

Pengaruh Penambahan Lubang pada Rotor terhadap Fluks Magnet Generator Magnet Permanen Fluks Radial

Effect of Hole Addition in Rotor on Magnetic Flux of Radial Flux Permanent Magnet Generator

Hari Prasetyo^{1,2*}, Linda Wijayanti², Melisa Mulyadi²

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Mayjen Sungkono Km 5, Purbalingga, 53371, Indonesia

²Program Studi Program Profesi Insinyur, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
Jl. Jenderal Sudirman RT 02 RW 04 No. 51, Karet Semanggi, Jakarta 12930, Indonesia

*Corresponding author: hari.prasetyo@unsoed.ac.id

ABSTRAK

DOI;
[10.30595/jrst.v8i1.19281](https://doi.org/10.30595/jrst.v8i1.19281)

Histori Artikel:

Diajukan:
07/09/2023

Diterima:
04/04/2024

Diterbitkan:
18/04/2024

Pada generator magnet permanen, semakin besar flux magnet akan semakin besar back-emf. Namun semakin tinggi flux magnet akan semakin tinggi rugi daya pada inti stator dan inti sehingga akan meningkatkan suhu kerja generator. Pada inti rotor, salah satu cara mengurangi rugi daya adalah dengan mengurangi volume rotor yang dialiri flux magnet. Studi ini membahas pengaruh penambahan lubang pada inti rotor terhadap flux magnet pada celah udara. Metode yang digunakan adalah simulasi magnetic menggunakan software FEMM 4.2. Simulasi diawali dengan kombinasi ketebalan magnet 1-5 mm dengan jarak antar magnet pada rotor 1 mm dan celah udara 3 mm untuk membuktikan relasi antara ketebalan magnet dan flux magnet di celah udara. Ketebalan magnet 5 mm dengan rapat fluks tertinggi kemudian dikombinasikan dengan penambahan lubang identik pada rotor sebanyak 1-8 buah. Flux magnet di celah udara diamati. Hasilnya : (i) semakin besar tebal magnet semakin tinggi flux magnet pada celah udara, (ii) penambahan lubang pada inti rotor tidak menurunkan flux magnet di celah udara, bahkan semakin banyak lubang identik pada inti stator cenderung meningkatkan nilai flux magnet di celah udara.

Kata Kunci: Flux Magnet, Lubang Identik, Rotor, Generator, Magnet

ABSTRACT

The back emf of a permanent magnet generator increases with magnetic flux. However, a larger magnetic flux results in a higher power loss in the rotor and stator cores, raising the generator's operating temperature. Reducing the volume of the rotor that is carried by magnetic flux is one method of reducing power loss at the rotor core. The impact of increasing rotor core holes on the magnetic flux in the air gap is covered in this paper. The FEMM 4.2 program is used to do magnetic simulation as the method. In order to demonstrate the connection between magnetic thickness and magnetic flux in the air gap, the simulation starts with a combination of 1–5 mm magnetic thickness, 1 mm magnet spacing on the rotor, and 3 mm air gap. The thickness of the 5 mm magnet as the highest flux density then combined with the addition of 1-8 identical holes in the rotor. We examine the magnetic flux in the air gap. Our findings indicate that: (i) the magnetic flux in the air gap increases with the thickness of the magnet; (ii) adding holes to the rotor core does not decrease the magnetic flux in the air gap; in fact, adding more similar holes to the stator core tends to raise the magnetic flux value in the air gap.

Keywords: Flux Magnets, Identical Holes, Rotors, Generators, Magnets

1. PENDAHULUAN

Generator sinkron magnet permanen (GSMP) pada pembangkitan daya listrik digunakan untuk membangkitkan listrik dengan menggunakan permanen magnet sebagai sumber fluks magnet tanpa menggunakan bantuan energi dari luar generator (S.J. Chapman, 2012). Generator sinkron magnet permanen (GSMP) banyak dikembangkan dengan menggunakan parameter-parameter seperti ketebalan magnet, dan celah udara antar magnet. Generator sinkron magnet permanen memiliki kelebihan: (i) sistem eksitasi rotor diganti dengan magnet permanen sehingga tidak memerlukan sumber luar rangkaian rotor, (ii) meningkatkan keandalan karena tidak memerlukan slip-ring (S. Marimoto, 2007), (iii) efisiensi tinggi karena tidak ada rugi-rugi tembaga pada rotor, dan (iv) mempunyai faktor daya yang tinggi (F. Demmelmayr, 2011).

