

ANALISIS PENGARUH VARIASI SLOT DAN POLE TERHADAP TEGANGAN DAN EFISIENSI DAYA PADA PERANCANGAN GENERATOR MAGNET PERMANEN MENGGUNAKAN SOFTWARE MAGNET

Mario Sumantri, Satyo Nuryadi

*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Informatika dan Elektro
Universitas Teknologi Yogyakarta
Jl. Ringroad Utara Jombor Sleman Yogyakarta
E-mail : mariobross934@gmail.com, satyo.nuryadi@uty.ac.id*

ABSTRAK

Energi terbarukan diharapkan dapat menjadi alternatif untuk mengatasi masalah kebutuhan listrik yang tinggi dan dapat menggantikan penggunaan energi fosil untuk menghasilkan listrik. Penggunaan energi angin merupakan salah satu contoh dari pemanfaatan energi terbarukan. Permasalahan yang sering timbul dari penggunaan energi terbarukan adalah bahwa biaya investasi yang dikeluarkan untuk membangun pembangkit dengan energi terbarukan tidak sebanding dengan jumlah energi yang dihasilkan. Salah satu penyebabnya adalah efisiensi generator yang belum optimal untuk penggunaan energi terbarukan. Oleh karena itu dibutuhkan pengembangan generator yang dapat mengoptimalkan energi terbarukan. Dari permasalahan tersebut penulis melakukan penelitian tentang perancangan generator dengan variasi slot dan pole yang bertujuan untuk mencari *output* yang efektif berdasarkan tegangan dan daya menggunakan perangkat lunak MagNet. Dimana variabel slot yang diujikan adalah 8, 10, 12, 16, 18 dan variabel pole yang diujikan adalah 4, 8, 12, 16, 18. Hasil simulasi kemudian dianalisa dengan skenario berikut yaitu mengolah data tegangan dan daya keluaran, kemudian dilihat dari efisiensi daya keluaran. Desain generator dengan variasi jumlah slot dan pole tanpa pembebanan yang menghasilkan daya yang paling tinggi adalah 18 slot 18 pole dengan daya sebesar 54.132 kW dan tegangan output yang paling tinggi adalah 18 slot 16 pole dengan tegangan sebesar 120.2737999 Volt. Sedangkan pada desain generator variasi jumlah slot dan pole dengan pembebanan sebesar 50 ohm, daya output paling tinggi adalah 18 slot 18 pole dengan daya sebesar 6987.951 Watt dan tegangan output paling tinggi juga pada 18 slot 18 pole dengan tegangan sebesar 510.672 V. Analisa kemudian dilakukan dengan melihat efisiensi daya keluaran, dimana pada perancangan generator dengan jumlah variasi slot dan pole yang memiliki efisiensi daya paling tinggi yaitu pada 10 slot 18 pole dengan persentase efisiensi daya sebesar 92%. Sedangkan yang memiliki efisiensi daya terendah yaitu pada 12 slot 4 pole dan 16 slot 4 pole dengan persentase efisiensi daya sebesar 8%.

Kata Kunci: Energi Terbarukan, Software Magnet, Generator, Slot, Pole

I. PENDAHULUAN

Generator adalah mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Perkembangan teknologi generator dari tahun ke tahun terus mengalami peningkatan mulai dari bentuk, desain, ukuran, dan material yang digunakan. Perkembangan teknologi generator ini tidak lepas dengan adanya *software* untuk mendesain mesin-mesin listrik. Sehingga sebelum melakukan perancangan dan implementasi pembuatan mesin-mesin listrik khususnya generator, diharapkan nantinya peneliti mampu mengetahui bahan apa saja yang dibutuhkan dalam perancangan generator tersebut.

Penelitian tentang perancangan generator menggunakan *Software* untuk mendapatkan hasil keluaran generator yang baik sudah mulai banyak dilakukan, di antaranya adalah penelitian studi bentuk rotor magnet permanen pada generator sinkron magnet permanen fluks aksial tanpa inti stator menggunakan metode variasi bentuk magnet, variasi kecepatan putaran, dan variasi lebar celah udara (Sofian, E. 2011), penelitian tentang simulasi pengaruh ketebalan yoke rotor, jarak antar kutub dan jenis material magnet permanen terhadap rapat fluks pada generator sinkron fluks aksial (Alam, M. F. dkk. 2013), penelitian tentang desain generator sinkron magnet permanen jenis neodymium iron boron untuk pltb daya 500 watt

