



MAGNETIC SIMULATION AND ANALYSIS OF RADIAL FLUX PERMANENT MAGNET GENERATOR USING FINITE ELEMENT METHOD

SIMULASI DAN ANALISIS MAGNETIK GENERATOR MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL MENGGUNAKAN METODA ELEMEN HINGGA

Pudji Irasari^a, Hilman Syaeful Alam^b, Muhammad Kasim^{a,*}

^a Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik - LIPI

Kompleks LIPI Jl Sangkuriang, Gd 20, Lt 2, Bandung, Jawa Barat 40135, Indonesia

^b UPT Balai Pengembangan Instrumentasi - LIPI

Kompleks LIPI Jl Sangkuriang, Gd 30, Bandung, Jawa Barat 40135, Indonesia

Received 10 May 2012; received in revised form 14 June 2012; accepted 15 June 2012

Published online 31 July 2012

Abstract

This paper discusses magnetic simulation and analysis of radial flux permanent magnet generator (PMG) using finite element method (FEM) by utilizing open source software FEMM 4.2. The specification of generator is 25 V, 28 A, 3 phase, 300 rpm. The analyzed magnetic flux was in the air gap, stator teeth and slots to find out the distribusion pattern and its fluctuation. The simulations were conducted in no-load and nominal load (28 A) conditions. Furthermore, the maximum flux density of simulation ($B_{g(sim)}$) was used to calculate phase voltage E_{ph} to find out the magnitude of generated electromotive force (EMF). The calculation results were presented as voltage vs. rotation graph in no-load condition and voltage vs. current graph in nominal load condition. Both graphs were validated using E_{ph} from experiment result ($E_{ph(exp)}$) and E_{ph} whose B_g value was obtained from analytical calculation ($E_{ph(calc)}$). The final results showed that in no-load condition, E_{ph} graph with $B_{g(sim)}$ ($E_{ph(sim)}$) was close to $E_{ph(exp)}$ and $E_{ph(calc)}$. The error rate with respect to the experiment was 6,9%. In nominal load condition, $E_{ph(sim)}$ graph almost coincided with $E_{ph(calc)}$ graph, with the voltage drop of both was 0.441 V. Both graphs however were far different from $E_{ph(exp)}$ graph, which had 9 V of voltage drop. The overall results demonstrated that magnetic distribution pattern presented by FEM was very helpful to avoid magnetic flux accumulation in a particular segment. Besides, $B_{g(sim)}$ made the process to predict the value of E_{ph} become easier.

Key words: simulation, magnetic flux, generator, permanent magnet, finite element .

Abstrak

Dalam makalah ini dibahas simulasi dan analisis magnetik generator magnet permanen (GMP) fluks radial menggunakan metoda elemen hingga (MEH) dengan perangkat lunak terbuka FEMM 4.2. Generator memiliki spesifikasi 25 V, 28 A, 3 fasa, 333 rpm. Fluks magnet yang dianalisis adalah pada celah udara, gigi dan alur stator untuk mengetahui pola distribusi dan fluktuasinya. Simulasi dilakukan dalam keadaan tanpa beban dan dengan beban nominal (28 A). Selanjutnya kerapatan fluks celah udara maksimum hasil simulasi ($B_{g(sim)}$) digunakan untuk menghitung tegangan fasa E_{ph} guna mengetahui besarnya electromotive force (EMF) yang dibangkitkan. Hasil perhitungan ditampilkan berupa grafik tegangan vs. putaran untuk kondisi tanpa beban dan grafik tegangan vs. arus untuk kondisi beban nominal. Kedua grafik tersebut divalidasi dengan E_{ph} hasil eksperimen ($E_{ph(exp)}$) dan E_{ph} yang nilai B_g nya diperoleh dari perhitungan analisis ($E_{ph(calc)}$). Hasil akhir menunjukkan bahwa dalam kondisi tanpa beban grafik E_{ph} dengan $B_{g(sim)}$ ($E_{ph(sim)}$) mendekati $E_{ph(exp)}$ maupun $E_{ph(calc)}$. Tingkat kesalahan terhadap eksperimen sebesar 6,9%. Untuk kondisi beban nominal, grafik $E_{ph(sim)}$ hampir berimpit dengan $E_{ph(calc)}$, dengan tegangan jatuh keduanya sebesar 0,441 V. Namun kedua grafik tersebut berbeda cukup jauh dengan grafik $E_{ph(exp)}$ yang tegangan jatuhnya 9 V. Dari keseluruhan hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pola distribusi magnet yang disajikan oleh MEH sangat membantu untuk menghindari penumpukan fluks magnet pada segmen tertentu. Selain itu $B_{g(sim)}$ sangat memudahkan dalam memprediksi besarnya E_{ph} .

Kata kunci: simulasi, fluks magnet, generator, magnet permanen, elemen hingga.

