



# Perancangan *Permanent Magnet Synchronous Generator* Sultan *Wind Turbine V-5*

## *Sultan Wind Turbine V-5 Permanent Magnet Synchronous Generator Design*

Muhammad Irfan, Erwin Erwin\* dan Slamet Wiyono

Laboratorium Rekayasa Energi Baru Terbarukan, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Indonesia

### Informasi artikel

Diterima:  
06/04/2021  
Direvisi:  
17/06/2021  
Disetujui:  
28/06/2021

### Abstract

*Wind is an inexhaustible source of energy so that the use of wind energy change systems will have a positive impact on the environment. Sultan Wind Turbine is a vertical axis wind turbine called the Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). Synchronous generator is a machine that converts mechanical energy into electrical energy. Permanent magnet synchronous generator (PMSG) is a generator that uses permanent magnets to generate an air gap field instead of using an electromagnet. The purpose of this study is to design a 100 W PMSG generator for Sultan Wind Turbine using the MagNet infolytica software, then the results of looking for simulations at various speeds and various loads, after that to determine the value of the output power and efficiency at each loading and RPM. The design of this generator is the first design that is adapted to previous research where this design will optimize the simulation of previous designs that were applied to the Sultan Wind Turbine v-5. A method for designing a permanent magnet synchronous generator simulation of the sultan wind turbine which will be tested in developing its performance using the J.R. Handershot. In this design using MagNet Infolytica software to find the values of Voltage and Current along with Torque obtained from simulations with the finite element method, then data processing is carried out in Excel to find the value of output power and efficiency. The results obtained in this study are by changing the geometric shape. able to produce with a rotating speed of about 100 rpm to 150 rpm at a load of 5 ohms, namely 125, 86 Watt to 231.59 Watt. The average DC voltage is 33.5 volts, the average DC current is 6.65 Ampere, the torque is 23. 24 Nm, the input power is 365.14 Watts, the output power is 231.59 Watts and the efficiency ranges from 58% to 79%.*

*Keywords: Sultan wind turbine , PMSG, J.R. Handershot, MagNet Infolytica.*

### Abstrak

Angin merupakan sumber energi yang tidak ada habisnya sehingga pemanfaatan sistem perubahan energi angin akan berdampak positif terhadap lingkungan. Sultan Wind Turbine merupakan turbin angin sumbu vertical biasa disebut *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*. Generator sinkron suatu mesin yang mengkonversikan energi mekanik menjadi energi elektrik. *Permanent magnet synchronous generator (PMSG)* adalah generator yang menggunakan magnet permanen untuk menghasilkan medan celah udara daripada menggunakan elektromagnet. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang generator PMSG 100 W untuk *Sultan Wind Turbine* menggunakan *software infolytica MagNet*, kemudian hasil mencari simulasi diberbagai kecepatan dan berbagai beban, setelah itu untuk Mengetahui nilai daya output dan efisiensi pada masing masing pembebanan dan RPM. Perancangan generator ini merupakan desain pertama yang disesuaikan dengan penelitian sebelumnya dimana perancangan ini akan mengoptimalkan simulasi perancangan-perancangan sebelumnya yang di aplikasikan pada Sultan Wind Turbine v-5. Suatu metode untuk merancang simulasi generator sinkron magnet permanen terhadap *sultan wind turbin* yang akan di uji dalam pengembangan peformanya menggunakan metode J.R. Handershot. Dalam perancangan ini menggunakan *software MagNet infolytica* untuk mencari nilai Voltase dan Arus beserta Torsi yang didapatkan dari simulasi dengan metode *finite element method*, kemudian dilakukan pengolahan data dalam excel untuk mencari nilai daya output dan efisiensi, Adapun hasil yang didapat pada penelitian ini dengan merubah bentuk geometrinya mampu menghasilkan dengan kecepatan putar sekitar 100 rpm sampai 150 rpm pada beban 5 ohm yaitu 125,86 Watt sampai 231,59 Watt. Tegangan DC rata-rata sebesar 33,5 volt, arus DC rata-rata sebesar 6,65 Ampere, Torsi sebesar 23,24 Nm, Daya input sebesar 365,14 Watt, Daya output sebesar 231,59 Watt dan efisiensi rentang 58% sampai 79%.

**Kata Kunci:** turbin angin *Sultan*, PMSG, J.R. Handershot, *MagNet Infolytica*.

\*Penulis Korespondensi. Tel: -; Handphone: +62 821 8253 5758  
email : [erwin@untirta.ac.id](mailto:erwin@untirta.ac.id)

## 1. PENDAHULUAN

Penelitian simulasi pada PMSG ini telah banyak dikembangkan oleh pengembang turbin angin skala mikro salah satu adalah penelitian yang sudah dilakukan oleh Tim Lentera Bumi Nusantara (Nusantara, 2017) sebagai bahan ajar generator sinkron, pada bahan ajar tersebut mensimulasi pada software MagNet dengan kecepatan putar 1000 rpm dan didapati hasil 500 watt dengan 12 slot 8 pole dan metode yang dilakukan berupa kuantitatif. Penelitian ini banyak dijadikan acuan referensi lainnya sebagai perancangan lainnya, Seperti pada perancangan yang ada pada referensi referensi penulis ambil.

Penelitian lain dengan judul Analisa Efisiensi dan Rancang Generator Permanent Magnet 12 Slot 8 Pole Menggunakan Software Magnet 7.5 (Arfianto, 2018) yang bertujuan mencari tegangan AC reverse engineering dari bahan ajar lentera Bumi Nusantara tanpa mengubah bentuk geometrinya, namun merubah jenis material magnetnya berupa NDFeB, yaitu: Neodymium Iron-Boron pada variasi kecepatan putar 300, 400, 500, 600 RPM tanpa beban yaitu tegangan AC rata rata didapatkan hasil 89,46 volt.

Pada penelitian lainnya dengan topik Desain Generator Sinkron Magnet Permanen jenis Neodymium Iron Boron Untuk PLTB Daya 500 Watt Menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica (Umami, 2018). bertujuan membandingkan pengaruh material yang berbeda terhadap hasil simulasi dengan software MagNet Infolytica dengan jumlah 24 slot dan 8 pole terhadap kecepatan 1000 rpm, hasil yang didapat pada material Magnet Neodymium iron Boron pada beban resistor 100  $\Omega$  didapat 507,8 Watt, sedangkan pada material Ceramic pada beban resistor 22  $\Omega$  menghasilkan 112,90 Watt.

Dan yang ada pula dipenelitian lain dengan judul Desain Dan Simulasi Generator Magnet Permanen 3 Fasa Menggunakan Softwawre Magnet Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Rendah (Hamzah, dkk., 2020). Menggunakan metode penelitian metode kuantitatif. Dalam penelitian ini perancang mendesain PMSG menggunakan

perangkat lunak MagNet Infolytica untuk kapasitas 500 Watt, dengan memanfaatkan potensi angin 6.17 m/s, perancangan geometri terdapat lubang poros dan lubang kotak kecil kecil pada keliling lubang poros. Menggunakan jumlah slot 18, jumlah pole 12, diameter luar stator 175 mm, tebal inti stator/rotor 45 mm, kecepatan putar dengan 100, 200, 300, 400, 500 rpm dengan rangkaian simulasi 3 fasa, simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan angin didapatkan hasil Tegangan keluaran antar fasa dari simulasi generator adalah 39,88 V AC, dengan nilai tegangan efektif 56,40 V AC. Jika dibandingkan dengan perhitungan diperoleh selisih (*error*) sebesar 1,62% untuk nilai tegangan antar fasa dan 1,65% untuk tegangan efektif.