menggunakan perangkat lunak magnet infolytica (Irsyadul, M. U. dkk. 2013), analisa perancangan dan simulasi generator sinkron magnet permanen dengan rotor berlubang (Azka, M. 2013), reduksi torsi cogging pada motor brushless dc 12 slot 8 kutub tipe surface menggunakan metode penggunaan umbrella, notch dan toki (tonjolan) pada stator Siregar, V. R. H. 2015), perancangan generator 100 watt menggunakan *software* elektromagnetik infolytica (Anam, C. dkk. 2017), analisa pengaruh variasi umbrella terhadap tegangan keluaran pada generator BLDC 12 slot 8 pole (Fizari, A. J. dkk. 2018), aspek rancangan generator magnet permanen fluks radial kecepatan rendah (Suhada, M. O. dan Yasri, I. 2018), variasi geometri model PM generator sinkron 12 slot 8 pole ¼ model (Hadisiswoyo, M. R. dkk. 2018), serta penelitian tentang analisa efisiensi dan rancang generator permanen magnet 12 slot 8 pole menggunakan *software* magnet (Arifianto, I. dan Hs, M. R. 2018).

Pada umumnya, penelitian dan pengembangan generator dilakukan pada parameter-parameter yang mempengaruhi kinerja generator, baik optimasi parameter pada stator maupun optimasi parameter rotor pada generator. Salah satu contoh optimasi parameter pada stator dan rotor adalah slot dan pole. Slot adalah tempat untuk melilitkan gulungan kawat pada inti stator, semakin banyak jumlah slot maka akan semakin banyak jumlah gulungan kawat pada inti stator. Pole adalah kutub magnet pada generator. Makalah ini menggunakan metode variasi jumlah slot dan pole untuk mendapatkan tegangan dan daya keluaran yang optimal.

Generator magnet permanen adalah generator yang menggunakan magnet permanen sebagai penghasil induksi fluks magnet yang ditempatkan pada rotor. Generator magnet permanen memiliki prinsip kerja yang sama dengan generator sinkron tetapi pada rotornya kumparan medan diganti dengan magnet permanen. Generator magnet permanen menghasilkan fluks pada kutub-kutub rotor yang memotong kumparan jangkar sehingga menghasilkan GGL bolak-balik pada ujung stator sehingga kumparan jangkar pada stator menghasilkan tegangan induksi (Pane, E., 2009).

Rotor merupakan bagian berputar yang ada pada generator. Pada generator magnet permanen, rotor merupakan tempat tersusunnya magnet permanen sebagai pembangkit medan magnet yang diperlukan untuk pembangkit listrik. Induksi elektro magnetik yang ada pada generator permanent magnet menggunakan hukum *fareday* yang berbunyi “adanya

perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan GGL pada kumparan tersebut”, dibuktikan dengan Persamaan 1.1 :

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1)$$

Keterangan :

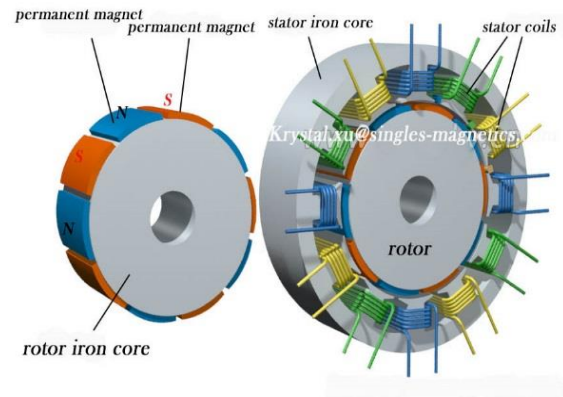
e : Tegangan(V)

N : Banyak lilitan

$d\phi$: Perubahan Fluks magnet(webber)

dt : Perubahan Waktu(s)

Tidak hanya hukum fareday, pada generator permanent magnet ini digunakan hukum *lenz* yang berbunyi “GGL induksi yang muncul berlawanan arah dengan perubahan fluks menyebabkan arus mengalir” (Noprizal, L. dkk., 2017). Gambar stator dan rotor magnet permanen dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 1: Stator dan rotor generator permanen magnet

