

Analisis *Concentrated Winding* Menggunakan Metode *Clockwise* dan Kombinasi pada PMSG 12S8P

Reza Pahlevi¹, Dian Budhi Santoso²

Jurusan Teknik Elektro Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang
Jl. HS. Ronggo Waluyo, Kabupaten Karawang, Jawa Barat 41361

¹reza.pahlevi18126@student.unsika.ac.id

²dian.budhi@ft.unsika.ac.id

Intisari — Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan kemajuan teknologi, meningkatnya kebutuhan energi listrik harus diiringi dengan meningkatnya teknologi yang digunakan untuk mengkonversi energi primer menjadi energi sekunder. Salah satu alat yang digunakan untuk mengkonversi energi primer menjadi energi sekunder listrik adalah generator. Generator merupakan mesin listrik utama yang digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap, Pembangkit Listrik Tenaga Air, Pembangkit Listrik Tenaga Bayu, dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel. Ada berbagai macam komponen di dalam generator sehingga dapat menghasilkan listrik, salah satu komponen yang sangat penting adalah lilitan tembaga (*winding*) karena komponen ini akan menerima fluks elektromagnetik yang dihasilkan oleh putaran rotor sehingga menjadi tegangan listrik. Banyak sekali metode *winding* yang bisa diaplikasikan pada generator salah satunya adalah metode *concentrated winding* dengan dua variasi arah putaran yaitu *clockwise* dan kombinasi. Untuk pengujian yang dilakukan, digunakan spesifikasi generator berjenis *Permanent Magnet Synchronous Generator* dengan 18 slot dan 8 *pole* yang di desain pada *software Finite Element Method*. Hasil yang didapatkan dari pengujian *concentrated winding* pada generator permanen magnet 12S8P dengan arah putaran *clockwise* mendapatkan tegangan sebesar 184.80 *volt*, sedangkan pada arah putaran kombinasi mendapatkan tegangan sebesar 206.05 *volt*. Maka dapat disimpulkan ketika melakukan *winding* tidak ada metode yang salah karena *winding* adalah mencari metode terbaik untuk mendapatkan tegangan yang maksimal, pada pengujian generator permanen magnet 12S8P skema terbaiknya adalah menggunakan metode kombinasi.

Kata kunci — *Permanent Magnet Synchronous Generator, Winding, Finite Element Method, Flux Linkage.*

Abstract — The need for electrical energy continues to increase along with the increase in population and technological advances, the increasing need for electrical energy must be accompanied by increasing technology used to convert primary energy into secondary energy. One of the tools used to convert primary energy into secondary electrical energy is a generator. Generators are the main electrical machines used in Steam Power Plants, Hydro Power Plants, Wind Power Plants, and Diesel Power Plants. There are various components in the generator to produce electricity. One very important component is the copper coil because this component will receive the electromagnetic flux generated by the rotation of the rotor so that it becomes an electric voltage. There are so many winding methods that can be applied to the generator, one of which is the concentrated winding method with two variations in the direction of rotation, namely clockwise and combinations. For the tests carried out, a generator specification of the Permanent Magnet Synchronous Generator with 18 slots and 8 poles was used which was designed in the Finite Element Method software. The results obtained from the concentrated winding test on the 12S8P permanent magnet generator with a clockwise rotation direction get a voltage of 184.80 volts, while in the combined rotation direction a voltage of 206.05 volts. So it can be concluded when doing winding there is no wrong method because the winding is looking for the best method to get the maximum voltage, in testing the 12S8P permanent magnet generator the best scheme is to use a combination method.

Keywords — *Permanent Magnet Synchronous Generator, Winding, Finite Element Method, Flux Linkage.*

I. PENDAHULUAN

Listrik merupakan salah satu kebutuhan utama bagi masyarakat terutama di masa pandemi pada saat ini, dimana sebagian besar masyarakat melakukan pekerjaannya secara *Work From Home* (WFH) dengan tujuan mencegah penularan virus Covid-19. Sistem WFH akan membuat kebutuhan listrik rumah tangga meningkat, seperti pada wilayah Jawa Barat konsumsi listrik rumah tangga naik 13%-20% per bulan, pada sektor lain konsumsi listrik industri turun 40%, bisnis turun 20%, sosial turun 10%, dan pemerintahan turun 10% [1].

Mulai pada tahun 2018 Indonesia lebih memfokuskan pada pengembangan pembangkit-pembangkit yang menggunakan Energi Baru Terbarukan (EBT) seperti Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sembari terus melakukan peningkatan pada teknologi batu bara bersih / Clean Coal Teknologi (CCT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) [2]. Untuk mewujudkan tujuan Bauran Energi Nasional Tahun 2025 yang menargetkan bahwa bauran Energi Baru Terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 maka teknologi EBT harus ditingkatkan [3].

Salah satu contoh pemanfaatan EBT adalah dengan menggunakan Turbin Angin atau Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Turbin Angin bekerja berdasarkan energi yang dihasilkan oleh kecepatan angin untuk memutar bilah atau kincir. Putaran bilah tersebut dikonversi menjadi energi mekanik, kemudian energi mekanik dikonversi oleh generator menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan oleh Turbin Angin memiliki tegangan *Alternating Current* (AC) dan keluarannya masih fluktuatif yang disebabkan oleh kecepatan angin, maka dari itu peranan *Controller* sangat penting untuk mengubah tegangan yang semula AC menjadi *Direct Current* (DC), menstabilkan tegangan, mengatur *cut in* dan *cut off*, dan lain sebagainya.