Pada penelitian ini dilakukan pengembangan penelitian dalam perbedaan bentuk geometri, baik bentuk diameter 150 mm dengan tebal 60 mm, jumlah slot 12, jumlah pole 8, jumlah lilitan, dan terdapat 5 variasi kecepatan angin rendah dari 50, 75, 100, 125, 150 RPM, dan dengan 5 variasi beban resistor 5, 7.5, 10, 15, 20 ohm.

Sultan Wind Turbine merupakan turbin angin sumbu vertikal biasa disebut *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Adapun alasan mengapa jenis vertikal dikarenakan angin yang dihasilkan rata-rata di Indonesia sekitar 3 m/s - 5 m/s, jadi sangat lah cocok pada pengembangan turbin ini.

Namun pada turbin angin berporos vertikal atau *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) yaitu tidak menghasilkan efisiensi lebih besar daripada turbin angin berporos horizontal (HAWT). Ini disebabkan dipengaruhi oleh beberapa faktor berupa hambatan pada pisau pemutar angin, dan kecepatan angin yang rendah. Untuk itu dibutuhkan inovasi dan penelitian lebih lanjut agar efisiensi yang diharapkan pada sultan wind turbine menjadi lebih maksimal.

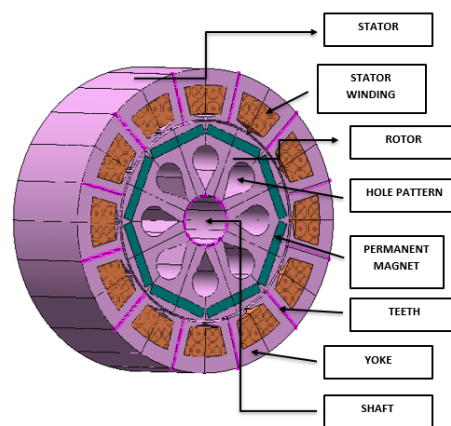
Dilihat dari perkembangan *sultan wind turbine v-4.5* menuju kepada *sultan wind turbine v-5*, maka dari itu perlu adanya pengembangan terhadap Sultan Wind Turbine bagian generator, lebih spesifikasi pengembangan yang dilakukan menggunakan simulasi generator listrik dengan sebuah

*software design electromagnetic* berbasis *Finite element methode* dimana nama *software* tersebut *Infolytica Magnet*, dengan *software* tersebut dapat dicari nilai efisiensi dan juga daya output pada pembebanan yang bervariasi untuk kondisi angin yang ada pada *Sultan Wind Turbine*. Hal ini bermanfaat melihat rumusan masalah pada rancangan adalah generator seperti apa yang sekiranya berfungsi dengan baik terhadap *Sultan Wind Turbin*, dengan menggunakan simulasi *software infolytica magnet* untuk mencari nilai daya *output* dan efisiensi, sehingga mampu memaksimalkan kualitas listrik yang didapat dari turbin angin tersebut.

*Generator sinkron* (disebut juga alternator) merupakan mesin konversi energi terbesar. Lebih dari 90% energi listrik di dunia dihasilkan oleh alternator. Generator sinkron bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang terdiri dari stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak atau berputar). Energi mekanis diperoleh dari penggerak mula yang memutar rotor, sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan stator.

Generator sinkron magnet permanen (PMSG) adalah generator yang menggunakan magnet permanen untuk menghasilkan medan celah udara daripada menggunakan elektromagnet. Motor ini memiliki keunggulan yang signifikan. Menarik minat para peneliti dan biasanya digunakan dalam aplikasi wind turbine.

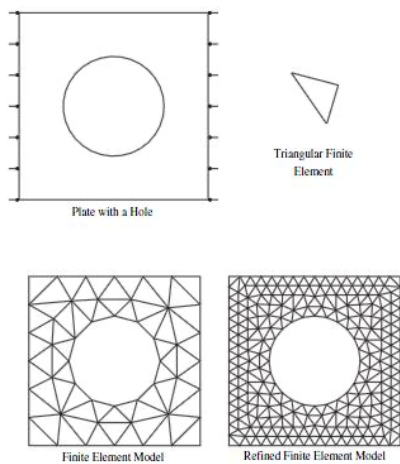
Generator sinkron magnet permanen merupakan mesin listrik berputar dengan 3-fase stator klasik yang seperti generator induksi pada umumnya (Handershot, 1994). Rotornya mempunyai magnet permanen yang terpasang pada permukaan. Dalam hal ini, PMSG hampir sama dengan motor induksi, di mana medan magnet celah udara yang dihasilkan oleh magnet permanen, sehingga medan magnet pada rotor konstan konstruksi generator sinkron secara garis besar terdiri dari beberapa bagian komponen dapat dilihat pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Komponen-komponen *permanent magnet* generator sinkron

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik untuk memperoleh penyelesaian pendekatan suatu persamaan differensial parsial dan masalah nilai batasnya (Jin, 1993). Secara umum, persamaan differensial dan masalah nilai batas dapat diselesaikan dengan metode Galerkin atau metode Ritz. Secara matematis, metode Galerkin lebih mudah dari metode Ritz. Metode Ritz memerlukan pengetahuan tentang *variational calculus* untuk memperoleh penyelesaian pendekatan. Secara umum, metode Galerkin banyak digunakan untuk menyelesaikan sistem persamaan differensial, khususnya persamaan yang mempunyai turunan pertama. Metode elemen hingga menerapkan metode Galerkin untuk menyelesaikan persamaan differensial pada suatu subdomain atau elemen. Sebuah domain komputasi tiga dimensi tersusun dari sekumpulan subdomain atau elemen tiga dimensi, sehingga pendekatan metode elemen hingga Galerkin dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial di seluruh domain komputasi tersebut.

Perambatan gelombang elektromagnet melalui suatu medium merupakan salah satu fenomena fisis yang mempunyai bentuk persamaan differensial, sehingga metode elemen hingga dapat digunakan untuk memodelkan persamaan differensial ini. Pemodelan dapat dilakukan dengan menggunakan elemen skalar atau elemen vektor.



Gambar 2. Meshing pada plate (Fish, dkk., 2007)

Elemen skalar digunakan jika gelombang elektromagnet merambat pada medium homogen, sedangkan elemen vektor dapat diterapkan baik pada medium homogen maupun non-homogen (Mur, 1994).

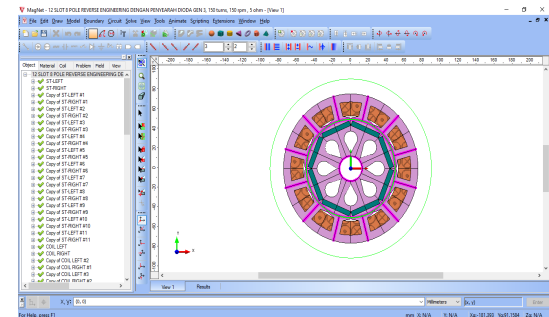
Meskipun konsep matematis metode elemen hingga lebih kompleks dibandingkan metode lain misalnya metode beda hingga, tetapi metode ini berkembang pesat karena kemampuannya untuk menganalisis persoalan yang mempunyai bentuk geometri rumit (Akin, 1994).

