

Desain dan Simulasi GMP Fluks Aksial Berbasis Dimensi Magnet Permanen Komersil

PUDJI IRASARI, PUJI WIDIYANTO, MUHAMMAD FATHUL HIKMAWAN

Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Indonesia
Email: pudj002@lipi.go.id

Received 20 Februari 2020 | Revised 28 Maret 2020 | Accepted 3 Mei 2020

ABSTRAK

Makalah ini membahas desain dan simulasi generator magnet permanen fluks aksial 500 W, 220 V, 500 rpm, 1 fasa, stator tunggal tanpa inti besi lunak dan rotor ganda berbahan baja karbon. Tujuan studi adalah untuk mengetahui performa generator pada dua jenis pembebanan yaitu beban R_L dan Z_L . Metode perhitungan desain dilakukan secara analitik dan numerik menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2 dengan berbasis pada dimensi magnet permanen komersil. Performa generator yang dianalisis meliputi tegangan terminal, daya keluaran dan efisiensi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketika diberi beban R_L , daya keluaran dan efisiensi generator lebih tinggi dibanding ketika diberi beban Z_L . Grafik tegangan terminal dari kedua jenis pembebanan tersebut sebagian berimpit tetapi pada beban R_L tingkat penurunannya lebih tajam disebabkan tegangan jatuhnya lebih besar. Dari semua hasil perhitungan dan simulasi, dapat disimpulkan bahwa generator menunjukkan performa yang baik pada kedua jenis pembebanan dengan efisiensi sekitar 80%.

Kata kunci: generator, magnet permanen, fluks aksial, stator tunggal, rotor ganda

ABSTRACT

This paper discusses the design and simulation of 500 W, 220 V, 500 rpm axial flux permanent magnet generators, with the construction of coreless, single stator, and double rotor made of carbon steel. This study aims to find out the performance of the generators in two types of loadings, namely R_L and Z_L loads. The design calculation method is done analytically and numerically using FEMM 4.2 software based on the dimensions of commercial permanent magnets. The generator performances analyzed include the terminal voltage, the output power, and the efficiency. From the simulation results, it is known that under load R_L , the output power and efficiency are higher than under load Z_L . The terminal voltage graphs of the two types of loadings partially coincide but at the R_L load, the rate of the decline is sharper due to the greater voltage drop. From all the results, it can be concluded that the generator shows good performance on both types of loads with a quite high efficiency, which is around 80%.

Keywords: generator, permanent magnet, axial flux, single stator, double rotor

1. PENDAHULUAN

Sebagai negara tropis, Indonesia tidak memiliki kecepatan angin rata-rata yang tinggi seperti halnya negara-negara subtropis. Kecepatan angin Indonesia cukup rendah, yakni berada pada kisaran 2,5 - 6 m/s (**Dewata, dkk, 2015**). Berdasarkan hasil pengukuran (**Dida, dkk, 2016**), kecepatan angin sebesar 6 - 12 m/s terjadi khususnya di perairan sebelah selatan khatulistiwa. Di wilayah-wilayah dengan kecepatan angin yang relatif kecil, pemanfaatan energi angin untuk pembangkit listrik dilakukan dengan membuat turbin angin skala kecil berkapasitas puluhan hingga ratusan watt. Konstruksi turbin angin juga cukup sederhana sehingga memungkinkan untuk dikerjakan oleh bengkel atau industri kecil lokal.

Penguasaan teknologi turbin angin makin banyak dilakukan di Indonesia sejak tersedianya magnet permanen NdFeB secara komersial dengan harga yang semakin terjangkau. Magnet NdFeB mempermudah desainer dalam merancang generator dengan kutub banyak untuk menghasilkan kecepatan yang sangat rendah. Dengan demikian generator dan baling-baling turbin tidak perlu dihubungkan melalui transmisi mekanik atau dapat dihubungkan langsung dalam satu poros.

Ditinjau dari arah fluks magnet di celah udara, Generator Magnet Permanen (GMP) ada dua jenis, yaitu GMP fluks aksial dan fluks radial. Salah satu kelemahan GMP adalah adanya torsi *cogging* yang disebabkan oleh gaya tarik menarik antara fluks magnet rotor dengan gigi stator. Pada daerah dengan kecepatan angin rendah, torsi *cogging* menjadi masalah karena dibutuhkan kecepatan angin yang lebih tinggi untuk mulai memutar turbin (*cut-in wind speed*). Torsi *cogging* dapat dieliminir dengan menggunakan stator tanpa gigi (*toothless stator*) atau tanpa inti besi lunak (*coreless stator*). Kedua konstruksi tersebut banyak dijumpai pada Generator Magnet Permanen Fluks Aksial (GMPFA). Tidak adanya gigi dan inti besi lunak membuat proses manufaktur generator menjadi lebih mudah. Untuk menyatukan atau menempatkan lilitan, bahan non-magnetik seperti resin, umumnya digunakan.