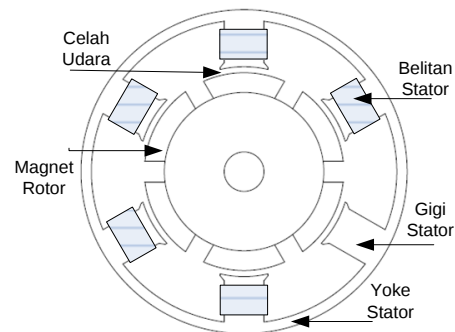
Kerja generator sinkron magnet permanen (GSMP) dipengaruhi oleh beberapa hal, salah satunya adalah nilai rapat fluks celah udara (B_g) magnet permanen yang digunakan. Nilai B_g menentukan besarnya nilai tegangan yang mempengaruhi besarnya daya yang dihasilkan GSMP. Magnet permanen akan menghasilkan konsentrasi fluks yang tinggi pada sebagian area generator. Konsentrasi fluks yang tinggi dapat menyebabkan titik panas atau hotspot yang dapat meningkatkan temperatur generator [M. Kasim, 2011].

Susunan permanen magnet radial fluks menghasilkan fluks dalam arah tegak lurus terhadap shaft generator. Generator sinkron magnet permanen fluks radial merupakan teknologi yang mature, relative mudah dikonstruksi dan kuat strukturnya (Y. Wei, 2021).

Konstruksi permanen magnet pada rotor dapat dipasang di permukaan (surface mounted), maupun ditanam (inserted mounted). Surface mounted, yang dipasang menggunakan lem maupun las khusus, merupakan konstruksi pada aplikasi PMSG kecepatan rendah karena gaya sentrifugal tidak signifikan sehingga tidak beresiko melepaskan magnet dari rotor (A. Bensalah, 2022). Penempatan magnet pada permukaan rotor akan memaksimalkan rapat fluks dan fluks magnet pada celah udara karena sangat mengurangi fluks mengalir pada rotor (H. Prasetyo, 2015)

Sumber utama panas dalam generator sinkron magnet permanen (GSMP) adalah rugi-rugi yang terdiri dari rugi lilitan, rugi inti dan rugi rotasional. Panas total yang timbul dari rugi-rugi tersebut, harus terdistribusi secara merata dan dijaga supaya tidak melebihi temperatur maksimum yang diizinkan untuk mencegah

kerusakan pada generator magnet permanen. (P. Irasari, 2012).



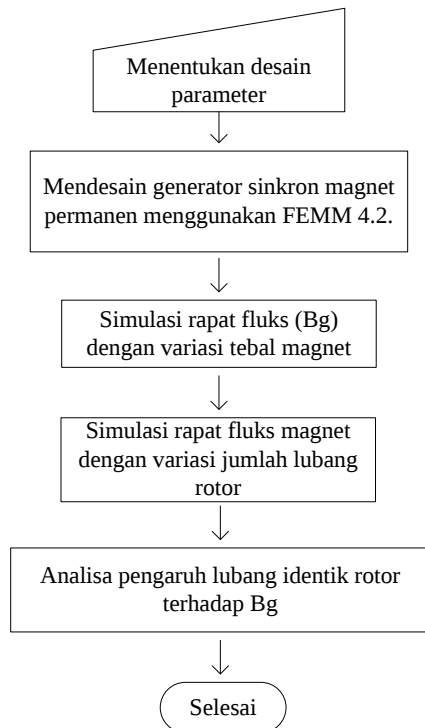
Gambar 1. GSMP Fluks Radial (H. Prasetyo, 2019)

Gambar 1. Merupakan gambar generator magnet permanen fluks radial. Magnet sebagai sumber fluks magnet menempel pada permukaan rotor (surface mounted). Karena magnet diletakkan pada keliling permukaan rotor maka arah fluks yang dihasilkan akan tegak lurus terhadap shaft generator (fluks arah radial). Gigi stator merupakan bagian stator tempat kumparan stator. Yoke merupakan bagian stator diantara gigi stator. Celah udara merupakan daerah diantara magnet dan gigi stator yang akan dilewati fluks magnet untuk menginduksikan tegangan pada kumparan stator (H. Praseijo, 2019).