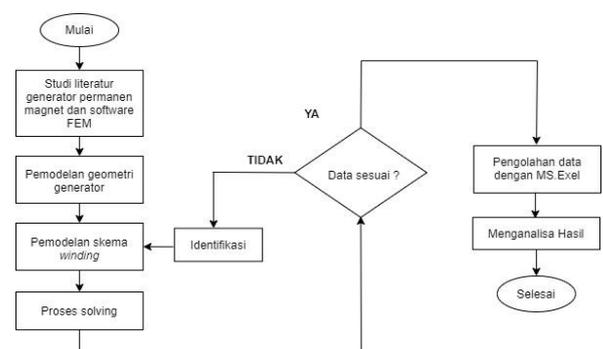
Generator adalah salah satu komponen utama dalam turbin angin yang berfungsi untuk menghasilkan listrik. Ada beberapa jenis generator mulai dari letak kutubnya yang berada pada rotor maupun stator, berdasarkan

putaran medan ada yang sinkron dan asinkron, berdasarkan jenis arus yang dibangkitkan ada yang AC maupun DC, dan pada jumlah fasanya ada yang 1 fasa maupun 3 fasa. Generator yang akan penulis desain berjenis generator AC dengan menggunakan permanen magnet.

Untuk mendesain generator penulis menggunakan *software Computer Aided Design* (CAD) yang berbasis *Finite Element Method* (FEM) sehingga dapat menyelesaikan permasalahan *engineering* terutama di bidang elektromagnetik dengan bekerja membagi obyek yang akan dianalisa menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan daerah.

II. METODOLOGI

Pada penelitian yang penulis lakukan digunakan model perancangan simulasi menggunakan *software* FEM. Simulasi ini dibuat untuk mengetahui skema *winding* yang tepat untuk generator magnet permanen. Konfigurasi jumlah slot dan pole yang penulis uji adalah 18 *slot* dan 8 *pole* (18S8P), untuk menggambarkan alur pekerjaan dan kerangka agar lebih mudah dipahami dan dianalisa berdasarkan urutan serta langkah proses membuat *winding* pada generator permanen magnet 18S8P.



Gbr. 1 Diagram Alir Penelitian

III. STUDI LITERATUR

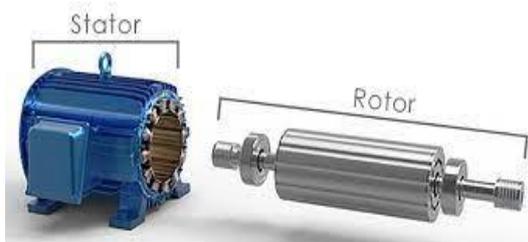
A. Generator

Generator adalah sebuah mesin yang dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi yang menggerakkan generator

sumbernya bermacam-macam, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Angin generator bergerak karena adanya angin yang membuat bilah turbin angin berputar baik secara horizontal maupun vertikal. Demikian pula pada Pembangkit Listrik Tenaga Air generator bergerak karena adanya aliran air yang menabrak kincir air maupun turbin sehingga dapat berputar menghasilkan energi mekanik. Sedangkan pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel listrik dihasilkan melalui pembakaran bahan bakar disel sehingga dapat memutar turbin dan dikonversi oleh generator menjadi energi listrik.

B. Konstruksi Generator

Generator terdiri dari dua bagian utama yaitu, bagian yang diam (stator) dan bagian yang bergerak (rotor).



Gbr. 2 Stator dan Rotor

Bagian stator terdiri dari Inti Stator yang berbentuk cincin yang berlaminasi yang disatukan serapat mungkin sehingga dapat menghindari rugi-rugi arus eddy (*eddy current losses*). Pada inti stator terdapat slot-slot untuk menempatkan lilitan tembaga dan untuk mengatur arah medan magnetnya. Lilitan Tembaga adalah bagian stator yang terdiri dari beberapa lilitan tembaga yang terdapat dalam slot-slot dan ujung-ujung kumparan. Masing-masing slot dihubungkan untuk mendapatkan tegangan induksi.

Alur Stator (*teeth*) merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator yang berbentuk menyerupai gigi. Rumah Stator (*housing*) merupakan bagian dari stator yang umumnya terbuat dari besi tuang yang berbentuk silinder dan mempunyai sirip-sirip seperti *heatsink* yang berfungsi untuk mendinginkan komponen didalamnya.

Bagian rotor terdiri dari Inti Kutub yang memiliki poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalan atau jalur fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Kumparan Medan mempunyai dua bagian

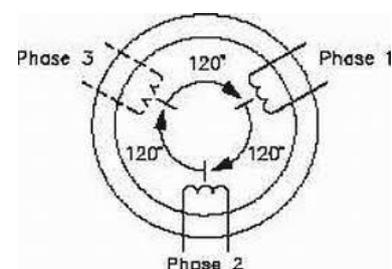
yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi. Isolasi pada kumparan medan harus benar benar baik dalam hal kekuatan mekanisnya, ketahanannya akan suhu yang tinggi dan ketahanannya terhadap gaya sentrifugal yang besar.