* Corresponding Author. Tel: +62-22-2503055

E-mail: kasime99uh@yahoo.co.id

I. PENDAHULUAN

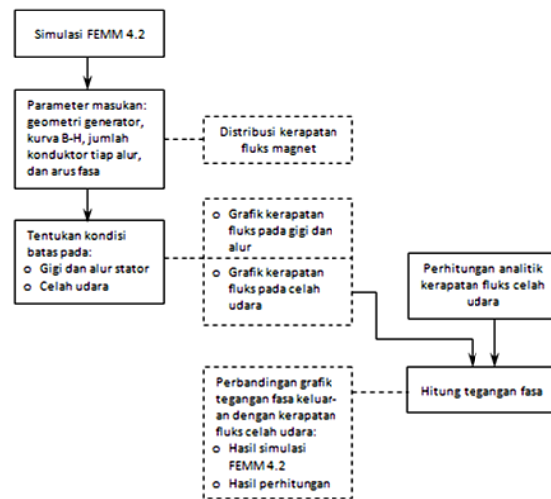
Analisis medan magnet dalam suatu mesin listrik dapat dilakukan secara analisis ataupun numerik. Metoda analisis biasanya dilakukan dalam dua tahap, yang pertama arah medan di setiap titik dalam mesin diasumsikan terlebih dahulu sehingga dapat diperoleh sebuah rangkaian magnetik. Selanjutnya pada tahap kedua rangkaian tersebut dianalisis dengan cara yang sama seperti analisis rangkaian listrik. Metoda analisis dianggap lebih fleksibel sebagai *design tool* untuk memprediksi unjuk kerja mesin sedangkan dalam metoda numerik atau MEH, komponen mesin yang dianalisis dibagi menjadi elemen-elemen kecil (diskrit) dan besarnya medan magnet dapat diketahui pada setiap elemen tersebut. Dibandingkan metoda analisis, metoda numerik dapat memberikan hasil yang lebih akurat apabila pembagian elemen dapat dibuat sekecil mungkin tetapi metoda ini memerlukan waktu yang lebih lama [1, 2].

Analisis medan magnet perlu dilakukan untuk mencegah terjadinya saturasi medan magnet dalam laminasi inti yang dapat mengakibatkan munculnya konsentrasi panas [3]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Ghita *et.al* [4] MEH diaplikasikan untuk optimasi geometri GMP. Dimensi magnet dan bukaan alur rotor merupakan variabel yang diolah untuk memperoleh fluks magnet maksimum sementara dimensi statornya konstan. Guo, Y. *et.al* [5] menentukan parameter kunci generator sinkron magnet permanen 500 watt menggunakan MEH. Parameter-parameter tersebut adalah fluks lilitan, *back electromotive force* dan induktansi. Validasi dengan eksperimen menunjukkan bahwa parameter hasil simulasi memberikan nilai yang akurat (sama dengan hasil eksperimen).

Dalam makalah ini analisis medan magnet akan dilakukan secara numerik menggunakan software FEMM 4.2. Kerapatan fluks yang dianalisis adalah pada gigi stator dan celah udara yang merupakan tempat-tempat kritis terjadinya konsentrasi fluks, pola distribusi dan fluktuasi fluks magnet dalam GMP serta pengaruhnya terhadap pembangkitan *electromotive force* (EMF) baik dalam kondisi tanpa beban maupun dengan beban nominal.

II. METODOLOGI

Analisis medan magnet dilakukan menggunakan *open source software* FEMM 4.2. Metodologi penelitian ini seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Kotak dengan garis tanpa putus merupakan proses sedangkan yang bergaris putus-putus adalah hasil simulasi/perhitungan. Hasil simulasi pertama berupa distribusi medan



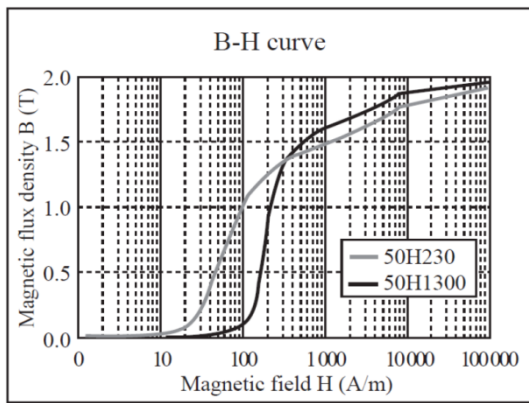
Gambar 1. Blok diagram langkah-langkah analisis medan magnet menggunakan FEMM 4.2.

magnet yang ditampilkan pada penampang melintang generator. Sedangkan hasil simulasi kedua adalah grafik fluktuasi kerapatan fluks pada gigi dan alur dan hasil simulasi ketiga adalah grafik fluktuasi kerapatan fluks di celah udara. Semua simulasi dilakukan dalam kondisi tanpa beban dan beban nominal.

Dari grafik ketiga (kerapatan fluks celah udara) diambil nilai maksimumnya kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan tegangan fasa untuk mendapatkan grafik tegangan fasa keluaran dalam kondisi tanpa beban dan beban nominal. Kedua grafik tersebut selanjutnya divalidasi dengan perhitungan analisis dan eksperimen.

A. Material Laminasi Inti

Material laminasi inti biasa disebut dengan *soft magnet* karena material ini menunjukkan karakteristik magnetnya hanya apabila dikenai gaya magnet misalnya medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen atau arus yang melintasi kumparan yang mengelilingi laminasi inti tersebut [6]. Material laminasi yang paling banyak digunakan dalam mesin listrik putar adalah *silicon steel* (baja silikon) jenis *grain-non-oriented*. Keberadaan silikon dalam baja dapat meningkatkan *volume resistivity* untuk menurunkan arus Eddy dan mengurangi histerisis. Kandungan silikon dalam baja silikon kira-kira 0,5% – 3,25% [7]. Laminasi inti yang digunakan dalam prototip GMP adalah dari Nippon Steel dengan tebal 5 mm, tipe 50H1300. Karakteristik magnetik dari laminasi inti diperlihatkan pada Gambar 2 dimana fluks yang mengalir harus dijaga agar tidak mencapai titik saturasi (kira-kira 2 T). Apabila nilai tersebut dilampaui, maka arus magnetisasi akan menyimpang dari bentuk sinusoida dan mengandung harmonik [9].