Penelitian dan pengembangan teknologi turbin angin skala kecil telah banyak dilakukan di Indonesia, baik itu berupa penelitian komponen maupun sistem. Salah satu penelitian sistem turbin angin dilakukan oleh (**Nakhoda & Saleh, 2016**) dengan membuat turbin angin sumbu vertikal model Savonius dan generatornya dari jenis GMPFA stator tunggal dan rotor tunggal. GMPFA didesain untuk membangkitkan daya 615 W pada 50 Hz. Pembuatan dan pengujian GMPFA stator tunggal dan rotor tunggal dilakukan oleh (**Wijaya, W., & Nugroho, 2014**). Dalam penelitian ini generator didesain dengan 24 kutub, statornya tanpa inti besi lunak, dan dari hasil uji diperoleh daya keluaran sebesar 28.99 W pada 50 Hz. Penelitian lain terkait GMPFA dilakukan oleh (**Kasim, dkk, 2016**) dan (**Wirtayasa, dkk, 2017**). Selain itu, (**Kasim, dkk., 2016**) juga mengkaji dampak variasi lebar celah udara terhadap performa generator. Kontrol daya turbin angin skala kecil 500 W, 3 fasa, 180 V, 3A, dibuat dan diuji oleh (**Robiansyah, 2017**).

Dalam makalah ini akan didesain dan disimulasikan GMPFA 1 fasa, 500 W, 500 rpm, 220 V, stator tunggal, rotor ganda. Studi dilakukan untuk mengetahui performa generator dalam kondisi berbeban resistif murni R_L dan resistif-induktif terhubung seri (Z_L).

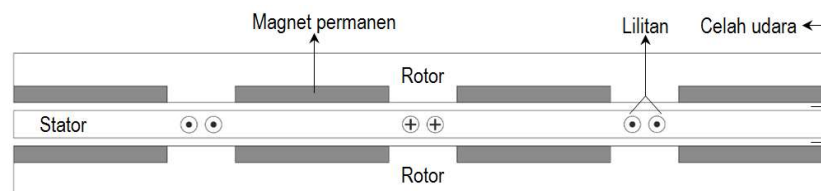
Desain dilakukan berbasis pada dimensi magnet permanen komersil yang dapat diperoleh dari penyedia daring dalam negeri. Permasalahan yang perlu diperhatikan ketika mendesain dengan ukuran dan kekuatan magnet yang sudah ditetapkan adalah bahwa lebar kutub stator tidak dapat ditentukan mengikuti keinginan perancang. Ada batasan nilai rasio lebar kutub rotor terhadap kutub stator yang harus dipenuhi bila ingin mendapatkan performa mesin yang baik. Dengan terbatasnya lebar kutub stator berarti terbatas pula ruang untuk lilitan yang

menyebabkan variasi jumlah dan diameter lilitan yang dapat disusun juga menjadi terbatas. Kondisi tersebut menyebabkan daya dan tegangan menjadi kontradiktif, artinya bila besarnya tegangan telah terpenuhi tetapi diinginkan daya yang lebih besar maka diameter lilitan harus diperbesar atau sebaliknya bila besarnya daya telah tercapai tetapi diinginkan tegangan yang lebih tinggi maka jumlah lilitan harus diperbanyak. Apabila ruang yang tersedia tidak cukup untuk menampung dua kebutuhan tersebut sekaligus maka hanya salah satu parameter yang dapat dipenuhi, umumnya adalah tegangan dengan pertimbangan bahwa kekurangan daya dapat diatasi dengan menambah jumlah unit generator. Metode perhitungan desain dalam studi ini akan dilakukan secara analitik dan numerik menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2. Performa generator yang dianalisis meliputi tegangan terminal, daya keluaran dan efisiensi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Pemilihan Tipe Rotor

Sebelum melakukan perhitungan desain, tipe rotor harus ditetapkan terlebih dahulu. Gambar 1 memperlihatkan topologi GMPFA stator tunggal tanpa inti besi lunak dan rotor ganda yang memperlihatkan posisi seluruh komponen utamanya.



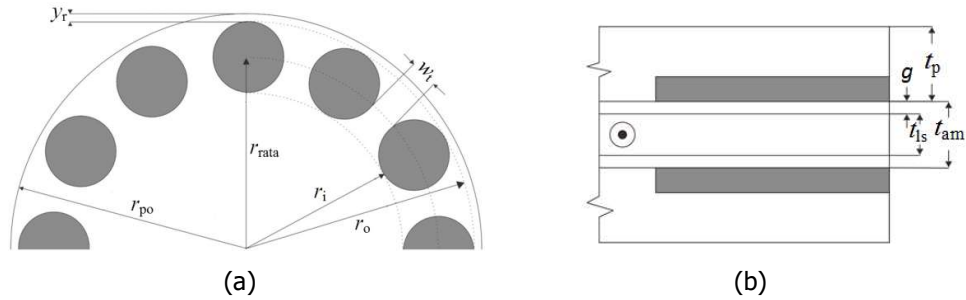
Gambar 1. Topologi GMPFA

Stator merupakan bagian yang statis atau diam, berbentuk piringan yang terbuat dari bahan non-magnetis dan berfungsi sebagai tempat lilitan kawat tembaga. Rotor adalah bagian yang berputar, berbentuk piringan dari baja karbon atau laminasi baja listrik dan di dalamnya disusun magnet permanen.

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa tipe rotor yang digunakan adalah tipe inset, yaitu bagian ketebalan magnet permanen ditanam dalam piringan rotor sehingga hanya permukaannya saja yang nampak di celah udara. Tipe rotor lain yang juga banyak digunakan adalah tipe rotor yang magnet permanennya direkatkan pada permukaan piringan (*surface permanent magnet rotor*). Tipe tersebut lebih mudah dimanufaktur tetapi memiliki resiko lebih tinggi dalam hal magnet permanen terlepas dari tempat kedudukannya saat generator berputar. Berdasarkan pertimbangan tersebut maka tipe rotor inset yang dipilih dalam studi ini.

