

Analisis Desain Permanent Magnet Synchronous Generator 12 Slot 8 Pole dengan Membandingkan 3 Material Stator dan Rotor Menggunakan Software Magnet Infolytica

Didin¹, Mustarum Musaruddin^{2*}, dan Wa Ode Siti Nur Alam³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

*Corresponding Author: Mustarum Musaruddin (mustarum@uho.ac.id)

Abstract — This study analyses the design of a 12 slot 8 pole permanent magnet synchronous generator by comparing 3 stator and rotor materials. This research uses Finite Element Method (FEM) based software, Magnet Infolytica. FEM is a method used to solve problems about complex electromagnetics, so that it can be solved by analytical models, especially those related to non-linear properties of materials. In this study, 3 types of materials were used, namely Carpenter: silicon steel, Megaperm 40L and Vocaflux 48. The three generators with different stator and rotor materials were simulated using Magnet Infolytica 7.5 software. No-load simulation output results for 3 types of materials namely Carpenter: silicon steel of 279 VDC, Megaperm 40L of 265 VDC and Vocaflux48 of 261 VDC. For load testing, a load variation of 100Ω, 50Ω, and 25Ω is given. The results obtained that the material that produces the best output is Carpenter: silicon steel material which produces output at 100Ω load of 2.94 A, 294.20 VDC, -8.64 Nm and efficiency of 88%. At 50Ω load of 5.28 A, 264.30 VDC, -14.59 Nm, and efficiency of 86%. While at a load of 25Ω, the output is obtained at 8.74 A, 218.60 VDC, -21.16 Nm, and an efficiency of 81%.

Keywords — Finite Element Method, Permanent Magnet Synchronous Generator, Magnet Infolytica Software

Abstrak — Penelitian ini menganalisis desain permanent magnet synchronous generator 12 slot 8 pole dengan membandingkan 3 material stator dan rotor. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak berbasis Finite Element Method (FEM) yaitu Magnet Infolytica. FEM adalah metode yang digunakan untuk memecahkan masalah tentang elektromagnetik yang kompleks, sehingga dapat diselesaikan dengan model analisis terutama yang terkait dengan sifat non linier bahan. Dalam penelitian ini digunakan 3 jenis material yaitu Carpenter: silicon steel, Megaperm 40L dan Vocaflux 48. Ketiga generator beda material stator dan rotor disimulasikan menggunakan software Magnet Infolytica 7.5. Hasil keluaran simulasi tanpa beban untuk 3 jenis material yaitu Carpenter:silicon steel sebesar 279 VDC, Megaperm 40L sebesar 265 VDC dan Vocaflux48 sebesar 261 VDC. Untuk pengujian berbeban diberi variasi beban 100Ω, 50Ω, dan 25Ω. Hasil yang diperoleh bahwa material yang menghasilkan keluaran terbaik yaitu material Carpenter:silicon steel yang menghasilkan output di beban 100Ω sebesar 2,94 A, 294,20 VDC, -8,64 Nm dan efisiensi sebesar 88%. Pada beban 50Ω sebesar 5,28 A, 264,30 VDC, -14,59 Nm, dan efisiensi sebesar 86%. Sedangkan pada beban 25Ω diperoleh output sebesar 8,74 A, 218,60 VDC, -21,16 Nm, dan efisiensi sebesar 81%.

Kata kunci — Finite Element Method, Permanent Magnet Synchronous Generator, Software Magnet Infolytica

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan yang penting untuk membantu kehidupan masyarakat dalam menjalani kesehariannya. Di era revolusi industry 4.0 ini umumnya pekerjaan yang dilakukan tidak akan cepat terselesaikan tanpa adanya listrik. Apa lagi untuk didaerah perkotaan yang konsumsi listriknya lebih tinggi, kebutuhan akan listrik di era 4.0 ini menjadi kebutuhan yang tidak bisa terpisahkan dari pekerjaan dan keseharian [1].

