10 ke 16 *pole* yaitu dari 89,34% ke 28,21 %. Kenaikan jumlah *slot* dengan jumlah *pole* yang sama dapat mempengaruhi penurunan nilai arus, tegangan, daya dan torsi.

5.2 Saran

Saran yang dapat dilakukan untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya yaitu.

1. Melakukan pengembangan perancangan menggunakan topologi *interior permanent magnet*.

2. Melakukan simulasi dengan pengaruh kombinasi *slot* dan *pole* terhadap nilai *cogging torque* dan *torque ripple*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nurlaila and A. T. Yulianto, “Perkembangan Energi Terbarukan di Beberapa Negara,” *Prosiding Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir*, pp. 11–21, 2019.
- [2] Anonim, “Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Tentang Kebijakan Energi Nasional No. 79” pp. 1–36, 2014.
- [3] Budiastara I. N., I. A. D. Giriantari, W. Artawijaya, and C. I. Partha, “Pemanfaatan Energi Angin Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik Di Nusa Penida Dan Dampaknya Terhadap Lingkungan,” *Jurnal Bumi Lestari*, vol. 9, no. 2, Agustus, pp. 263–267, 2009.
- [4] Adistia N. A., R. A. Nurdiansyah, J. Fariko, Vincent, and J. W. Simatupang, “Potensi Energi Panas Bumi, Angin, Dan Biomassa Menjadi Energi Listrik Di Indonesia,” *TESLA Jurnal Teknik Elektro*, vol. 22, no. 2, pp. 105-110, 2020, doi: 10.24912/tesla.v22i2.9107.
- [5] Bachtiar A. and W. Hayyatul, “Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras,” *Jurnal Teknik Elektro ITP*, vol. 7, no. 1, pp. 34–45, 2018, doi: 10.21063/jte.2018.3133706.
- [6] Shaik N., “Design and Comparison of Permanent Magnet Motor Topologies for Different Application Sectors,” Thesis. Department of Electrical Engineering Polytechnic Milano, Milan, 2022.
- [7] Lim D. K. and J. S. Ro, “Analysis And Design Of A Delta-Type Interior Permanent Magnet Synchronous Generator By Using An Analytic Method,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 85139–85145, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924537.
- [8] Liu W. and T. A. Lipo, “A Family Of Vernier Permanent Magnet Machines Utilizing An Alternating Rotor Leakage Flux Blocking Design,” *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, vol. 2, pp. 2461–2468, 2017, doi: 10.1109/ECCE.2017.8096472.
- [9] Ghaheri A., A. M. Ajamloo, H. Torkaman, and E. Afjei, “Design, Modelling And Optimisation Of A Slotless Axial Flux Permanent Magnet Generator For Direct-Drive Wind Turbine Application,” *IET Electric Power*

- Applications*, vol. 14, no. 8, pp. 1291–1310, 2020, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0385
- [10] Magnussen F. and H. Lendenmann, “Parasitic Effects In PM Machines With Concentrated Windings,” *IEEE Transactions of Industry Applications*, vol. 43, no. 5, pp. 1223–1232, 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.904400.
- [11] Manishe M. I., A. Hasibuan, and R. Putri, “Perancangan Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Finite Element Method (FEM),” *Jurnal Energi Elektrik*, vol. 10, no. 1, p. 42-48, 2021, doi: 10.29103/jee.v10i1.4895.
- [12] Pahlevi R. and D. B. Santoso, “Analisis Concentrated Winding Menggunakan Metode Clockwise dan Kombinasi pada PMSG 12S8P,” *Electrician - Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 16, no. 2, pp. 223–231, 2022, doi: 10.23960/elc.v16n2.2297.
- [13] Wolnik T., V. Styskala, T. Mlcak, “Study On The Selection Of The Number Of Magnetic Poles And The *Slot-Pole* Combinations In Fractional *Slot* PMSM Motor With A High Power Density,” *Energies*, vol. 15, no. 1, 2022, doi: 10.3390/en15010215.
- [14] Irfan M., R. F. Ariyanto, L. Syafaah, A. Faruq, Nurhadi, N. Subeki, “Stator Slotted Design Of Axial Flux Permanent Magnet Generator For Low-Speed Turbine,” *IOP Conference Series Material Science and Engineering (ICEAT)*, vol. 821, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/821/1/012027.
- [15] Sun T., J. Wang, C. Jia, L. Peng, “Integration Of FOC With DFVC For Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Drives,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 97935–97945, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2996948.
- [16] Prashanth N. A., “Flux Maximization In Wind Turbine Permanent Magnet Synchronous Generator Made Of NdFeB Permanent Magnets,” *Materials Today Proceeding.*, vol. 49, no. June, pp. 731–737, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.224.
- [17] Heng T. Y., T. J. Ding, C. C. W. Chang, T. J. Ping, H. C. Yian, and M. Dahari, “Permanent Magnet Synchronous Generator Design Optimization For Wind Energy Conversion System: A Review,” *7th International Conference on Advances on Clean Energy Research, ICACER*, vol. 8, pp.