Stator merupakan bagian yang tidak berputar pada generator. Stator akan menarik medan magnet yang dihasilkan oleh rotor dan kumpulan medan magnet telah terinduksi dan menjadi tegangan ataupun arus (Asyari, H. dkk., 2016). Pada stator terdapat kumparan/lilitan yang juga disebut *coil*, *coil* terpasang tetap pada inti stator sehingga tidak dapat berputar. Untuk penempatan *coil* pada stator terdapat *slot* atau sering juga disebut alur stator. *Slot* berbanding terbalik dengan belitan oleh karena itu apabila ingin memperbesar daya keluaran caranya dengan memperkecil jumlah slot dan memperbanyak jumlah lilitan (Widyaningsih, W. P. dkk., 2013). Pole merupakan sepasang kutub yang berhadapan, dapat dilihat pada Gambar 1, hal tersebut tujuannya agar terjadi gaya tarik menarik antar magnet sehingga apabila ada kumparan pada stator akan tercipta gaya induksi elektromagnetik.

Hukum Induksi Elektromagnetik Faraday pertama kali dikemukakan oleh Michael Faraday pada tahun 1831. Induksi Elektromagnetik adalah gejala timbulnya gaya gerak listrik (ggl) di dalam suatu kumparan bila terdapat perubahan fluks magnetik pada konduktor pada kumparan tersebut atau bila konduktor bergerak relatif melintasi medan magnet. Sedangkan yang dimaksud dengan Fluks adalah banyaknya jumlah garis gaya yang melewati luasan suatu bidang yang tegak lurus garis gaya magnetik. Hukum induksi elektromagnetik menyatakan bahwa: Jika fluks yang menghubungkan sebuah kalang/loop berubah terhadap fungsi waktu, maka tegangan akan terinduksi antara terminal-terminalnya dan Nilai tegangan induksi proporsional terhadap besarnya perubahan fluks.

Dari pernyataan tersebut dapat dikatakan ketika fluks di dalam kalang pada angka 1 weber per detik, tegangan 1 volt akan terinduksi antara terminal - terminalnya. Akibatnya, jika fluks berubah-ubah di dalam sebuah kawat dengan N putaran, tegangan induksi dinyatakan dengan Persamaan 1.2 :

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Keterangan:

- E = tegangan induksi [V]
- N = Jumlah putaran pada kawat
- $\Delta\phi$ = perubahan fluks di dalam kawat (Wb)
- Δt = interval waktu ketika fluks berubah (s)

Fluks linkage atau kerapatan fluks adalah jumlah garis fluks magnet yang mengalir pada suatu penampang dibagi dengan luas penampang tersebut. Kerapatan fluks diinisialkan dengan B. Rumus kerapatan fluks seperti berikut:

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (1.3)$$

Keterangan:

- B : Kerapatan fluks (Wb/m²)
- ϕ : Fluks magnet (Wb)
- A : Luas penampang (m²)

Dari persamaan diatas diketahui bahwa semakin luas penampang maka kerapatan fluksnya semakin rendah sehingga intensitas medan magnet yang dihasilkan juga rendah. Sedangkan pada luas penampang yang lebih sempit kerapatan fluksnya tinggi sehingga intensitas medan magnet juga tinggi. Kerapatan fluks diukur dalam satuan weber per meter persegi (Wb/m²) namun satuan ini dapat digantikan dengan satuan sistem matrik internasional atau dengan

kata lain satuan internasional (SI) yang lebih baru, tesla (T). Sebelum kedua satuan tersebut digunakan, satuan lain yang lebih dulu digunakan untuk kerapatan fluks adalah Gauss (G), untuk mengkonversinya diketahui bahwa 1 Wb/m² sama dengan 1 T atau 10.000G (A. EDMINISTER, J., 2005).

Aplikasi MagNet adalah perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi terkait medan elektromagnetik berbasis *Finite Element Method* (FEM). FEM adalah metode komputasi dengan konsep memecah area hitungan menjadi luasan kecil-kecil lalu dihitung berbagai parameternya satu-persatu di tiap luasan tersebut.



Gambar 2: Tampilan aplikasi magnet

Pada gambar diatas merupakan ikon dari aplikasi MagNet 7.5. Aplikasi ini dapat memvariasikan bahan magnetik, memodifikasi desain, dan menganalisa hubungan fluks magnet dan gaya. Aplikasi ini juga dapat menghasilkan pemodelan 3D dan pemodelan 2D, namun untuk pemodelan 3D akan memakan waktu sangat lama pada saat solving berjalan karena grafik untuk 3D lebih besar dari 2D. Aplikasi ini juga dapat digunakan untuk menghitung jumlah gaya dan torsi (Edwards, J. . D., 2004).