Generator adalah alat yang digunakan untuk mengkonversi energi gerak menjadi energi listrik. dimana energi gerak yang mampu memutar rotor pada generator dan terjadinya fenomena medan elektromagnet yang mampu menghasilkan listrik dan disalurkan menggunakan konduktor untuk sampai ke rumah untuk dipergunakan sehari-hari [2].

Dari tahun ke tahun generator selalu berkembang dari segi material, ukuran, desain, bentuk yang akhirnya mempengaruhi efisiensi keluaran generator tersebut. Berkembangnya generator tersebut tidak luput dari beberapa perangkat lunak komputer yang mampu mendesain mesin-mesin listrik. Salah satunya perangkat lunak Magnet Infolytica yaitu perangkat lunak berbasis Finite Element Method (FEM). FEM adalah metode yang digunakan untuk memecahkan masalah tentang medan elektromagnetik yang kompleks, sehingga mampu diselesaikan dengan model analisis terutama pada bagian yang terkait dengan sifat non linier bahan [3].

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis desain 3 generator dengan material stator dan rotor yang berbeda serta disimulasikan saat diberi variasi beban dan tanpa beban. Software magnet infolytica digunakan dalam penelitian untuk proses desain, simulasi dan analisis. Dengan penelitian ini dapat ditentukan dari 3 material yang digunakan, mana yang lebih baik dalam menghasilkan keluaran generator. Penelitian ini meliputi pendesainan generator 12 slot 8 pole serta pemasukan parameter apa yang harus dimasukkan dalam input desain dan perubahan material. Berdasarkan daya keluaran dari ke 3 generator, akan menghasilkan arus, tegangan, torsi, Pin, Pout dan efisiensi.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Prinsip Kerja Generator Sinkron Magnet Permanen

Prinsip pengoperasian generator sinkron magnet permanen dengan generator sinkron tidak jauh berbeda. Medan magnet tetap dihasilkan ketika magnet permanen digunakan, jadi tidak diperlukan arus DC untuk menghasilkan medan magnet. Fluks magnet, disisi lain, diperoleh dari magnet permanen yang telah diperlakukan secara khusus untuk mengarahkan garis gaya magnet secara radial atau aksial dari kutub magnet. Generator ini memiliki struktur umum yang sama, dengan kumparan stator sebagai letak terjadinya induksi, sebuah rotor dengan permanen magnet sebagai inti medan magnet, dan celah udara sebagai tempat aliran udara. Dari rotor ke stator. Rotasi penggerak utama yang terhubung ke poros rotor pada saat rotor berputar maka magnet permanen juga ikut berputar, dan fluks magnet pada inti kutub rotor disirkulasikan di sekitar rotor oleh magnet permanen sebagai pembangkit medan magnet. Fluks magnet dari kutub rotor melewati celah udara dan mencapai permukaan stator bersama dengan lilitan inti stator.

B. Perhitungan manual desain generator permanent magnet 12 slot 8 pole material

Untuk perhitungan manual desain generator permanent magnet 12 slot 8 pole menggunakan persamaan dan perkalian sebagai berikut ini.

Luas Area Magnet Per Kutub (S_m)

$$S_m = \pi \cdot \frac{D_i + D_a}{2} \cdot \frac{1}{P} \cdot L_h \quad (m^2) \quad (1)$$

luas ekuivalen gap (S_g) :

$$S_g = \pi \cdot \frac{D_i + D_c}{2} \cdot \frac{N_c}{N_s} \cdot L_a \quad (m^2) \quad (2)$$

koefisien permeance (P_c) :

$$P_c = \frac{L_m \times S_g}{\sigma_g \times S_m} \times \frac{K_f}{K_r} \quad (3)$$

kemiringan kurva demagnetisasi (μ_r)

$$\mu_r = \frac{B_r}{H_{cj}} \times \frac{10^7}{4 \times \pi} \quad (4)$$

Titik pengoperasian generator (B_d)

$$B_d = \frac{P_c \times B_r}{P_c + \mu_r} (T) \quad (5)$$

Kerapatan fluks celah udara magnet: (B_g)

$$B_g = \frac{B_d \times S_m}{K_f \times S_g} (T) \quad (6)$$

rata-rata Kerapatan fluks celah udara magnet (B_g')

