

## RANCANG BANGUN PROTOTYPE MOTOR MAGNET PERMANEN METODE HALBACH ARRAY

*Design Of Halbach Array Method Permanent Magnet Motor Prototype*

Adriansyah Ekosaputro<sup>1</sup>, Ida Bagus Fery Citarsa<sup>2</sup>, Paniran<sup>3</sup>

### ABSTRAK

Rancangan motor magnet permanen metode halbach array terdiri dari empat buah layer. Layer pertama dan ketiga memanfaatkan fluks magnet pada komponen radial dengan sudut polaritas magnet permanen pada stator dan rotor sebesar  $30^\circ$ , layer kedua dan keempat memanfaatkan fluks magnet pada komponen axial pada stator dan rotornya. Vektor kerapatan fluks celah udara yang berputar ke kiri menyebabkan rotor dapat berputar berlawanan arah putar jarum jam. Magnitud kerapatan fluks ( $B$ ) pada celah udara rotor dan stator dengan bantuan software FEMM 4.2 diperoleh komponen radial bernilai maksimum yaitu  $0,57085$  T dan komponen aksial bernilai minimum yaitu  $0,09579$  T. Magnitud kerapatan fluks magnet memiliki nilai persentase error yang tinggi antara analisa FEMM dan pengukuran Spectrum NF-5035, akibat dari pemanasan dan pemukulan pada saat pemasangan magnet. Motor magnet permanen berhasil mengkonversi tenaga magnet permanen menjadi tenaga putaran pada rotor sebanyak satu kali putaran atau berotasi sejauh  $360^\circ$  dengan arah putaran berlawanan dengan jarum jam.

**Kata kunci:** permanen magnet motor, halbach array, FEMM analisis

### ABSTRACT

Halbach array method permanent magnet motor design consists of four layers. The first and third layer utilize magnetic flux in the radial component at an angle of permanent magnet polarity on the stator and rotor of  $30^\circ$ , while the second and fourth layer utilize the magnetic flux in the axial component of the stator and rotor. Air-gap flux density vector rotating to the left causes the rotor to rotate counterclockwise. Magnitude of flux density ( $B$ ) in the rotor and stator air gap with the help of FEMM 4.2 software are obtained that radial component maximum value is  $0.57085$  T and axial component maximum value is  $0.09579$  T. The minimum magnitude of the magnetic flux density has a high percentage of error between the analysis FEMM and the measurement Spectrum NF-5035, as a result of heating and beatings at the time of installation of magnets.

The permanent magnet motors managed to convert power into torque on the rotor for one round or rotates  $360^\circ$  in the the counterclockwise direction.

**Keywords:** permanent magnet motor, Halbach array, FEMM analysis

## I. PENDAHULUAN

Motor merupakan alat yang banyak berperan aktif hampir di semua peralatan, kebutuhan akan motor sebagai alat penggerak sudah tidak asing lagi. Berbagai alat kerja menerapkan motor sebagai penggeraknya (Fitzgerald, dkk 1997.)

Perancangan motor pada penelitian ini digunakan metode Halbach array, magnet permanen pada bagian statornya disusun berdasarkan metode Halbach array linier dengan arah horizontal, dimana sisi aktif dari susunan halbach pada rotor dan stator saling berhadapan (Pujiaty. TG., Sigit. 2009).

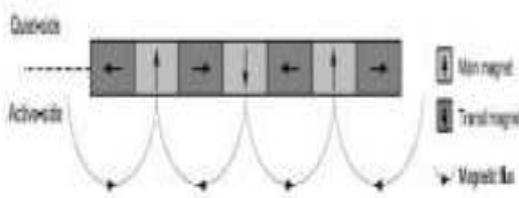
Metode Halbach array merupakan pengaturan khusus dari magnet permanen yang meningkatkan medan magnet pada satu sisi dan membatalkan medan magnet untuk mendekati nol di sisi lain dari barisan magnet tersebut, dengan begitu maka dapat memaksimalkan pemanfaatan medan magnet yang dihasilkan oleh tiap magnet permanen.

Pemilihan metode halbach array pada susunan magnet permanen rotor dan stator motor magnet permanen agar dapat dihasilkan medan magnet serta arah vektor kerapatan fluks yang memusat dan berputar pada bagian dalam motor antara sisi aktif dari susunan magnet permanen halbach array

stator dan rotor. Dengan menyusun halbach arraylinier pada bagian stator dan rotor maka prinsip kerja dari susunan magnet tersebut akan menghasilkan peningkatan kerapatan fluks magnet pada celah udara komponen radial dan mengurangi kerapatan fluks yang saling berlawanan pada komponen aksial. Dengan mengurangi kerapatan fluks pada komponen aksial maka dapat mengurangi gangguan dan vibrasi pada gaya radial, yang diharapkan dapat menghasilkan vektor kerapatan fluks berbentuk putaran dan gaya yang lebih besar pada komponen radial untuk menggerakkan rotor. Susunan magnet secara silinder pada komponen radial motor didesain dengan kemiringan untuk membantu pembentukan vektor kerapatan fluks yang berputar terhadap sumbu pusat.