II. METODELOGI PENELITIAN


Adapun tahapan proses simulasi untuk mendapatkan nilai tegangan dan daya keluaran yang optimal pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3: Diagram alir penelitian

Metode yang digunakan untuk mendapatkan hasil tegangan dan daya keluaran yang optimal pada perancangan generator magnet permanen dengan variasi jumlah slot dan pole adalah seperti pada Gambar 3.


Proses yang pertama adalah penentuan spesifikasi generator. Dalam tahapan ini ada beberapa langkah yang akan dilakukan seperti penentuan ukuran generator, menentukan ukuran *mesh* yang akan digunakan untuk setiap komponen, menentukan jenis material setiap komponen sehingga generator bisa berjalan ketika disimulasikan.

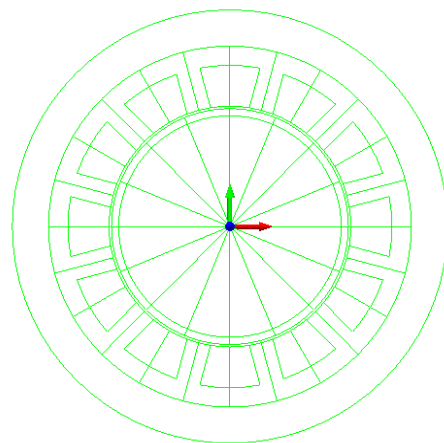
Kemudian proses selanjutnya adalah pemodelan generator. Pemodelan merupakan langkah awal dalam perancangan generator magnet permanen, pada tahap ini dilakukan pembuatan sketsa dari generator, yang berisi gambaran 2D pada *software MagNet*. Penggambaran model pada *software MagNet* dapat menggunakan *toolbar*  atau pada menu “Draw”. Sehingga pemodelan yang dibuat menjadi sketsa garis. *Toolbar* tersebut dapat digunakan

untuk menggambar garis, lingkaran dan busur. Pada pemodelan sketsa garis ini berisi pembuatan komponen dari generator yaitu Stator, Kumputan, Celah udara Rotor, dan Magnet Permanen. Pada pemodelan ini, diujikan 5 variasi slot dan pole dengan jumlah slot yang divariasikan yaitu 8, 10, 12, 16, 18 dan jumlah pole yang divariasikan yaitu 4, 8, 12, 16, 18 untuk mendapatkan nilai tegangan dan daya sebagai pertimbangan analisa.

Analisa data dan kesimpulan merupakan proses akhir dari penelitian ini. Pada tahap ini data yang telah dihasilkan oleh beberapa variabel objek berupa perancangan generator Permanent Magnet yang telah disimulasikan dengan variasi slot dan variasi pole, akan dicatat dan diolah dengan bantuan *Microsoft Excel* yang selanjutnya akan dianalisis dan dilihat pengaruh yang terjadi terhadap tegangan dan daya keluaran dari simulasi dengan variasi slot dan po

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan merupakan proses awal dalam suatu perancangan generator PMG dengan menggunakan *software MagNet*. Permanent Magnet Generator yang dimodelkan sendiri adalah generator yang memiliki 12 slot 8 pole. Penggambaran model pada *software MagNet* dapat menggunakan *toolbar*  atau pada menu “Draw”. *Toolbar* tersebut dapat digunakan untuk menggambar garis, lingkaran, serta busur. Hasil model garis pada generator 12 slot 8 pole ditunjukkan pada Gambar 4 yang kemudian komponen-komponennya berdasarkan garis yang telah dibuat.





