

Simulasi Medan Magnet Pada Generator Magnet Permanen Menggunakan Metode Elemen Hingga

Dirga Ari Abibintar¹, Warindi², Wahyudi Budi Pramono³

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia
Jl Kaliurang KM 14.5 Yogyakarta, Indonesia

¹12524095@students.uii.ac.id

²085240403@uui.ac.id-³985240104@uui.ac.id

Abstrak— Magnet permanen merupakan pengembangan teknologi yang mendasari penggunaan pada berbagai alat dalam kelistrikan. Perbedaan dasar itu yang meningkatkan tingkat efisiensinya. Diantaranya adalah generator. Generator merupakan dasar dari terciptanya energi listrik maka sebelum dibuat diperlukan suatu simulasi untuk mengukur permasalahan yang akan terjadi. Aliran medan magnet disini berperan sebagai salah satu permasalahan utama dilakukannya simulasi. Dengan Matlab PDE toolbox merupakan media alat simulasi yang dipilih karena dalam metodologinya terdapat tahapan-tahapan yang mudah untuk digunakan. Hasil dari simulasi berupa gambar topologi generator dengan arah aliran medan listrik. Kemudian hasil simulasi dianalisis menggunakan metode elemen hingga.

Kata kunci: magnet permanen, generator, matlab, PDEtool, metode elemen hingga

I. PENDAHULUAN

Generator magnet permanen merupakan salah satu pengembangan dalam teknologi kelistrikan yang diciptakan guna meningkatkan efisiensi penggunaan serta fungsinya. Generator jenis ini menggunakan magnet permanen pada rotor untuk menghasilkan medan magnet utama.

Pada penelitian ini difokuskan pada cara mengetahui medan magnet fluks. Kemudian untuk dapat mengetahui persamaan diferensial serta analisis digunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Dalam membantu menyelesaikan metode tersebut, digunakan program atau software matlab dengan toolbox PDE guna memudahkan analisis simulasi. Program matlab bertujuan untuk mensimulasikan medan magnet pada generator magnet permanen. Terdapat tahapan-tahapan proses pada matlab PDEtool untuk mendapatkan hasil simulasi yang benar.

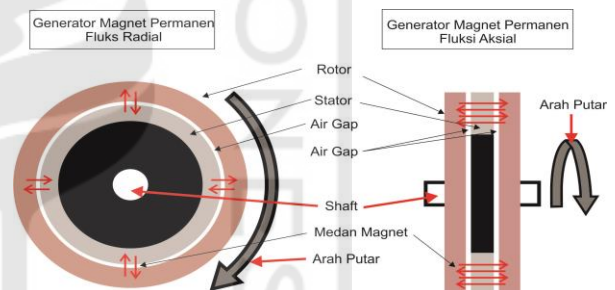
Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah membuat analisis generator melalui simulasi medan magnet dalam matlab PDEtool dengan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*).

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Generator Magnet Permanen

Secara garis besar, generator magnet permanen dibagi menjadi dua jenis bila dilihat dari fluks magnet yang dihasilkan, yaitu:

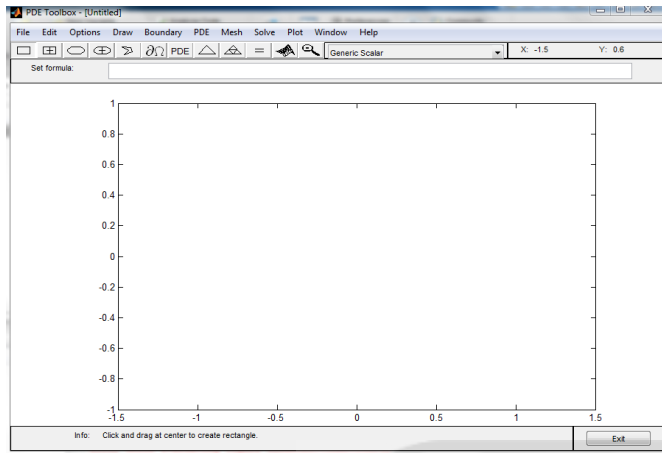
1. Generator magnet permanen dengan fluks radial/Generator MPFR (Radial Flux Permanent Magnet Generator)
2. Generator magnet permanen dengan fluks aksial/Generator MPFA (Axial Flux Permanent Magnet Generator)



Gambar 1. Perbedaan generator fluks aksial dan fluks radial.