- 277–282, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.10.239.
- [18] Khan S., S. S. H. Bukhari, J. S. Ro, “Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 173848–173854, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957046.
- [19] Ullah W., F. Khan, S. Hussain, “Investigation of Inner/Outer Rotor Permanent Magnet Flux Switching Generator For Wind Turbine Applications,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 149110–149117, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3122883.
- [20] Zhao J., Y. Liu, and X. Xu, “Comparisons of Concentrated and Distributed Winding PMSM in MV Power Generation,” *Proceedings 23rd International Conference on Electrical Machines, ICEM*, 2018, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8507199.
- [21] Gonçalves P. F. C., S. M. A. Cruz, and A. M. S. Mendes, “Design Of A Six-Phase Asymmetrical Permanent Magnet Synchronous Generator For Wind Energy Applications,” *The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, vol. 2019, no. 17, pp. 4532–4536, 2019, doi: 10.1049/joe.2018.8175.
- [22] Soltani M., S. Nuzzo, D. Barater, G. Franceschini, “A Multi-Objective Design Optimization For A Permanent Magnet Synchronous Machine With Hairpin Winding Intended For Transport Applications,” *Electronics*, vol. 10, no. 24, 2021, doi: 10.3390/electronics10243162.
- [23] Mahmoud M. M., M. K. Ratib, M. M. Aly, and A. M. M. A. Rahim, “Wind-Driven Permanent Magnet Synchronous Generators Connected To A Power Grid: Existing Perspective And Future Aspects,” *Wind Engineering*, vol. 46, no. 1, pp. 189–199, 2022, doi: 10.1177/0309524X211022728.
- [24] Herisanu N., V. Marinca, G. Madescu, and F. Dragan, “Dynamic Response Of A Permanent Magnet Synchronous Generator To A Wind Gust,” *Energies*, vol. 12, no. 5, pp. 1–11, 2019, doi: 10.3390/en12050915.
- [25] Jedryczka C., D. Danielczyk, W. Szelag, “Torque Ripple Minimization of the Permanent Magnet Synchronous Machine By Modulation Of The Phase Currents,” *Sensors*, vol. 20, no. 2406, p. 11, 2020.

- [26] Pramono G. E., F. Muliawati, and N. F. Kurniawan, “Desain Dan Uji Kinerja Generator Ac Fluks Radial,” *Electronic Journal UIKA*, pp. 34–40, 2020.
- [27] Irfan J. and A. Hamzah, “Disain Dan Simulasi Generator Magnet Permanen 3 Phasa Menggunakan Softwawre Magnet Untuk Pembangkit Listrik Tenaga”, *JOM Fteknik*, vol. 6, hal. 1–7, 2019.
- [28] Sun T., J. M. Kim, G. H. Lee, J. P. Hong, M. R. Choi, “Effect of *pole* and *slot* combination on noise and vibration in *permanent* magnet synchronous motor,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 5, pp. 1038–1041, 2011, doi: 10.1109/TMAG.2010.2093872.
- [29] Zhang Y. and F. Wang, “Choice Of *Pole-Slot* Number Combination For PM Generator Direct-Driven By Wind Turbine,”, 2008, doi: 10.1109/ICPST.2008.4745333.
- [30] Cortez R. I., J. D. L. Cruz, E. H. Mayoral, W. D. Gomez, “Evaluating the Broad Range Performance of a Radial Flux PMSG,”, 2019, doi: 10.1109/TLA.2019 .8986431.
- [31] Kilmartin J., A. Mahmoudi, “Effects of the *Pole-Slot* Combination on a Surface Permanent Magnet Generator for Wind Applications,” Thesis, Faculty of Science and Engineering Flinders University, Adelaide, 2016.
- [32] Dogan H., F. Wurtz, A. Foggia, and L. Garbuio, “Analysis Of *Slot-Pole* Combination Of Fractional-Slots PMSM For Embedded Applications,” *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP 2011 and Electromotion 2011 Joint Conference*, pp. 611–615, 2011, doi: 10.1109/ACEMP.2011.6490669.
- [33] Suhada M. O. and I. Yasri, “Aspek Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah,” *JOM FTEKNIK*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2018.