Perkembangan teknologi komputer, metode komputasi numerik dan sistem desain berbantuan komputer atau CAD sangat menunjang perkembangan metode elemen hingga. Sejalan dengan perkembangan teknologi komputer, maka pada saat ini kode perhitungan elemen hingga telah dikembangkan untuk sistem komputer mikro.

Adapun salah satu penggunaan metode elemen hingga atau metode elemen analisis pada sistem komputer mikro terdapat pada salah satu software dimana pengguna gunakan pada peneitian kali ini, yaitu Software MagNet Infolytica, dimana metode elemen hingga membaca metode elektromagnetisme kompleks pada simulasi.

Magnet adalah paket paling canggih pada saat ini tersedia untuk memodelkan perangkat elektromagnetik di komputer pribadi. Aplikasi ini menyediakan "laboratorium virtual" dimana pengguna dapat membuat model dari bahan magnetik dan gulungan, tampilan-tampilan dalam bentuk plot lapangan dan grafik, dan

mendapatkan nilai numerik untuk jumlah seperti hubungan fluks dan gaya. Seorang pengguna MagNet hanya membutuhkan pengetahuan dasar tentang konsep magnetik untuk memodelkan perangkat yang ada, memodifikasi desain, dan menguji gagasan baru.



Gambar 3. Tampilan user interface dari software MagNet 7.5 infolytica

Gambar 3 merupakan tampilan dari Software MagNet Infolytica. MagNet dirancang sebagai alat pemodelan 3D lengkap untuk memecahkan masalah elektromagnetik yang dapat melibatkan medan magnet statik, medan varising dan arus eddy, dan kondisi sementara dengan bagian perangkat. Banyak perangkat dapat diwakili dengansangat baik oleh model 2D, jadi MagNet menawarkan pilihan pemodelan 2D, dengan penghematan besar dalam sumber daya komputasi dan waktu penyelesaian.

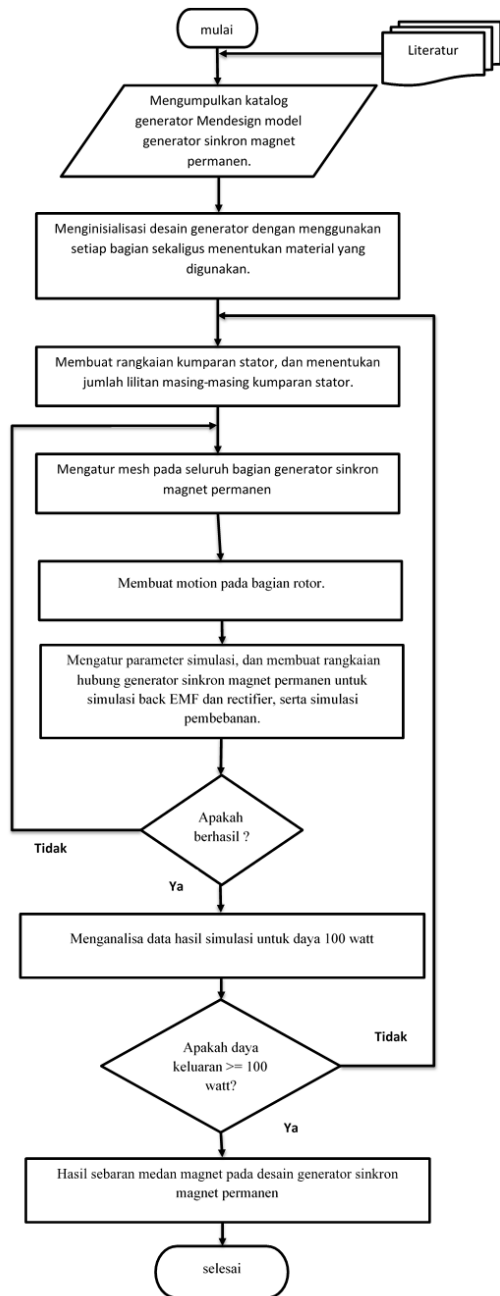
Berdasarkan kajian literatur sebelumnya, bahwa perlu adanya pengembangan desain dari Permanent Magnet Synchronous Generator Sultan Wind Turbine yang sudah ada untuk menghasilkan listrik yang lebih banyak dengan kecepatan angin rendah.

## 2. METODOLOGI

Langkah-langkah mendesain generator sinkron magnet pemanen antara lain, Mengumpulkan katalog generator berupa data generator dan Membuat desain generator sinkron permanen magnet. kemudian Melakukan inisialisasi desain generator sinkron magnet permanen pada perangkat lunak MagNet Infolytica dan Membuat rangkaian kumparan stator serta Mengatur mesh, Langkah selanjutnya Membuat motion bagian rotor dan mengatur

parameter simulasi serta membuat rangkaian simulasi.

Gambar 4, menampilkan diagram alir penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan parameter perancangan permanent magnet synchronous generator Sultan Wind Turbine V-5.

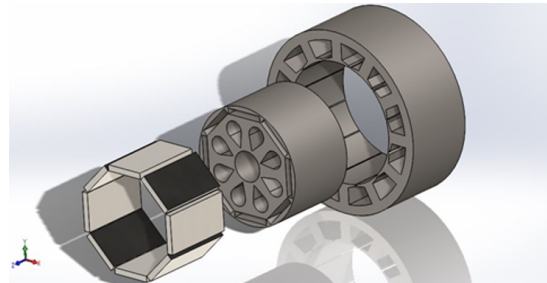


Gambar 4. Diagram alir penelitian

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

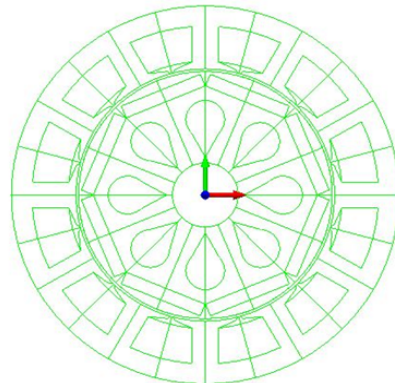
Sebelum dianalisa dan disimulasikan untuk menghasilkan data output, tahap sebelumnya adalah membuat perancangan

geometri pada generator. Berikut ini adalah desain permanent magnet synchronous generator yang dianalisa, pertama-tama generator dirancang dalam *solidworks* untuk ditentukan dimensinya. Pada gambar 5 bisa lihat dari depan kebelakang yaitu magnet, rotor, motor.