**Halbach array** .Halbach array merupakan susunan khusus dari magnet permanen yang memusatkan medan magnet pada satu sisi dari barisan sementara meniadakan medan hampir mendekati nol pada sisi lainnya. Susunan ini dapat meningkatkan ikatan magnetik dalam sebuah ruang yang terbatas, selain itu juga dapat meningkatkan kerapan fluks magnetik, meningkatkan energi keluaran yang dibutuhkan pada jenis desain untuk mencapai magnetik fluks gradient maksimum (Yan, dkk. 2012)

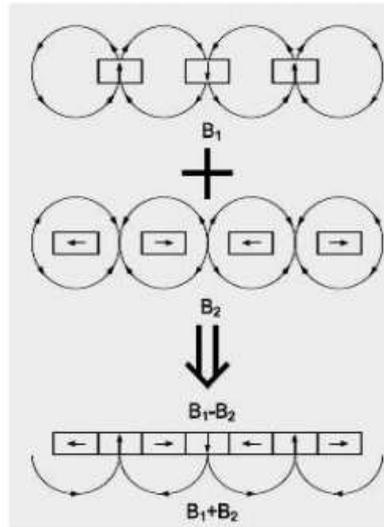
Ada dua tipe dari halbach array, yaitu flat (datar) atau linier halbach array dan halbach cylinders. Ciri dari Flat halbach array ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Halbacharray

Halbach array terdiri dari dua set magnet, yaitu main magnets dan transitmagnet. Superimposisi dari fluks magnetik disebabkan oleh main magnets,  $B_1$ , dan transit magnets,  $B_2$ , memberikan situasi dimana medan magnet dari satu sisi halbach array merupakan penjumlahan dari medan magnet ( $B_1+B_2$ ) sementara medan magnet pada sisi lainnya dari halbach array merupakan pengurangan antara medan

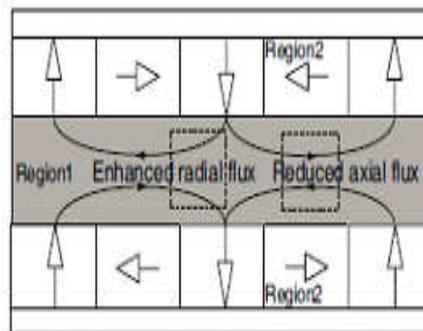
magnet ( $B_1-B_2$ ), seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Aturan dari halbach array, (a) mainmagnets, (b) transit magnets dan (c) halbach array

Susunan linier dual halbach array dengan sangat baik meningkatkan kerapatan fluks pada celah udara pada komponen radial, sementara mengurangi kerapatan fluks aksial secara signifikan. Dengan demikian gangguan dan vibrasi pada gaya radial dapat diiadakan dengan mengurangi fluks aksial.

Linier dual halbach array dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Dual halbach array magnetisasi dan fluks

**Magnet Neodymium Iron Boron (NdFeB).** Neodymium Iron Boron (NdFeB) adalah salah satu jenis dari bahan magnetik tanah jarang (Anonim. 2007). Keuntungan karakteristik dari magnet NdFeB yaitu memiliki produksi energi yang sangat tinggi, coercive force yang sangat tinggi dan stabilitas suhu.



Gambar 4 Neodymium Iron Boron (NdFeB)

Tabel 1 Karakteristik magnet NdFeB N35

Parameter, Simbol	Besaran	Satuan
Kerapatan Fluks remanensi, $B_r$	1200	mT
<i>Coercive force, <math>H_c</math> :</i>		
$H_c$	>868	kA/m
$H_{ci}$	>955	kA/m
<i>Max. Energy Product, (BH)max</i>	33-36	MGOe
<i>Curie Temperature, <math>T_c</math></i>	310	°C
<i>Max. working Temp, <math>T_w</math></i>	80	°C
<i>Relative Permeability, <math>\mu_r^*</math></i>	1,05	-

### FEMM (Finite Element Method Magnetics)

**4.2. Finite Element Method Magnetics (FEMM) 4.2** adalah paket program untuk memecahkan masalah elektromagnetik frekuensi rendah pada dua dimensi planar dan axisymmetric domain (Baltzis, Konstantinos B. 2010). Program saat ini ditujukan untuk masalah linier / nonlinier magnetostatik, linier / nonlinier waktu harmonic magnetik, masalah linier elektrostatik dan masalah steady-state aliran panas. FEMM merupakan paket open-source finite element yang ditulis oleh David Meeker dan dapat diperoleh di <http://femm.foster-miller.net>.