LAMPIRAN A DATA SIMULASI 12S8P

Current(A)	Voltage(V)	Load Force/Torque(Nm)	Pin	Pout
0	0	-2,76008	101,1621	0
1,221414	122,1414	-2,09444	76,7651	149,1852
0,808059	80,80595	2,788803	102,215	65,29601
0,674718	67,47177	-1,089	39,91397	45,5244
0,618515	61,85149	-4,30804	157,8978	38,25607
0,629854	62,98543	-13,694	501,9095	39,67164
1,110883	111,0883	-12,6096	462,1658	123,4061
1,009217	100,9217	-8,49463	311,3445	101,8518
0,979005	97,90053	1,174662	43,0536	95,84514
0,896679	89,66791	-10,3696	380,0644	80,40333
0,810858	81,08576	-17,6333	646,2924	65,74901
0,807505	80,75046	-13,4735	493,8291	65,20637
1,048461	104,8461	-11,2961	414,0227	109,9271
1,027162	102,7162	-2,40135	88,01416	105,5062
0,842153	84,21528	0,293293	10,74977	70,92214
0,657219	65,72185	-0,49494	18,14033	43,19362
0,627382	62,73815	-4,81986	176,6569	39,36076
0,633002	63,30015	-13,9423	511,0114	40,06909
1,118881	111,8881	-14,9355	547,4163	125,1895
1,057882	105,7882	-6,37416	233,625	111,9114
0,950511	95,05109	-4,43116	162,4105	90,34709
0,892456	89,24562	-7,36422	269,9128	79,64781
0,82522	82,52196	-13,9715	512,0805	68,09874
0,800155	80,01546	-13,6727	501,129	64,02474
1,068047	106,8047	-11,782	431,8338	114,0724
1,014442	101,4442	0,552119	20,23621	102,9093
0,817478	81,74775	-0,38862	14,2436	66,82695
0,642411	64,24115	-4,29892	157,5637	41,26925
0,622885	62,28853	-7,05826	258,6986	38,79861
0,700279	70,02793	-10,2924	377,2349	49,0391
1,091653	109,1653	-13,4297	492,2258	119,1706
1,066974	106,6974	-7,38792	270,7814	113,8433
0,95187	95,18704	-5,31168	194,6833	90,60573
0,886242	88,6242	-7,90693	289,804	78,54249
0,825125	82,51253	-12,1039	443,6298	68,08317
0,813758	81,37575	-13,9828	512,496	66,22013

1,055989	105,5989	-11,0934	406,5957	111,5113
,02987	102,987	-0,4692	17,19693	106,0633
0,793219	79,32195	4,383638	160,6687	62,91972
0,642641	64,26411	-1,52475	55,88514	41,29876
0,628002	62,80018	-9,47173	347,1572	39,43863
0,73227	73,227	-15,5538	570,0775	53,62193
1,066368	106,6368	-14,2909	523,7906	113,7141
1,027159	102,7159	-7,75173	284,1157	105,5056
0,963877	96,38772	-11,8136	432,99	92,90593
0,868856	86,88563	-9,68538	354,9879	75,49114
0,80209	80,20905	-8,42001	308,6095	64,33491
0,919794	91,9794	-10,9985	403,1154	84,60209
1,011213	101,1213	-11,0464	404,8723	102,2552
1,025935	102,5935	0,678511	24,86871	105,2542
0,775866	77,58661	1,892348	69,35818	60,19682
0,644262	64,4262	-1,54632	56,6754	41,50735
0,629888	62,9888	-9,09372	333,3024	39,67589
0,759298	75,92978	-13,6231	499,3139	57,65332
1,066468	106,6468	-14,68	538,0509	113,7354
1,033678	103,3678	-5,60465	205,4213	106,8491
0,942786	94,27856	-4,88495	179,0428	88,88447
0,862096	86,20964	-9,21864	337,8808	74,32101
0,826947	82,69471	-14,8321	543,6254	68,38416
0,917557	91,75566	-12,8278	470,1642	84,191
1,015658	101,5658	-10,4224	382,0008	103,1561

