

DOI <http://dx.doi.org/10.36722/sst.v8i3.1705>

Analisis Pengaruh Slot Terhadap Efisiensi Generator *Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)* 12 Slot 16 Pole dan 24 Slot 16 Pole Menggunakan FEM (*Finite Element Method*)

Rizki Andika^{1*}, Zulfatri Aini¹¹Program Studi Teknik Elektro, Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau,
Jl. HR. Soebrantas No.KM. 15, Pekanbaru, 28293.Penulis untuk Korespondensi/E-mail: 11850511407@students.uin-suska.ac.id

Abstract - Permanent magnet synchronous generator (PMSG) is a self-excitation generator using a permanent magnet. PMSG has different slot variations so that it has different efficiencies. This study aims to see the effect of slots on the efficiency of PMSG 12 Slot 16 Pole and PMSG 24 Slot 16 Pole. The research method used is to simulate PMSG 12 Slot 16 Pole and PMSG 24 Slot 16 Pole in Finite Element Method (FEM) based software. In the simulation at a rotating speed of 1000 Rpm with a variable in the form of resistance $R = 50 \Omega$ PMSG 12 Slot 16 Pole obtained an output value of 1245.29 Watt with an efficiency of 76% while PMSG 24 Slot 16 Pole obtained an output value of 3919 Watt with an efficiency of 86%.

Abstrak - Permanent magnet synchronous generator (PMSG) adalah generator yang eksitasinya dilakukan sendiri (self-excitation) dengan menggunakan magnet permanen. PMSG memiliki variasi slot yang berbeda-beda sehingga menghasilkan efisiensi yang berbeda pula. Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh slot terhadap efisiensi PMSG 12 Slot 16 Pole dan PMSG 24 Slot 16 Pole. Dengan metode penelitian yang dipakai adalah mensimulasikan PMSG 12 Slot 16 Pole dan PMSG 24 Slot 16 Pole pada software berbasis Finite element Method (FEM). Pada simulasi di kecepatan putar 1000 Rpm dengan variabel berupa tahanan $R = 50 \Omega$ PMSG 12 Slot 16 Pole di dapat nilai output sebesar 1245.29 Watt dengan efisiensi sebesar 76% sedangkan PMSG 24 Slot 16 Pole di dapat nilai output sebesar 3919 Watt dengan efisiensi sebesar 86%.

Keywords - *Permanent Magnet Synchronous generator (PMSG), Slot, Efficiency.*

PENDAHULUAN

Angin adalah salah satu energi terbarukan yang potensinya cukup besar di Indonesia dan belum dimaksimalkan dengan baik. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan salah satu cara pemanfaatan energi, yaitu pemanfaatan energi angin menjadi listrik menggunakan generator sebagai komponen utamanya [1]. Pada PLTB Energi kinetik angin dimanfaatkan untuk memutar kincir angin yang terhubung dengan rotor generator dan jika rotor berputar maka generator akan menghasilkan listrik [2]. Generator adalah komponen utama pembangkit listrik tenaga Bayu yang memanfaatkan torsi dan

putaran rotor menjadi arus listrik dan tegangan. Komponen utama dari sebuah generator adalah stator dan rotor, Stator adalah bagian yang diam dan terdapat *coil-coil* tembaga yang akan menerima medan magnet, sedangkan rotor adalah bagian yang bergerak dan menghasilkan medan magnet [3].

Generator menggunakan prinsip hukum Faraday dan hukum *Lenz*, hukum *Faraday* atau yang biasanya disebut dengan hukum induksi magnetik menyatakan bahwa medan magnet yang berubah-ubah terhadap satuan waktu akan menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) [4]. Sedangkan hukum *Lenz* menyatakan bahwa GGL atau arus induksi yang

berlawanan arah dengan perubahan *fluks* menghasilkan arus yang mengalir [5]. Di dalam generator rotor akan bergerak dan menghasilkan medan magnet yang akan ditangkap oleh *coil-coil* tembaga pada stator sehingga menghasilkan gaya gerak listrik, Gaya gerak listrik tanpa beban inilah yang disebut sebagai *Back EMF (electric magnet force)* [6]. Efisiensi adalah hasil perbandingan dari daya masukan (Pin) dibagi daya keluaran (Pout), semakin tinggi efisiensi sebuah generator, berarti semakin baik pula kualitas generator tersebut. Beberapa hal yang mempengaruhi efisiensi generator seperti kecepatan angin yang rendah sehingga menyebabkan turbin tak berputar dan besarnya beban atau daya yang dipakai [7]. Sedangkan rugi-rugi generator yang menyebabkan efisiensi generator dapat menurun seperti rugi-rugi tembaga yang dikarenakan *coil-coil* tembaga di dalam stator menjadi panas, rugi-rugi mekanik yang disebabkan oleh gesekan di bantalan poros generator dan rugi-rugi besi dikarenakan material generator yang panas [8].

Generator yang banyak ditemukan di pasaran adalah generator yang membutuhkan putaran tinggi (*High Speed Induction*) untuk bekerja dan perlu arus eksitasi listrik tambahan untuk menghasilkan medan magnetnya, tentu saja generator jenis ini tidak bisa diaplikasikan di daerah terpencil yang tidak memiliki sumber listrik awal [9]. Oleh karena itu digunakanlah *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* yang untuk eksitasi medan magnetnya menggunakan magnet permanen dan bukan lagi dari eksitasi tambahan dari luar [10]. Alasan inilah yang menyebabkan mengapa PMSG sangat populer, karena memiliki efisiensi yang sangat tinggi untuk pembangkit listrik sekala menengah dan daerah terpencil [11][12]. Konstruksi generator jenis ini juga tidak serumit generator konvensional pada umumnya yang menggunakan belitan pada rotornya untuk menghasilkan medan magnetik [13]. Jenis generator ini memiliki beberapa kelebihan antara lain memiliki efisiensi yang baik di kecepatan rendah, tidak perlu eksitasi tambahan karena sumber eksitasi medan magnet digantikan oleh permanen magnet dan biaya perawatan yang tidak mahal, sehingga banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin [14].