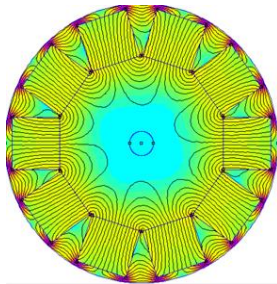
2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan adalah simulasi menggunakan software FEMM 4.2. untuk mengamati parameter rapat fluks magnet pada celah udara (B_g) dengan variasi tebal magnet dan jumlah lubang identic pada rotor. Sesuai gambar 2 prosedur penelitian adalah sebagai berikut :

- (i) Menentukan parameter desain berupa dimensi komponen generator dan jenis material komponen generator.
- (ii) Mendesain generator sinkron permanen magnet fluks radial menggunakan software FEMM 4.2.
- (iii) Simulasi rapat fluks magnet dengan variasi tebal magnet 1-5 mm. Lebar celah udara dianggap tetap pada jarak yang rendah (1 mm). Gambar 3 menunjukkan contoh hasil simulasi rapat fluks magnet. Warna yang berbeda menunjukkan perbedaan besar rapat fluks magnet.
- (iv) Hasil Langkah (iii) dengan fluks magnet tertinggi, disimulasikan kembali dengan variasi jumlah lubang identic pada rotor 1-8 lubang. Selanjutnya Analisa hasil simulasi.



Gambar 2. Prosedur penelitian



Gambar 3. Rapat fluks magnet hasil simulasi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Parameter desain

Parameter ini menentukan gambar desain generator yang akan digunakan dalam analisa magnetik. Parameter desain terdiri dari dimensi komponen generator dan jenis material yang digunakan pada bagian rotor, stator, magnet dan shaft.

Tabel 1. Dimensi komponen generator

Komponen	Volume	Satuan
Diameter Stator	120	mm
Diameter Rotor	65	mm
Jumlah Magnet	10	kutub
Jumlah Slot	20	slot
Lebar Celah udara	3	mm
Jarak Antar Magnet	1	mm
Tebal Magnet	1-5	mm

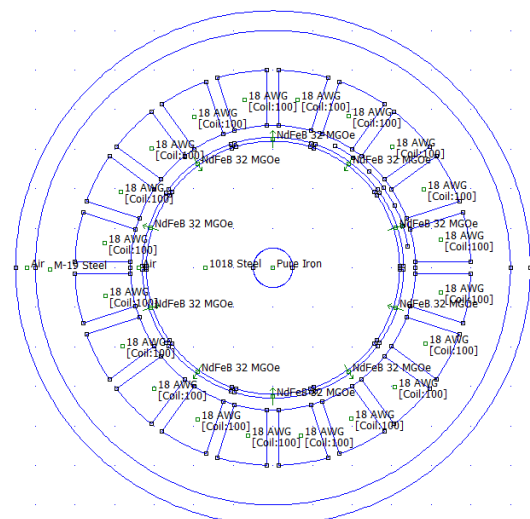
Tabel 1 menunjukkan dimensi dari komponen generator. Dapat dilihat dimensi tebal magnet divariasikan dengan ketebalan 1mm sampai dengan 5mm. Tabel 2 menunjukkan material komponen generator. Stator menggunakan material dengan permeabilitas yang tinggi untuk mengalirkan fluks magnet. Permanen magnet menggunakan Neodinium Iron Boron (NdFeB) karena memiliki kerapatan fluks remanensi (br) tinggi (sekitar 1,1 T). Rapat fluks NdFeB termasuk paling tinggi diantara jenis magnet, sebagai contoh dibandingkan magnet jenis BaF12019, rapat fluks NdFeb 10 kali lebih besar (P. Irasari, 2007).