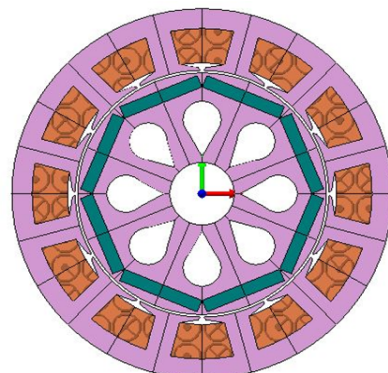


Gambar 5. Perancangan awal dengan *solidworks*

Setelah dimensi dan geometri telah ditentukan, perancangan tersebut dibuat Kembali pada *MagNet Infolytica*, berikut desain 2D permanent magnet synchronous generator pada *software MagNet* (lihat gambar 6).



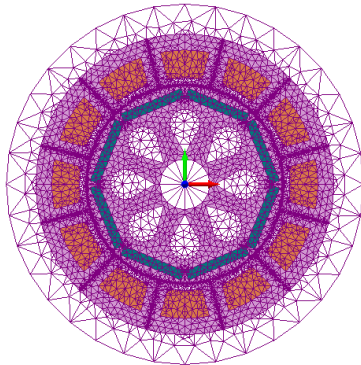
Gambar 6. Desain 2D permanent magnet synchronous generator



Gambar 7. Model geometri permanent magnet synchronous generator setelah pemberian material

Setelah desain 2 dimensi telah selesai, maka model tersebut diberikan material, mesh, pemasukan parameter serta melakukan solving sebagai simulasi.

Pada gambar 7, memiliki spesifikasi dimensi dan spesifikasi input adapun berikut spesifikasi rancangan *permanent magnet generator sinkron sultan wind turbine v-5*.



Gambar 8. Model geometri *permanent magnet synchronous generator* setelah pemberian material

Tabel 1. Spesifikasi dimensi *generator sultan wind turbine v-5*

No	Dimensi	Unit	Nilai
1	Jumlah slot	-	12
2	Jumlah pole	-	8
3	Diameter luar Stator	mm	150
4	Diameter dalam Stator	mm	100
5	Diameter Rotor	mm	98
6	Diameter Shaft	mm	25.4
7	panjang magnet	mm	32.5
8	Lebar magnet	mm	5
9	Tinggi umbrella	mm	4
10	Lebar teeth	mm	10
11	Tebal rotor dan stator	mm	60
12	Tebal magnet	mm	60
13	Celah udara (air gap)	mm	2
14	Airbox	mm	180
15	Jumlah Lubang variasi geometri rotor	-	8

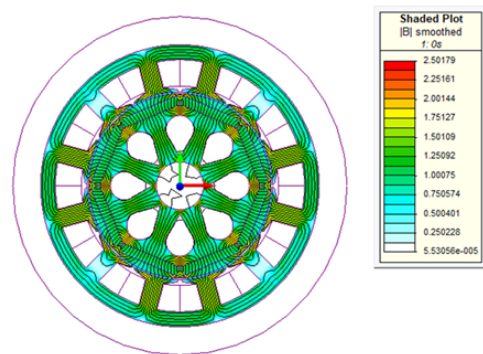
Table 1 merupakan data dimensi permanent magnet generator sinkron untuk *sultan wind turbine v-5*. Generator tersebut didesain dengan 12 slot dan 8 pole. Pada table 2, merupakan data parameter input

untuk mencari hasil simulasi pada variasi motion dan resistor.

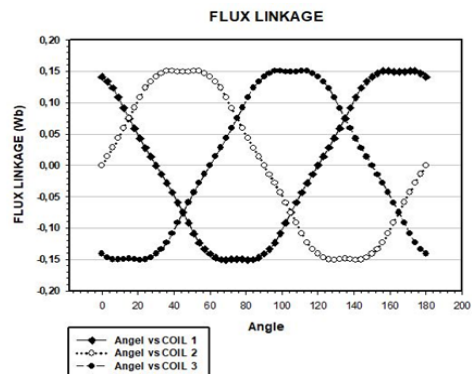
Tabel 2. Parameter input PMSG *Sultan Wind Turbine v-5*

No	Uraian	Nilai
1	Jumlah lilitan	150
2	Jumlah phasa	3
3	Mesh / max element size	3mm
4	Motion 1	50 rpm
5	Motion 2	75 rpm
6	Motion 3	100 rpm
7	Motion 4	125 rpm
8	Motion 5	150 rpm
9	Resistor 1	5 ohm
10	Resistor 2	7.5 ohm
11	Resistor 3	10 ohm
12	Resistor 4	15 ohm
13	Resistor 5	20 ohm
14	Material Magnet	PM12: Br 1.2 mur 1.0
15	Material stator dan rotor	TR52: USS Transformer 52 - 29 Gage
16	Material kumparan	Copper: 5.77e7 Siemens/meter

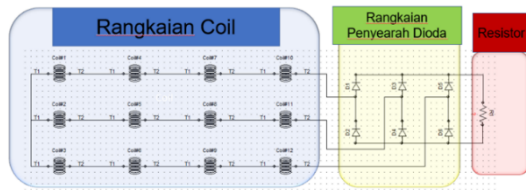
Gambar 9 merupakan gambaran aliran fluks menunjukkan bahwa semakin bewarna merah, maka semakin besar kerapatan fluksnya dan diperoleh nilai *flux linkage*. Nilai *flux linkage* juga bisa menghasilkan nilai tegangan antar fasa (lihat gambar 10).



Gambar 9. hasil distribusi medan magnet PMSG sultan wind turbine v-5

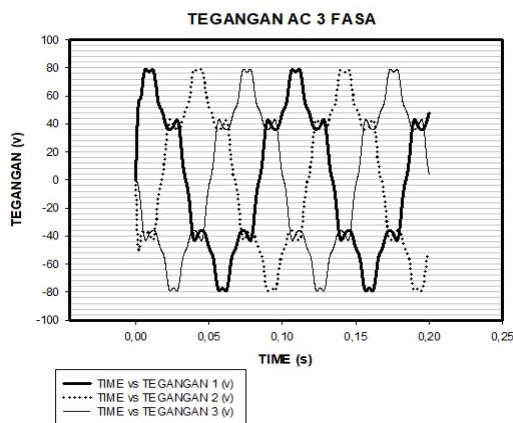


Gambar 10. Grafik Flux linkage dari 3 coil



Gambar 11. Penyearah diode 3 fase terhadap resistor

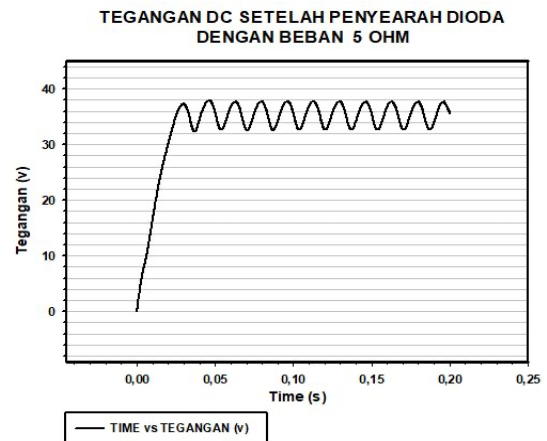
Gambar 11. merupakan rangkaian penyearah simulasi dengan pemberian beban pada simulasi permanent magnet Synchronous generator sultan wind turbine, listrik yang keluar pada generator sinkron yaitu AC, namun diubah menjadi DC dengan penyearah dioda, dikarenakan sumber listrik lebih mudah dibuat yaitu tegangan AC, seperti generator sinkron yang menghasilkan AC, jika rotor berputar karena digerakan oleh angin, walaupun AC mudah didapat dan banyak sekali komponen yang dapat dihidupkan oleh AC, AC memiliki kekurangan, yaitu tidak dapat disimpan hanya bisa langsung di manfaatkan secara langsung atau disalurkan, penelitian ini menggunakan sumber tenaga Angin, dan pada angin sewaktu-waktu kencang dan lambat, bahkan terkadang tidak ada. Jadi perlu adanya Arus yang disimpan, sehingga perlu dirubah ke dalam bentuk tegangan DC.