Penelitian tentang generator permanen magnet sudah cukup berkembang untuk saat ini, seperti penelitian yang bertujuan merancang generator PMSG 100 W untuk *Sultan Wind Turbine* yang menggunakan metode perancangan dan mensimulasikannya dengan menggunakan *software*

berbasis *Finite Element Method*. Didapatkan hasil 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% [15]. Penelitian yang bertujuan untuk mencari efisiensi generator berdasarkan *variable slot, pole* dan lilitan dengan metode pemodelan dan simulasi dengan menggunakan *software* berbasis *Finite Element Method*. Didapatkan hasil nilai efisiensi terbesar terdapat di 2 Generator yaitu 12 Slot 16 *Pole* 80 Lilitan dan 12 Slot 16 *Pole* 60 lilitan yang di mana masing-masing mempunyai nilai efisiensi 89% [16]. Penelitian yang bertujuan untuk menghasilkan generator angin yang berkualitas baik dengan pilihan belitan *coil (Winding)*, dengan metode pemodelan dan mensimulasikannya dengan menggunakan *software* berbasis *Finite Element Method* didapatkan hasil output 4,188 V untuk pilihan jenis lilitan dengan arah yang sama (CW) dan output 4,762 V untuk pilihan jenis lilitan dengan arah yang berbeda (CCW) [17].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh slot terhadap efisiensi *Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)*, yaitu dengan membandingkan PMSG 12 Slot 16 *Pole* dengan PMSG 24 Slot 16 *Pole* terhadap efisiensi yang dihasilkan. Penelitian tentang pengaruh slot terhadap efisiensi generator sudah pernah dilakukan, namun belum spesifik karena tidak dijelaskan tentang beban dan kecepatan yang digunakan saat simulasi dan hanya sampai di kombinasi slot 18 Slot 16 *pole* saja [16]. sehingga belum terlalu jelas, apakah slot berpengaruh terhadap efisiensi yang dihasilkan oleh PMSG. Karena itu pada penelitian ini melakukan keterbaruan yaitu membahas kombinasi slot yang lebih banyak yaitu 24 Slot 16 *pole* dengan beban sebesar 50 *Ohm* dan disimulasikan di kecepatan 1000 Rpm.

Penelitian ini menggunakan magnet permanen *Neodymium Iron Boron* karena memiliki nilai *fluks* yang paling besar dibandingkan bahan permanen magnet yang lain [18]. *Neodymium Iron Boron* juga mulai menggantikan penggunaan bahan permanen magnet jenis *Ceramic* karena memiliki nilai menghasilkan *fluks* yang lebih besar atau medan magnet yang lebih besar [19]. Permanen magnet biasanya digolongkan berdasarkan *grade* atau tingkat kuat medan magnet yang dihasilkan, magnet yang paling umum ditemukan di pasaran adalah

jenis *grade* N35 dan N52. Permanen magnet dengan nilai *grade* N52 menghasilkan medan magnet yang lebih besar dibandingkan N35, namun memiliki harga yang jauh lebih mahal [20].

Perkembangan teknologi generator mulai dari ukuran, *output*, desain, bentuk dan peningkatan efisiensi daya *output* tidak lepas karena adanya software untuk mendesain mesin mesin listrik [21]. Pada penelitian ini menggunakan *software* simulasi berbasis *Finite Element Method (FEM)*. *MagNet Infolytica* adalah salah satu *software* yang berbasis *Finite element method(FEM)*, beberapa peralatan yang dapat disimulasikan pada *software MagNet Infolytica* adalah generator, motor, transformator, loudspeaker atau peralatan yang menggunakan belitan dan permanen magnet. *Software MagNet Infolytica* digunakan untuk membuat rancangan generator dengan menggunakan material yang diinginkan dan menganalisis masalah medan elektromagnetik yang kompleks dalam generator untuk mendapatkan *desain* generator yang diinginkan [22].

METODE

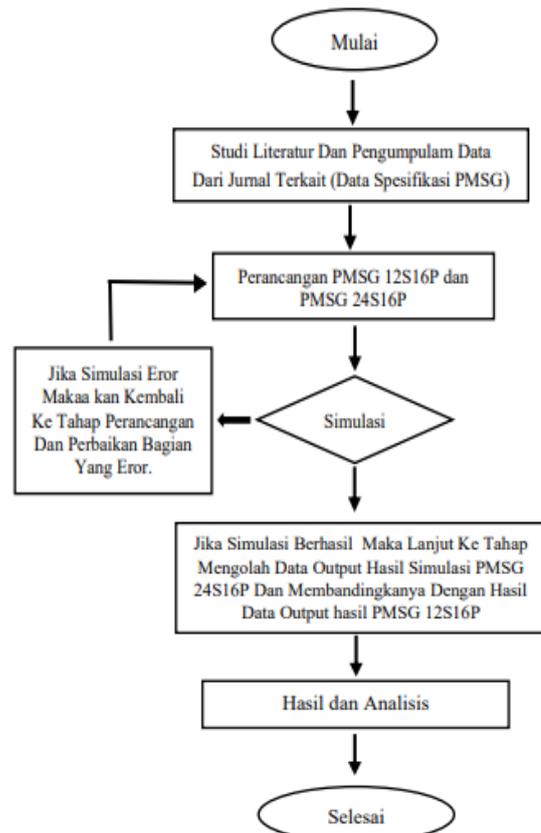
Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen yaitu dengan merancang dan mensimulasikan PMSG 24 Slot 16 Pole dan kemudian hasil *output* nya dibandingkan dengan PMSG 12 Slot 16 pole. Berikut adalah *flow chart* tahapan-tahapan penelitian terlihat pada gambar 1.

Studi Literatur

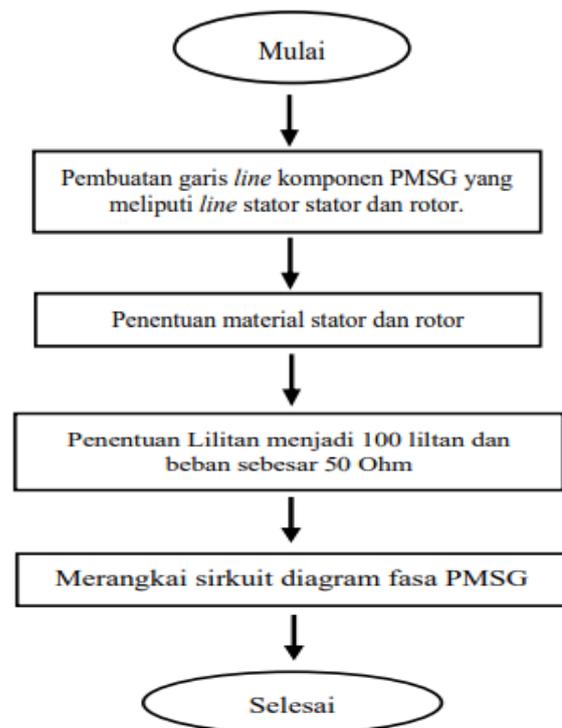
Tahap ini adalah tahap pengumpulan data berdasarkan referensi jurnal-jurnal terkait yang meliputi spesifikasi PMSG seperti material, ukuran, kecepatan putar, dan beban yang digunakan saat simulasi. Berikut adalah spesifikasi PMSG yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Spesifikasi PMSG 12S16P dan 24S16P