B. Matlab PDEtool

PDEtool merupakan aplikasi toolbox pada matlab yang berfungsi untuk memecahkan masalah geometri 2D. Aplikasi ini juga mencakup mode preset untuk aplikasi, seperti electrostatics, magnetostatics, heat transfer, dan sebagainya.



Gambar 2 Interface Matlab PDEtool

Berikut fungsi-fungsi tools terkait pada PDEtool:

1. Geometry (Penggambaran Desain)
Terdiri dari blok bangunan padat (persegi, persegi panjang, lingkaran, elips, dan poligon) yang dapat digabungkan untuk menentukan geometri kompleks
2. Boundary Conditions
Befungsi menentukan jenis kondisi batas PDE pada sebuah objek geometri. Terdapat dua jenis kondisi batas, yaitu Dirichlet dan Neumann
3. PDE (Parsial Differential Equation)
PDE berfungsi untuk menentukan berbagai jenis skalar termasuk masalah elliptic, parabolic, hyperbolic, dan eigenvalue.
4. Mesh
Fungsi ini digunakan untuk menampilkan data dalam bentuk permukaan 2D. Cirinya berupa grid yang menghubungkan dua titik terdekat dalam ruang 2D.
5. Solving
Befungsi untuk menentukan parameter untuk memecahkan PDE. Terdapat beberapa parameter pada aplikasi ini, yaitu Elliptic Equations, Parabolic Equations, Hyperbolic Equations, Eigenvalue Equations.
6. Plot
Fungsi ini berisis macam-macam parameter yang berguna untuk menampilkan kebutuhan saat proses geometri atau solving selesai. Tipe plot serta parameter yang lain disesuaikan dengan kebutuhan.

C. Metode Elemen Hingga (*Finite Elemen Methode*)

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik untuk penyelesaian pendekatan suatu persamaan differensial parsial dan masalah nilai batasnya.

Persamaan Maxwell adalah persamaan diferensial yang menentukan (bersama-sama dengan syarat batas untuk keadaan tertentu) medan yang ditimbulkan oleh sumber muatan arus.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad (2.4)$$

Medan E dan B dalam kerjanya ditentukan oleh gaya Lorentz

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.5)$$

Dan medan Magnet D dan B dikaitkan dengan kedua medan tadi oleh persamaan dasar dari medium, $\mathbf{D} = \mathbf{D}(\mathbf{E})$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{B})$.

Persamaan Maxwell mempunyai konsekuensi penting sebagai berikut

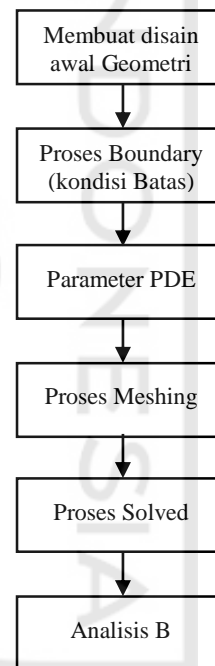
1. Perambatan gelombang listrik-magnet dapat terjadi dengan kecepatan $C = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ dalam ruang hampa, sama dengan kecepatan cahaya.
2. Syarat batas untuk medan ditentukan dibidang temu antara dua medium yang berbeda, syarat repenting adalah bahwa komponen tangensial dari E dan H.
3. Medan E dan B dapat diturunkan dari fungsi potensial

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2.7)$$

III. METODE PENELITIAN

Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3



Gambar 3. Diagram Alir

Pembuatan desain awal geometri

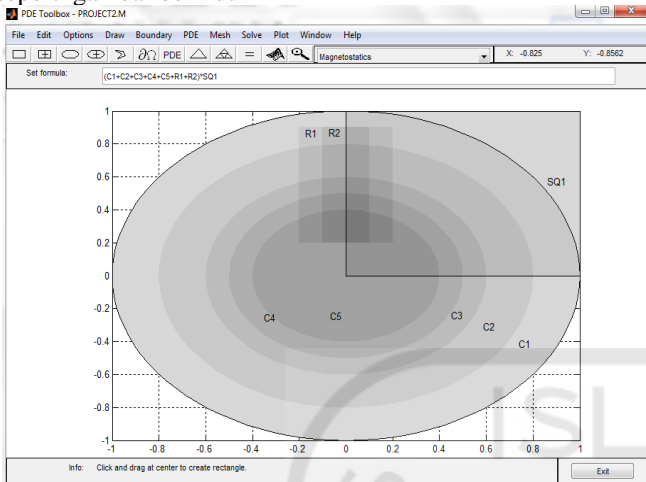
Model adalah gabungan lima lingkaran dan dua persegi panjang, agar memasukkan perintah berikut:

```

Command Window
>> pdecirc(0,0,1,'C1')
>> pdecirc(0,0,0.8,'C2')
>> pdecirc(0,0,0.6,'C3')
>> pdecirc(0,0,0.5,'C4')
>> pdecirc(0,0,0.4,'C5')
>> pderect([-0.2 0.2 0.2 0.9],'R1')
>> pderect([-0.1 0.1 0.2 0.9],'R2')
>> pderect([0 1 0 1],'SQ1')
fx >>
  