Gambar 2. Kurva magnetik laminasi inti yang digunakan dalam GMP (50H1300) [8].

B. Magnet Permanen

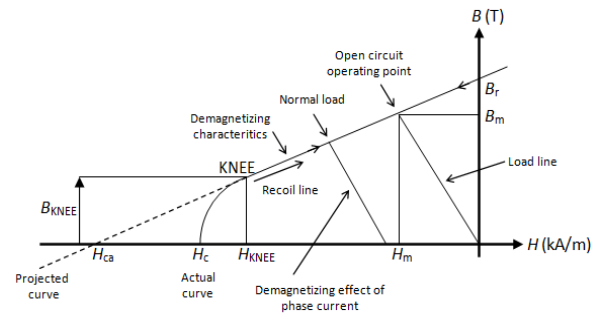
Magnet permanen yang digunakan adalah NdFeB tipe N35 dengan karakteristik teknis dari pabrikan diperlihatkan pada Tabel 1. Karakteristik magnet yang diberikan oleh pabrikan (Tabel 1) merupakan parameter masukan simulasi distribusi medan magnet. Di antara dua parameter H_c hanya salah satu yang akan dipilih. Untuk menentukan yang mana parameter tersebut, digunakan bantuan kurva B-H yang memperlihatkan kurva demagnetisasi magnet permanen (Gambar 3).

Pada umumnya titik operasi magnet dapat bergerak naik turun sepanjang garis lurus yang disebut dengan *demagnetizing characteristic* dan kemiringannya adalah *recoil permeability*. Tanpa adanya arus fasa yang mengalir dalam lilitan, titik operasi magnet berada pada *open-circuit operating point*. Garis dari titik pusat menuju *open-circuit operating point* disebut *load line*.

Apabila ada arus yang mengalir dalam lilitan stator, medan magnet yang dibangkitkan oleh lilitan akan mendorong titik operasi menuruni lintasan karakteristik *demagnetization*, menekan kerapatan fluks celah udara sehingga besarnya kerapatan fluks celah udara turun di bawah *open-circuit operating point* atau nilai tanpa beban. Apabila arus dihilangkan, titik operasi akan kembali menuju ke *open circuit point*. Garis lurus yang menjadi lintasan operasi magnet disebut *recoil line*. Perpotongan antara *recoil line* dengan sumbu H negatif diberi label H_{ca} , yaitu *apparent coercivity*, yang digunakan untuk perhitungan

Tabel 1
Karakteristik magnet N35 [10].

Parameter, simbol	Besaran	Satuan
• Kerapatan fluks remanensi, B_r	1220	mT
• Coercive force, H_c		
○ H_{cb}	868	kA/m
○ H_{cj}	955	kA/m
• Produk $BH_{(maks.)}$	36	MGOe



Gambar 3. Diagram skematik karakteristik B-H material magnet permanen [11].

rangkaian magnetik. Sedangkan H_c adalah *actual coercivity* [11]. Untuk simulasi distribusi medan magnet dalam penelitian ini, nilai H_c yang diambil adalah H_{cb} (Tabel 1) yang dalam Gambar 2 identik dengan H_{ca} . Sedangkan fluks remanensi B_r adalah kerapatan fluks maksimum yang dapat disimpan oleh magnet setelah menjalani proses magnetisasi hingga mencapai saturasi [12]. Dimensi magnet adalah panjang \times lebar \times tebal ($50,8 \times 16 \times 12$) dalam satuan mm.

1) *Perhitungan medan magnet dengan metoda elemen hingga*

Dalam kasus mesin-mesin listrik yang menggunakan laminasi inti dan memiliki frekuensi operasi yang relatif rendah maka arus eddy dalam laminasi inti dan perubahan kerapatan arusnya dapat diabaikan sehingga persamaan medan magnetostatiknya dapat diturunkan [13]. Menurut hukum ampere dan persamaan Maxwell, besarnya medan magnet dihitung menggunakan kerapatan arus sebagai masukan adalah [2]:

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2}$$

Dimana $H(x,y,z)$ = medan magnet dalam ampere per meter, $B(x,y,z)$ = kerapatan fluks magnet dalam Tesla dan $J(x,y,z)$ = kerapatan arus dalam ampere per meter. Hubungan antara kerapatan fluks magnet dan medan magnet dinyatakan dengan persamaan:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \nabla \times A \tag{3}$$

dimana $\mu_r(x,y,z)$ = permeabilitas relatif dan μ_0 = permeabilitas udara = $4\pi 10^{-7}$. Untuk kasus dua dimensi (bidang datar):

$$J = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ j(x,y) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x,y) \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ -\frac{\partial A_z}{\partial x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2) Kerapatan fluks celah udara

Perhitungan kerapatan fluks celah udara digunakan sebagai validasi metoda elemen hingga untuk mendapatkan tegangan fasa baik dalam kondisi berbeban maupun tanpa beban. Kerapatan fluks celah udara sangat dipengaruhi oleh dimensi stator dan magnet permanen. Dalam rancangan ini stator diadopsi dari salah satu stator motor induksi standar yang ada di pasaran. Besarnya kerapatan fluks celah udara $B_{g(\text{calc.})}$ dihitung dengan persamaan (7-13) [2] [14]:

$$B_{g(\text{calc.})} = \frac{C_\phi}{1 + \frac{\mu_r k_c k_{ml}}{PC}} B_r \quad (7)$$