C. Prinsip Kerja PMSG

Generator bekerja berdasarkan hukum Faraday yang berbunyi, apabila suatu penghantar diputar didalam sebuah medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya magnet, maka pada ujung penghantar tersebut akan menimbulkan Garis Gaya Listrik (GGL) yang mempunyai satuan *Volt*. Ketika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet dapat dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet permanen.

Pada generator tipe ini medan magnet diletakan pada stator yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada slip ring dan sikat karbon, sehingga akan mengakibatkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Untuk mengatasi masalah ini, digunakan generator dengan tipe kutub internal yang dimana medan magnet akan dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC akan dibangkitkan oleh rangkaian stator.

Tegangan yang dihasilkan akan berbentuk sinusoidal dan rotor diputar dengan kecepatan konstan. Tegangan AC tiga fasa dibangkitkan oleh generator sinkron kutub internal pada tiga kumparan stator yang dirancang sedemikian rupa sehingga membentuk beda fasa dengan sudut 120° [4]. Bentuk gambaran sederhana hubungan kumparan 3 fasa dengan tegangan yang dibangkitkan diperlihatkan pada gambar dibawah ini.

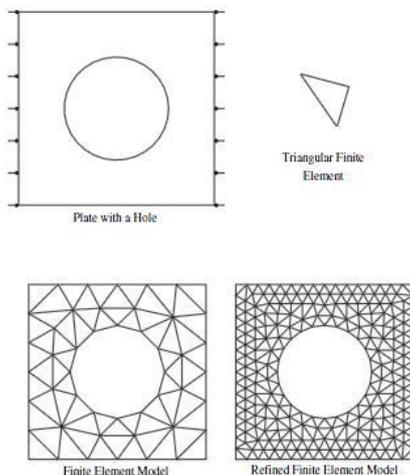


Gbr. 3 Skema Kumparan 3 Fasa

D. Finite Element Method

Finite Element Method (FEM) adalah metode pendekatan yang membentuk persamaan-persamaan numerik yang diselesaikan dengan cermat dan teliti untuk mendapatkan hasil yang akurasi. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan, maka domain akan dibagi dalam beberapa bagian elemen yang dimana pada setiap sudut garis elemen akan terdapat simpul pada jarak tertentu. Semakin banyak elemen pada sebuah bidang yang dianalisis, maka tingkat akurasinya akan semakin presisi [5].

Pembagian terhadap suatu bidang (*meshing*) merupakan hal yang paling utama untuk dipertimbangkan dalam penerapan FEM. Dalam melakukan *meshing* semakin bidang yang diteliti dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil maka hasil yang didapatkan akan semakin akurat. Pada sistem CAD berbasis FEM, salah satu pendekatannya adalah bentuk objek yang dianalisis tersirat dengan *finite element mesh* yang diikuti dengan penggunaan analisis secara matematis [6]. Bentuk objek yang tersirat dengan finite element mesh digambarkan pada gambar berikut.



Gbr. 4 Meshing pada plate

E. Winding

Winding adalah proses melilit dan mengelompokkan kawat konduktor untuk setiap fasanya dengan tujuan mendapatkan hasil tegangan yang maksimal pada generator. Ada beberapa syarat *winding* yang harus dipenuhi agar mendapatkan keluaran yang maksimal, antara lain:

1. Pada semua slot pada rotor harus terdapat lilitan.
2. Lilitannya harus seimbang dimana setiap fasanya berjarak 120 derajat.
3. Jumlah setiap lilitan harus sama.
4. Jumlah slot merupakan kelipatan dari jumlah fasa.

IV. PEMBAHASAN

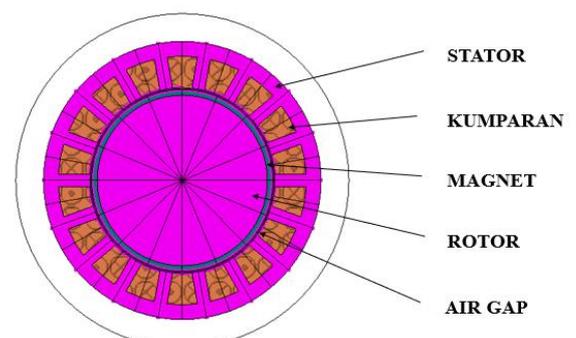
A. Pemodelan PMSG 18 slot 8 pole

Langkah pertama adalah membuat pemodelan PMSG 18S8P pada *software* MagNet mulai dari stator, kumparan, rotor, magnet, *air gap*, sampai *air box*. Spesifikasi pemodelan PMSG 18S8P dijabarkan dalam tabel berikut.

Tabel 1. Pemodelan PMSG

Data Pemodelan PMSG		
No	Keterangan	Ukuran
1	Slot	18 Slot
2	Pole	8 Pole
3	Tebal Core	40 mm
4	Jumlah Lilitan	100 lilitan
5	Lebar Magnet	3 mm
6	Diameter Stator	75 mm
7	Diameter Rotor	49 mm
8	Lebar Celah Udara	1 mm
9	Material Stator	Carpenter: Silicon Steel
10	Material Rotor	Carpenter: Silicon Steel
11	Material Coil	Copper:5.77e7 Siemens/meter
12	Material Magnet	PM12: Br1.2 mur 1.0

Berdasarkan Tabel 1. diatas maka didapatkan pemodelan PMSG 18S8P sebagai berikut.