```

Gambar 3.

Perintah diatas akan menampilkan tampilan disain awal seperti gambar berikut

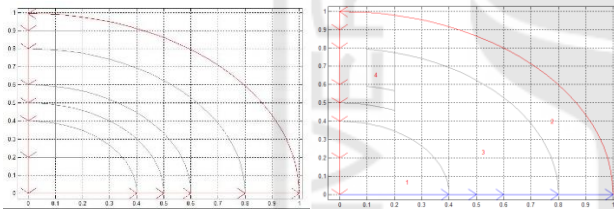


Gambar 4. Model Geometri awal

Dilanjutkan memasukkan rumus set untuk mengurangi model ke kuadran pertama:

$$(C1+C2+C3+C4+C5+R1+R2)*SQ1$$

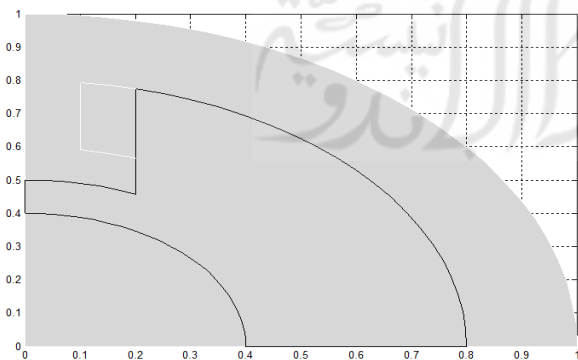
Dalam proses *boundary* (kondisi batas), beberapa batas subdomain perlu dihilangkan dari menu *boundary* sampai geometri terdiri dari empat subdomain: stator, rotor, koil, dan celah udara. Dalam plot berikut, stator adalah subdomain 1, rotornya adalah subdomain 2, koilnya adalah subdomain 3, dan celah udara adalah subdomain 4.



Gambar 5. Perbandingan Proses Boundary

Penentuan jenis kondisi batas dilakukan sepanjang sumbu x menjadi batas Neumann (biru) dengan ketentuan $g = 0$ dan $q = 0$, batas lainnya yaitu Dirichlet adalah kondisi *default* dari Boundary Mode tanpa perlu diubah dengan kondisi $h = 1$ dan $r = 0$.

Proses PDE



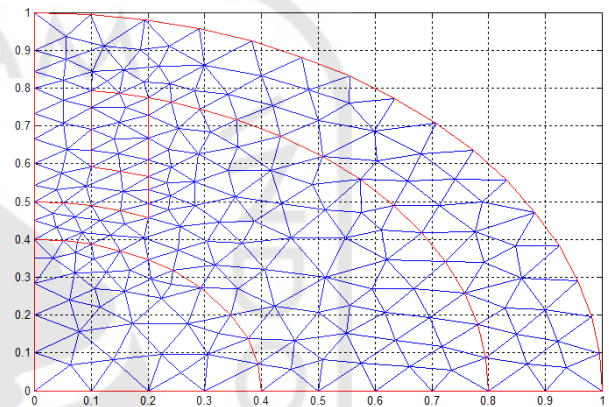
Gambar 6. PDE Mode

Pada proses PDE menentukan parameter dari masing-masing komponen. Berikut adalah nilai koefisien dari masing-masing komponen

- Koil: $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m, $J = 10$ H/m²
- Stator dan rotor: $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot (5000 / (1 + 0.05 \cdot (u_x.^2 + u_y.^2)) + 200)$ H/m, dimana $u_x.^2 + u_y.^2$ sama dengan $|\nabla A|^2$, $J = 0$ (tanpa arus).
- Celah udara: $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m, $J = 0$