$$B_g' = \frac{2}{\pi} \times B_g (T) \quad (7)$$

fluks efektif yang melewati celah udara ke koil, (Φ_g)

$$\Phi_g = B_g \times S_g (WB) \quad (8)$$

Rata-rata fluks efektif yang melewati celah udara ke koil, (Φ_g')

$$\Phi_g' = \frac{2}{\pi} \times \Phi_g (WB) \quad (9)$$

Menghitung jarak slot (coil span)

$$Coil \ span = \frac{N_s}{P} \quad (10)$$

kecepatan putar dan frekuensi generator

$$f = \frac{n \times p}{120} \quad (11)$$

Rumus perhitungan Tegangan 1 Line Generator

$$q = \frac{N_s}{P \times coil \ span} \quad (12)$$

$$K_w = \frac{1}{q} \times \frac{\sin(\pi/6)}{\sin(\pi/6 \times q)} \quad (13)$$

$$E_{ph} = 4,44 \times f \times lilitan \times K_w \times K_s \times \Phi' \times \frac{N_s}{coil \ span} \quad (14)$$

$$Tegangan \ 1 \ line = E_{ph} \times \sqrt{3} \ volt \ Dc \quad (15)$$

Rumus waktu putaran step mekanikal dan waktu perstep mekanikal

$$n = \frac{(rpm) \times 360 \ deg}{60 \ second} = deg/s \quad (16)$$

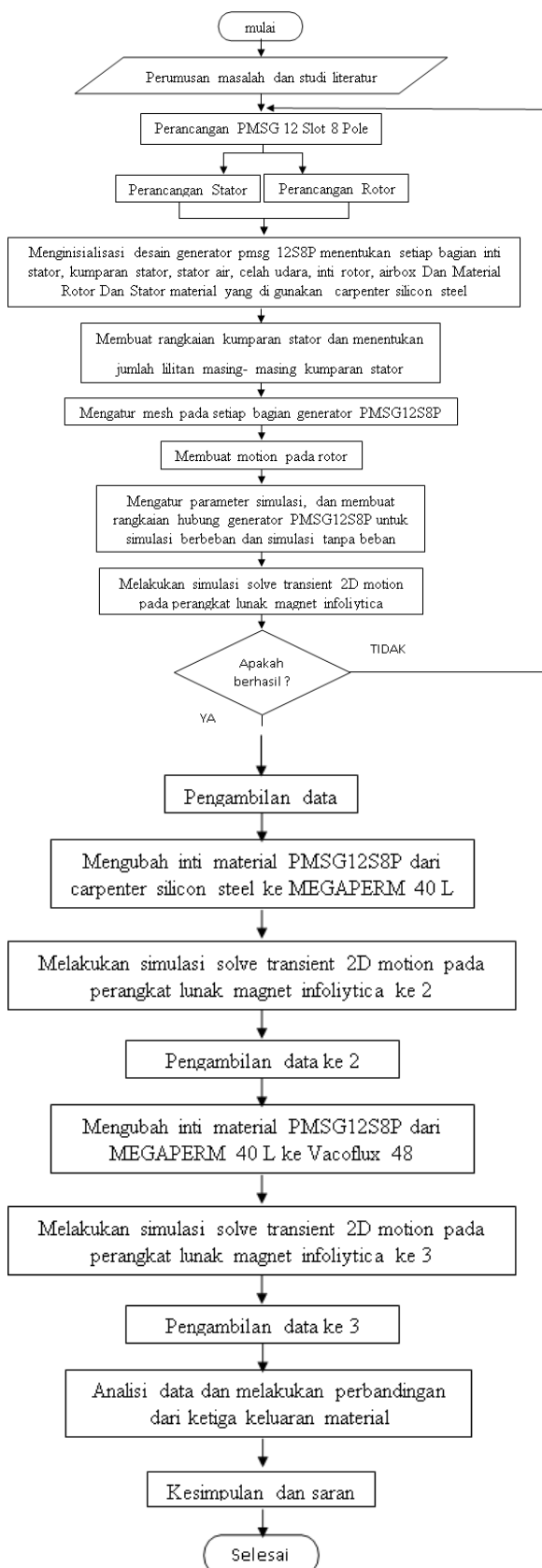
$$satu \ step \ putaran \ mekanikal = \frac{per \ step \ putaran \ (deg)}{n \ deg/s} \ second \quad (17)$$