LAMPIRAN B DATA SIMULASI 15S8P

Current(A)	Voltage(V)	Load Force/Torque(Nm)	Pin	Pout
0	0	-2,76008	289,0345	0
6,562091	65,62091	-10,1156	1059,306	430,6104
10,58418	105,8418	-15,9016	1665,209	1120,248
12,97969	129,7969	-24,8851	2605,964	1684,724
14,53937	145,3937	-33,0013	3455,884	2113,933
15,63329	156,3329	-32,3973	3392,637	2443,998
16,49251	164,9251	-33,2168	3478,458	2720,029
17,15927	171,5927	-47,0321	4925,191	2944,405
19,03178	190,3178	-45,3803	4752,212	3622,086
19,79463	197,9463	-55,6183	5824,334	3918,275
20,3838	203,838	-42,1752	4416,575	4154,992
19,94938	199,4938	-31,033	3249,764	3979,777
19,42724	194,2724	-23,9015	2502,957	3774,178
17,7221	177,221	-28,1324	2946,016	3140,73
16,59205	165,9205	-36,7691	3850,447	2752,96
17,10297	171,0297	-33,3705	3494,552	2925,115
17,49725	174,9725	-31,442	3292,594	3061,537
17,86387	178,6387	-36,5531	3827,827	3191,18
17,94479	179,4479	-48,5933	5088,676	3220,156
19,59358	195,9358	-52,5571	5503,768	3839,085
20,03554	200,3554	-40,7077	4262,896	4014,228
19,78554	197,8554	-28,592	2994,151	3914,676
19,30756	193,0756	-27,6411	2894,568	3727,819
17,64086	176,4086	-21,5823	2260,095	3111,999
16,2627	162,627	-39,85	4173,078	2644,755
17,04001	170,4001	-33,5368	3511,965	2903,619
17,36335	173,6335	-32,4147	3394,461	3014,858
17,7834	177,834	-37,3768	3914,093	3162,493
17,93025	179,3025	-49,5708	5191,041	3214,939
19,56076	195,6076	-52,7181	5520,624	3826,232
20,0173	200,173	-41,3521	4330,382	4006,924
19,80325	198,0325	-29,4942	3088,623	3921,687
19,29372	192,9372	-22,3312	2338,513	3722,477
17,64633	176,4633	-26,6558	2791,392	3113,928
16,35549	163,5549	-35,9249	3762,049	2675,019
16,95715	169,5715	-32,1551	3367,273	2875,451

17,38623	173,8623	-31,3211	3279,941	3022,811
17,85414	178,5414	-43,8492	4591,882	3187,702
17,99372	179,9372	-42,7479	4476,547	3237,738
19,36758	193,6758	-54,5679	5714,333	3751,033
20,09497	200,9497	-41,1685	4311,158	4038,077
19,74572	197,4572	-30,2081	3163,39	3898,934
19,28411	192,8411	-23,1559	2424,877	3718,769
17,62697	176,2697	-27,4154	2870,934	3107,101
16,37494	163,7494	-36,2699	3798,176	2681,386
16,93544	169,3544	-33,0816	3464,292	2868,092
17,37622	173,7622	-31,2841	3276,063	3019,33
17,77638	177,7638	-36,4889	3821,113	3159,996
17,9192	179,192	-48,554	5084,559	3210,977
19,56194	195,6194	-52,4777	5495,449	3826,695
20,01363	200,1363	-40,6648	4258,409	4005,456
19,76972	197,6972	-28,5705	2991,898	3908,418
19,29598	192,9598	-27,633	2893,717	3723,349
17,63213	176,3213	-21,5846	2260,337	3108,921
16,26149	162,6149	-39,852	4173,288	2644,36
17,03952	170,3952	-33,542	3512,509	2903,451
17,36313	173,6313	-32,4218	3395,206	3014,784
17,78317	177,8317	-37,3851	3914,961	3162,413
17,93202	179,3202	-49,577	5191,691	3215,573
19,56146	195,6146	-52,7195	5520,777	3826,509
20,01785	200,1785	-41,3522	4330,389	4007,145