Carter coefficient k_c ,

$$k_c = \left[1 - \frac{W_{ss}}{\tau_s} + \frac{4l'_g}{\pi\tau_s} \ln \left(1 + \frac{W_{ss}\pi}{4l'_g} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

$$l'_g = l_g + l_m / \mu_r \quad (9)$$

Leakage coefficient k_{ml} ,

$$k_{ml} = 1 + \frac{4l_m}{\pi\mu_r\alpha_m\tau_p} \ln \left[1 + \pi \frac{l_g}{(1-\alpha_m)\tau_p} \right] \quad (10)$$

Permeance coefficient PC ,

$$PC = \frac{l_m}{l_g \cdot C_\phi} \quad (11)$$

Flux concentration factor C_ϕ ,

$$C_\phi = \frac{2\alpha_m}{1+\alpha_m} \quad (12)$$

$$\alpha_m = \frac{\tau_m}{\tau_p} \quad (13)$$

Parameter untuk menghitung kerapatan fluks celah udara ditampilkan pada Tabel 2.

3) Electromotive force (EMF)

Besarnya kerapatan fluks magnet celah udara B_g berpengaruh langsung pada besarnya EMF yang dibangkitkan, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan (14-16):

Tabel 2

Parameter menghitung B_g .

Parameter, simbol	Besaran	Satuan
Kerapatan fluks remanensi, B_r	1,2	T
Permeabilitas relatif magnet, μ_r	1,1	
Lebar alur stator, W_{ss}	0,00534	m
Kisar alur stator, τ_s	0,00859	m
Panjang radial celah udara, l_g	0,001	m
Panjang radial magnet l_m	0,012	m
Kisar kutub stator, τ_p	0,02576	m
Busur magnet, τ_m	0,01603	m

$$E_{ph} = 4,44fN_{ph}k_wk_s\phi \quad (14)$$

$$\phi = \text{fluks magnet} = B_g A_m \quad (15)$$

$$f = \text{frekuensi} = \frac{n \cdot p}{120} \quad (16)$$

dimana E_{ph} = tegangan fasa (volt), k_w = faktor lilit = 1 (lilitan kisar penuh), k_s = faktor kemiringan = 0,984, A_m = luas permukaan magnet = $1,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, p = jumlah kutub = 18, n = putaran (rpm), N_{ph} = jumlah lilitan fasa = 90. Nilai B_g yang akan digunakan untuk menghitung Persamaan (15) adalah $B_{g(\text{calc.})}$ dan B_g hasil simulasi atau $B_{g(\text{sim.})}$. Untuk kondisi berbeban, besarnya tegangan fasa keluaran dihitung pada kondisi nominal menggunakan persamaan [15]:

$$V_1 = \sqrt{E_{ph}^2 - I_{ph}^2(\omega L \cos \varphi - R \sin \varphi)^2} - I_{ph}(\omega L \sin \varphi + R \cos \varphi) \quad (17)$$

dengan $L = 4,19 \text{ mH}$ dan $R = R_g + R_L = 0,1 + 0,029 = 0,129 \text{ } \Omega$, masing-masing adalah resistansi lilitan dan resistansi beban.

C. Tahapan Simulasi

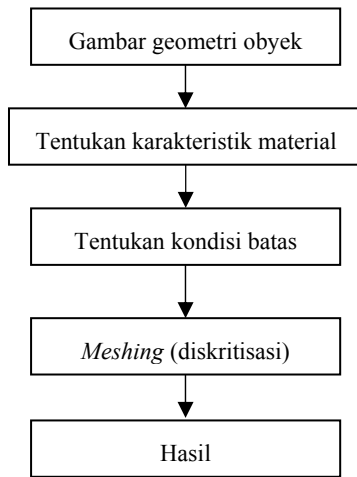
Distribusi fluks magnet dalam penelitian ini disimulasikan menggunakan software FEMM 4.2 dimana basis perhitungannya menggunakan persamaan Maxwell. Langkah-langkah umum simulasi diperlihatkan pada Gambar 4. Setiap langkah yang ditampilkan dalam Gambar 4 (langkah 1 s.d 4) merupakan parameter masukan yang harus dipenuhi sebelum eksekusi simulasi dilakukan.

Karakteristik material yang diperlukan ditampilkan dalam Tabel 3. Pada tahap *meshing*, obyek yang diamati dibagi menjadi elemen-elemen kecil berbentuk segitiga. Kecepatan eksekusi simulasi sangat dipengaruhi oleh spesifikasi komputer yang digunakan. Dalam penelitian ini waktu simulasi tergolong cepat karena objek yang diamati hanya dalam bentuk dua dimensi.

Tabel 3

Parameter masukan simulasi magnetik menggunakan FEMM 4.2.