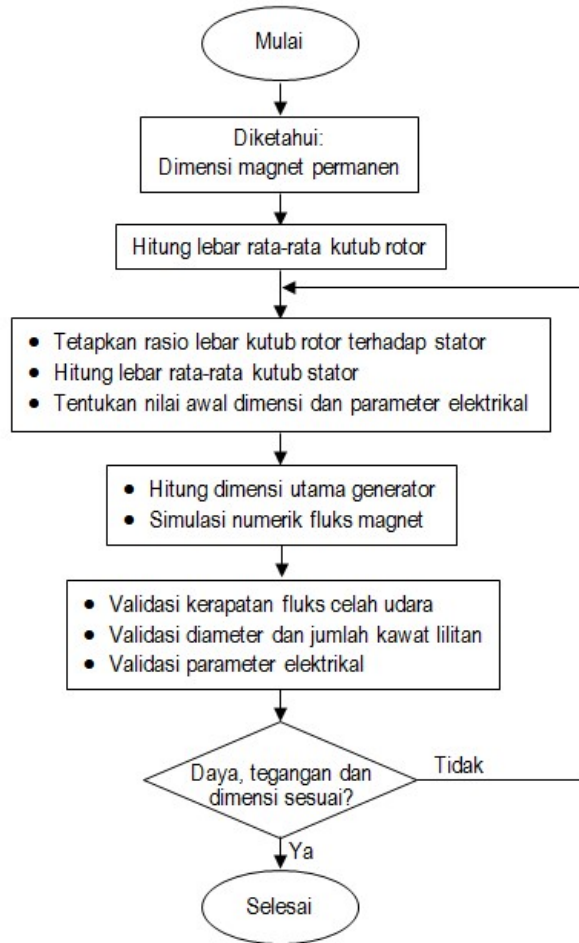
2.2 Penentuan Parameter Awal Desain

Parameter awal desain atau biasa disebut juga dengan parameter masukan terdiri dari parameter mekanikal dan elektrik. Parameter awal mekanikal berupa dimensi dari komponen utama generator, yaitu stator dan rotor. Kedua komponen tersebut dianggap sebagai komponen utama karena terkait langsung dengan proses konversi energi listrik. Dimensi dari komponen utama yang harus dihitung adalah dimensi arah radial dan arah aksial seperti diperlihatkan pada Gambar 2(a) & (b).



Gambar 2. Dimensi GMPFA, (a) Dimensi Arah Radial (b) Dimensi Arah Aksial

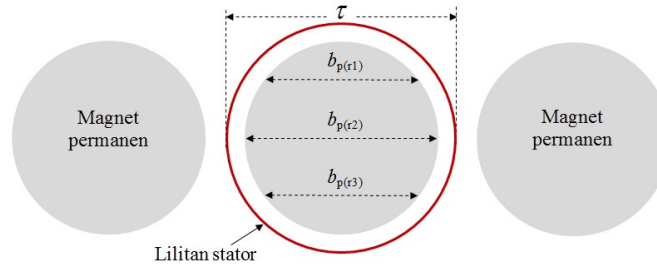
Prosedur desain GMPFA berbasis pada dimensi magnet permanen dilakukan mengikuti tahapan yang ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Desain GMPFA Berbasis pada Dimensi Magnet Permanen

Lebar kutub rotor rata-rata $b_{p(rata)}$ diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata dari $b_{p(r1)-(r3)}$ dimana $b_{p(r2)}$ adalah lebar busur yang dihasilkan oleh r_{rata} pada kutub rotor. Dengan cara yang sama, $b_{p(r1)}$ dan $b_{p(r3)}$ adalah lebar busur pada jari-jari yang bersesuaian $r1$ dan $r3$. Lilitan stator

berbentuk lingkaran mengikuti bentuk magnet permanen. Apabila GMPFA dibentangkan, maka lebar kutub stator dan rotor dapat dilihat seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Lebar kutub stator dan rotor

Besarnya lebar kutub stator τ adalah

$$\tau = \frac{2\pi r_{rata}}{2p} \quad (1)$$

dengan p = jumlah pasang kutub.

Lebar kutub stator rata-rata $\tau_{(rata)}$ dihitung dengan cara yang sama seperti mendapatkan $b_{p(rata)}$. Selanjutnya rasio lebar kutub rotor terhadap kutub stator α_i :

$$\alpha_i = \frac{B_{rata}}{B_{mg}} = \frac{b_{p(rata)}}{\tau_{(rata)}} \quad (2)$$

dimana B_{rata} = kerapatan fluks celah udara rata-rata, B_{mg} = kerapatan fluks celah udara maksimum.

Nilai α_i berada pada rentang $0,55 < \alpha_i < 1$ (Dalcali & Akbaba, 2017) (Gieras, 2010). Nilai tersebut berpengaruh terhadap bentuk gelombang tegangan yang diinduksikan ke lilitan stator yang merupakan fungsi dari gelombang kerapatan fluks magnet di celah udara. Dalam studi ini, α_i ditetapkan sekitar 0,85.