No	Nama	Material	Tebal (mm)
1	Stator	M1000-100A	25
2	Rotor	M1000-100A	49
3	Coil	Copper:5.77e7 siemens/meter	17
4	Magnet	Neodymium Iron Boron: 48/11	3
5	Air box	Udara	150
6	Air gap	Udara	1



Gambar 1. Flow Chart Penelitian

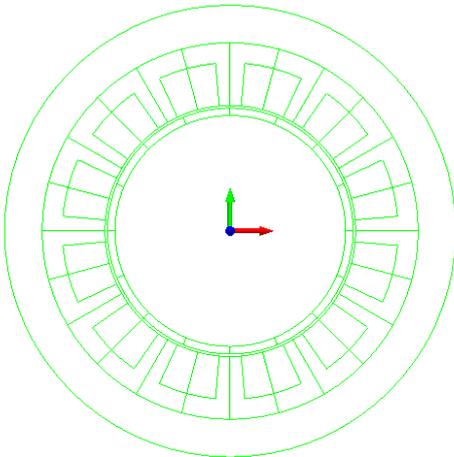


Gambar 2. Flow Chart Perancangan PMSG

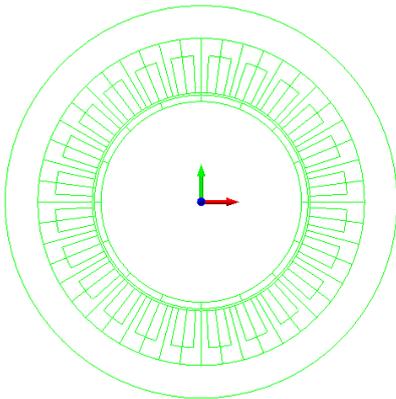
Perancangan PMSG 12S16P dan 24S16P

Generator *Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)* 12 Slot 16 Pole adalah generator yang memiliki jumlah slot *coil* sebanyak

12 buah dan kutub magnet sebanyak 16 buah. Generator *Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)* 24 Slot 16 Pole adalah generator yang memiliki jumlah slot *coil* sebanyak 24 buah dan kutub magnet sebanyak 16 buah. Perancangan pada penelitian ini adalah dengan *Software Infolyca MagNet* dengan jumlah lilitan sebanyak 100 lilitan dan beban sebesar 50 Ohm. Berikut *Flow Chart* perancangan PMSG 12S16P dan 24S16P.

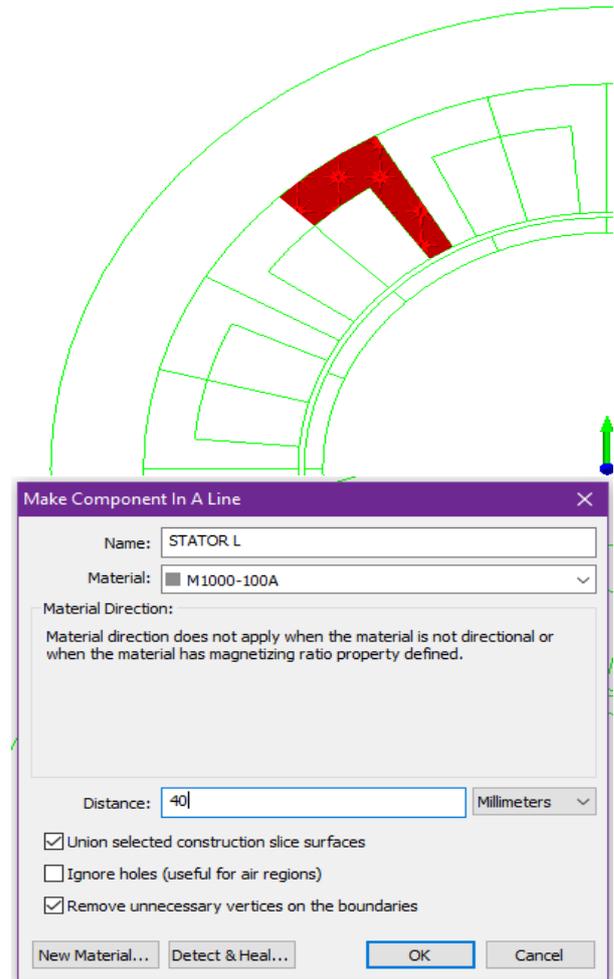


Gambar 3. Perancangan Awal PMSG 12S16P dengan garis (*Line*)



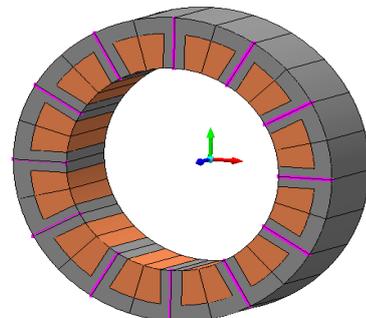
Gambar 4. Perancangan Awal PMSG 24S16P dengan garis (*Line*)

Pemodelan awal adalah dengan membuat garis-garis untuk pembentukan bagian-bagian dari PMSG yang akan dibuat, yang meliputi bagian-bagian dari stator dan rotor. Setelah tahap ini selesai baru masuk ke tahap pembuatan komponen-komponen dengan material yang telah ditentukan.

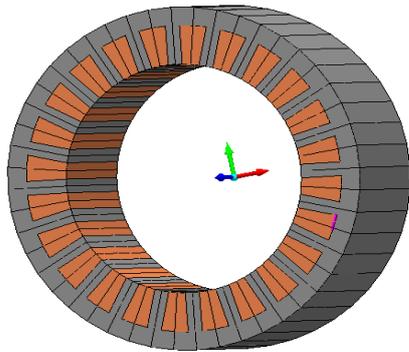


Gambar 5. Pembuatan bagian-bagian generator dengan material yang telah ditentukan.