Gambar 12. Grafik gelombang tegangan AC 3 fasa terhadap waktu

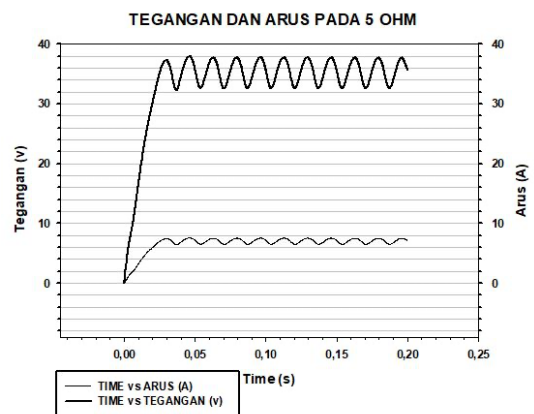
Gambar 12 adalah grafik yang diperoleh dari simulasi sebelum disearahkan dengan penyearah dioda, terdapat 3 gelombang yang ada pada grafik, berikut merupakan gelombang-gelombang ketiga fasa. Dilihat pada grafik terdapat pada garis kontinu tebal merupakan gelombang tegangan pada fasa 1,

untuk garis putus putus ialah gelombang tegangan pada fasa 2, untuk garis kontinu tipis ialah gelombang tegangan fasa 3. Pada grafik gambar 12, bisa perhatikan gelombang tidak begitu landai, karna pengaruh nilai cogging yang tidak baik, namun besar tegangan maksimum AC sekitar 80 volt pada kecepatan putar 150 rpm.



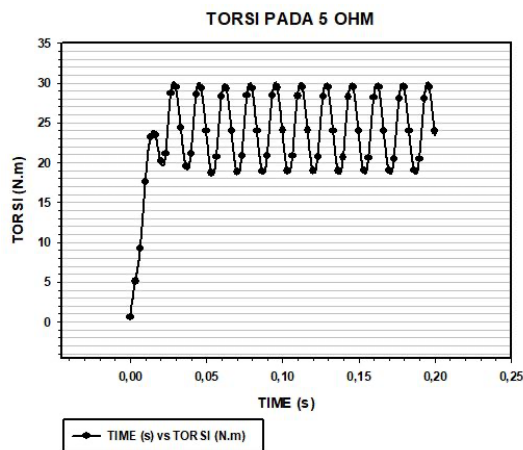
Gambar 13. Grafik gelombang tegangan DC terhadap waktu

Pada gambar 13, merupakan grafik tegangan dc terhadap waktu yang telah di searahkan dengan rangkaian penyearah dioda, dengan memberikan beban 5 ohm pada kecepatan 150 rpm , gelombang dc yang didapat lebih landai dan terlihat stabil rata, dikarenakan pemberian beban yang optimal sesuai dengan rancangan geometrinya. Besar nilai rata rata tegangan pada grafik gambar 13, berkisar 33,5 volt DC dengan tegangan maksimum berkisar kurang lebih 38 volt DC sangat optimal untuk medekati tegangan baterai 24 VDC, dengan nilai sedikit diatasnya masuk tegangan lebih ideal.



Gambar 14. Grafik hubungan tegangan dan arus pada beban 5 ohm

Gambar 14, merupakan hubungan Tegangan dan arus terhadap waktu, tegangan ada pada garis tebal kontinu berupa grafik gelombang DC yang ada pada posisi atas pada gambar besar rata-rata tegangan yang didapat pada 150 rpm terhadap 5 ohm didapat sebesar 33.5 volt, dan arus dengan satuan Ampere ada pada garis tipis kontinu berupa grafik dc yang ada pada posisi bawah pada gambar besar rata-rata arus yang didapat pada 150 rpm terhadap beban 5 ohm sebesar 6.65 Ampere dengan mengambil 1 simulasi 180 derajat penuh dalam waktu 0,2 second.



Gambar 15. Grafik torsi 150 rpm pada beban 5 ohm

Grafik pada gambar 15, merupakan hubungan torsi terhadap waktu (s), torsi yang didapat sebesar 23.24 Nm dari kecepatan putar 150 rpm untuk pembebanan 5 ohm yang diberikan.

Setelah semua data hasil simulasi didapatkan beserta grafiknya, selanjutnya mencari besar daya dan efisiensi untuk dianalisis lebih lanjut dan diolah melalui software Microsoft excel. Perhitungan akan membuat semua hasil menjadi lebih jelas, perhitungan menggunakan persamaan berikut:

a) Perhitungan daya input:

$$W_{in} = 2 \pi \frac{\omega}{60} \times \tau \quad (1)$$

$$W_{in} = 2 \pi \frac{150 \text{ rpm}}{60} \times 23.24 \text{ Nm}$$

$$W_{in} = 365.1 \text{ watt}$$

b) Perhitungan daya output:

$$W_{out} = V \times I \quad (2)$$

$$W_{out} = 33.25 \text{ volt} \times 6.65 \text{ Ampere}$$

$$W_{out} = 221.6 \text{ watt}$$

c) Perhitungan efisiensi

$$\eta = \frac{W_{output}}{W_{input}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{221.6 \text{ watt}}{365.1 \text{ watt}}$$

$$\eta = 0.60$$

Perhitungan tersebut, diambil dari nilai simulasi paling optimum dari semua percobaan variasi motion dan beban resistor.

Tabel 3. Rata-rata data 150 rpm pada 5 ohm

Rata-rata	Current (A)	Voltage (V)	Torque (Nm)	Pout (W)	Pin (W)	Efficiency
5 ohm	6.65	33.25	23.25	231.59	365.14	0.62

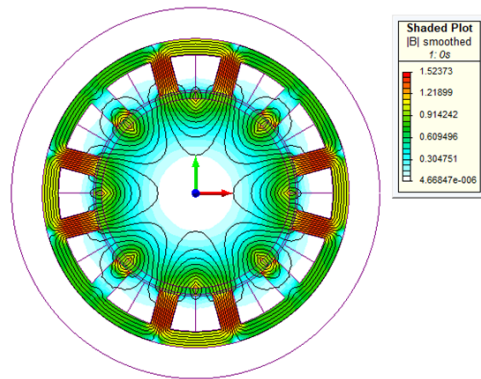
Dari tabel 3, diketahui bahwa nilai rata-rata tegangan sebesar 33,25, arus 6,65 maka daya output nya sebesar 231,59 Watt. Dan untuk daya input di hasilkan dari arus dan torsi sebesar 23,25 Nm dengan kecepatan 150 rpm yaitu 365,14 Watt. Efisiensi di hasilkan dari perbandingan antara daya output dan daya input yaitu sebesar 0,62 atau 62%.