Dari nilai α_i tersebut dapat diperoleh sebagian besar dimensi generator arah radial. Selanjutnya nilai awal parameter elektrik juga ditetapkan, dan seluruh nilai awal untuk perhitungan desain ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Awal Desain GMPFA

Parameter, simbol	Nilai	Satuan	Parameter, simbol	Nilai	Satuan
<i>Dimensi</i>			<i>Parameter elektrik</i>		
Diameter magnet, d_m	0.030	m	Daya keluaran, P_o	500	W
Tebal magnet, t_m	0.003	m	Tegangan terminal, V	220	V
Jarak antar magnet, w_t	0.004	m	Faktor daya, $\cos \theta$	0.85	
Jari-jari dalam magnet, r_i	0.050	m	Efisiensi, η	0.8	%
Jari-jari luar magnet, r_o	0.080	m	Frekuensi, f	50	Hz
Jari-jari rata-rata magnet, r_{rata}	0.065	m	Jumlah pasang kutub, p	6	pasang
Lebar celah udara, g	0.001	m	Jumlah kutub, $2p$	12	kutub
Tebal piringan rotor, t_p	0.007	m	Jumlah fasa, m	1	fasa
Jumlah alur stator, S_1	12	alur	Jumlah koil/kutub/fasa, q	1	

Lebar yoke rotor y_r dan tebal piringan t_p dihitung secara bersamaan. Dua dimensi tersebut harus dapat menjamin bahwa kerapatan fluks magnet yang melalui yoke rotor B_r berada di

bawah saturasi atau kejenuhan magnetik material. Hubungan antara ketiga parameter y_r , t_p , dan B_{yr} dinyatakan dalam Persamaan (3) (**Boldea, 2006**):

$$B_{yr} = \frac{\Phi_f}{2 y_r t_p} \quad (3)$$

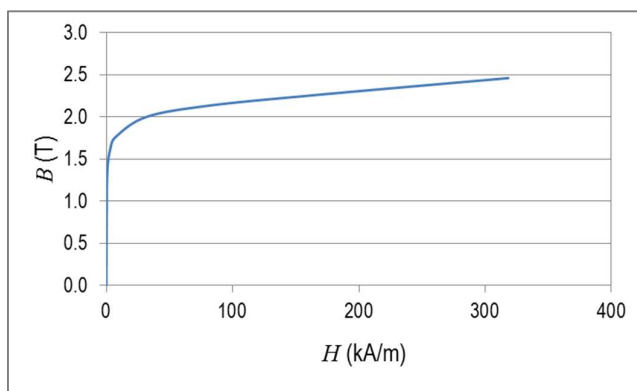
dimana Φ_f = fluks magnet di celah udara (T) dan B_{yr} ditetapkan sebesar 1 T.

Material piringan rotor umumnya adalah baja dengan kandungan karbon yang sangat rendah. Baja karbon banyak digunakan karena memiliki karakteristik mekanik yang baik dan harganya murah (**Tumanski, 2011**). Dalam studi ini, bahan magnetik lunak yang digunakan untuk piringan rotor adalah baja karbon 1117 yang karakteristiknya diperoleh dari pustaka perangkat lunak FEMM 4.2 dan diperlihatkan pada Gambar 5.

Jari-jari luar piringan r_{po} :

$$r_{po} = r_o + y_r \quad (4)$$

Tebal aksial lilitan stator t_s dan jarak antar permukaan magnet t_{am} dapat diketahui setelah diperoleh besarnya diameter dan jumlah lilitan melalui perhitungan parameter elektrikal.



Gambar 5. Karakteristik Magnetik Baja Karbon 1117

2.3 Perhitungan Parameter Elektrikal

Arus jangkar I_a dan diameter kawat lilitan d_w dihitung dengan persamaan (**Gieras, dkk, 2008**) (**Irasari, dkk, 2013**):

$$I_a = \frac{P_o}{m V \eta \cos \theta} \quad (5)$$

$$A_w = \frac{I_a}{J} \quad (6)$$

$$d_w = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \quad (7)$$

dimana: A_w = luas penampang kawat lilitan (mm^2), J = kerapatan arus (A/mm^2), ditetapkan $J = 3 \text{ A}/\text{mm}^2$.

Besarnya tegangan induksi E_f ketika fluks magnet di celah udara Φ_f berputar dengan frekuensi f dan memotong lilitan stator adalah:

$$E_f = 4.44fN_1k_{w1}\Phi_f \quad (8)$$

$$\Phi_f = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_o^2 (1 - k_d^2) \quad (9)$$

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + [\mu_{rrec}(g + 0.5t_{ls})/t_m]k_{sat}} \quad (10)$$

$$k_d = \frac{r_i}{r_o} \quad (11)$$

dimana M_1 = jumlah lilitan seri dalam 1 fasa, k_{w1} = faktor lilit pada harmonik fundamental, $D_o = 2 \times r_o$, μ_{rrec} = permeabilitas relatif magnet = 1,05, B_{mg} = kerapatan fluks maksimum di celah udara (T), B_r = kerapatan fluks remanensi = 1,4 T, k_{sat} = faktor jenuh magnetik material yang nilainya $k_{sat} \geq 1$.