Gbr. 5 Pemodelan PMSG 18S8P

1. Stator adalah bagian inti generator yang tidak bergerak, pada stator terdapat lilitan/kumparan *coil* yang merupakan tempat terbentuknya tegangan dan arus hasil perpotongan fluks.
2. Kumparan/*Coil* adalah konduktor listrik tempat arus listrik berinteraksi dengan medan magnet, dengan medan magnet berubah-ubah terhadap waktu. *Coil*/kumparan ini terletak pada stator.
3. Magnet adalah penghasil medan elektromagnetik, pada PMSG magnet yang digunakan merupakan magnet permanen. Medan magnet ini nantinya akan diinterasikan dengan arus listrik yang terdapat pada *coil*/kumparan. Magnet dapat terletak pada ujung rotor ataupun pada permukaan rotor.
4. Rotor adalah bagian inti generator yang bergerak, pada rotor PMSG terdapat magnet permanen yang diletakkan pada ujung rotor. Magnet tersebut berfungsi sebagai membangkitkan medan magnet yang kemudian akan diinduksikan ke stator.
5. *Air Gap* atau celah udara adalah bagian kosong antara rotor dan stator agar tidak terjadi gesekan langsung pada stator saat rotor berputar. Selain itu, celah udara adalah tempat terjadinya perpindahan fluks magnet dari rotor menuju stator.

B. Analisa Generator

Sebelum melakukan proses pelilitan atau *winding* terlebih dahulu dilakukan analisa pada geomeri generator untuk mendapatkan beberapa variabel sehingga dapat menentukan skema lilitan yang akan digunakan dan mendapatkan fasa induk dari setiap lilitan. Variabel yang akan dicari adalah jumlah *slot*, jumlah *pole*, *pole pair*, *mechanical slot*, *mechanical pole*, *360 degree electrical*, dan *degree electrical/phase* yang disajikan dalam tabel 2.

C. Mengolah Data Pada Microsoft Exel

Setelah menganalisa spesifikasi generator dan mendapatkan data yang dibutuhkan, langkah selanjutnya adalah mengolah data tersebut menggunakan MS. Exel untuk mendapatkan grafik gelombang sinusoidal pada setiap lilitan sehingga dapat dianalisa

dan mengelompokkan lilitan tersebut dalam satu fasa sehingga mendapatkan hasil sebagai berikut:

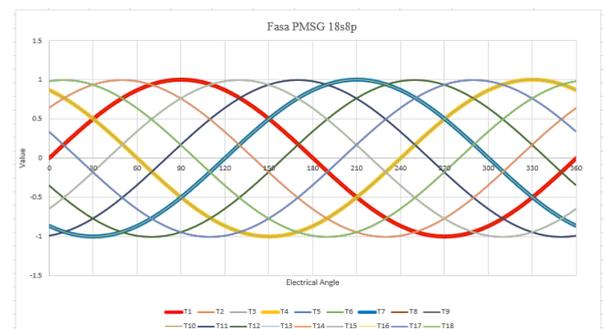
Tabel 2. Spesifikasi Geometri Generator

Keterangan	Nilai	Satuan
Jumlah Slot	18	-
Jumlah Pole	8	-
Pole Pair	4	-
Mech Slot	20	<i>Degree Mechanical</i>
Mech Pole	45	<i>Degree Mechanical</i>
360° Electrical	90	<i>Degree Mechanical</i>
DegEle/Phase	80	<i>Degree Electrical</i>