Komponen	Keterangan
<i>Laminasi inti</i>	
• Kurva BH magnetik	Dipetakan dari Gambar 1
• Permeabilitas relatif, μ_r	4000 [2]
<i>Magnet permanen</i>	
• Permeabilitas relatif, μ_r	1,1 [11]
• Gaya koersif, H_c	868 kA/m [10]
<i>Lilitan</i>	
• Jumlah lilitan fasa, N_{ph}	90 lilit
• Kerapatan arus, J	5 A/mm ²

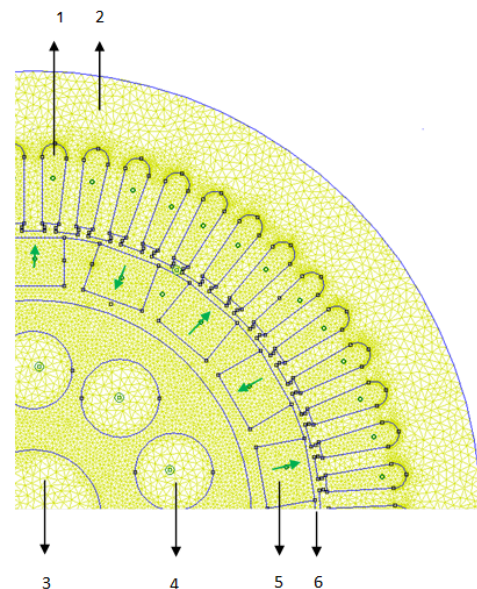


Gambar 4. Langkah-langkah utama simulasi distribusi medan magnet menggunakan FEMM 4.2.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pendefinisian jenis material GMP, arah magnetisasi dan hasil *meshing* diperlihatkan pada Gambar 5. Kutub magnet utara-selatan digambarkan dengan anak panah arah radial ke sisi luar dan sisi dalam. Tiga buah lingkaran kecil di bagian tengah adalah lubang udara yang sekaligus berfungsi sebagai *cooling system*. Jumlah konduktor per alur adalah 10 dengan diameter 1,0 mm. *Meshing* dengan elemen terkecil 1 mm menghasilkan 43.424 *nodes* dan 86.517 *elements*. Total waktu eksekusi simulasi yang diperlukan kira-kira 33 detik. Hasil simulasi distribusi medan magnet tanpa beban dan dengan beban nominal 28 ampere diperlihatkan pada Gambar 6.

Besarnya kerapatan fluks maksimum tanpa beban yang tertulis dalam kotak data adalah 2,172 Tesla. Nilai tersebut turun menjadi 2,161 Tesla pada kondisi beban nominal karena adanya fluks magnet lawan yang dibangkitkan oleh lilitan. Pola distribusi menunjukkan bahwa rapat fluks yang tinggi terdapat pada gigi stator dan area tepat di bawah magnet permanen. Namun demikian masih sulit untuk memastikan besarnya kerapatan fluks pada titik atau posisi tersebut.



Keterangan:

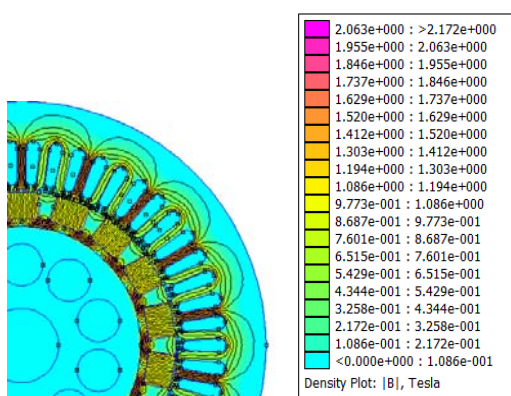
- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. Alur (terisi lilitan) | 4. Lubang udara rotor |
| 2. Stator | 5. Magnet permanen |
| 3. Poros | 6. Celah udara |

Gambar 5. Pendefinisian material dan *meshing* struktur GMP.

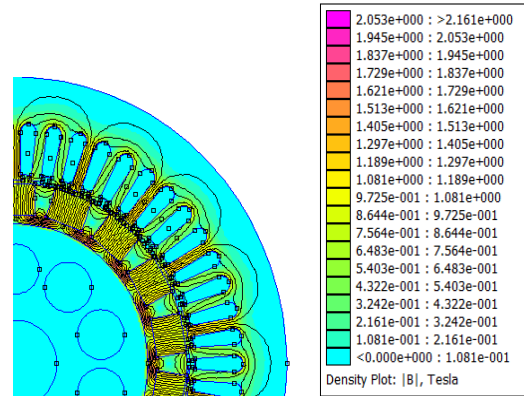
Informasi utama dari Gambar 6 adalah bahwa pola distribusi tidak menunjukkan adanya penumpukan fluks magnet pada area tertentu yang dapat menimbulkan konsentrasi panas.

Untuk mendapatkan nilai rapat fluks pada alur dan gigi stator yang lebih terukur maka ditentukan *boundary condition* (kondisi batas) sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7. Kondisi batas dibuat agak panjang hingga mencakup beberapa alur dan gigi. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui fluktuasi rapat fluks pada kedua area tersebut dan hasil simulasinya diperlihatkan pada Gambar 8.

Gambar 8(a) menunjukkan bahwa rapat fluks tertinggi tanpa beban kira-kira 1,65 T terjadi pada gigi stator kemudian turun hingga hampir nol di dalam alur dan naik lagi kira-kira 0,6 T pada dua gigi stator berikutnya. Pola tersebut dapat dibandingkan dengan Gambar 6. Rapat fluks

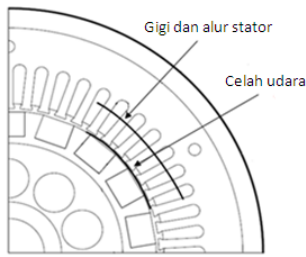


(a)



(b)

Gambar 6. Distribusi medan magnet; (a) tanpa beban; (b) beban nominal.