B_{mg} pada Persamaan (10) divalidasi melalui simulasi fluks magnetik menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2. Dari simulasi tersebut juga akan diperoleh bentuk gelombang kerapatan fluks magnet di celah udara serta pola distribusi fluks magnet pada stator dan rotor.

Resistansi kawat lilitan R_1 , reaktansi bocor alur X_1 serta reaktansi bersama X_a sumbu d dan q dihitung dengan persamaan:

$$R_1 = \frac{\rho L_w}{A_w} \quad (12)$$

$$X_1 = 4\pi f \mu_0 \frac{L_i N_1^2}{pq} (\lambda_s + \frac{L_{1e}}{L_i} \lambda_e + \lambda_{1d}) \quad (13)$$

$$X_{ad} = 2m\mu_0 f \left(\frac{N_1 k_{w1}}{p} \right)^2 \frac{(r_o^2 - r_i^2)}{g'} k_{fd} \quad (14)$$

$$X_{aq} = 2m\mu_0 f \left(\frac{N_1 k_{w1}}{p} \right)^2 \frac{(r_o^2 - r_i^2)}{g'_q} k_{fq} \quad (15)$$

dimana ρ = massa jenis tembaga = $1,72 \times 10^{-8}$ ($\Omega \cdot m$), L_w = panjang kawat lilitan (m), L_i = panjang efektif lilitan stator arah radial, λ_s = permeansi bocor alur, λ_e = permeansi bocor ujung lilitan, λ_{1d} = permeansi fluks bocor diferensial, g' dan g'_q = celah udara ekuivalen sumbu d dan sumbu q, k_{fd} dan k_{fq} = faktor bentuk reaksi jangkar sumbu d dan q.

Faktor bentuk reaksi jangkar didefinisikan sebagai rasio amplitudo kerapatan fluks pada harmonik pertama terhadap nilai maksimum komponen normal kerapatan fluks reaksi jangkar. Untuk rotor tipe inset, k_{fd} dan k_{fq} dihitung dengan persamaan:

$$k_{fd} = \frac{1}{\pi} [\alpha_i \pi + \sin \alpha_i \pi + c_g (\pi - \alpha_i \pi - \sin \alpha_i \pi)] \quad (16)$$

$$k_{fq} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{c_g} (\alpha_i \pi - \sin \alpha_i \pi) + \pi (1 - \alpha_i) + \sin \alpha_i \pi \right] \quad (17)$$

$$c_g = 1 + h/g \quad (18)$$

dimana h = kedalaman magnet permanen ditanam dalam piringan rotor (m).

Reaktansi sinkron X_s dan arus jangkar I_a pada sumbu d dan q, diperoleh menggunakan persamaan:

$$X_{sd} = X_{ad} + X_1 \quad (19)$$

$$X_{sq} = X_{aq} + X_1 \quad (20)$$

$$I_{ad} = \frac{E_f (X_{sq} + X_L)}{(X_{sd} + X_L)(X_{sq} + X_L) + (R_1 + R_L)^2} \quad (21)$$

$$I_{aq} = \frac{E_f (R_1 + R_L)}{(X_{sd} + X_L)(X_{sq} + X_L) + (R_1 + R_L)^2} \quad (22)$$

$$I_a = \sqrt{I_{ad}^2 + I_{aq}^2} \quad (23)$$

Besarnya tegangan terminal adalah:

$$V = \sqrt{(E_f - I_a R_1)^2 - (I_a X_{sq})^2 - (I_a X_{sd})^2} \quad (24)$$

Daya, rugi daya serta efisiensi dihitung dengan persamaan-persamaan berikut:

$$P_{elm} = m E_f I_a \cos \psi \quad (25)$$

$$\psi = \arccos \left(\frac{I_{aq}}{I_a} \right) \quad (26)$$

$$P_o = P_{elm} - P_{rugi} \quad (27)$$

$$P_{rugi} = P_{cu} + P_c + P_{fric} + P_{wd} \quad (28)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_{elm}} \times 100\% \quad (29)$$

P_{elm} = daya elektro magnetik (W), ψ = sudut daya beban, $\cos \psi$ = faktor daya beban, P_{rugi} = rugi daya total (W), P_{cu} = rugi tembaga (W), P_c = rugi inti (W), P_{fric} = rugi gesekan bantalan poros, P_{wd} = rugi hambatan angin di celah udara (W), η = efisiensi (%).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perhitungan Parameter Elektrikal

Proses perhitungan parameter elektrikal secara analitik dan numerik merupakan satu kesatuan karena B_{mg} divalidasi melalui simulasi magnetik. Apabila terjadi perbedaan nilai B_{mg} setelah validasi maka N_1 harus disesuaikan untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan (Persamaan (8) dan (24)). Selain itu d_w juga divalidasi untuk disesuaikan dengan diameter kawat yang tersedia di pasar komersil. Berdasarkan nilai awal desain pada Tabel 1, hasil perhitungan parameter elektrikal ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Nilai Awal dan Nilai Validasi Parameter Elektrikal

Parameter, simbol	Nilai awal	Nilai validasi	Satuan
Daya keluaran, P_o	500	579,64	W
Arus jangkar, I_a	3,34	3,14	A
Diameter kawat lilitan, d_w	2,09	2	mm
Tegangan terminal, V	220	224,27	V
Jumlah lilitan, N_l	600	540	lilit

Parameter elektrikal yang lain, yakni resistansi, reaktansi dan rugi-rugi daya yang dihitung berdasarkan nilai B_{mg} , d_w dan N_l yang telah divalidasi, hasilnya diperlihatkan dalam Tabel 3.