Kecepatan diambil dari data generator sultan wind turbine pada eksperimen sebelumnya v- 4.5 (Erwin, dkk., 2019) dengan RPM rotor B pada tanggal 21 bulan 7 tahun 2018 saat pengambilan data turbin tanpa sirip ekor pengarah yaitu dengan kecepatan 50 rpm, 75 rpm, 100 rpm, 125 rpm, 150 rpm sebagai sampel, dengan beban sebesar 5 ohm, 7.5 ohm, 10 ohm, 15 ohm dan 20 ohm.

Gambar 16 memperlihatkan nilai rata-rata dari percobaan dengan variasi kecepatan dan beban yang berbeda. Pada acuan referensi (Nusantara, 2017) terdapat hasil yang berbeda pada perancangan yang telah disimulasi kembali, baik geometri, spesifikasi dimensi, maupun parameter input, hanya saja variable simulasi yang dimasukkan, yaitu kecepatan putar pada putaran angin rendah 3 m/s - 5 m/s sama diberikannya pada putaran sekitar 150 rpm dan beban 5 ohm.



	A	B	C	D	E	F
1	Tanggal	Jam	RPM Anemometer	Wind Spee	RPM A	RPM B
2	7/21/2018	10:50:00 AM	84	2.1666	48	42
3	7/21/2018	10:50:10 AM	114	2.8506	80	62
4	7/21/2018	10:50:20 AM	126	3.1242	86	74
5	7/21/2018	10:50:30 AM	110	2.7594	78	62
6	7/21/2018	10:50:40 AM	108	2.7138	74	52
7	7/21/2018	10:50:50 AM	96	2.4402	104	74
8	7/21/2018	10:51:00 AM	132	3.261	136	88
9	7/21/2018	10:51:10 AM	106	2.6682	136	64
10	7/21/2018	10:51:20 AM	80	2.0754	126	56
11	7/21/2018	10:51:30 AM	122	3.033	134	58
12	7/21/2018	10:51:40 AM	106	2.6682	128	44
13	7/21/2018	10:51:50 AM	116	2.8962	160	68
14	7/21/2018	10:52:00 AM	108	2.7138	162	76
15	7/21/2018	10:52:10 AM	120	2.9874	168	62
16	7/21/2018	10:52:20 AM	96	2.4402	146	60
17	7/21/2018	10:52:30 AM	106	2.6682	150	70
18	7/21/2018	10:52:40 AM	104	2.6226	110	40
19	7/21/2018	10:52:50 AM	56	1.5282	84	32
20	7/21/2018	10:53:00 AM	30	0.9354	42	12



Gambar 17. Contoh hasil distribusi medan magnet PMSG

(a)

	A	B	C	D	E	F
2740	7/21/2018	6:26:20 PM	162	3.945	62	106
2741	7/21/2018	6:26:30 PM	136	3.3522	62	106
2742	7/21/2018	6:26:40 PM	160	3.8994	60	122
2743	7/21/2018	6:26:50 PM	146	3.5802	42	118
2744	7/21/2018	6:27:00 PM	130	3.2154	38	112
2745	7/21/2018	6:27:10 PM	104	2.6226	44	90
2746	7/21/2018	6:27:20 PM	128	3.1698	46	84
2747	7/21/2018	6:27:30 PM	136	3.3522	40	84
2748	7/21/2018	6:27:40 PM	162	3.945	72	110
2749	7/21/2018	6:27:50 PM	178	4.3098	86	130
2750	7/21/2018	6:28:00 PM	172	4.173	104	156
2751	7/21/2018	6:28:10 PM	96	2.4402	56	90
2752	7/21/2018	6:28:20 PM	104	2.6226	80	100
2753	7/21/2018	6:28:30 PM	106	2.6682	56	84
2754	7/21/2018	6:28:40 PM	140	3.4434	76	96
2755	7/21/2018	6:28:50 PM	174	4.2186	102	136
2756	7/21/2018	6:29:00 PM	178	4.3098	108	166
2757	7/21/2018	6:29:10 PM	134	3.0666	116	178
2758	7/21/2018	6:29:20 PM	134	3.3066	94	138
2759	7/21/2018	6:29:30 PM	150	3.6714	110	128
2760	7/21/2018	6:29:40 PM	164	3.9906	100	134
2761	7/21/2018	6:29:50 PM	144	3.5346	94	138
2762	7/21/2018	6:30:00 PM	124	3.0786	102	124

(b)

Gambar 16. Data kecepatan RPM pada penelitian sebelumnya; (a) Baris awal, (b) Baris akhir

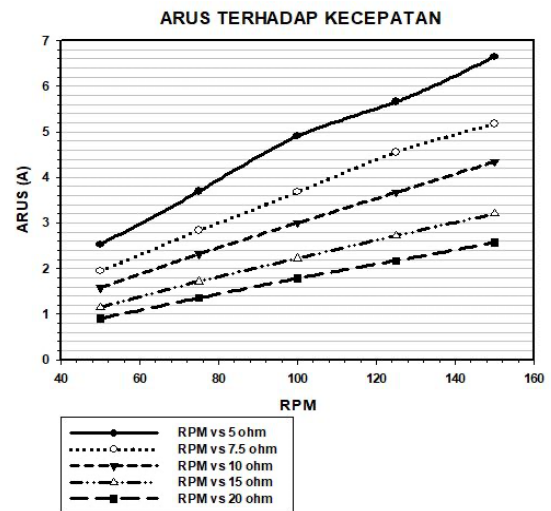
Gambar 17 merupakan gambaran aliran fluks hasil simulasi pada PMSG bahan ajar lentera bumi nusantara, terlihat pada gambar di atas terdapat perbedaan penyebaran flux yang kurang merata pada bagian area slot Stator, seperti adanya kebocoran flux yang besar, sehingga banyak fluks yang tidak ditangkap. Karena tidak adanya pemberian umbrella pada area stator sebagai penyangga coil (lilitan). Dan terlihat pula perbedaan geomteri stator dan magnet pada penelitian yang dikembangkan, dimana geometrinya berbentuk solid dan tidak ada lubang poros, dan magnet terletak pada surface rotor berbentuk arc (lengkungan), maka dari itu menyebabkan generator tidak ekonomis.

Dari data tersebut diketahui bahwa nilai rata-rata tegangan sebesar 33,25, arus 6,65 maka daya output nya sebesar 231,59 Watt. Dan untuk daya input di hasilkan dari arus dan torsi sebesar 23,25 Nm dengan kecepatan 150 rpm yaitu 365,14 Watt. Efisiensi di hasilkan dari perbandingan antara daya output dan daya input yaitu sebesar 0,62 atau 62% (lihat tabel 4).