Tabel 2. Material komponen generator

Nama Komponen	Material
Stator	<i>Silicon Steel</i> (M-19)
Rotor	<i>Carbon Steel</i> (1018 Steel)
Shaft Rotor	Besi (<i>Pure Iron</i>)
Magnet Permanen	<i>Neodymium Iron Boron</i> (NdFeb 32)
Celah Udara	Udara (air)
Lilitan	Kumparan (AWG 18)

3.2. Desain FEMM 4.2.

Desain generator menggunakan FEMM 4.2. dilakukan berdasar dimensi dan material yang telah ditentukan pada table 1 dan table 2. Gambar 4 menunjukkan desain tersebut. Dapat dilihat material bagian adalah pure iron, rotor adalah, 1018 steel, magnet jenis NdFeB 32, stator adalah silicon steel M-19, celah udara serta daerah batas merupakan udara (air).



Gambar 3. Desain generator pad FEMM 4.2

Desain yang diatas adalah gambar tampak depan dari generator magnet permanen

fluks radial, sehingga dapat terlihat aliran fluks magnet dari generator magnet fluks radial.

3.3. Simulasi variasi tebal magnet

Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi pengaruh variasi ketebalan magnet 1 mm s.d. 5 mm terhadap rapat fluks magnet pada celah udara. Jarak antar magnet 1mm dan celah udara 3 mm dibuat tetap. Luas penampang magnet pada celah udara yang menghadap ke stator adalah $9,87143 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Luas magnet ini tetap karena yang berubah hanya ketebalannya saja. Fluks magnet sesuai persamaan (1) merupakan perkalian antara rapat fluks magnet dengan luas magnet.

$$\phi = B_g \cdot A_m \quad (1)$$

dengan,

ϕ = fluks magnet (Wb)

B_g = rapat fluks magnet

A_m = luas magnet

Sebagai contoh dari table 3, untuk tebal magnet 1 mm, rapat fluks magnet sebesar 0,287181 tesla pada luas permukaan magnet $9,87143 \text{ m}^2$ akan menghasilkan fluks magnet (ϕ) sebesar :

$$\begin{aligned} \Phi &= 0,287181 \text{ T} \times 9,87143 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\ &= 2,83489 \times 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

Sedangkan untuk tebal magnet 5 mm, dihasilkan fluks magnet sebesar :

$$\begin{aligned} \Phi &= 0.741988 \text{ T} \times 9,87143 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\ &= 2,83489 \times 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

Tabel 3. Hasil simulasi variasi tebal magnet

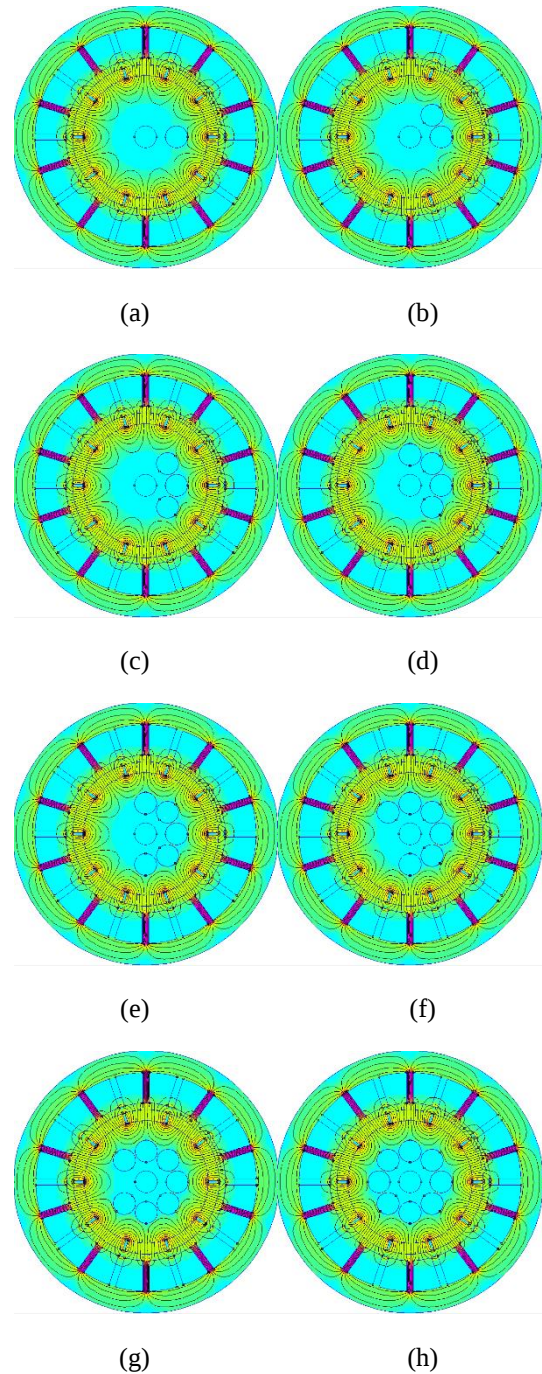
Tebal magnet	Luas Magnet (m^2)	Nilai	
		Kerapatan Fluks Magnet (T)	Fluks (Wb)
1 mm	9.87143×10^{-4}	0.287181	2.83489×10^{-4}
2 mm	9.87143×10^{-4}	0.472977	4.66896×10^{-4}
3 mm	9.87143×10^{-4}	0.602815	5.95065×10^{-4}
4 mm	9.87143×10^{-4}	0.686376	6.77551×10^{-4}
5 mm	9.87143×10^{-4}	0.741988	7.32448×10^{-4}