Efisiensi

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (18)$$

III. METODE PENELITIAN

Untuk mendesain Permanent Magnet Synchronous Generator 12 slot 8 pole diperlukan tahapan-tahapan seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Metode Penelitian

Membuat dimensi ukuran dan spesifikasi dari 3 generator (PMSG) beda material stator dan rotor yang akan digunakan sebagai penelitian. Desain generator (PMSG) 12 slot 8 pole menggunakan parameter seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Bentuk Ukuran

NO	DIMENSI	SIMBOL	UNIT	NILAI
1.	Jumlah slot	N_s	-	12
2.	Jumlah pole	N_p	-	8
3.	Diameter dalam magnet	D_a	Milimeter	92
4.	Diameter luar stator	D_b	Milimeter	150
5.	Diameter dalam stator	D_c	Milimeter	100
6.	Diameter luar rotor	D_d	Milimeter	98
7.	Diameter dalam lubang slot	D_e	Milimeter	134
8.	Diameter luar magnet	D_i	Milimeter	98
9.	Tebal inti stator dan rotor	L_a	Milimeter	40
10.	Panjang magnet	L_h	Milimeter	20
11.	Tebal magnet	L_m	Milimeter	3
12.	Tinggi umbrella	L_t	Milimeter	17
13.	Jarak antar slot	L_{ig}	Milimeter	16
14.	Lebar teeth	L_w	Milimeter	10
15.	Celah udara	σ^u	Milimeter	1
16.	Diameter rotor	D_r	Milimeter	92

Tabel 2. Spesifikasi Generator untuk Data 1

NO	NAMA	BAHAN MATERIAL
1.	Stator	Carpenter: Silicon steel
2.	Rotor	Carpenter: Silicon steel
3.	Kumparan	Copper: 5.77e7 Siemens/meter
4.	Magnet	NdFeB: Neodymium Iron Boron
5.	Stator Air Gap Dan Rotor Air Gap	AIR
6.	Stator Air Box	AIR
7.	Rotor Air Box	AIR

Tabel 3. Spesifikasi Generator untuk Data 2

NO	NAMA	BAHAN MATERIAL
1.	Stator	MEGAPERM 40 L
2.	Rotor	MEGAPERM 40 L
3.	Kumparan	Copper: 5.77e7 Siemens/meter
4.	Magnet	NdFeB: Neodymium Iron Boron
5.	Stator Air Gap Dan Rotor Air Gap	AIR
6.	Stator Air Box	AIR
7.	Rotor Air Box	AIR

Tabel 4. Spesifikasi Generator untuk Data 3

NO	NAMA	BAHAN MATERIAL
1.	Stator	Vacoflux 48
2.	Rotor	Vacoflux 48
3.	Kumparan	Copper: 5.77e7 Siemens/meter
4.	Magnet	NdFeB: Neodymium Iron Boron
5.	Stator Air Gap Dan Rotor Air Gap	AIR
6.	Stator Air Box	AIR
7.	Rotor Air Box	AIR

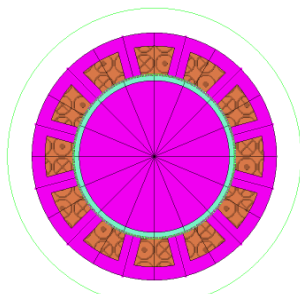
Pengaturan mesh ini untuk membagi-bagi tiap komponen atau biasa disebut (finite element method) pada generator, menjadi bagian-bagian kecil yang di sebut (cross section) yang nantinya akan dianalisis menggunakan solve transient 2D with motion. Untuk mendapatkan hasil yang lebih rinci maka pengaturan mesh harus di perkecil dan untuk penelitian ini digunakan maximum element mesh [4]. Tabel 5 memperlihatkan tentang pengaturan Mesh yang digunakan.