Deg elec Slot sebesar 80°																			
Degree	0	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360	
0	0	-0,9848	-0,342	0,86025	0,64239	-0,64239	0,86025	0,342	0,9848	0,342	0,86025	0,64239	-0,64239	-0,342	-0,9848	-0,342	-0,86025	0,64239	0,86025
10	0,187165	-0,9397	-0,5	0,768044	0,76804	-0,5	-0,9397	0,17365	1	0,17365	-0,9397028	-0,5	0,76804	0,76804	-0,5	-0,9397	0,17365	1	0,17365
20	0,25882	-0,9063	-0,5758	0,707107	0,81915	-0,4226	-0,9063	0,08719	0,96919	0,25882	-0,9063078	-0,5758	0,70711	0,81915	-0,4226	-0,9063	0,08719	0,96919	0,25882
30	0,34302	-0,866	-0,6428	0,642788	0,86603	-0,342	-0,866	-0,17365	1	0,17365	-0,8660324	-0,6428	0,64279	0,86603	-0,342	-0,866	-0,17365	1	0,17365
40	0,42262	-0,8192	-0,70711	0,575796	0,96915	-0,2588	-0,8192	0,08719	0,96919	0,42262	-0,81922	-0,70711	0,57579	0,96915	-0,2588	-0,8192	0,08719	0,96919	0,42262
50	0,5	-0,768	-0,768	0,5	0,93969	-0,17365	-0,768	0,17365	1	0,17365	-0,93969	-0,768	0,5	0,93969	-0,17365	-0,768	0,17365	1	0,17365
60	0,57578	-0,7071	-0,8192	0,422618	0,96919	-0,08719	-0,7071	0,08719	0,96919	0,57578	-0,7071088	-0,8192	0,42262	0,96919	-0,08719	-0,7071	0,08719	0,96919	0,57578
70	0,64279	-0,6428	-0,866	0,34202	0,98481	1,202	-0,6428	-0,342	0,98481	0,64279	-0,64279	-0,866	0,34202	0,98481	1,202	-0,6428	-0,342	0,98481	0,64279
80	0,70711	-0,5758	-0,9063	0,258819	0,96919	0,08719	-0,5758	0,08719	0,96919	0,70711	-0,5757954	-0,9063	0,25882	0,96919	0,08719	-0,5758	0,08719	0,96919	0,70711
90	0,76804	-0,5	-0,9397	0,173648	1	0,17365	-0,9397	-0,5	0,76804	0,76804	-0,5	-0,9397	0,17365	1	0,17365	-0,9397	-0,5	0,76804	0,76804
100	0,81915	-0,4226	-0,96919	0,087196	0,96919	0,25882	-0,4226	-0,96919	0,08719	0,81915	-0,4226083	-0,96919	0,08719	0,96919	0,25882	-0,4226	-0,96919	0,08719	0,81915
110	0,86603	-0,342	-0,9848	-1,202	0,86603	-0,342	-0,9848	-0,17365	1	0,17365	-0,98481	-0,342	-0,9848	-1,202	0,86603	-0,342	-0,9848	-0,17365	1
120	0,90631	-0,2588	-0,8192	0,08719	0,96919	0,42262	-0,8192	-0,2588	0,90631	0,90631	-0,258819	-0,8192	0,08719	0,96919	0,42262	-0,8192	-0,2588	0,90631	0,90631
130	0,93969	-0,17365	-0,768	0,17365	0,96919	0,5	-0,768	0,17365	0,93969	-0,1736482	-0,768	0,17365	0,96919	0,5	-0,768	0,17365	0,93969	-0,1736482	-0,768
140	0,96919	-0,08719	-0,6428	0,08719	0,96919	0,70711	-0,08719	-0,6428	0,96919	0,96919	-0,0871907	-0,6428	0,08719	0,96919	0,70711	-0,08719	-0,6428	0,96919	0,96919
150	0,98481	0	-0,866	0,34202	0,98481	0,64279	-0,866	0,34202	0,98481	0,98481	0,64279	-0,866	0,34202	0,98481	0,64279	-0,866	0,34202	0,98481	0,98481
160	0,99619	0,08716	-0,96919	-0,42262	0,81915	0,70711	-0,96919	-0,4226	0,99619	0,99619	-0,4226	-0,96919	-0,4226	0,81915	0,70711	-0,96919	-0,4226	0,99619	0,99619
170	1	0,17365	-0,9397	-0,5	0,76804	0,76804	-0,5	-0,9397	0,17365	1	0,17364818	-0,9397	-0,5	0,76804	0,76804	-0,5	-0,9397	0,17365	1
180	0,98481	0	-0,866	0,34202	0,98481	0,64279	-0,866	0,34202	0,98481	0,98481	0,64279	-0,866	0,34202	0,98481	0,64279	-0,866	0,34202	0,98481	0,98481

Gbr. 6 Data yang diolah pada *exel*

Data yang telah diolah akan ditampilkan dalam sebuah grafik gelombang sinusoidal seperti gambar berikut:



Gbr. 7 Grafik fasa pada setiap lilitan

Pada Gambar 7. terdapat 18 gelombang sesuai dengan jumlah lilitan yang digunakan. Gelombang tersebut memiliki tiga fasa induk yaitu fasa induk U, fasa induk V, dan fasa induk W. Berdasarkan aturan yang berlaku setiap fasa harus berjarak 120 derajat, sehingga diperoleh induk fasa U berada pada lilitan T1, induk fasa V berada pada lilitan fasa T4, dan induk fasa W berada pada lilitan T7.

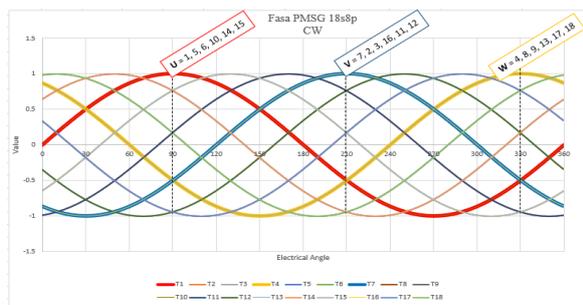
D. Skema Winding

Setelah mendapatkan grafik gelombang sinusoidal dari setiap lilitan dan mendapatkan induk fasa, langkah selanjutnya dari proses *winding* adalah mengelompokkan lilitan pada

setiap fasa untuk mendapatkan keluaran tegangan yang maksimal. Ada beberapa metode untuk melakukan pengelompokan fasa antara lain *clockwise* dan kombinasi. Dari kedua metode tersebut nantinya akan dianalisa metode lilitan mana yang lebih baik atau mendapatkan tegangan yang maksimal pada PMSG 18S8P.

1) Metode *Clockwise*

Metode *clockwise* atau lilitan serarah adalah proses mengelompokkan lilitan searah dengan jarum jam. Untuk mencari lilitan yang satu fasa dengan induk fasanya bisa diperoleh dengan menganalisa grafik sinusoidal pada setiap fasa yang terdapat pada Gbr. 7 Kelompok fasa diperoleh dengan mencari gelombang lilitan yang terdekat dari induk fasanya pada kuadran positif.