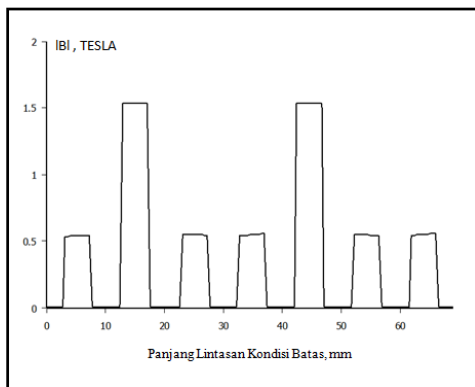


Gambar 7. Kondisi batas pada celah udara dan gigi stator.

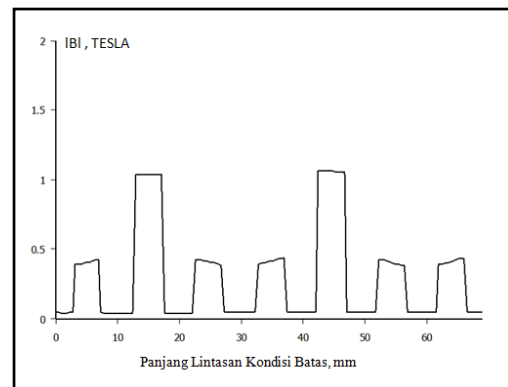
maksimum terjadi saat gigi tepat menghadap bagian tengah kutub magnet. Saat diberi beban nominal, rapat fluks maksimum turun menjadi kira-kira 1,25 T. Meskipun material inti mampu dialiri fluks magnet dengan kerapatan hingga 2 T (Gambar 2) namun dalam perancangan, nilainya dibatasi hingga 1,7 T (pada gigi stator) untuk menekan besarnya rugi inti [3]. Pola rapat fluks celah udara diambil dengan menentukan kondisi batas sepanjang kira-kira 50 mm (Gambar 7). Hasil simulasi fluktuasi rapat fluks celah udara diperlihatkan pada Gambar 9. Fluks celah udara merupakan mutual fluks yang dibangkitkan oleh magnet permanen dan lilitan dalam alur. Rapat fluks maksimum hasil simulasi ($B_{g(sim)}$) tanpa beban besarnya kira-kira 0,94 T, terjadi ketika posisi magnet tepat di tengah gigi stator. Adanya dua puncak lain dalam satu gelombang (di sisi kiri dan kanan puncak maksimum) sebagai akibat dari efek *slotting* [16]. Fluks minimum terjadi

tepat di tengah bukaan alur stator karena permeabilitas udara ($4\pi 10^{-7}$) lebih kecil dibanding permeabilitas laminasi inti (4000) (Persamaan 3).

$B_{g(sim)}$ selanjutnya disubstitusikan dalam Persamaan (15) untuk mendapatkan tegangan fasa tanpa beban pada berbagai putaran atau frekuensi. Untuk $B_{g(calc)}$ tanpa beban perhitungan analisis nilainya mengacu pada [11] yaitu sebesar 0,7-0,95 B_r . Dengan mempertimbangkan adanya fluks bocor maka yang diambil adalah B_g pada batas terkecil, yaitu 0,7 B_r atau $B_{g(calc)} = 0,84$ T. Nilai tersebut selanjutnya disubstitusikan dalam Persamaan (15). Perbandingan tegangan fasa tanpa beban hasil perhitungan, simulasi dan eksperimen diperlihatkan pada Gambar 10 dimana dapat dilihat bahwa grafik tegangan fasa tanpa beban yang paling mendekati hasil eksperimen adalah hasil perhitungan dengan $B_{g(calc)} = 0,7B_r$. Besarnya kesalahan (*error*) rata-rata untuk masing-masing tegangan fasa adalah: $E_{ph(sim)}$ 6,9% dan $E_{ph(calc)}$ 4,47%. Tegangan fasa berbeban dihitung pada kondisi nominal yaitu pada frekuensi 50 Hz. Besarnya $B_{g(calc)}$ dihitung menggunakan Persamaan (7) diperoleh 0,84 T sedangkan $B_{g(sim)}$ diambil dari Gambar 9(b) adalah 0,83 T. Substitusi masing-masing nilai B_g tersebut ke dalam persamaan (17) kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen diperlihatkan pada Gambar 11.

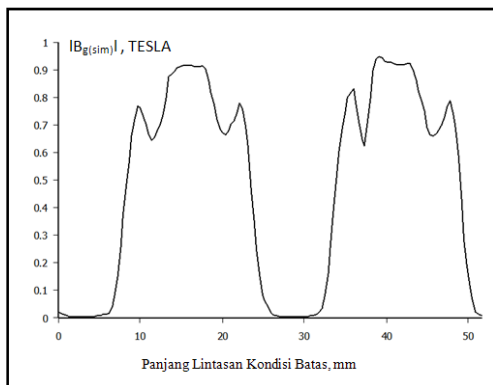


(a)

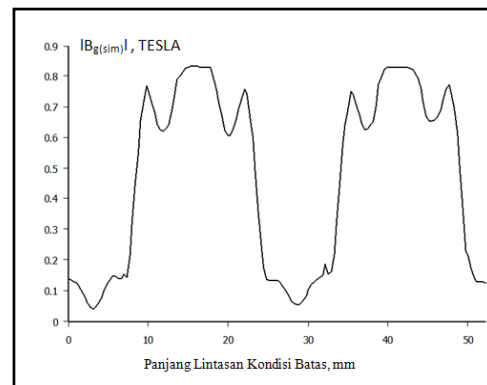


(b)

Gambar 8. Fluktuasi rapat fluks pada alur dan gigi stator; (a) tanpa beban; (b) beban nominal.