Dengan luas penampang magnet di celah udara tetap $9.87143 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ maka semakin tebal magnet maka semakin besar rapat fluks magnet dan semakin besar fluks magnet pada celah udara. Sehingga dapat diperoleh informasi

bahwa semakin besar volume magnet akan menghasilkan rapat fluks yang lebih besar.

3.4. Simulasi variasi jumlah lubang rotor

Untuk mengetahui pengaruh penambahan lubang udara pada rotor dengan keluaran fluks GSMP pada penelitian ini dilakukan variasi parameter penambahan lubang udara pada rotor yaitu sebanyak 1 s.d. 8 lubang. Hasil dari simulasi GSMP dengan variasi parameter penambahan lubang pada rotor dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Grafik dan hasil simulasi GSMP fluks radial 10 kutub tebal magnet 5 mm, jarak antar magnet 1 mm; (a) 2 lubang; (b) 2 lubang; (c) 3

lubang; (d) 4 lubang; (e) 5 lubang; (f) 6 lubang; (g) 7 lubang; dan (h) 8 lubang.

Dari gambar 4 dapat dilihat lubang pada rotor mengganggu garis medan magnet pada GSMP fluks radial. Semakin dekat lubang udara dengan magnet permanen maka garis medan magnetnya akan mengalami perubahan seolah terdorong oleh lubang udara ke arah permukaan rotor. Hal tersebut terjadi karena pada rotor yang berbahan besi karbon (*Carbon Steel*) memiliki permeabilitas μ lebih tinggi dibandingkan lubang udara. Sehingga medan magnet akan mengalir pada material rotor dibandingkan pada lubang udara. Perubahan pada garis medan magnet tersebut akan membuat kerapatan fluks magnet berubah. Namun perubahan garis medan magnet tersebut menaikkan rapat fluks magnet celah udara GSMP fluks radial.

Tabel 4 menunjukkan hasil simulasi pengaruh variasi jumlah lubang identik pada rotor terhadap rapat fluks magnet di celah udara. Ketebalan magnet 5 mm, jarak antar magnet 1mm dan celah udara 3 mm dibuat tetap. Lubang pada rotor dalam simulasi ini divariasikan jumlahnya dari 1 sampai 8 buah.

Dari tabel 4 ditunjukkan semakin banyak jumlah lubang identik pada rotor maka tidak menurunkan rapat fluks magnet tetapi justru cenderung meningkatkan rapat fluks magnet pada celah udara. Dengan 1 lubang pada rotor besar rapat fluks magnet 0.742452 T sedangkan dengan 8 lubang rotor meningkat menjadi 0.742748 T. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil volume material rotor maka akan semakin kecil losses fluks pada rotor sehingga meningkatkan nilai rapat fluks magnet pada celah udara.