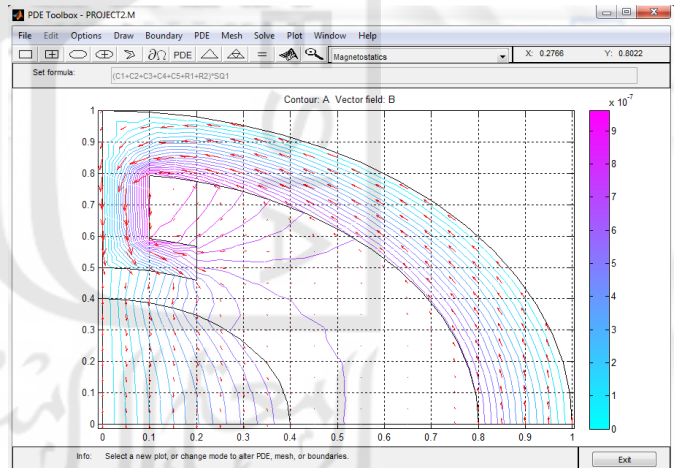
Proses Meshing

Menampilkan kondisi grid (jejaring) pada bagian dalam geometry, mengindikasikan pengaruh pemberian nilai koefisien pada tiap komponen yang dilakukan pada proses sebelumnya.



Gambar 7. Mesh Mode

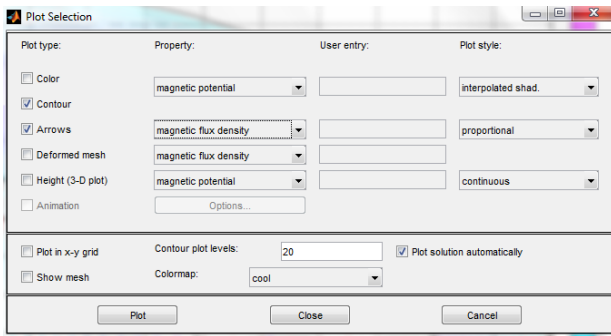
Proses Solved



Gambar 8. Solved Mode

Merupakan tahapan akhir pada proses simulasi menggunakan PDEtool. Menunjukkan hasil berupa kontur pada bagian *geometry* dan bidang vektor yang menunjukkan kerapatan fluks magnetik yang berupa panah berwarna merah

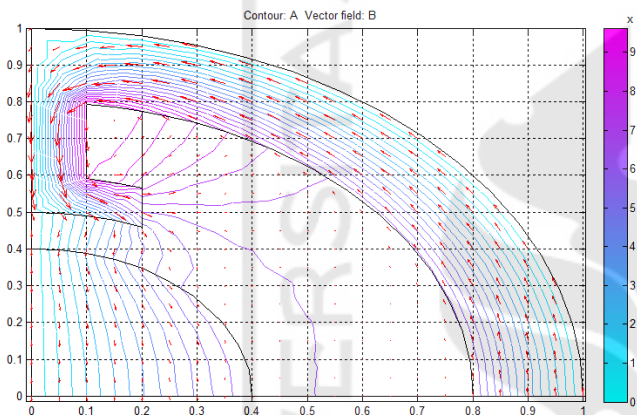
Penyesuaian tampilan pada *mode Solved* bias diubah sesuai dengan keadaan. Proses ini berada pada *mode Plot-Parameters*. Berikut tampilan dari mode Plot



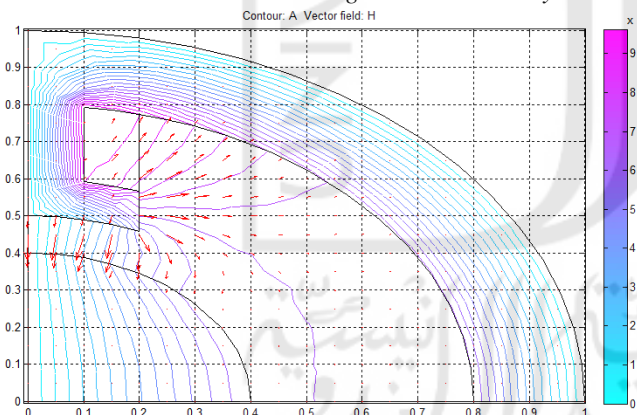
Gambar 9. Plot Parameters

IV. HASIL DAN ANALISIS

Hasil Simulasi



Gambar 10. Parameter Magnetic Flux Density



Gambar 11. Parameters Magnetic Field

Analisis Metode Elemen Hingga

Magnet, motor listrik merupakan area dimana masalah yang melibatkan magnetostatika dapat ditemukan. Istilah "Statika" menjelaskan tentang laju waktu perubahan yang lambat, jadi diawali dengan persamaan Maxwell berikut