Tahap ini adalah tahap pembuatan komponen PMSG dengan material-material yang telah ditentukan, seperti magnet yang menggunakan material *neodymium iron boron*, dan inti besi menggunakan komponen M-1000 sama seperti material yang terdapat pada tabel spesifikasi.

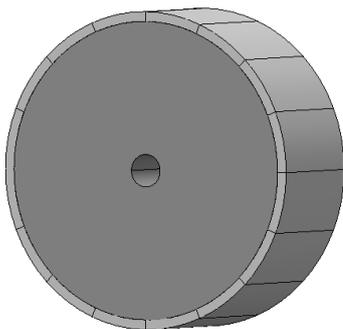


Gambar 6. Stator PMSG 12S16P



Gambar 7. Stator PMSG 24S16P

Stator adalah bagian yang tidak bergerak pada PMSG. Di dalam stator terdapat *coil-coil* tempat penangkapan medan magnet yang dihasilkan oleh putaran rotor sehingga menghasilkan tegangan listrik. Pada Gambar 7 dapat kita lihat dimana ada perbedaan yaitu banyaknya slot *coil* antara PMSG 12S16P dan PMSG 24S16P. Dimana PMSG 12S16P memiliki jumlah *coil* sebanyak 12 buah, sedangkan PMSG 24S16P memiliki jumlah *coil* sebanyak 24 buah. Yang dilakukan pada penelitian ini adalah membandingkan PMSG 12S16P dan PMSG 24S16P, untuk diketahui efisiensi yang terbaik antara keduanya, sehingga dapat diketahui apakah slot berpengaruh terhadap efisiensi yang dihasilkan.



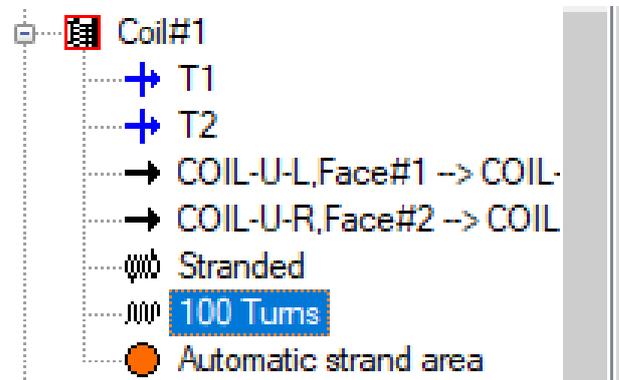
Gambar 8. Disain Rotor untuk PMSG 12S16P dan PMSG 24S16P

Rotor adalah bagian yang bergerak pada PMSG. Pada rotor PMSG terdapat magnet permanen yang merupakan ciri khas generator jenis PMSG dibanding generator lainnya. Permanen magnet inilah yang akan menghasilkan medan magnet yang kemudian ditangkap oleh *coil-coil* pada stator sehingga menghasilkan tegangan listrik.

Pada Gambar 8 dan 9, dapat dilihat bahwa jumlah *pole* atau kutub magnet pada PMSG 12S16P dan PMSG 24S16P adalah sama yaitu berjumlah 16 buah. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perbedaan dari PMSG 12S16P dan PMSG 24S16P pada penelitian ini hanya terletak pada jumlah slotnya

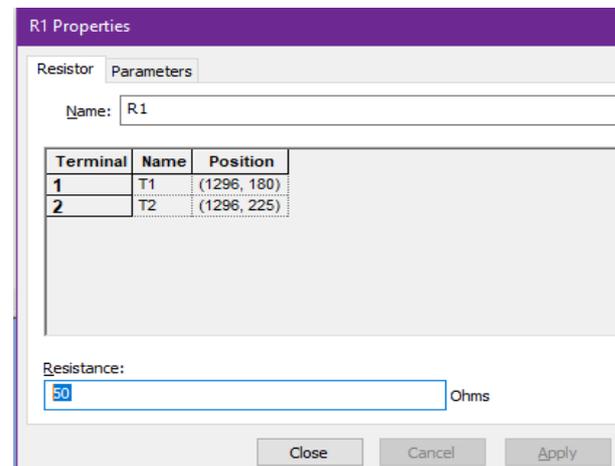
saja, sementara disain rotor serupa dengan jumlah pole yang sama.

Setelah semua komponen bagian PMSG selesai dibuat, maka masuk ke tahap penentuan jumlah lilitan dan beban.



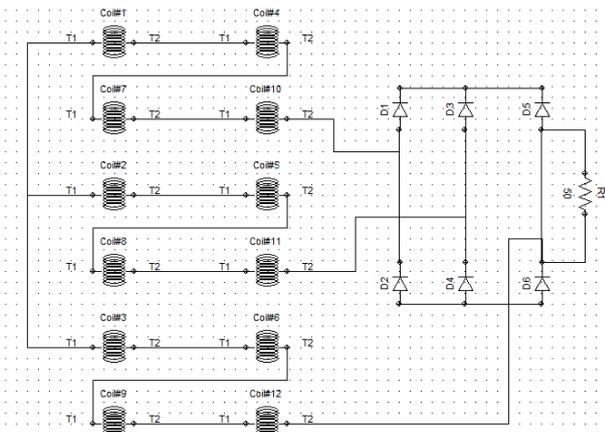
Gambar 9. Penentuan lilitan

Gambar 9 adalah proses penentuan lilitan tiap *coil-coil* PMSG menjadi 100 lilitan, dan Setelah itu masuk ke tahap penentuan jumlah beban sebesar 50 Ohm seperti Gambar 10.

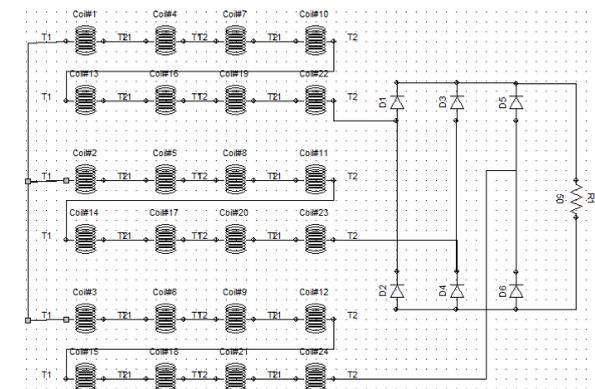


Gambar 10. Menentukan jumlah beban (R)

Tahap selanjutnya adalah merangkai circuit diagram fasa *coil-coil* rangkaian pembebanan PMSG 12S16P seperti Gambar 11.