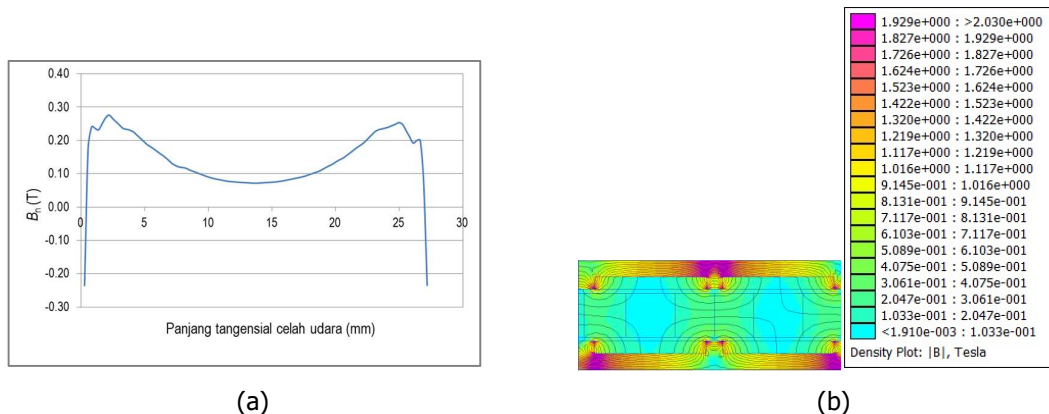
Tabel 3. Hasil Perhitungan Resistansi, Reaktansi dan Rugi Daya

Parameter, simbol	Nilai	Satuan
Resistansi stator, R_1	$0,3 \times 10^{-3}$	Ω
Reaktansi stator, X_1	0,333	Ω
Reaktansi bersama sumbu d, X_{ad}	0,171	Ω
Reaktansi bersama sumbu q, X_{aq}	0,077	Ω
Reaktansi sinkron sumbu d, X_{sd}	0,504	Ω
Reaktansi sinkron sumbu q, X_{sq}	0,410	Ω
Rugi tembaga, P_{cu}	$2,9 \times 10^{-3}$	W
Rugi inti, P_c	120,59	W
Rugi hambatan angin, P_{wd}	$7,9 \times 10^{-3}$	W
Rugi gesekan bantalan poros, P_{fric}	4,35	W

Rugi gesekan bantalan poros dihitung dengan asumsi berat poros sama dengan 10% berat piringan.

3.2 Hasil Simulasi Fluks Magnetik

Simulasi magnetik dilakukan pada $I_a = 3,14$ A, hasilnya diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil Simulasi Fluks Magnet (a) Kerapatan Fluks Magnet di Celah Udara (b) Distribusi Fluks Magnet pada Stator dan Rotor

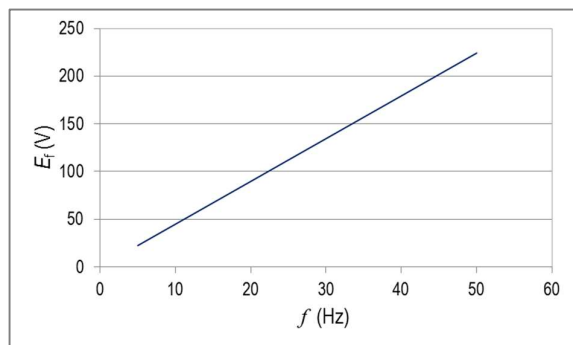
Kerapatan fluks magnet hanya dapat diperoleh dari satu sisi celah udara. Amplitudo maksimum terjadi ketika fluks magnet rotor berada di tengah kutub stator (Gambar 6(a)). Dari simulasi ini didapat nilai rata-rata kerapatan fluks celah udara komponen normal $B_n = 0,1466$ T. Mengacu pada Persamaan (2), $B_n = B_{ata}$, sehingga B_{mg} validasi = 2 sisi celah udara $\times B_n / \alpha_1 =$

0,3421 T. Dibandingkan dengan nilai awal $B_{mg} = 0,3106$ T, terdapat perbedaan sekitar 9,2%. Agar tegangan tetap mendekati 220 V, nilai N_1 dikoreksi dan diperoleh angka yang paling optimum adalah 540 lilit. Hasil akhir untuk V sedikit lebih tinggi dibanding V_{awal} (Tabel 2).

Gambar 6(b) memperlihatkan distribusi fluks magnet pada stator dan rotor dengan pola yang teratur. Kerapatan fluks magnet maksimum pada rotor sebesar 1,929 T masih berada di bawah tingkat kejenuhan magnetik baja karbon 1117.

3.3 Hasil Simulasi Karakteristik GMPFA

Performa GMPFA tanpa beban ($V = 0$) digambarkan dalam bentuk Grafik E_f sebagai fungsi frekuensi f (Gambar 7). Dalam kondisi ini, tegangan yang dibangkitkan generator adalah tegangan induksi E_f yang memiliki hubungan proporsional terhadap f .