$$\nabla \times H = J$$

$$\nabla \times B = 0 \text{ dan hubungannya } B = \mu H$$

di mana B adalah kerapatan fluks magnet, H adalah intensitas medan magnet, J adalah kerapatan arus, dan μ adalah bahan permeabilitas magnetik. Karena, $\nabla \cdot B = 0$ ada potensi vektor magnet A. Sehingga

$$B = \nabla \times A \text{ dan } \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J$$

Rata-rata kasus mengasumsikan bahwa arus mengalir sejajar dengan sumbu z, jadi hanya komponen z dari A yang digambarkan, $A = (0,0,A)$, $J = (0,0,J)$

Bisaa juga dikaitkan dengan asumsi (Lorenz gauge atau Coulomb gauge)

$$\nabla \cdot A = 0$$

dan kemudian persamaan untuk A dalam hal J dapat disederhanakan ke PDE elips scalar

$$-\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J$$

Di mana $J = J(x, y)$.

Untuk kasus 2-D, kita dapat menghitung kerapatan fluks magnetik B sebagai $B = \left(\frac{\partial A}{\partial y}, -\frac{\partial A}{\partial x}, 0 \right)$ dan medan magnet H, sebagai gantinya diberi $H = \frac{1}{\mu} B$

Tampilan kondisi subdomain garis batas antar bagian dengan bahan yang berbeda adalah $H \times n$ secara terus menerus. Ini mengartikan hubungan dengan $\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n}$ dan tidak diperlukan kondisi khusus karena formula beragam yang ada pada PDE.

Dalam bahan feromagnetik, μ biasanya bergantung pada kekuatan medan $|B| = |\nabla A|$, jadi pemecah nonlinier diperlukan.

Kondisi batas Dirichlet menentukan nilai potensial magnetostatik A pada garis batas. Kondisi Neumann menentukan nilai komponen normal $n \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right)$ pada garis batas.

Ini setara dengan menentukan nilai tangensial medan magnet H pada garis batas. Visualisasi potensi magnetostatik A, medan magnet H, dan kerapatan fluks magnet B tersedia. B dan H dapat diplot sebagai bidang vektor.

V. KESIMPULAN

Matlab toolbox PDE merupakan program yang berfungsi memecahkan persamaan diferensial parsial. Partial Differential Equation (PDE) Toolbox didesain untuk menyelesaikan perpindahan panas, struktur mekanika dan persamaan diferensial parsial umum pada konfigurasi dua dimensi dan tiga dimensi.

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik untuk menyelesaikan persamaan pendekatan suatu persamaan diferensial. Termasuk didalamnya yaitu persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell menentukan syarat batas suatu kondisi, dimana kasus pada laporan ini diantaranya penentuan batas pada sumbu x dengan kondisi Neumann berpengaruh pada hasil kerapatan fluks magnetik.

PDEtool dapat dimanfaatkan sebagai bagian dari alat bantu untuk mempelajari metode elemen hingga, karena relatif mudah untuk dipelajari..

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ghita, C., Deaconu, I.-D., Chirilia, A.-I., Navrapescu, V., & Ilina, I. D. (2009). 2D Analisis of electronical transformers magnetic field due to the magnteizing magneto motive force. 54(3), 233–242.
- [2] Irasari, P., Alam, H. S., & Kasim, M. (2012). Simulasi dan Analisis Magnetik Generator Magnet Permanen Fluks Radial Menggunakan Metoda Elemen Hingga. 23–30.
- [3] Meesuk, P., Kulworawanichpong, T., & Pao-lar, P. (2011). Magnetic field analisis for a distribution transformer with unbalanced load conditions by using 3-D finite element method. 5(12).
- [4] Jin, J.-M. (2014). The Finite Element Method in Electromagnetics, Third Edition. New York: John Willey and Sons Inc.
- [5] Reitz, J. R., Milford, F. J., & Christy, R. W. (1993). Dasar Teori Listrik Magnet (3rd ed.). Penerbit ITB.