LAMPIRAN C DATA SIMULASI 18S10P

Current(A)	Voltage(V)	Load Force/Torque(Nm)	Pin	Pout
0	0	-2,01747	211,2688	0
1,98225	198,225	-31,0844	3255,151	392,9315
1,053863	105,3863	-63,4843	6648,06	111,0626
1,2643	126,43	-90,0662	9431,707	159,8454
1,915423	191,5423	-94,1052	9854,678	366,8844
2,547213	254,7213	-55,1161	5771,748	648,8295
2,711593	271,1593	-12,9802	1359,284	735,2737
2,585223	258,5223	33,92675	3552,801	668,3378
2,465461	246,5461	72,00101	7539,928	607,8496
1,774231	177,4231	78,84435	8256,561	314,7895
0,397352	39,73524	50,56733	5295,399	15,78889
1,516683	151,6683	21,31421	2232,019	230,0327
2,111139	211,1139	-11,0721	1159,464	445,6907
3,255233	325,5233	-17,4685	1829,3	1059,654
3,13431	313,431	-9,88926	1035,601	982,3901
2,902372	290,2372	-3,89882	408,2831	842,3765
1,858597	185,8597	-18,9035	1979,569	345,4382
1,178057	117,8057	-50,3093	5268,381	138,7818
1,195647	119,5647	-80,4128	8420,805	142,9572
2,005726	200,5726	-89,6039	9383,3	402,2937
2,612493	261,2493	-51,6589	5409,712	682,5122
2,733255	273,3255	-12,7777	1338,081	747,0684
2,582458	258,2458	30,45215	3188,942	666,9087
2,492989	249,2989	66,1816	6930,521	621,4992
1,804566	180,4566	70,28802	7360,545	325,6457
0,351712	35,17116	39,5123	4137,719	12,3701
1,543778	154,3778	11,44628	1198,652	238,3252
2,142741	214,2741	-17,7062	1854,193	459,1339
3,222544	322,2544	-18,3642	1923,091	1038,479
3,042058	304,2058	-8,36194	875,66	925,4118
2,899046	289,9046	1,614788	169,1002	840,4468
1,882541	188,2541	-9,8243	1028,798	354,3961
1,254301	125,4301	-40,0756	4196,707	157,3272
1,147432	114,7432	-72,2667	7567,746	131,6599
2,059532	205,9532	-84,9569	8896,668	424,1672
2,635355	263,5355	-48,7786	5108,085	694,5094
2,743755	274,3755	-12,7963	1340,023	752,8189

2,59735	259,735	27,64903	2895,399	674,6225
2,493261	249,3261	61,53973	6444,426	621,6352
1,817168	181,7168	63,23002	6621,432	330,2099
0,326597	32,65966	30,24552	3167,304	10,66653
1,567814	156,7814	3,588156	375,7508	245,8042
2,185444	218,5444	-23,1001	2419,041	477,6164
3,179538	317,9538	-19,2531	2016,176	1010,946
2,964616	296,4616	-6,75995	707,9007	878,8946
2,89317	289,317	6,102998	639,1045	837,043
1,907697	190,7697	-2,4143	252,8248	363,9308
1,302118	130,2118	-31,1081	3257,632	169,5512
1,11601	111,601	-65,4949	6858,613	124,5479
2,092541	209,2541	-81,1031	8493,097	437,8729
2,644095	264,4095	-46,4352	4862,679	699,1238
2,757994	275,7994	-12,6738	1327,196	760,6534
2,61991	261,991	25,2399	2643,116	686,3929
2,481256	248,1256	57,31245	6001,745	615,6631
1,823995	182,3995	57,30535	6001,002	332,6958
0,309347	30,93468	22,55035	2361,467	9,569542
1,578832	157,8832	-2,88376	301,9865	249,2711
2,228407	222,8407	-27,2311	2851,639	496,58
3,158837	315,8837	-19,9527	2089,439	997,8249
2,918695	291,8695	-5,63556	590,1549	851,8781
2,888019	288,8019	9,738379	1019,801	834,0656