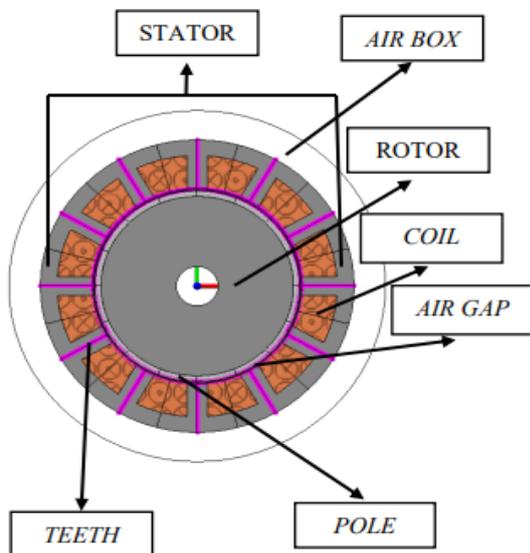


Gambar 12. Rangkain Pembebanan PMSG 12S16P

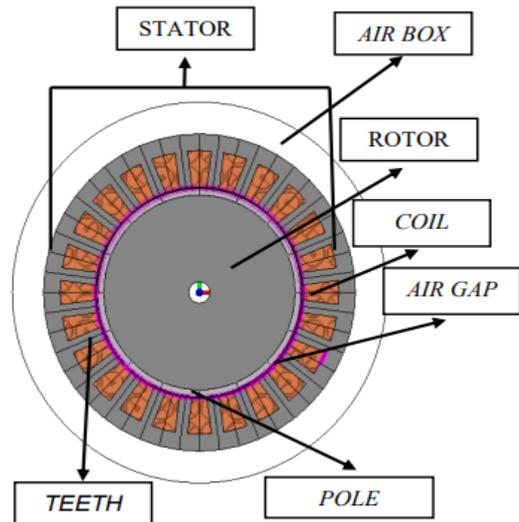


Gambar 13. Rangkain Pembebanan PMSG 24S16P

Setelah proses pembebanan selesai maka perancangan PMSG 12S16P dan PMSG 24S16P selesai dan untuk di simulasi. Gambar 13 adalah gambar PMSG 12S16P dan PMSG 24S16P yang siap di simulasi.



Gambar 13. PMSG 12S16P



Gambar 14. PMSG 24S16P

Pengambilan Data Simulasi.

Setelah setelah perancangan PMSG selesai, maka akan masuk ke tahap simulasi. Dimana kedua PMSG akan simulasikan dengan kecepatan 1000 Rpm dan diberi beban sebesar 50 Ohm. Tujuannya adalah untuk mendapatkan hasil keluaran [23]. Data keluaran simulasi yang diambil adalah sebagai berikut.

Tegangan

Tegangan adalah keluaran yang dihasilkan dari induksi elektromagnetik pada coil-coil generator.

$$\epsilon = -N \left(\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \right) \tag{1}$$

Dimana

ϵ = GGL induksi (Volt)

N = jumlah lilitan

$\Delta\phi$ = perubahan fluks magnet (Wb)

Δt = selang waktu (s)

Arus

Arus Listrik adalah hasil perbandingan tegangan input dengan hambatan. Arus listrik sangat erat hubungannya dengan kecepatan putar generator, semakin cepat generator berputar maka semakin besar pula arus listrik yang dihasilkan [23].

Torsi

Torsi di dapat dari hasil kali jari-jari lingkaran dengan gaya yang bekerja. Torsi adalah putaran dari suatu gaya terhadap suatu poros [24].

$$T = F \times r \tag{2}$$

Dimana:

F = Gaya sentrifugal dari benda yang berputar (N)

r = Jarak benda ke pusat rotasi (m)

Daya keluaran (Pout)

Daya keluaran (Pout) adalah hasil kali arus dengan tegangan.

$$Pout = V \times I \tag{3}$$

Dimana

V = Tegangan

I = Arus

Daya Masuk (Pin)

Persamaan mencari daya masuk adalah sebagai berikut.

$$Pin = T \times Rpm \times 2\pi / 60 \tag{4}$$

Dimana

T = Torsi(Nm)

Rpm = Kecepatan putar

$\pi = 3,14$

Efisiensi

Efisiensi adalah hasil perbandingan Daya keluaran(Pout) dengan daya masukan (Pin) [25].

$$n = Pout / Pin \tag{5}$$

Dimana:

Pout = Daya keluaran

Pin = Daya masukan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai Keluaran PMSG 12S16P

Pada penelitian ini nilai keluaran tegangan, arus dan torsi di dapat dari *Software MagNet Infolytica*, sedangkan untuk daya input, daya output dan efisiensi didapatkan dari perhitungan manual menggunakan aplikasi microsoft excel.

Tabel 2. Nilai Keluaran PMSG 12S16P

No	Tegangan(V)	Arus(A)	Torsi(Nm)
1	270.3	5.4	-17.3
2	227.0	4.5	-15.6
3	257.3	5.1	-15.4
4	279.2	5.6	-16.6
5	276.4	5.5	-16.1

No	Tegangan(V)	Arus(A)	Torsi(Nm)
6	236.4	4.7	-15.4
7	228.1	4.6	-15.7
8	256.4	5.1	-15.3
9	279.9	5.6	-16.6
10	277.4	5.5	-16.1
11	236.7	4.7	-15.4
12	228.1	4.6	-15.7
13	256.4	5.1	-15.3
14	279.9	5.6	-16.6
15	277.4	5.5	-16.1
16	236.6	4.7	-15.4
17	228.1	4.6	-15.7
18	256.4	5.1	-15.3
19	279.9	5.6	-16.6
20	277.4	5.5	-16.1
21	236.6	4.7	-15.4
22	228.1	4.6	-15.7
23	256.4	5.1	-15.3
24	279.9	5.6	-16.6
25	277.4	5.5	-16.1
26	236.6	4.7	-15.4
27	228.1	4.6	-15.7
28	256.4	5.1	-15.3
29	279.9	5.6	-16.6
30	277.4	5.5	-16.1
31	236.6	4.7	-15.4
32	228.1	4.6	-15.7
33	256.4	5.1	-15.3
34	279.9	5.6	-16.6
35	277.4	5.5	-16.1
36	236.6	4.7	-15.4
37	228.1	4.6	-15.7
38	256.4	5.1	-15.3
39	279.9	5.6	-16.6

Tabel 2 adalah data nilai keluaran PMSG 12S16P dari *Software MagNet Infolytica* yang telah selesai di simulasi. Nilai keluaran PMSG 12S16P ini semakin meningkat berdasarkan nilai kecepatan putar dari rotor generator, jadi semakin besar kecepatan putar maka nilai arus, tegangan dan torsi juga semakin besar [26]. Dari tabel nilai keluaran PMSG 12S16P di atas jika dikalkulasikan menjadi nilai keluaran rata-rata akan diperoleh nilai sebagai berikut.