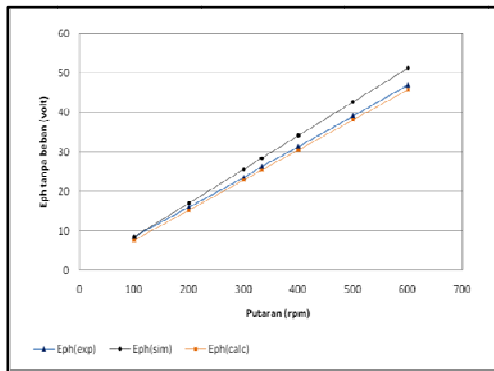


(a)



(b)

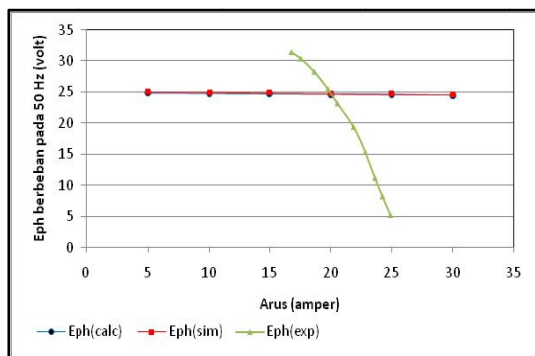
Gambar 9. Hasil simulasi fluktuasi rapat fluks celah udara; (a) tanpa beban; (b) beban nominal.



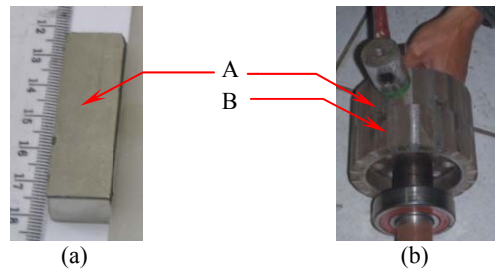
Gambar 10. Perbandingan tegangan fasa tanpa beban hasil simulasi FEMM, perhitungan dan eksperimen.

Dengan nilai $B_{g(calc)}$ dan $B_{g(sim)}$ yang hampir sama maka dapat dilihat pada Gambar 11 bahwa grafik tegangan yang dihasilkan keduanya hampir berimpit. Terjadi perbedaan tegangan jatuh yang cukup besar antara hasil perhitungan dan simulasi apabila dibandingkan dengan eksperimen. Tegangan jatuh $E_{ph(calc)}$ dan $E_{ph(sim)}$ kira-kira 0,441 V sedangkan eksperimen mencapai 9 V. Tegangan jatuh eksperimen yang cukup besar kemungkinan disebabkan oleh kualitas magnet yang sudah menurun, hal ini sekaligus merupakan kelemahan dari penelitian ini. Kondisi magnet permanen pada rotor dibandingkan dengan kondisi magnet yang masih baru dari pabrik diperlihatkan pada Gambar 12.

Dari Gambar 12 dapat dilihat bahwa permukaan magnet yang terpasang pada rotor warnanya tidak mengkilat seperti saat kondisinya masih baru. Lapisan nikelin yang melindungi magnet dari karat hampir seluruhnya telah mengelupas. Hal tersebut dapat terjadi karena: (1) gaya mekanis yang dikenakan langsung terhadap magnet saat pemasangan ke dalam alur rotor, (2) gesekan magnet dengan permukaan bidang saat rotor dilepas untuk kebutuhan penelitian. Selain dua hal tersebut, gaya mekanis tak langsung yang dilakukan saat *assembly* (Gambar 13) juga berkontribusi terhadap turunnya kualitas magnet. Gaya mekanis tak langsung dilakukan saat *assembly* rotor dengan *casing*. Gaya mekanis



Gambar 11. Perbandingan tegangan fasa berbeban pada kondisi nominal hasil simulasi FEMM, perhitungan dan eksperimen.



Keterangan: A = magnet permanen
B = alur rotor

Gambar 12. Kondisi magnet; (a) masih baru dari pabrik; (b) terpasang pada rotor.

secara langsung maupun tak langsung yang sering dilakukan terhadap magnet dapat menyebabkan retak pada bagian luar maupun dalamnya [17] [18]. Kerusakan fisik tersebut dapat menyebabkan terjadinya fluks bocor, yaitu kondisi dimana fluks magnet tidak dapat melintasi celah udara dan berkontribusi dalam konversi energi [19]. Kondisi magnet yang masih baik memperlihatkan penurunan tegangan yang tidak terlalu curam sebagaimana dalam penelitian [5] [20] [21].

IV. KESIMPULAN

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa fluks magnet terdistribusi secara merata atau tidak terjadi konsentrasi fluks pada area tertentu yang dapat menimbulkan *hot spot*. Pada putaran nominal (333 rpm) dan kondisi tanpa beban, perbedaan nilai $E_{ph(calc)}$ dan $E_{ph(sim)}$ terhadap $E_{ph(exp)}$ masing-masing sebesar 4,47% dan 6,9%.