Gambar 7. Karakteristik Generator tanpa Beban

Karakteristik berbeban diperoleh dengan memberikan beban R_L dan Z_L pada generator. Pada beban Z_L , nilai R_L yang diberikan sama dengan ketika diberi beban R_L murni sedangkan nilai induktansi L dinaikkan secara bertahap. Pengaruh pembebanan terhadap V , P_o serta η ditampilkan dalam Tabel 4 dan 5.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Parameter Elektrikal pada Variasi Beban R_L

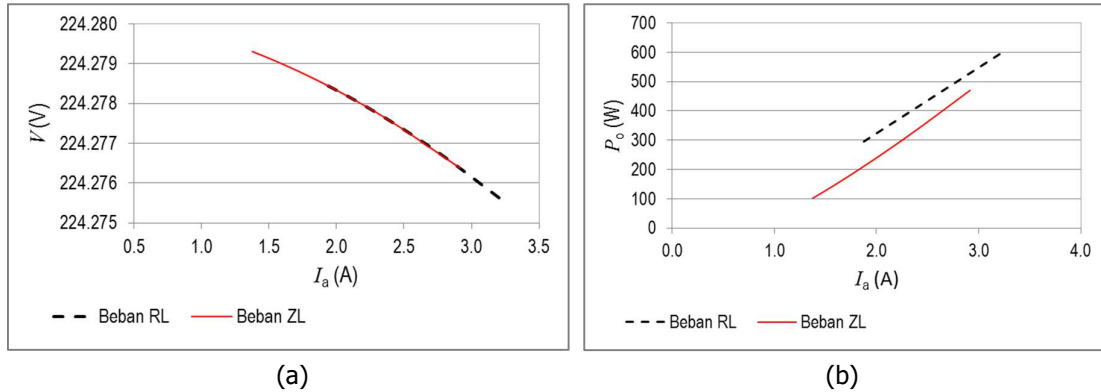
R_L (Ω)	I_{ad} (A)	I_{aq} (A)	I_a (A)	V (V)	P_{elm} (W)	P_o (W)	η (%)
70	0.02	3.20	3.20	224.276	718.56	593.61	82.61
80	0.01	2.80	2.80	224.277	628.75	503.79	80.13
90	0.01	2.49	2.49	224.277	558.89	433.94	77.64
100	0.01	2.24	2.24	224.278	503.01	378.05	75.16
110	0.01	2.04	2.04	224.278	457.28	332.32	72.67
120	0.01	1.87	1.87	224.279	419.17	294.22	70.19

Tabel 5. Hasil Perhitungan Parameter Elektrikal pada Variasi Beban Z_L

R_L (Ω)	L (H)	X_L (Ω)	Z_L (Ω)	I_{ad} (A)	I_{aq} (A)	I_a (A)	V (V)	$\cos \psi$	P_{elm} (W)	P_o (W)	η (%)
70	0.1	31.42	76.73	1.21	2.65	2.92	224.276	0.910	595.20	470.24	79.01
80	0.2	47.12	92.85	1.23	2.07	2.41	224.278	0.860	464.47	339.51	73.10
90	0.3	62.83	109.76	1.17	1.67	2.04	224.278	0.818	373.98	249.02	66.59
100	0.4	78.54	127.16	1.09	1.38	1.76	224.279	0.785	309.73	184.77	59.66
110	0.5	94.25	144.85	1.01	1.17	1.54	224.279	0.758	262.62	137.67	52.42
120	0.6	109.96	162.76	0.93	1.01	1.38	224.279	0.736	227.00	102.05	44.95

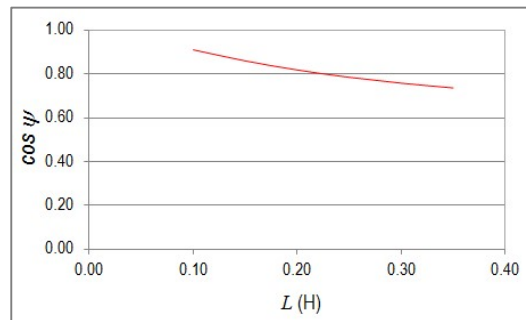
Agar hubungan antara parameter yang dianalisis dapat dilihat dengan lebih jelas maka hasil perhitungan dalam Tabel 4 dan 5 disajikan kembali dalam bentuk grafik pada Gambar 8-10.

Gambar 8(a) memperlihatkan sebagian grafik V beban R_L dan Z_L saling berimpit. Namun beban R_L mengalirkan I_a sedikit lebih tinggi dibanding beban Z_L menyebabkan tegangan jatuh yang merupakan fungsi dari I_a , R_L , X_{sd} dan X_{sq} dalam Persamaan (24) menjadi lebih tinggi akibatnya tegangan terminalnya menjadi lebih rendah. Namun pada beban R_L , $I_{aq} = I_a$, menghasilkan faktor daya $\cos \psi = 1$. Dengan faktor daya yang lebih tinggi, daya keluaran P_o pada beban R_L juga lebih tinggi (Gambar 8(b)).