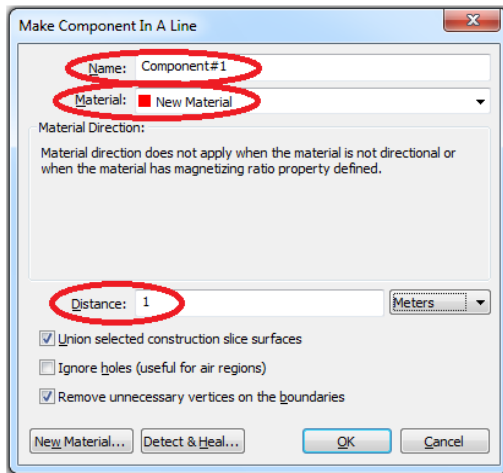
Gambar 4: Model generator dalam garis

Parameter tetap untuk perancangan generator permanen magnet dengan variasi slot dan pole ini seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1: Parameter Awal Generator Permanent Magnet

PARAMETER AWAL GENERATOR PERMANENT MAGNET			
VARIABEL	SIMBOL	NILAI	UNITS
Diameter Luar Stator	Db	200	mm
Diameter Dalam Stator	Dc	121	mm
Panjang Stator	Ls	79	mm
Diameter Lubang Slot	De	180	mm
Diameter Rotor	Dr	115	mm
Diameter Luar Magnet	Di	119	mm
Diameter Dalam Magnet	Da	115	mm
Tebal Magnet	Lm	4	mm
Lebar Celah Udara	lg	3	mm
Kecepatan Putaran	N	1000	rpm

Pembuatan komponen dilakukan dengan menyeleksi bagian komponen dengan menggunakan  (*Select Construction Slice Surfaces*) kemudian klik ikon  untuk membuat komponen. Selanjutnya akan muncul kotak dialog seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5. Pada kotak dialog tersebut diisi nama komponen, jenis material komponen dan ketebalan komponen tersebut. Ketebalan komponen semua sama diisi 40 milimeter.



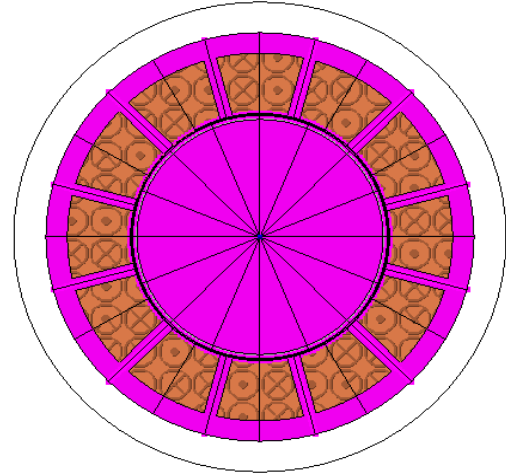
Gambar 5: Kotak dialog pembuatan komponen

Jenis bahan yang digunakan dalam perancangan permanen magnet generator dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2: Material komponen permanen magnet generator

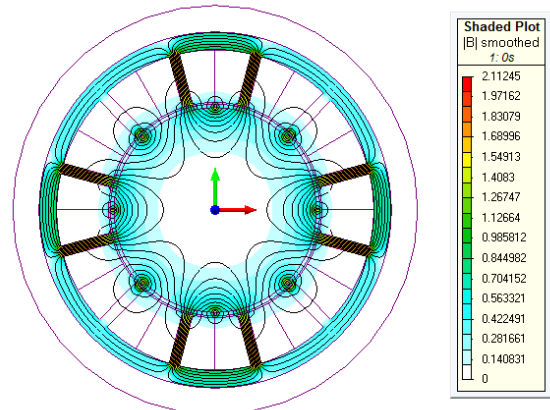
No	Komponen	Material
1	Stator	Carpenter: Silicon Steel
2	Rotor	Carpenter: Silicon Steel
3	Coil	Copper: 5.77e7 Siemens/meter
4	Magnet	Neodymium Iron Boron: 48/11
5	Airbox	AIR

Salah satu contoh hasil perancangan generator dengan menggunakan data-data tersebut adalah seperti gambar berikut.



Gambar 6: Generator magnet permanen

Kemudian untuk mendapatkan hasil perhitungan dari perancangan generator adalah dengan mengklik *solve* pada menu bar, setelah itu mengklik *Transient 2D with Motion* untuk mensimulasikan hasil rancangan, yang nantinya hasil data simulasi yang didapatkan akan dimasukkan ke Microsoft Excel untuk diolah lebih lanjut.