Tabel 4. Hasil simulasi variasi lubang rotor

Jumlah lubang identik	Nilai		
	Luas Magnet (m ²)	Kerapatan Fluks Magnet (T)	Fluks (Wb)
1 lubang	987143 x 10 ⁻⁴	0.742452	7.32906 x 10 ⁻⁴
2 lubang	987143 x 10 ⁻⁴	0.742009	7.32469 x 10 ⁻⁴
3 lubang	987143 x 10 ⁻⁴	0.742115	7.32574 x 10 ⁻⁴
4 lubang	987143 x 10 ⁻⁴	0.74225	7.32707 x 10 ⁻⁴
5 lubang	987143 x 10 ⁻⁴	0.742549	7.33002 x 10 ⁻⁴

6 lubang	987143 x 10 ⁻⁴	0.742192	7.3265 x 10 ⁻⁴
7 lubang	987143 x 10 ⁻⁴	0.742418	7.32873 x 10 ⁻⁴
8 lubang	987143 x 10 ⁻⁴	0.742748	7.33198 x 10 ⁻⁴

4. KESIMPULAN

Dari bagian hasil dan pembahasan dapat disimpulkan:

- Pada uji coba variasi parameter ketebalan magnet GSMP fluks radial, kerapatan fluks (B) dan fluks (Φ) tertinggi pada desain GSMP fluks radial dengan ketebalan 5 mm yaitu sebesar 0.741988 Tesla dan 7,32448 x 10⁻⁴ Wb.
- Penambahan lubang udara pada GSMP fluks radial dilihat dari gambar hasil simulasi terlihat mempengaruhi garis medan magnet pada rotor GSMP fluks radial. Hal tersebut terjadi karena permeabilitas bahan rotor lebih besar dari permeabilitas lubang udara. Sehingga, garis medan magnet mengalir pada rotor dan terlihat seperti terdorong oleh lubang udara.
- Uji coba penambahan lubang udara pada rotor GSMP fluks radial tidak terlalu berpengaruh terhadap keluaran fluks di celah udara GSMP fluks radial. Dari simulasi yang dihasilkan kerapatan fluks (B) pada setiap variasi penambahan lubang hanya berbeda ± 0.001 Tesla tidak terlalu signifikan perubahannya.
- Pada uji coba variasi penambahan lubang didapat nilai fluks terbesar pada penambahan 8 lubang nilai keluaran fluks dan kerapatan fluks sebesar 7.33198 x 10⁻⁴ Wb dan 0.742748 Tesla.

DAFTAR PUSTAKA

- Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th Edition, New York: McGraw-Hill International Edition, 2012.
- S. Marimoto, "Trend of Permanent Magnet Synchronous Machines," *IEEJ Trans*; vol. 2: pp. 101–108, 2007.
- F. Demmelmayr, M. Troyer, M. Schroedl, "Advantages of PM-machines Compared to Induction Machines in Terms of Efficiency and Sensorless Control in Traction Applications, " *IECON - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC,

- Australia, 07-10 November 2011, pp. 2762-2768.
- M. Kasim, Fitriana and P. Irasari, "Analisis Pengaruh Rapat Fluks Celah Udara Terhadap Karakteristik Generator Magnet Permanen," *Ketenagalistrikan Dan Energi Terbarukan*, vol. 12, 2011
- Y. Wei, Z. Cheng, J. Si, F. Jin, C. Gao, C. Gan, "Analysis of a direct-drive permanent magnet synchronous generator with novel toroidal winding," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, pp. :2237-2245, 2021.
- A. Bensalah, G. Barakat, Y. Amara, "Electrical Generators for Large Wind Turbine: Trends and Challenges," *energies*, Vol. 15, 6700. pp. 1-36, 2022.
- H. Prasetyo, S. Waluyo. Optimasi lebar celah udara generator axial magnet permanen putaran rendah 1 fase. *JNTETI*, Vol. 4, No. 4, pp. 258-262, 2015.
- P. Irasari, H. Syaeful A and M. Kasim, "Thermal Analysis on Radial Flux Permanent Magnet Generator (PMG) using Finite Element Method," *The Journal for Technology and Science*, vol. 22, p. 2, 2011
- H. Prasetyo, Winasis, Priswanto, D. Hermawan. Design of a single-phase radial flux permanent magnet generator with variation of the stator diameter. *Jurnal Teknologi*, vol. 81, No. 4, pp. 75-86, June, 2019.
- P. Irasari, et al. 2007. Aplikasi. Magnet Permanen Ba₁₂Fe₁₉O dan NdFeB Pada Generator Magnet Permanen Putaran Rendah. *Jurnal Sains Material Indonesia (LIPI)*, Vol 11 No 1 hal: 38-41.