Tabel 5. Pengaturan Mesh

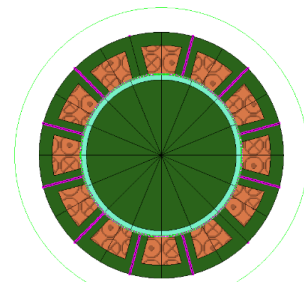
NO	NAMA	NILAI	SATUAN
1.	STATOR	1	milimeter
2.	ROTOR	1	milimeter
3.	KUMPARAN	1	milimeter
4.	MAGNET	1	milimeter
5.	AIR GAP STATOR	0,5	milimeter
6.	AIR GAP ROTOR	0,5	milimeter
7.	AIR BOX STATOR	Default	milimeter
8.	AIR BOX ROTOR	Default	milimeter

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

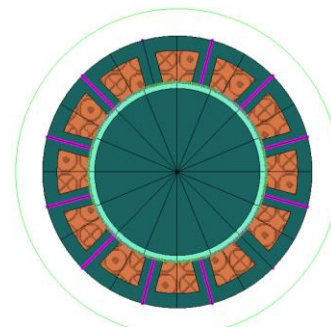
Hasil desain Generator permanent magnet 12 slot 8 pole dengan 3 material yang berbeda menggunakan perangkat lunak Magnet Infolytica 7.5 dapat dilihat pada Gambar 2 (Carpenter:Silicon steel), Gambar 3 (Megaperm 40L) dan Gambar 3 (Vocaflux 48).



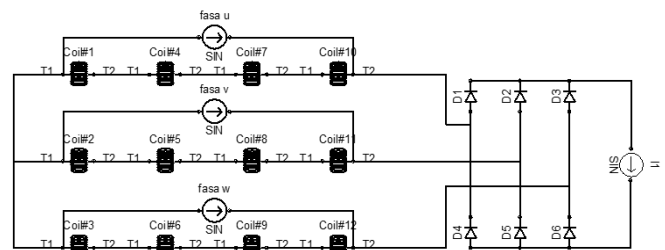
Gambar 2. Carpenter:Silicon steel



Gambar 3 Megaperm 40L



Gambar 4. Vocaflux 48



Gambar 5. Rangkaian tanpa beban

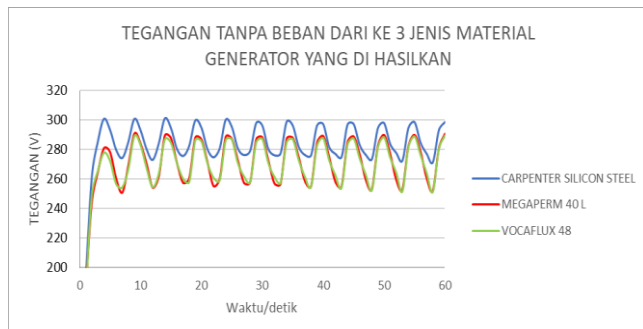
Gambar 5 memperlihatkan rangkaian tanpa beban yang di hubungkan secara hubung Y dan disetiap 1 fasa menghubungkan 4 coil. Pada fasa 1 menghubungkan coil 1, 4, 7, dan 10. Untuk fasa 2 menghubungkan coil 2, 5, 8 dan 11. Sedangkan fasa 3 menghubungkan coil 3, 6, 9, dan 12 lalu disearahkan menggunakan penyearah elektronik full wafe diode rectifier yang menggunakan 6 dioda.