Gambar 7: Distribusi kerapatan medan magnet

Gambar 7 merupakan hasil perhitungan medan magnet (B) dalam bentuk visualisasi gambar. Gradasi warna yang ditunjukkan pada gambar menunjukkan nilai medan magnet di titik tersebut, medan magnet terbesar ditandai dengan warna merah sampai medan magnet terkecil ditandai warna putih. Warna lainnya memiliki nilai medan magnet diantara rentang tersebut, yang detailnya dapat dilihat pada indeks di samping gambar. Sedangkan garis-garis menunjukkan lintasan fluks magnet, terlihat bahwa fluks magnet

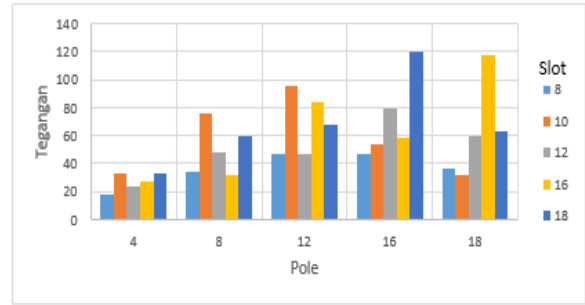
mengalir dari kutub utara menuju ke kutub selatan yang lintasannya melalui stator. Fluks magnet yang mengalir di stator inilah yang akan menimbulkan arus listrik pada belitan yang ada di stator.

Nilai keluaran dari proses perhitung kemudian dimasukkan Microsoft Exel agar dapat diolah menjadi data tegangan dan daya. Pada Tabel 3 merupakan data tegangan rata-rata dan daya rata-rata hasil simulasi dari perancangan generator yang dilakukan dengan variasi slot dan pole tanpa pembebanan.

Tabel 3: Data keseluruhan variasi slot dan pole tanpa pembebanan

Percobaan	Variasi		Data Output Tanpa Beban	
	Slot	Pole	Tegangan (V)	Daya (P)
1	8	4	17.518	11.448
2		8	33.817	20.250
3		12	46.839	9.371
4		16	46.398	9.105
5		18	36.139	3.521
6	10	4	33.220	6.862
7		8	75.472	6.207
8		12	95.682	5.013
9		16	53.551	3.082
10	18	31.608	3.580	
11	12	4	23.977	13.299
12		8	48.3434	5.062
13		12	46.922	37.268
14		16	79.665	7.777
15		18	59.562	5.090
16	16	4	27.571	8.511
17		8	31.585	25.647
18		12	84.213	7.217
19		16	58.317	48.724
20	18	117.678	4.123	
21	18	4	32.458	5.728
22		8	59.680	6.845
23		12	67.208	10.657
24		16	120.274	4.959
25		18	63.383	54.132

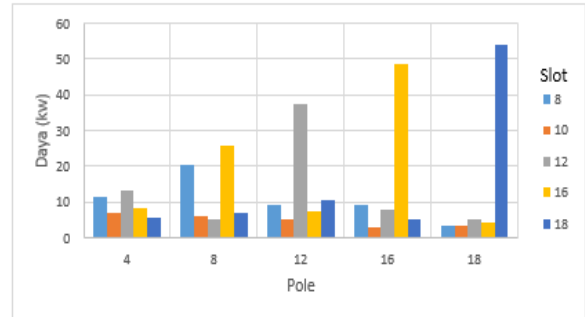
Dari data pada Tabel 3 didapatkan sebuah grafik tegangan rata-rata dari keseluruhan percobaan seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8: Grafik tegangan keluaran tanpa pembebanan

Pada grafik diatas terlihat bahwa *output* tegangan rata-rata dari variasi slot dan pole tanpa pembebanan dengan parameter awal desain generator yang sama dan kecepatan putar yang sama, maka didapatkan tegangan puncak pada jumlah slot dan pole yang berselisih 2. Sedangkan rata-rata tegangan terendah didapatkan dari jumlah slot paling banyak dengan jumlah pole yang sedikit.

Kemudian dari data pada Tabel 3 juga didapatkan sebuah grafik daya rata-rata secara keseluruhan dari variasi jumlah slot dan pole tanpa pembebanan seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9: Grafik daya keluaran tanpa pembebanan

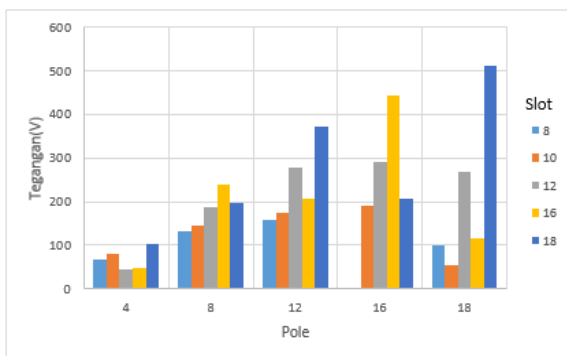
Daya keluaran dari variasi jumlah slot dan pole tanpa pembebanan dengan parameter awal desain generator yang sama dan kecepatan putar yang sama, maka pada jumlah slot dan pole yang sama akan memberikan keluaran daya yang besar. Sedangkan rata-rata untuk daya keluaran terkecil didapatkan dari jumlah pole paling banyak dengan jumlah slot yang sedikit.