Tegangan rata-rata (V)

Tegangan rata-rata berdasarkan tabel 2 adalah 255.9 V.

Arus rata-rata (A)

Arus rata-rata dari tabel 2 adalah sebesar 5.1 A.

Torsi rata-rata (Nm)

Torsi rata-rata dari tabel di atas adalah sebesar-15.59 Nm.

Daya masuk (W)

$$P_{in} = -15.55 \times 1000 \times 2 \times 3.14 / 60 \\ = -1627.3 \text{ Watt.}$$

Daya keluar (W)

$$P_{out} = 249.53 \times 4.99 \\ = 1245.29 \text{ Watt.}$$

Efisiensi (%)

$$n = 1245.29 / 1627.3 \\ = 0.76$$

Nilai Keluaran PMSG 24S16P

Tabel 3. Nilai Keluaran PMSG 24S16P

No	Tegangan (V)	Arus (A)	Torsi (Nm)
1	342.7	6.9	-31.1
2	389.8	7.8	-26.5
3	429.0	8.6	-45.1
4	438.2	8.8	-44.6
5	365.1	7.3	-35.0
6	357.2	7.1	-24.4
7	424.2	8.5	-35.2
8	469.3	9.4	-48.4
9	440.2	8.8	-44.7
10	363.5	7.3	-34.8
11	357.0	7.1	-24.4
12	424.0	8.5	-35.2
13	469.3	9.4	-48.4
14	440.4	8.8	-44.8
15	363.6	7.3	-34.8
16	357.0	7.1	-24.4
17	424.0	8.5	-35.2
18	469.3	9.4	-48.4
19	440.4	8.8	-44.7
20	363.6	7.3	-34.8
21	357.0	7.1	-24.4
22	424.0	8.5	-35.2
23	469.3	9.4	-48.4
24	440.4	8.8	-44.7
25	363.6	7.3	-34.8
26	357.0	7.1	-24.4
27	424.0	8.5	-35.2
28	469.3	9.4	-48.4
29	440.4	8.8	-44.7
30	363.6	7.3	-34.8
31	357.0	7.1	-24.4
32	424.0	8.5	-35.2
33	469.3	9.4	-48.4
34	440.4	8.8	-44.7
35	363.6	7.3	-34.8
36	357.0	7.1	-24.4
37	424.0	8.5	-35.2
38	469.3	9.4	-48.4
39	440.4	8.8	-44.7

Tabel 3 adalah data nilai keluaran PMSG 24S16P dari *Software MagNet Infolytica* yang telah selesai

di simulasi. Sama seperti PMSG 12S16P, nilai keluaran yang dihasilkan PMSG 24S16P juga erat kaitannya dengan kecepatan putar generator, semakin meningkat nilai kecepatan putar dari rotor generator, maka nilai arus, tegangan dan torsi juga semakin besar [26]. Dari tabel nilai keluaran PMSG 24S16P di atas jika di kalkulasikan menjadi nilai keluaran rata-rata akan diperoleh nilai sebagai berikut.

Tegangan rata-rata (V)

Tegangan rata-rata berdasarkan tabel 3 adalah 409.8 V.

Arus rata-rata (A)

Arus rata-rata dari tabel 3 adalah sebesar 8.20 A.

Torsi rata-rata (Nm)

Torsi rata-rata dari tabel 3 adalah sebesar -37.44 Nm.

Daya masuk (W)

$$P_{in} = -37.44 \times 1000 \times 2 \times 3.14 / 60 \\ = -3919 \text{ Watt.}$$

Daya keluar (W)

$$P_{out} = 409.8 \times 8.20 \\ = 3358.38 \text{ Watt.}$$

Efisiensi (%)

$$n = 3358.38 / 3919 \\ = 0.86$$

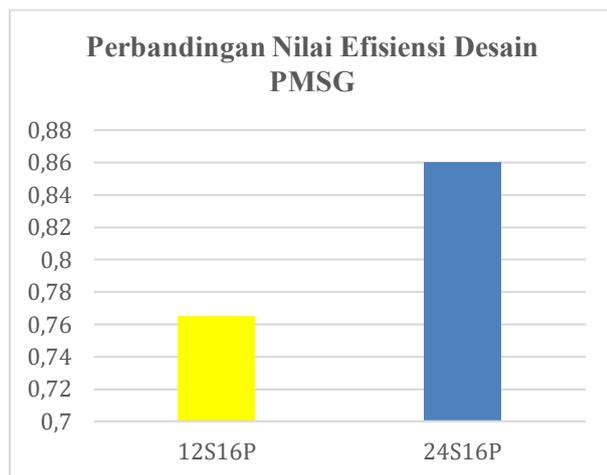
Perbandingan Nilai Keluaran PMSG 12S16P dan PMSG 24S16P

Tabel 4. Perbandingan Keluaran

No	Jenis PMSG	12S16P	24S16P
1	Tegangan (V)	255.9	409.8
2	Arus (A)	5.1	8.20
3	Torsi (Nm)	-15.59	-37.44
4	Daya Masuk (W)	1627.3	3919
5	Daya Keluar (W)	1245.29	3358.38
6	Efisiensi	76 %	86%

Pada tabel 4 dapat kita lihat bahwa nilai tegangan, arus dan torsi PMSG 24S16P lebih besar dibanding dengan PMSG 12S16P. Bahkan untuk nilai tegangan PMSG 24S16P hampir bernilai dua kali lebih besar dari pada PMSG 12S16P yaitu 409.8 Volt berbanding 255.9 Volt. Untuk nilai arus PMSG 12S16P juga lebih kecil dibanding dengan PMSG 24S16P yaitu dengan nilai 5.1 Ampere berbanding 8.20 Ampere. Sementara itu untuk nilai torsi, PMSG 24S16 Pole memiliki nilai sebesar -37.44 Nm sedangkan PMSG 12S16P memiliki nilai torsi sebesar -15.59 Nm.