Tabel 6. Error Hasil Simulasi dan Perhitungan

No	Material stator dan rotor	Metode	Hasil Volt Dc	error
1.	Carpenter:silicon steel	simulasi	279,7489677	0 %
		perhitungan	279,7489677	
2.	MEGAPERM 40L	simulasi	265,9459682	0 %
		perhitungan	265,9459682	
3.	VOCAFLUX 48	simulasi	261,7911233	0 %
		perhitungan	261,7911233	

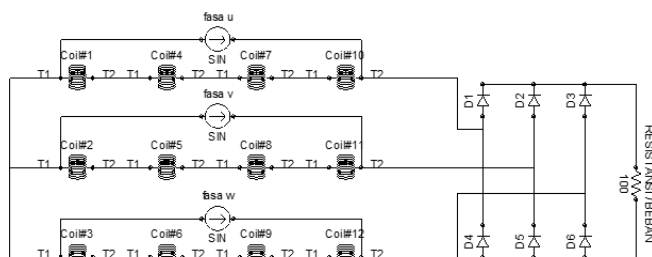
Tabel 6 menunjukan hasil perhitungan secara manual untuk mendapatkan tegangan yang akan menjadi perbandingan dari hasil simulasi yang menggunakan perangkat lunak magnet infolytica dimana desainya disimulasikan secara

solve transient 2D motion atau 2 dimensi, yang akan menghasilkan tegangan efektif secara simulasi untuk ke 3 jenis generator 12 slot dan 8 pole beda material. Dari hasil pengamatan terhadap error dari ke 3 material didapatkan nilai error sebesar 0%.

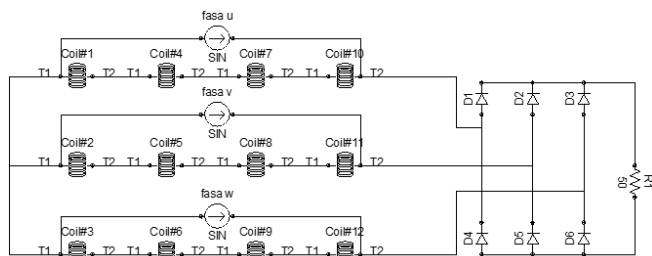


Gambar 6. Grafik tegangan tanpa beban

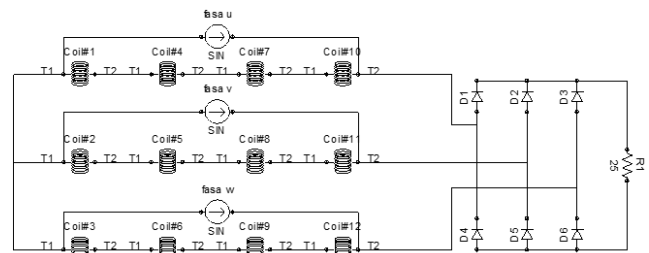
Gambar 6 ini memperlihatkan grafik keluaran dari generator permanent magnet 12 slot dan 8 pole yang tidak berbeban dari ke 3 jenis generator beda material. Pada grafik tersebut dapat dilihat garis biru merupakan hasil dari keluaran material generator Carpenter silicon steel yang gelombang tegangan maksimumnya sampai di 300 Vdc, garis merah merupakan material Megaperm 40 L dan material Vocaflex 48 berwarna hijau dari kedua material tegangan maksimumnya sampai di 290 VDC, dan dapat di lihat bahwa di grafik. Dari pengujian ini diperoleh bahwa Material Carpenter silicon steel merupakan material yang paling baik dalam menghasilkan tegangan volt Dc yang dapat mencapai 300 Vdc tegangan maximum.



Gambar 7. Rangkaian beban 100 ohm



Gambar 8. Rangkaian beban 50 ohm



Gambar 9. Rangkaian beban 25 ohm

Gambar 7, 8 dan 9 merupakan gambar dari rangkaian generator keluaran 3 fasa yang disearahkan menggunakan penyearah elektronik atau di sebut full wafe diode rectifier yang pada penelitian ini menggunakan 6 dioda yang diberi variasi beban (ohm) . Gambar 7 adalah gambar rangkaian di beri beban 100 ohm, Gambar 8 adalah rangkaian diberi beban 50 ohm dan Gambar 9 adalah rangkaian diberi beban 25 ohm.