Tabel 4. Rata-rata data 150 rpm terhadap 5 ohm PMSG (Nusantara, 2017)

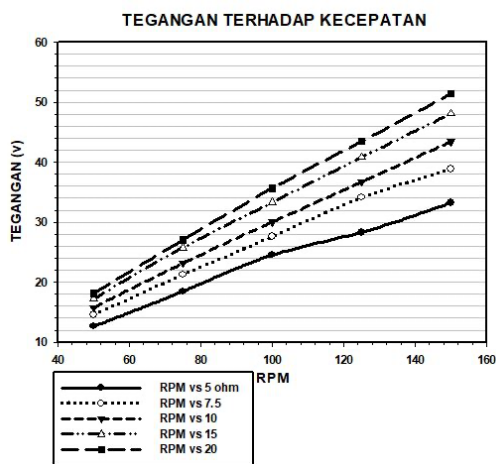
Rata-rata	Current (A)	Voltage (V)	Torque (Nm)	P <sub>out</sub> (Watt)	P <sub>in</sub> (Watt)	Efficiency
5 Ohm	3.48178	17.40889	-6.93494	63.65926	108.93376	0.66514

Gambar 18 adalah hasil dan simulasi dengan perubahan variasi parameter kecepatan putar terhadap nilai beban resistor.



Gambar 18. Kurva karakteristik arus terhadap kecepatan putar.

Dari grafik pada gambar 18, dapat dilihat bahwa semakin besar nilai putar maka semakin tinggi juga nilai Arus dan jika dilihat dari beban yaitu semakin besar nilai beban maka nilai aruspun semakin besar pula. Pada grafik gambar 18, bisa perhatikan perbedaan garis garis yang menjelaskan nilai beban resistornya, contohnya ada garis 5 ohm berbebtuk garis tebal kontinu terbentang dari 50 rpm sampai 150 rpm terhadap garis horizontal, nilai arus pada garis vertikalnya meningkat sekitar 2,5 Ampere (A) sampai 6,6 Ampere (A).

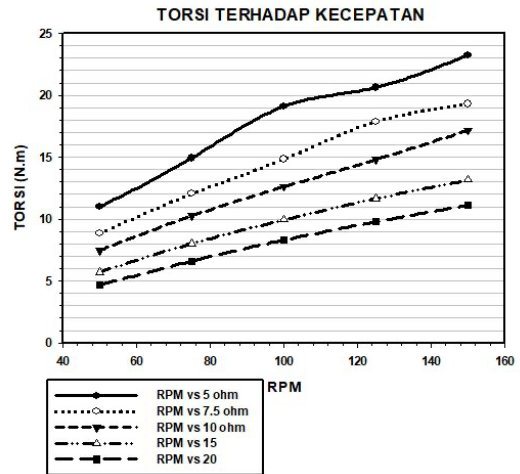


Gambar 19. Kurva karakteristik tegangan terhadap kecepatan putar

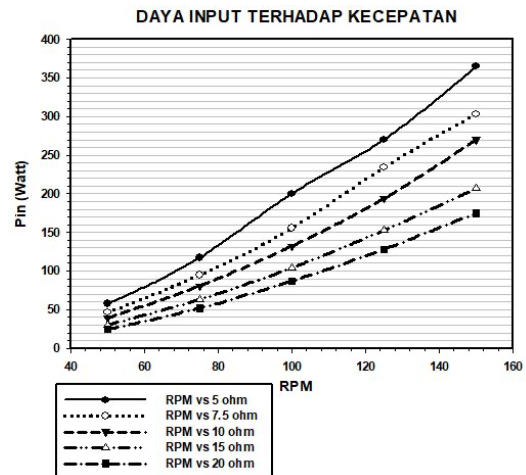
Dari gambar 19, dapat dilihat bahwa semakin besar nilai putar maka semakin tinggi juga nilai Tegangan dan jika dilihat dari beban yaitu semakin besar nilai beban maka nilai Inputan semakin Tinggi. Pada grafik gambar 19, bisa perhatikan perbedaan garis garis yang menjelaskan nilai beban resistornya, contohnya ada garis 5 ohm berbentuk garis tebal kontinu posisi paling bawah dari semua garis terbentang dari 50 rpm sampai 150 rpm terhadap garis horizontal, nilai tegangan pada garis vertikalnya meningkat sekitar 12,6 Volt (v) sampai 30,25 Volt (v).

Pada grafik gambar 20 terlihat bahwa, semakin besar nilai putar maka semakin tinggi juga nilai torsi dan jika dilihat dari beban yaitu semakin besar nilai beban maka nilai torsi semakin tinggi. Pada grafik gambar 20, bisa perhatikan perbedaan garis garis yang menjelaskan nilai beban resistornya,

contohnya ada garis 10 ohm berbentuk garis gores tebal putus putus posisi paling bawah dari semua garis terbentang dari 50 rpm sampai 150 rpm terhadap garis horizontal, nilai torsi pada garis vertikalnya meningkat sekitar 7,473 Newton meter (N.m) sampai 17,180 Newton meter (N.m).



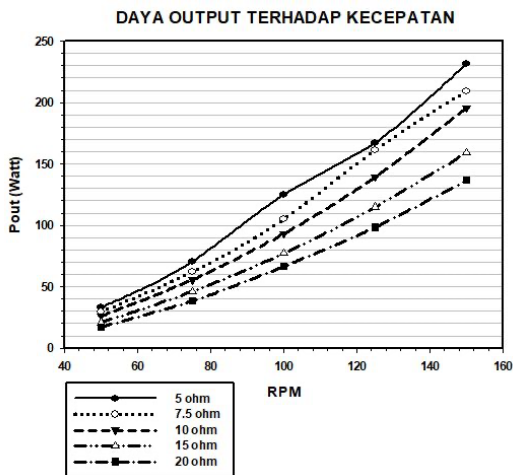
Gambar 20. Kurva karakteristik torsi terhadap kecepatan putar



Gambar 21. Kurva karakteristik daya input terhadap kecepatan putar

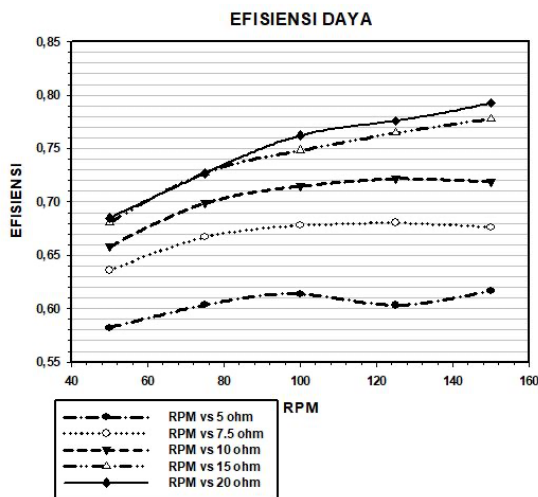
Dari grafik pada gambar 21, dapat dilihat bahwa semakin besar nilai putar maka semakin tinggi juga nilai daya inputan dan jika dilihat dari beban yaitu semakin besar nilai beban maka daya Inputan semakin rendah. Pada grafik gambar 21, bisa perhatikan perbedaan garis garis yang menjelaskan nilai beban resistornya, contohnya ada garis 7,5 ohm berbentuk garis putus putus posisi kedua dari atas dari semua garis terbentang dari 50 rpm sampai 150 rpm

terhadap garis horizontal, nilai daya input pada garis vertikalnya meningkat sekitar 46.295 Watt (W) sampai 303.333 Watt (W).