Pada Tabel 4 merupakan data tegangan rata-rata dan daya rata-rata hasil simulasi dari perancangan generator yang dilakukan variasi slot dan pole dengan pembebanan sebesar 50 ohm.

Tabel 4: Data keseluruhan variasi slot dan pole tanpa pembebanan

No	Variasi		Tegangan(V)	Daya		Efisiensi
	slot	pole		Pin	Pout	
1	8	4	66.504	1351.543	226.445	17%
2		8	133.738	2622.51	875.991	33%
3		12	159.588	754.278	408.251	54%
4		16	4.057	3510.018	334.074	10%
5		18	101.113	645.315	208.926	32%
6	10	4	79.487	897.398	136.909	15%
7		8	144.075	1221.929	421.294	34%
8		12	173.778	1398.793	610.755	44%
9		16	191.295	1325.361	739.922	56%
10	18	53.435	90.843	83.345	92%	
11	12	4	46.033	1440.582	109.885	8%
12		8	187.381	306.195	273.581	89%
13		12	279.639	5237.001	2736.05	52%
14		16	292.171	2505.223	1732.702	69%
15		18	267.074	2402.164	1525.96	64%
16	16	4	49.037	1026.393	85.536	8%
17		8	240.153	3641.679	1668.111	46%
18		12	208.114	2101.382	894.421	43%
19		16	444.036	8115.917	5560.878	69%
20		18	115.230	989.544	267.908	27%
21	18	4	101.689	870.296	217.840	25%
22		8	196.786	1957.283	782.391	40%
23		12	372.424	4139.227	2845.348	69%
24		16	206.325	1918.115	872.371	45%
25		18	510.672	9473.388	6987.951	74%

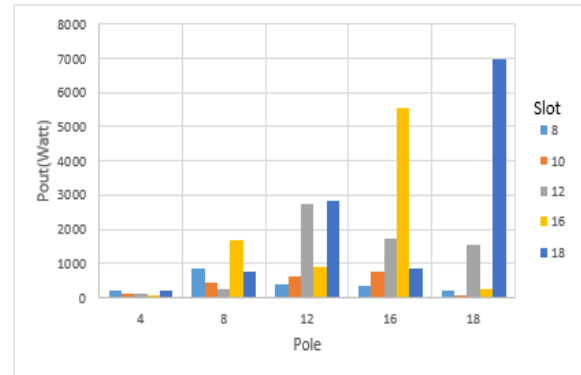
Dari data pada Tabel 4 didapatkan sebuah grafik tegangan dengan pembebanan sebesar 50 ohm. Grafik tegangan rata-rata dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10: Grafik tegangan keluaran dengan pembebanan

Kemudian dari Tabel 4 juga didapatkan sebuah grafik daya rata-rata dari variasi slot dan pole dengan

pembebanan sebesar 50 ohm. Grafik daya rata-rata (P_{out}) dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 10: Grafik daya keluaran dengan pembebanan

IV. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perancangan generator dengan variasi jumlah slot dan pole menggunakan perangkat lunak MagNet untuk mengetahui *output* tegangan dan daya yang optimal, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain generator dengan variasi jumlah slot dan pole tanpa pembebanan yang menghasilkan daya yang paling tinggi yaitu 18 slot 18 pole dengan daya sebesar 54.132 Kw. Sedangkan untuk desain generator dengan variasi jumlah slot dan pole dengan pembebanan sebesar 50 ohm yang menghasilkan daya *output* paling tinggi juga pada 18 slot dan 18 pole dengan daya sebesar 6987.951 Watt.
2. Desain generator dengan variasi jumlah slot dan pole tanpa pembebanan yang menghasilkan tegangan *output* yang paling tinggi yaitu 18 slot 16 pole dengan daya sebesar 120.274 V. Sedangkan untuk desain generator dengan variasi jumlah slot dan pole dengan pembebanan sebesar 50 ohm yang menghasilkan tegangan paling tinggi yaitu pada 18 slot dan 18 pole dengan tegangan sebesar 510.672 V.
3. Desain generator dengan variasi jumlah slot dan pole yang memiliki efisiensi daya yang paling tinggi yaitu pada 10 slot 18 pole dengan persentase daya efisiensi sebesar 92%.
4. Sedangkan generator dengan variasi jumlah slot dan pole yang memiliki efisiensi daya yang paling rendah yaitu pada 12 slot 4 pole dan 16 slot 4 pole dengan persentase daya efisiensi sebesar 8%.