Tabel 7. Hasil Simulasi

hasil	Carpenter:silicon steel		
	100 ohm	50 ohm	25 ohm
Current (A)	2,94	5,28	8,74
Voltage (V)	294,20	264,30	218,60
Torque (Nm)	-8,64	-14,59	-21,16
Pin	815,18	1374,73	1994,30
Pout	721,04	1187,49	1624,16
Efisiensi (%)	88,45	86,37	81,43
hasil	Megaperm 40 L		
	100 ohm	50 ohm	25 ohm
Current (A)	2,76	4,91	8,29
Voltage (V)	276,11	245,74	207,39
Torque (Nm)	-10,77	-15,72	-21,38
Pin	1015,55	1482,03	2015,05
Pout	651,99	1047,03	1460,57
Efisiensi (%)	64,20	70,64	72,48
hasil	Vocaflex48		
	100 ohm	50 ohm	25 ohm
Current (A)	2,75	4,96	8,38
Voltage (V)	275,93	248,03	209,71
Torque (Nm)	-12,51	-16,02	-21,58
Pin	1179,94	1510,58	2034,27
Pout	651,48	1047,46	1457,17
Efisiensi (%)	55,21	69,34	71,63

Tabel 7 memperlihatkan hasil simulasi dari 3 desain generator yang menggunakan magnet permanent serta diberi variasi beban sebesar 100 ohm, 50 ohm dan 25 ohm. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa keluaran yang tertinggi di hasilkan oleh generator dengan material Carpenter silicon steel dibandingkan dengan 2 material lainnya yaitu Megaperm 40L dan Vocaflex 48. Dimana pada material Carpenter silicon steel, nilai arus, tegangan, Pin dan Pout lebih baik dari 2 material lainnya serta torsi yang lebih rendah dari ke 2 material lainnya dan memiliki efisiensi yang paling baik sedangkan yang terendah di dihasilkan oleh material Vocaflex 48.

V. KESIMPULAN

Hasil perhitungan manual dari desain permanent magnet synchronous generator 12 slot 8 pole mendapatkan nilai keluaran tegangan yang sama dari hasil simulasi. Hasil simulasi dari ke 3 generator beda material stator dan rotor menggunakan software magnet infolytica 7.5 dari desain permanent magnet synchronous generator 12 slot 8 pole tanpa beban, diperoleh bahwa material yang menghasilkan keluaran terbaik yaitu Carpenter:silicon steel yang menghasilkan nilai keluaran 279,75 Volt Dc. Adapun hasil pengujian saat diberi beban 100 ohm, 50 ohm, dan 25 ohm, material yang menghasilkan keluaran terbaik yaitu Carpenter:silicon steel, dimana material ini dapat menghasilkan output di beban 100Ω sebesar 2,94 A, 294,20 VDC, -8,64 Nm dan efisiensi sebesar 88%. Pada beban 50Ω sebesar 5,28 A, 264,30 VDC, -14,59 Nm, dan efisiensi sebesar 86%. Sedangkan pada beban 25Ω diperoleh output sebesar 8,74 A, 218,60 VDC, -21,16 Nm, dan efisiensi sebesar 81%.

DAFTAR ACUAN

- [1] Prasetyo, Y., & Umar, S. T. (2019). Analisis Perbandingan Bahan Material Magnet Dalam Pemodelan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) 12 Slot 8 Kutub Dengan Menggunakan Finite Elemen Method (FEM) Software.
- [2] Anastasya, M. D., Setiawan, A., & Aminudin, A. (2020). Simulasi Generator Sinkron Magnet Permanen 36 Slot 12 Pole menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica. In Seminar Nasional Fisika (Vol. 1, No. 1, pp. 197-204).
- [3] Tsani, H. L. (2021). Analisis Perbandingan Material Rotor Core dalam Pemodelan PMSG 12 Slot 8 Kutub.
- [4] Umami, M. I. (2018). Desain Generator Sinkron Magnet Permanen Jenis Neodymium Iron Boron Untuk PLTB Daya 500 Watt Menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica.
- [5] Datasheet, MEGAPERM 40L, VAC ALLOYS FOR MOTOR AND GENERATOR APPLICATIONS, https://vacuumschmelze.com/03_Documents/Brochures/Alloys_for_Motor_and_Generator_Applications.pdf
- [6] Datasheet, Neodymium Iron Boron Datasheet, Eclipse Magnetics Ltd, England, www.eclipsemagnetics.com