Gbr. 8 Pengelompokan fasa *clockwise*

Setelah dianalisa gelombang sinusoidal yang terdekat dan berada pada kuadran positif, maka diperoleh pengelompokan fasa dari metode *clockwise* yang disajikan pada tabel berikut.

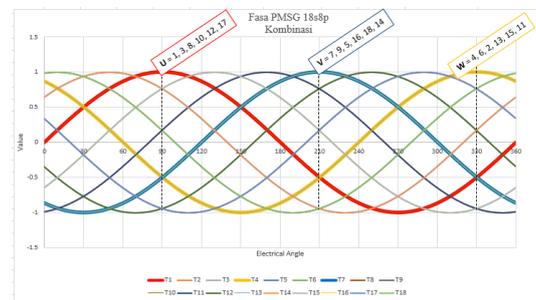
Tabel 3. Kelompok fasa lilitan *clockwise*

Lilitan Clockwise					
U		V		W	
T1	CW	T7	CW	T4	CW
T5	CW	T2	CW	T8	CW
T6	CW	T3	CW	T9	CW
T10	CW	T16	CW	T13	CW
T14	CW	T11	CW	T17	CW
T15	CW	T12	CW	T18	CW

2) Metode Kombinasi

Metode kombinasi adalah proses mengelompokkan lilitan yang menggabungkan lilitan *clockwise* dan *counter clockwise*. Untuk mencari lilitan yang satu fasa dengan induk fasanya bisa diperoleh dengan menganalisa

grafik sinusoidal pada setiap fasa yang terdapat pada Gbr. 7 Kelompok fasa diperoleh dengan mencari gelombang lilitan yang terdekat dari induk fasanya pada kuadran negatif.



Gbr. 9 Pengelompokan fasa kombinasi

Setelah dianalisa gelombang sinusoidal yang terdekat dan berada pada kuadran negatif, maka diperoleh pengelompokan fasa dari metode kombinasi yang disajikan pada tabel berikut.

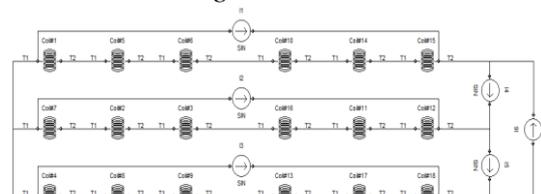
Tabel 4. Kelompok fasa lilitan kombinasi

Lilitan Kombinasi					
U		V		W	
T1	CW	T7	CW	T4	CW
T3	CCW	T2	CCW	T8	CCW
T8	CCW	T3	CCW	T9	CCW
T10	CW	T16	CW	T13	CW
T12	CCW	T11	CCW	T17	CCW
T17	CCW	T12	CCW	T18	CCW

E. Winding pada Software FEM

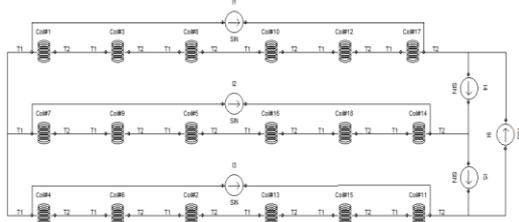
Setelah mendapatkan skema *winding* baik pada metode *clockwise* maupun kombinasi, langkah selanjutnya adalah mengaplikasikan pada desain PMSG yang telah dibuat dengan software MagNet sehingga mendapatkan hasil sebagai berikut.

1. Metode *winding clockwise*



Gbr. 10 Metode *winding clockwise*

2. Metode *winding* kombinasi



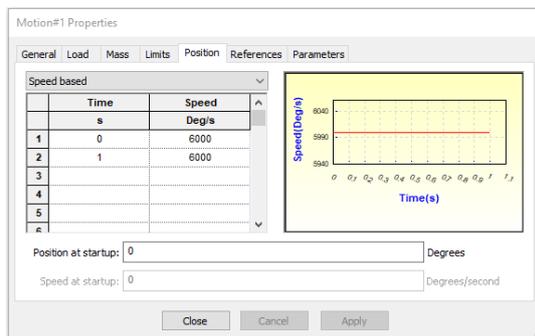
Gbr. 11 Metode *winding* kombinasi

Perbedaan dari kedua metode *winding* ini adalah pada konfigurasi lilitannya sehingga akan berbeda arah magnetnya.

F. Melakukan Pengaturan pada Software CAD berbasis FEM

1) Pengaturan Kecepatan Putar Generator

Setelah melakukan pemodelan dan *winding* pada PMSG 18S8P, langkah selanjutnya adalah melakukan pengaturan kecepatan putar generator dengan melakukan *setting* pada menu ‘*Make Motion Component*’ sebagai berikut.