Gambar 22. Kurva karakteristik daya output terhadap kecepatan putar

Pada grafik gambar 22, dapat dilihat bahwa semakin besar nilai putar maka semakin tinggi juga nilai daya keluaran dan jika dilihat dari beban yaitu semakin besar nilai beban maka daya Inputan semakin rendah. Pada grafik gambar 22 bisa perhatikan perbedaan garis garis yang menjelaskan nilai beban resistornya, contohnya ada garis 5 ohm berbentuk garis lurus kontinu posisi pertama dari atas dari semua garis terbentang dari 50 rpm sampai 150 rpm terhadap garis horizontal, nilai daya output pada garis vertikalnya meningkat sekitar 33.140 Watt (W) sampai 231.593 Watt (W).



Gambar 23. Kurva karakteristik efisiensi terhadap kecepatan putar.

Dari grafik gambar 23 dapat dilihat bahwa untuk nilai efisiensi tertinggi ada pada putaran 150 rpm dan dari grafik tersebut bahwa besaran nilai efisiensi dari generator di atas 0,58 atau 58% dan pada grafik gambar 23, bisa perhatikan perbedaan garis garis yang menjelaskan nilai beban resistornya, contohnya ada garis 7,5 ohm berbentuk garis titik posisi ke empat dari atas dari semua garis terbentang dari 50 rpm sampai 150 rpm terhadap garis horizontal, nilai efisiensi pada garis vertikalnya meningkat sekitar 0.635 (63,5%) sampai 0.676 (67,6%).

#### 4. SIMPULAN

Berdasarkan tujuan dari penelitian, kesimpulan yang didapat pada penelitian ini, bahwa desain perancangan *permanent magnet synchronous generator* yang memiliki jumlah slot 12 dan pole 8 dari *reverse engineering* perancangan pada 12 slot 8 pole, dengan merubah bentuk geometrinya mampu menghasilkan lebih dari 100 Watt dengan kecepatan putar sekitar 100 rpm sampai 150 rpm pada beban 5 ohm yaitu 125 ,86 Watt sampai 231,59 Watt. Dibandingkan dengan acuan refrensi pada bahan ajar PT. Lentera Bumi Nusantara nilai daya output pada variable optimum 150 rpm pada 5 ohm didapatkan sekitar 63,6 Watt. Ini menandakan hasil yang diperoleh dari peneliti lebih baik.

Hasil simulasi *permanent magnet synchronous generator* dengan kecepatan 150 rpm dan beban 5 Ω didapatkan tegangan DC rata-rata sebesar 33.5 volt, arus DC rata-rata sebesar 6.65 Ampere, Torsi sebesar 23.24 Nm, Daya input sebesar 365.14 Watt, Daya output sebesar 231.59 Watt.

Sedangkan Besar daya output dan efisiensi pada masing masing variasi kecepatan dan beban mulai dari 50 rpm sampai 150 rpm rentang daya output didapat sekitar 17,215 sampai 231, 593 dan efisiensi rentang 58% sampai 79% .

## DAFTAR PUSTAKA

- Afirianto, I., dan Rangga, Muhamad. 2018. Analisa Efisiensi dan Rancang Generator Permanent Magnet 12 Slot 8 Pole Menggunakan Software Magnet 7.5. *Seminar Nasional Microwave, Antena dan Propagasi (SMAP)*, hal. 43-47.
- Akin, E., 1994. *Finite Elements for analysis And Design*. London : Academic Press, inc.
- Chapman, S.J., 2012. *Electric Machinery Fundamentals 5th Edition.*, New York: Mcgraw-Hill.
- Erwin, E. dkk., 2018. The Effect of Hybrid Savonius And Darrieus Turbine On The Change Of Wake Recovery And Improvement Of Wind Energy Harvesting. *Journal of Applied Engineering Science*. 16(3), hal. 416-423.
- Erwin, E. dkk., 2019. Performance Investigation of Dual Shaft Hybrid Vertical Turbines Using Directional Fins. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN*. 5(8), hal.53-58.
- Fish, Jacob dan belytschko., 2007. *A First Course in Finite Elements.*, USA: Willey.
- Fitzgerald. A. E, Kingsley Jr. Charles, dan Usmans Stephen., 2003. *Electric Machinery (sixth Editions)*. New York: McGraw-Hill.
- Gerrit Mur., 1994. Edge element, their advantages and their disadvantages. *IEEE trans, On magnetics*. 30 (5). hal. 3552-3557.
- Gieras. F. J., 2017. *Electrical machines: Fundamentals of electromechanical Energi Conversion*. Florida, US: CRC Press.
- Gieras. F. J., 2010. *Permanent Magnet Motor Technology : Design And Application (Third Edition)*. Florida: CRC Press.
- Guo, Z., Chang, L., 2005. Fem Study On Permanent Magnet Synchronous Generators For Small Wind Turbines. *IEEE CCECE/CCGEI.*, 05, hal. 641-644.
- Hamzah, A., Suwitno, S., Irfan, I., Kurniawan, I., gussyafri. H., Susanto, H., dan Tsitsino, T. 2020. Design and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Generators for Small Scale Wind Power Plants. *International Conference on Renewable Energy Research and Challenge: E3S Web of Conferences*, 120, 1-8.
- Hendershot, J.R., dan Miller, T., 1994. *Design Of Brushless Permanent Magnet Motors*. New York, USA : Magna Physics Publishing And Oxford University.
- Hanselman, Duane., 2006. *Brushless Permanent Magnet Motor Design (Second edition)*. Ohio, US: Magna Physics Publishing.
- Jin, J., 1993. *The finite element method in Elektromagnetics*. John., New York : Willey and sons.
- Kenjo, T., dan Nagamori, S., 1985. *Permanent - Magnet And Brushless DC Motors*, New York: Oxford University Press.
- Krishnan, R., 2017. *Permanent Magnet Synchronous and brushless DC motor drives*. Florida, US: CRC Press.
- Madani, N. dkk., 2015. A Permanent Magnet Synchronous Generator For Small Scale Vertical Axis Wind Turbine. *IEEE*. 15, hal.48-52.
- Moaveni, Saeed., 1999. *Finite Element Analysis. Theory and Application with ANSYS'.*, New Jersey : Prentice-Hall, Inc.
- Sadarangani, C., 2006. *Electrical Machines: Design And Analysis of Induction And Permanent Magnet Motors*. Stocholm, Sweden: Royal ins, of tech.
- Simanjuntak, P.A., 2014. *Perancangan Motor/Generator Dengan Software Magnet, Modul Pembelajaran*. Lentera Bumi Nusantara, Cuheras, Jawa Barat.
- Sutrasno, 2004. Aplikasi Metode Elemen Hingga Pad Masalah Gelombang Elektromagnetik. *Widyanuklida*. 5(2), hal. 34-38
- Tim Penulis Lentera Bumi Nusantara., 2017. *Profil Lentera Bumi Nusantara*. Tasikmalaya, Jawa Barat.
- Umami, M. 2018. Desain Generator Sinkron Magnet Permanen Jenis Neodymium Iron Boron Untuk PLTB Daya 500 watt Menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica. *Skripsi*, Fakultas Teknik, Teknik Elektro, Universitas Mataram, NTB.