Pada putaran dan beban nominal, grafik tegangan jatuh $E_{ph(exp)}$ menunjukkan kecuraman yang relatif tajam kemungkinan disebabkan oleh demagnetisasi. Simulasi menggunakan FEMM 4.2 memudahkan dalam analisis fluktuasi medan magnet pada tiap segmen, terutama celah udara, serta gigi dan alur stator yang merupakan segmen paling beresiko terjadi penumpukan atau konsentrasi fluks. Namun demikian, FEMM 4.2 masih memiliki kelemahan karena data jenis



Gambar 13. Gaya mekanis tak langsung pada magnet permanen saat *assembly*.

material *silicon steel sheet* tidak tersedia lengkap dalam *software* tersebut sehingga hasil simulasinya masih perlu dibandingkan dengan perhitungan.

Penentuan kondisi batas mutlak diperlukan untuk mendapatkan nilai B yang lebih terukur. Dalam penelitian ini segmen yang B -nya berpengaruh langsung terhadap pembangkitan EMF adalah celah udara (B_g).

REFERENSI

- [1] D. Žarko, T.A. Lipo, D. Ban, "Analytical calculation of magnetic field distribution in the slotted air gap of a surface pm motor using complex relative air gap permeance," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 42, no. 7, pp. 1828-1837, Juli 2006.
- [2] G. Mahalingam, A. Keyhani, "Design of 42v/3000w permanent magnet synchronous generator," Electrical Engineering Department, Ohio State University, Columbus Ohio, Technical Report 2000.
- [3] E.S. Hamdi, *Design of small electrical machine*, D.V. Morgan, Ed. England: John Wiley & Sons, 1994.
- [4] C. Ghita, A.L. Chirila, I.D. Deaconu, D.I. Iliina, "Wind turbine permanent magnet synchronous generator magnetic field study," in *ICREPO*, Santender, 2008.
- [5] Y. Guo, Y. Dou, J. Zhu, Y. Zhan, J. Jin, "Parameter determination and performance analysis of a PM synchronous generator by magnetic field finite element analysis," in *Power Eng. Conf., AUPEC Australasian Universities*, Perth, WA, 2007, pp. 1-4.
- [6] A. Parviainen, "Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines," Lappeenranta University of Technology, Finland, PhD Thesis ISBN 952-214-030-9 (PDF), 2005.
- [7] R.H. Staunton, et al, "PM motor parametric design analyses for a hybrid electric traction drive application," Oak Ridge National Laboratory, Department of Energy, Tennessee, Laporan Penelitian 2004.
- [8] K. Fujisaki, R. Hirayama, Y. Nemoto, "Electromagnetic steel solution in electromagnetic field," Environment & Process Technology Center, Technical Development Bureau, Nippon Steel Corporation, Electrical Steel Sheet, Technical Report 2004.
- [9] P. Irasari, Fitriana, "Pengaruh harmonik terhadap tegangan keluaran prototip generator magnet permanen kecepatan rendah," *Teknologi Indonesia*, vol. 32(1), pp. 1-6, 2009.
- [10] Anonim, "Dimension Inspection Report," Ningbo East Magnet Co.LTD, Ningbo, Inspection Report 2008.
- [11] M.S. Widyan, "Design, optimization, construction and test of rare-earth permanent-magnet electrical machines with new topology for wind energy applications," Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik, Germany: Technischen Universität, Berlin, Ph.D Thesis 2006.
- [12] T.J.E. Miller, *Permanent – Magnet and Reluctance Motor Drives*, T.J.E. Miller, S. Yamamura Hammon P, Ed. New York, USA: Oxford University Press Inc., 1993.
- [13] D. Meeker, *Finite Element Methode Magnetics Version.*, 2008.
- [14] M. Comanescu, A. Keyhani, M. Dai, "design and analysis of 42-V permanent-magnet generator for automotive applications," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 18, no. 1, pp. 107-112, March 2003.
- [15] W. Wu, V.S. Ramsden, T. Crawford, G. Hill, "A Low-Speed, High-Torque, Direct-Drive Permanent Magnet Generator For Wind Turbines," in *Industry Applications Conference IEEE*, 2000, pp. 147-154.
- [16] F. Libert, J. Soulard, "Design study of different direct-driven permanent-magnet motors for a low speed application," in *NORPIE*, Trondheim, Norwegia, Juni 2004, pp. 1-6. [Online]. Available: www.elkraft.ntnu.no/norpie/10956873/Final%20Papers/061%20-%20norpie_061.pdf
- [17] Y. Zhang, K. Sekine, S. Watanabe, "Magnetic leakage field due to sub-surface defects in ferromagnetic specimens," in *NDT & E International*, 1995, pp. 67-71.
- [18] J. Philip, C.B. Rao, T. Jayakumar, B. Raj, "A new optical technique for detection of defects in ferromagnetic materials and components," in *NDT&E International*, 2000, pp. 289-295.
- [19] C. C Hwang, Y. H. Cho, "Effects of leakage flux on magnetic fields of interior permanent magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 4, pp. 3021-3024, Juli 2001.
- [20] L. Cano, L. Arribas, I. Cruz, "1.5 KW permanent magnets synchronous generator experimental bench test," in *EWEC*, London, 2004, pp. 1-9.
- [21] P. Irasari, Fitriana, "Perancangan dan analisa prototip generator magnet permanen radial fluks kecepatan rendah," *Teknologi Indonesia*, vol. 31, no. 2, pp. 75-82, 2008