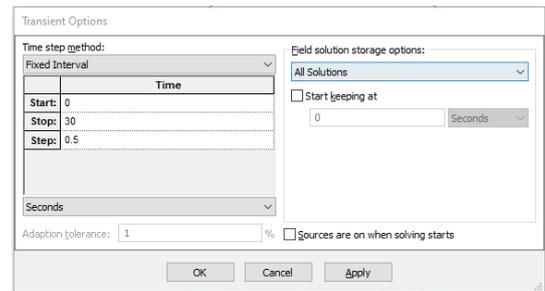


Gbr. 12 Pengaturan motion untuk memutar rotor

Untuk satuan kecepatan yang digunakan adalah derajat/detik (Deg/s), sehingga memerlukan konversi dari satuan rpm dengan ketentuan 1 putaran adalah 360 derajat, maka 1 rpm adalah 6 Deg/s.

2) Pengaturan Besar Derajat

Pengaturan besar derajat dan jumlah data ditentukan melalui ‘*Transient Option*’. Pengaturan yang perlu di masukan memiliki satuan waktu yaitu detik, sehingga diperlukan konversi untuk menentukan waktu yang dibutuhkan pada kolom *Stop* dan *Step*.



Gbr. 13 *Transient Option*

Perhitungan konversi yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\text{Step}(t) = \text{Stop}(t) / n \quad (1)$$

$$\text{Step}(t) = \text{Stop}(t) / n \quad (2)$$

Keterangan:

Stop (t) = Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan simulasi.

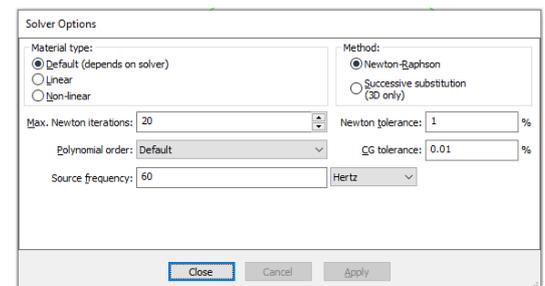
v = Kecepatan putaran dalam Deg/s.

θ = Besar sudut yang akan disimulasikan.

n = Jumlah data yang akan diambil.

3) Pengaturan *Solving*

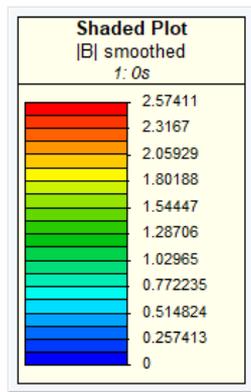
Pengaturan *solving* dilakukan pada ‘*Solver Options*’ menggunakan metode Newton-Raphson dengan jumlah iterasi maksimal adalah 20 dan toleransi 0.01%. Semakin besar nilai iterasi yang di setting dan semakin kecil toleransi maka hasil yang didapatkan akan semakin presisi.



Gbr. 14 *Solver Option*

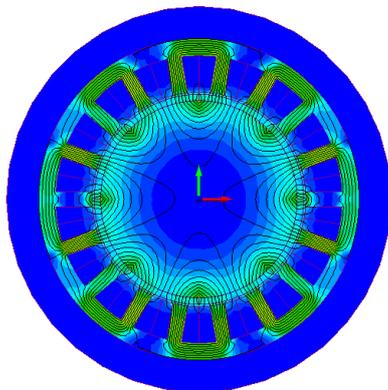
G. Flux Linkage

Flux Linkage adalah hubungan fluks dari komponen magnetik yang berada pada rotor dengan konduktor kumparan atau inti stator ketika medan magnet melewati kumparan. Satuan untuk *flux linkage* adalah weber (Wb), semakin rapat fluks pada inti generator maka akan menyebabkan suhu yang tinggi. Berikut adalah tabel kerapatan fluks pada software CAD berbasis FEM.



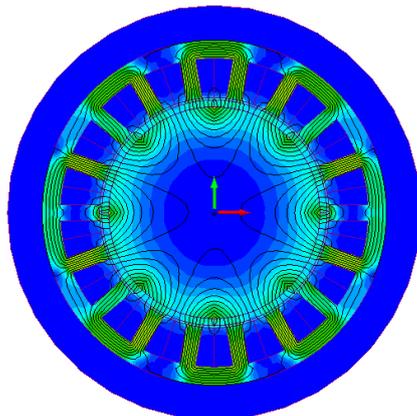
Gbr. 15 Tabel kerapatan fluks

1) Flux Linkage Metode Clockwise



Gbr. 16 Flux linkage clockwise

2) Flux Linkage Metode Kombinasi



Gbr. 17 Flux linkage kombinasi

Gbr. 16 dan 17 diatas adalah hasil Flux Linkage saat rotor berada dalam posisi 0 derajat. Arah aliran fluks mengalir dari kutub utara magnet ke kutub selatan magnet melewati Air Gap kemudian sampai kepada stator sebagai media hantaran Flux Linkage.

H. Tegangan yang Didapat

Langkah terakhir adalah mencari tegangan dari masing-masing metode untuk dianalisa metode lilitan mana yang terbaik digunakan untuk PMSG 18S8P yang telah di desain. Untuk mendapatkan tegangan keluaran langkah pertama adalah mengambil sample tegangan per-fasa yang ada pada software CAD berbasis FEM dan kemudian mengubahnya menjadi tegangan antar fasa menggunakan software Exel dengan menggunakan rumus.