Daya masuk (P_{in}) PMSG sangat dipengaruhi oleh Torsi dan karena torsi yang dihasilkan oleh PMSG 24S16P jauh lebih besar dibanding dengan PMSG 12S16P, menyebabkan nilai daya masuk juga memiliki selisih yang sangat besar, yaitu 3919 *Watt* berbanding 1627.3 *Watt*. Daya Keluaran (P_{out}) PMSG sangat erat kaitannya dengan tegangan dan arus yang dihasilkan, karena daya keluaran adalah hasil kali antara tegangan dan arus. Sehingga hal ini menyebabkan nilai daya keluaran (P_{out}) 24S16P lebih besar di banding dengan PMSG 12S16P, yaitu dengan nilai keluaran 3358.38 *Watt* berbanding dengan 1245.29 *Watt*.



Gambar 15. Diagram perbandingan nilai Efisiensi Desain PMSG

Pada Gambar 15 dapat dilihat bahwa efisiensi yang dihasilkan oleh PMSG 24 slot 16 *pole* lebih besar dibandingkan dengan PMSG 12 slot 16 *pole*. PMSG 24 slot 16 *pole* menghasilkan efisiensi sebesar 86%, sedangkan PMSG 12 slot 16 *pole* menghasilkan efisiensi sebesar 76%. Efisiensi adalah hasil bagi antara P_{out} dan P_{in} . Dikarenakan nilai P_{in} dan P_{out} PMSG 24S16P lebih besar dibandingkan dengan PMSG 12S16P sehingga menyebabkan nilai efisiensi PMSG 24S16P lebih besar dibandingkan PMSG 12S16P.

Dari perbandingan nilai keluaran PMSG 24S16P dan PMSG 12S16P di atas, menunjukkan bahwa jumlah slot berpengaruh terhadap nilai keluaran dan efisiensi yang dihasilkan oleh *Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)*. Pada slot PMSG terdapat coil-coil tembaga tempat penangkapan medan magnet (*Flux linkage*), banyaknya jumlah lilitan yang terdapat dalam coil ini berbanding lurus dengan nilai tegangan yang dihasilkan, semakin banyak jumlah lilitan maka tegangan yang dihasilkan juga semakin besar [16]. Karena PMSG

24S16P memiliki jumlah slot yang lebih banyak dari PMSG 12S16P, menyebabkan nilai keluaran dan nilai efisiensi PMSG 24S16P lebih besar dibanding PMSG 12S16P.

KESIMPULAN

Jumlah slot pada *Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)* berpengaruh terhadap keluaran yang dihasilkan. Daya keluaran terbesar di dapat dari PMSG 24 slot 16 *pole* yang menghasilkan daya keluaran sebesar 3311 *Watt*. Pada kecepatan dan beban yang sama, efisiensi terbaik dihasilkan oleh PMSG 24 slot 16 *pole* yang menghasilkan efisiensi sebesar 86%, sedangkan PMSG 12 slot 16 *pole* menghasilkan efisiensi sebesar 76%. Di dalam Slot PMSG terdapat *coil-coil* tembaga untuk penangkapan medan magnet yang dihasilkan oleh kutub magnet dan karena PMSG 12S16P dan PMSG 24S16P memiliki jumlah slot yang berbeda, sehingga menyebabkan perbedaan nilai keluaran dan efisiensi yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi terhadap penelitian ini, mulai dari bimbingan, saran dan kritik sehingga penyusunan penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] M. N. Kholis, "Rancangan Permanent Magnet Synchronous generator (pmsg) 12 Slot 8 Pole dengan Menggunakan Software Magnet Infolytica 7.5," Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2020. [Online]. Available: <http://eprints.ums.ac.id/83911/>.
- [2] I. A. A. Kurniawan Muhammad, Ida Bagus Fery Citarasa, "Simulasi Kombinasi Bentuk Rotor Permanent Magnet Synchronous Generator 12S8P Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Di Nusa Tenggara Barat," Universitas Mataram, 2021. [Online]. Available: <http://eprints.unram.ac.id/id/eprint/21269>.
- [3] F. Rizkyansah Hanly, Y. I. Nakhoda, and N. P. Agustini, "Rancang Bangun Permanent Magnet Linear Generator (PMLG) Menggunakan 9 Kutub Magnet," in *Seminar Hasil Elektro SI ITN Malang*, 2019, pp. 1–10. [Online].