Untuk penelitian selanjutnya, perlu diperhatikan bagian-bagian yang harus memiliki perhitungan yang cermat dalam hal ini adalah bagian yang mengalirkan energi. Pada simulasi lebih lanjut diperlukan penambahan variasi RPM, variasi *umbrella*, variasi pembebanan, variasi geometri, variasi jumlah lilitan dan variasi variabel-variabel lainnya sebagai tolak ukur pendesainan model generator agar mendapatkan hasil tegangan dan daya yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- A. EDMINISTER, J. (2005), *Elektromagnetika*, Ciracas: Erlangga.
- Alam, M.F., Sukmadi, T. dan Handoko, S. (2013), *Simulasi Pengaruh Ketebalan Yoke Rotor, Jarak Antar Kutub Dan Jenis Material Magnet Permanen Terhadap Rapat Fluks Pada Generator Sinkron Fluks Aksial*, *Transient*, 2(3).
- Anam, C., Nurhadi, N. dan Irfan, M. (2017), *Perancangan Generator 100 Watt Menggunakan Software Magnetik Infolytica*, *Kinetik*, 2(1), 27–36.
- Arifianto, I. dan Hs, M.R. (2018), *Analisa Efisiensi dan Rancang Generator Permanent Magnet 12 Slot 8 Pole Menggunakan Software Magnet 7.5*, 43–48.
- Asyari, H., Handaga, B., Basith, A., Himawan, M.A., Elektro, T., Teknik, F. dan Surakarta, U.M. (2016), *Pengaruh perbandingan konstruksi stator terhadap tegangan keluaran generator linier*, 16(1).
- Azka, M. (2013), *Analisis Perancangan Dan Simulasi Generator Sinkron Magnet Permanen Dengan Rotor Berlubang*, Universitas Indonesia, Depok.
- Fizari, A.J. (2018), *Analisa Pengaruh Variasi Umbrella Terhadap Tegangan Output pada Generator BLDC 12 Slot 8 Pole*.
- Hadisiswoyo, M.R., Arifianto, I., Rahmatia, S. dan Elson, R. (2018), *Variasi Geometri Pemodelan PM Generator Sinkron 12 Slot 8 Pole 1/4 Model*, 48–52.
- J. R Hendershot Jr and TJE Miller, 194, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motor*, Ohio, Magna Physics Publishing and Claredon Press.
- Noprizal, L., Syukri, M. dan Syahrizal, S. (2017), *Perancangan Prototype Generator Magnet Permanen 1 Fasa Jenis Fluks Aksial pada Putaran Rendah*, 1(1), 40–44.
- Pane, E. (2009), *Studi Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Permanent Magnet Generator (Aplikasi Pada Generator Sinkron Di Pltd Pt. Manunggal Wiratama)*.
- Siregar, V.R.H. (2015), *Reduksi Torsi Cogging Pada Motor Brushless Dc 12 Slot 8 Kutub Tipe Surface Mounted Magnet Umbrellaless Stator*, Universitas Indonesia, Depok.
- Sofian, E. (2011), *Studi Bentuk Rotor Magnet Permanen Pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator*, Universitas Indonesia, Depok.
- Suhada, M.O. dan Yasri, I. (2018), *Aspek Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah*, 5, 1–7.
- Umami, M.I. (2013), *Desain Generator Sinkron Magnet Permanen Jenis Neodymium Iron Boron Untuk PLTB Daya 500 Watt Menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica*, Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat.
- Widyaningsih, W.P., Studi, P., Konversi, T., Mesin, J.T. dan Semarang, P.N. (2013), *Perubahan Jumlah Alur Kumparan Stator Dapat Meningkatkan Kapasitas Daya Keluaran Generator*, 9(1), 24–28.