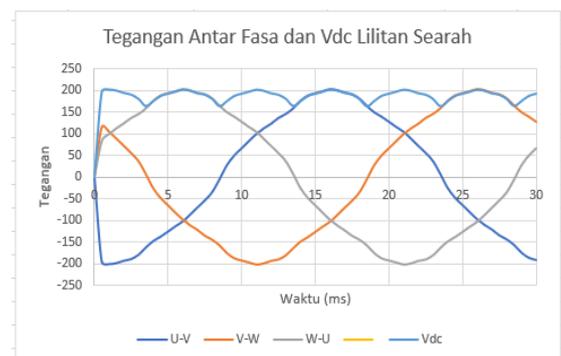
$$((Coil U-Coil V)(Coil V-Coil W)(Coil W-Coil U)) \quad (3)$$

Setelah mendapatkan tegangan antar fasa, langkah terakhir adalah mencari tegangan Vdc atau tegangan rata-rata dari tegangan antar fasa menggunakan rumus yang digunakan pada software Exel sebagai berikut.

$$MAX(ABS(Coil U V),ABS(Coil V W),ABS(Coil W U)) \quad (4)$$

Maka tegangan keluaran yang diperoleh dari masing masing metode winding untuk PMSG 18S8P disajikan dalam gambar grafik dan tabel dibawah ini.

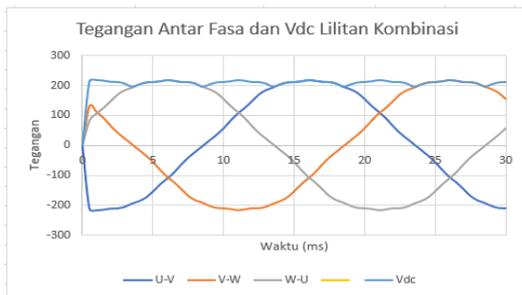
1) Tegangan Metode Clockwise



Gbr. 18 Grafik tegangan lilitan searah

Tegangan rata-rata yang dihasilkan oleh PMSG 18S8P dengan menggunakan concentrated winding dan menggunakan metode clockwise adalah 184.80 Volt.

2) Tegangan Metode Kombinasi



Gbr. 19 Grafik tegangan lilitan kombinasi

Tegangan rata-rata yang dihasilkan oleh PMSG 18S8P dengan menggunakan *concentrated winding* dan menggunakan metode kombinasi adalah 206.05 Volt.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan desain PMSG 18S8P dan *winding* yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dalam melakukan *winding*, tidak ada metode yang salah dan benar, *winding* adalah mencari skema terbaik untuk mendapatkan tegangan keluaran yang maksimal.
2. Pada desain PMSG 18S8P skema terbaik adalah menggunakan metode kombinasi, karena ketika fasanya dikelompokkan kepada induk fasa jaraknya yang paling dekat sehingga mampu menghasikan tegangan yang maksimal.
3. Tegangan yang diperoleh dari metode clockwise adalah 184.80 Volt, sedangkan pada metode kombinasi mendapatkan tegangan 206.05 Volt. Sehingga skema *winding* terbaik yang digunakan pada PMSG 18S8P adalah menggunakan metode kombinasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan terkhusus kepada keluarga yang telah *support* dengan sepenuh hati dan tanpa pamrih, kepada Bapak Dian Budhi Santoso selaku dosen pembimbing yang telah menuntun penulis

sampai di tahap ini, kepada teman-teman teknik elektro, dan tak lupa pula kepada warga Ciharas University periode Juli – September 2021.

REFERENSI

- [1] A. R. Rachmawati, "Pandemi Covid-19, Konsumsi Listrik Rumah Tangga Naik 13-20 Persen," *pikiran-rakyat.com*, 2020. <https://www.pikiran-rakyat.com/ekonomi/pr-01565806/pandemi-covid-19-konsumsi-listrik-rumah-tangga-naik-13-20-persen> (accessed Oct. 26, 2021).
- [2] Agung Pribadi, "Hingga Juni 2020, Kapasitas Pembangkit di Indonesia 71 GW," *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*, 2020. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/hingga-juni-2020-kapasitas-pembangkit-di-indonesia-71-gw> (accessed Oct. 26, 2021).
- [3] Humas EBTKE, "Forum Kehumasan Dewan Energi Nasional: Menuju Bauran Energi Nasional Tahun 2025," *Direktorat Jendral Energi Baru Terbarukan Dan Konservasi Energi*, 2021. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/04/09/2838/forum.kehumasan.dewan.energi.nasional.menuju.bauran.energi.nasional.tahun.2025> (accessed Oct. 26, 2021).
- [4] R. Harahap, C. P. Silaban, R. Dinzi, and F. R. Bukit, "Analisis Perbandingan Concentrated Winding Dan Toroidal Winding Pada Generator Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Tiga Fasa Menggunakan Inti Besi Pada Stator," 2021.
- [5] S. Ningsi, "Metode Elemen Hingga Untuk Perpindahan Panas Konduksi Steady State pada Domain 2D dengan Menggunakan Elemen Segitiga," *Saintifik*, vol. 7, no. 2, pp. 146–156, 2021, doi: 10.31605/saintifik.v7i2.336.
- [6] B. C. Wibowo, I. B. Winardi, M. Kom, and L. Belakang, "Simulasi Perubahan Tegangan Keluaran Permanent Magnet Synchronous Generator (Pmsg) 12s8p Terhadap Variasi Kecepatan Putar Rotor Dengan Software Berbasis Finite Element Method (Fem)," *J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 1–9, 2020.