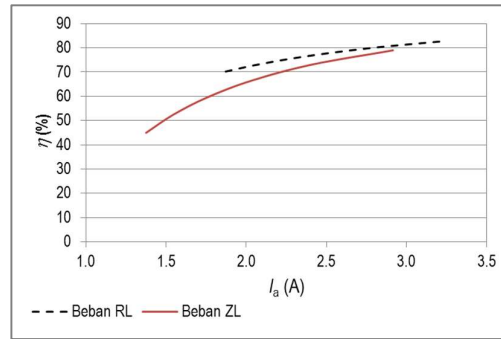
Gambar 8. Karakteristik GMPFA pada Beban R_L dan Z_L , (a) Tegangan Terminal V , (b) Daya Keluaran P_o

Gambar 9 menjelaskan pengaruh penambahan beban induktansi pada pada beban Z_L terhadap faktor daya dan memperlihatkan hubungan terbalik antara kedua parameter tersebut.



Gambar 9. Faktor Daya $\cos \psi$ Fungsi L

Dengan faktor daya yang lebih baik, generator dengan beban R_L menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibanding dengan beban Z_L seperti diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Efisiensi η Pada Beban R_L dan Z_L

Pada kedua jenis pembebanan, efisiensi generator makin tinggi ketika arus beban mendekati arus nominal. Kurva efisiensi pada beban R_L lebih landai disebabkan faktor dayanya konstan = 1. Sementara itu, kurva efisiensi dengan beban Z_L memperlihatkan penurunan yang lebih curam ketika arus beban semakin menjauhi arus nominal atau ketika beban semakin induktif. Efisiensi maksimum hasil simulasi pada beban R_L dan Z_L masing-masing adalah 82.61% dan 79.01%.

4. KESIMPULAN

Dalam makalah ini telah dibahas desain dan simulasi generator magnet permanen fluks aksial berbasis dimensi magnet permanen komersil. Generator memiliki konstruksi stator tunggal tanpa inti besi lunak dan rotor ganda dari bahan magnetik lunak baja karbon. Spesifikasi generator adalah 500 W, 220 V, 500 rpm, 1 fasa. Studi dimaksudkan untuk mengetahui performa generator ketika diberi beban R_L dan Z_L . Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada beban R_L , generator menghasilkan daya keluaran dan efisiensi yang lebih tinggi dibanding pada beban Z_L , masing-masing besarnya adalah 593.61 W dan 82.61%. Sementara itu grafik karakteristik tegangan terminal pada kedua jenis beban tersebut sebagian berimpit tetapi pada beban R_L tingkat penurunannya lebih besar karena tegangan jatuhnya lebih tinggi. Dari semua hasil perhitungan dan simulasi dapat disimpulkan bahwa performa generator cukup baik dengan efisiensi sekitar 80% pada kedua jenis pembebanan.

DAFTAR RUJUKAN

- Boldea, I. (2006). *Synchronous Generator*. USA: CRC Press.
- Dalcali, A., & Akbaba, M. (2017). Optimum Pole Arc Offset in Permanent Magnet Synchronous Generators for Obtaining Lowest Voltage Harmonics. *Scientia Iranica D*, 24(6), 3223-3230.
- Dewata, A., Bakar, A. S. A., & Dwicahyo, K. (2015). Pemanfaatan WRF-ARW untuk Simulasi Potensi Angin Sebagai Sumber Energi di Teluk Bone. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 5(2), 17 – 23.
- Dida, H. P., Suparman, S., & Widhiyanuriyawan, D. (2016). Pemetaan Potensi Energi Angin di Perairan Indonesia Berdasarkan Data Satelit QuikScat dan WindSat. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(2), 95-101.

- Gieras, J. F. (2010). *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Application* (Third ed.). US: CRC Press.
- Gieras, J. F., Wang, R.-J., & Kamper, M. J. (2008). *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines* (2nd ed.). Berlin: Springer.
- Irasari, P., Alam, H. S., & Kasim, M. (2013). Analytical Design Method of 3 KW, 200 rpm Permanent Magnet Generator for Renewable Energy Power Plant. *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, 2(1), 55-66.
- Kasim, M., Irasari, P., & Hikmawan, M. F. (2016). Design, Simulation and Analysis of 3 kW Low Speed Axial Flux Permanent Magnet Generator. *AIP Conference*, (pp. 050004-1 - 050004-11)
- Kasim, M., Irasari, P., Hikmawan, M. F., Widiyanto, P., & Wirtayasa, K. (2016). Effect of Air Gap Variation on the Performance of Single Stator Single Rotor Axial Flux Permanent Magnet Generator. *ICMSC*, (pp. 060001-1 - 060001-9)
- Nakhoda, Y. I., & Saleh, C. (2016). Rancang Bangun Generator Magnet Permanen untuk Pembangkit Tenaga Listrik Skala Kecil Menggunakan Kincir Angin Savonius Portabel. *Jurnal SETRUM*, 5(2), 71-76.
- Robiansyah, M. R. (2017). Perancangan Kontroler untuk Turbin Angin Skala Kecil. *Seminar Nasional Teknoka*, (pp. E6 - E15).
- Tumanski, S. (2011). *Handbook of Magnetic Measurements (Series in Sensors)* (1 ed.). Florida: CRC Press.
- Wijaya, F. D., W, Y. S., & Nugroho, R. A. (2014). Perancangan Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Putaran Rendah. *Annual Engineering Seminar*, (pp. B-21 - B-26).
- Wirtayasa, K., Irasari, P., Kasim, M., Widiyanto, P., & Hikmawan, M. (2017). Design of An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator (AFPMG) 1 kW, 220 Volt, 300 rpm, 1 Phase for Pico Hydro Power Plants. *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*, (pp. 172 - 179)