- Available: http://eprints.itn.ac.id/4362/9/Jurnal_Fihadiyan.pdf.
- [4] A. M. Lestari, G. Jatisukamto, and A. Z. Muttaqin, "Analisis Efisiensi Pada Generator 12 Slot 8 Pole," *J. Rotor*, vol. 11, no. April, pp. 35–38, 2018, [Online]. Available: <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/RTR/article/view/9098>.
- [5] H. Prasetyo, Ropiudin, and B. Dharmawan, "Generator Magnet Permanen Sebagai Pembangkit Listrik Putaran Rendah," *Din. Rekayasa*, vol. 8, no. 2, pp. 70–77, 2012, [Online]. Available: <https://www.neliti.com/id/publications/59677/generator-magnet-permanen-sebagai-pembangkit-listrik-putaran-rendah>.
- [6] Y. Prasetyo, "Analisis Perbandingan Bahan Material Magnet Dalam Pemodelan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) 12 Slot 8 Kutub Dengan Menggunakan Finite Element Method (Fem) Software Publikasi," Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2019. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/227201484.pdf>.
- [7] N. Priyaningsih and N. Yuniarti, "Analisis Efisiensi Generator Pada Wind Turbine," *J. Edukasi Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 157–168, 2017, doi: 10.21831/jee.v1i2.17420.
- [8] I. Refaldi, Y. Basir, and D. U. Y. Wardhani, "Analisis Fluktuasi Beban Terhadap Efisiensi Generator Sinkron Di PT. Pembangkit Listrik Palembang Jaya," *J. Ampere*, vol. 6, no. 2, pp. 92–103, 2021, doi: 10.31851/ampere.v6i2.7293.
- [9] H. Asy'ari, Jatmiko, and A. Ardiyatmoko, "Desain Generator Magnet Permanen Kecepatan Rendah untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin atau Bayu (PLTB)," *J. Portal-Universitas Islam Indonesia.*, vol.12, no.1, pp. 59-67, 2012,[Online]. Available: <http://journal.uii.ac.id/Snati/article/view/2963>.
- [10] R. Setiabudy and U. N. O. B. Sudibyo, "Analisis Metode Anti-Notch terhadap Pengurangan Torsi Cogging pada Permanent Magnet Synchronous Generator," *J. Int. Penelit. Ilm. & Teknik*, vol. 7, no. 12, pp. 1301–1313, 2016, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/317227871_Analysis_of_Anti-Notch_Method_to_theReduction_of_the_Cogging_Torque_in_Permanent_Magnet_Synchronous_Generator
- [11] M. R. Hadisiswoyo, I. Arifianto, S. Rahmatia, and R. Elson, "Variasi Geometri Pemodelan PM Generator Sinkron 12 Slot 8 Pole ¼ Model," in *Seminar Nasional Microwave, Antena dan Propagasi (SMAP) 2018 Unpak*, 2018, pp. 48–52. [Online]. Available: <https://repository.unpak.ac.id/tukangna/repo/files-20190202031520.pdf>
- [12] J. Lianda and Adam, "Optimasi Generator Magnet Permanen Pada Pembangkit Listrik Arus sungai Menggunakan boost Converter Dengan Voltage Controller," in *SNITT-Politeknik Negeri Balikpapan*, 2017, vol. 2, no. 1, pp. 42–44. [Online]. Available: <https://jurnal.poltekba.ac.id/index.php/prosidin/article/view/375>
- [13] E. Maghfira, A. Harahap, I. H. Rosma, and A. Hamzah, "Analisis Pengaruh Posisi Peletakan Magnet Permanen di Rotor Terhadap Kinerja Generator Sinkron Magnet Permanen," *Jom FTEKNIK*, vol. 7, no. 2, pp. 1–6, 2020, [Online]. Available: <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/viewFile/28707/27667>
- [14] I. Arifianto and M. R. Hs, "Analisa Efisiensi dan Rancang Generator Permanent Magnet 12 Slot 8 Pole Menggunakan Software Magnet 7.5," in *Seminar Nasional Microwave, Antena dan Propagasi (SMAP) 2018*, 2018, pp. 43–48. [Online]. Available: Analisa Efisiensi dan Rancang Generator Permanent Magnet 12 Slot 8 Pole Menggunakan Software Magnet 7.5
- [15] M. Irfan, E. Erwin, and S. Wiyono, "Perancangan Permanent Magnet Synchronous Generator Sultan Wind Turbine V-5 Sultan Wind Turbine V-5," *J. Asimetrik J. Ilm. Rekayasa Dan Inov.*, vol. 3, no. 2, pp. 131–142, 2021, [Online]. Available: <https://journal.univpancasila.ac.id/index.php/asimetrik/article/view/2055>
- [16] M. Ade Irawan, "Perancangan Generator Dengan Variasi Slot, Pole, Dan Lilitan Menggunakan Software Magnet," Universitas Teknologi Yogyakarta, 2019. [Online]. Available: <http://eprints.uty.ac.id/3348/>
- [17] I. A. Albarohin and U. Latifa, "Analisa Pengaruh Perbedaan Winding terhadap Back EMF dan Ke pada PMSG 18s16p," *CIRCUIT J. Ilm. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 2, p. 189, 2021, doi: 10.22373/crc.v5i2.9401.
- [18] G. A. 'Alimil Haqq, T. Hardianto, and B. Sujanarko, "Rancang Bangun Generator Permanen Magnet Satu Fasa dengan Daya 50 Watt Tipe Fluks Aksial Dual Rotor," *J. Arus Elektro Indonesia.*, vol. 6, no. 1, pp. 5–11, 2020, [Online]. Available: <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/E->

- JAEL/article/view/16775
- [19] M. I. Umami, I. M. A. Nrartha, and T. Zubaidah, "Desain Generator Sinkron Magnet Permanen Jenis Neodymium Iron Boron Untuk PLTB Daya 500 Watt Menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica," Universitas Mataram, 2018. [Online]. Available: <http://eprints.unram.ac.id/2707/15/15.Jurnal.pdf>
- [20] B. Prasetyo and T. H. Mulud, "Rancang Bangun Motor – Generator Magnet Permanen Jenis NdFeB," *EKSERGI J. Tek. Energi Vol*, vol. 15, no. 2, pp. 60–69, 2019, [Online]. Available: <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/eksergi/article/view/1507/0>
- [21] M. W. Kurniawan, R. F. Iskandar, and A. Qurthobi, "Software Magnet Study of the Effect of Umbrella Geometry on Output Power in 12S8P Generators for Wind Turbine Using Magnet Software," in *e-Proceeding of Engineering*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 5462–5469. [Online]. Available: <https://openlibrarypublications.telkomuniversit y.ac.id/index.php/engineering/article/view/9799/9662>
- [22] M. O. Suhada and I. Yasri, "Aspek Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah osen Teknik Elektro Program Studi Teknik Elektro S1 , Fakultas Teknik Universitas Riau Kampus Bina," *Jom FTEKNIK Vol.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2018, [Online]. Available: <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/view/19520/18867>
- [23] T. D. Putri and Liliana, "Analisis Pengaruh Material Magnet Permanent Terhadap Karakteristik Generator Sinkron Radial 18 Slot 16 Pole," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 11, no. 1, pp. 45–50, 2022, [Online]. Available: <http://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/powerelektro/article/view/3279%0Ahttp://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/powerelektro/artic le/download/3279/1691>
- [24] R. Harahap and S. Nofriadi, "Analisa Perbandingan Efisiensi Dan Torsi Dengan Menggunakan Metode Penyadapan Sejajar Terhadap Metode Pergeseran Sikat Pada Motor Arus Searah Kompon Pendek Dengan Kutub Bantu," *J. Electr. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 105–111, 2019, [Online]. Available: <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/jet/article/vi ew/2064/1474>
- [25] O. Dandi, "Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Pada PLTA Wonogiri," Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2021. [Online]. Available: [http://eprints.ums.ac.id/86088/3/naspud upload perpus.pdf](http://eprints.ums.ac.id/86088/3/naspud%20upload%20perpus.pdf)
- [26] M. D. Anastasya, A. Setiawan, and A. Aminudin, "Simulasi Generator Sinkron Magnet Permanen 36 Slot 12 Pole menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica," in *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 2020, vol. 4, pp. 197–204. [Online]. Available: <http://proceedings.upi.edu/index.php/sinafi/arti cle/view/1277/1157>