**Magnetostatic problems.** Masalah magnetostatik merupakan masalah yang memiliki medan yang seragam. Dalam masalah ini, intensitas medan (H) dan kerapatan fluks (B) harus mematuhi (Pujiaty, TG., Sigit. 2009):

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

Dimana: J = kerapatan arus (A/m<sup>2</sup>)

H = intensitas medan (A/m)

B = kerapatan fluks magnet (Tesla)

Subjek untuk menyusun hubungan antara B dan H untuk setiap material:

$$B = \mu H \quad (3)$$

Dimana: B = kerapatan fluks magnet (Tesla)

H = intensitas medan (A/m)

$\mu$  = Permeabilitas (W/A.m)

**Boundary conditions.** Kondisi batas untuk masalah magnetic dan elektrostatik tersedia dalam lima varietas [8]:

- Prescribed A.
- Small Skin Depth.
- Mixed.
- Strategic Dual Image.
- Periodic.
- Antiperiodic.

### 2.3.3 Asymptotic boundary conditions

Untuk menerapkan kondisi batasan asymptotic dengan cara mendefinisikan batasan kondisi dari tipe mixed yang baru. Kemudian memilih parameter:

$$c_0 = \frac{n}{\mu_0 r_0} \quad (3)$$

$$c_1 = 0 \quad (4)$$

Dimana:  $r_0$  = jari-jari luar (m atau tergantung dari unit panjang yang ditentukan)

$\mu_0$  = permeabilitas ruang hampa (W/A.m)

n = jumlah dari harmonik terkemuka

$c_0, c_1$  = faktor beban reluktansi

### 2.4 Dimensi benda

#### 2.4.1 Volume tabung

Rumus untuk mencari volume tabung sama dengan rumus untuk mencari volume prisma.  $V$  tabung = Luas alas x tinggi. Maka volume tabung dapat dicari dengan persamaan [7]:

$$V_{\text{tabung}} = \pi \times r^2 \times t \quad (5)$$

Dimana:  $V$  tabung = volume tabung (m<sup>3</sup>)

$\pi$  = Konstanta phi  $\frac{22}{7}$  atau 3,14

r = jari-jari tabung (m)

t = tinggi tabung (m)

#### 2.4.2 Volume silinder berlubang

Volume silinder berlubang dapat dihitung dengan persamaan (Valone, Thomas F. 2010):

$$V \text{ silinder berlubang} = \pi t(R^2 - r^2) \quad (6)$$

Dimana :  $V$  silinder berlubang = Volume silinder berlubang ( $m^3$ )

$$\pi = \text{Konstanta phi } \frac{22}{7} \text{ atau } 3,14$$

$R$  = jari-jari bagian luar (m)

$r$  = jari-jari bagian dalam (m)

$t$  = tinggi silinder berlubang (m)

**Persentase Kesalahan.** Perhitungan persentase kesalahan suatu dimensi, yaitu antara dimensi gambar kerja dan benda kerja dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$Pk = \frac{\Delta D}{Dg} \times 100\% \quad (7)$$

Dengan  $\Delta D$  adalah:

$$\Delta D = Db - Dg \quad (8)$$

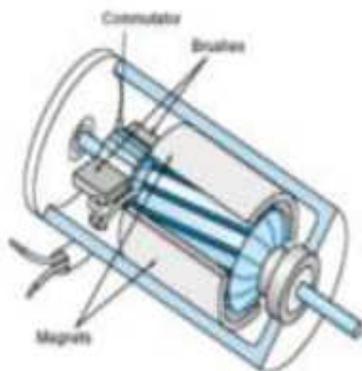
Dimana:  $Pk$  = Persentase kesalahan (%)

$\Delta D$  = Selisih dimensi ( $m^3$ )

$Db$  = Dimensi benda kerja ( $m^3$ )

$Dg$  = Dimensi gambar kerja ( $m^3$ )

**Permanent-Magnet (PM) motor.** Jenis ini menggunakan magnet permanen untuk menghasilkan fluks magnetik, armaturnya sama dengan armatur pada wound-field motor [8]. Terdapat tiga tipe magnet yang dipergunakan yaitu (1) Alnico magnet (terbuat dari paduan/alloy logam besi) memiliki fluks magnetik yang tinggi (high-fluks magnet) tetapi sifat magnetnya bisa hilang saat terjadi stall (2) Ferrite, memiliki fluks magnetik yang lebih kecil tetapi memiliki daya tahan terhadap demagnetisasi (3) rare-earth magnet (magnet tanah jarang) terbuat dari bahan samarium-cobalt atau neodymium-cobalt. Jenis terakhir ini menggabungkan keunggulan dari kedua jenis pertamanya yaitu memiliki fluks magnetik yang tinggi dan tahan terhadap demagnetisasi.



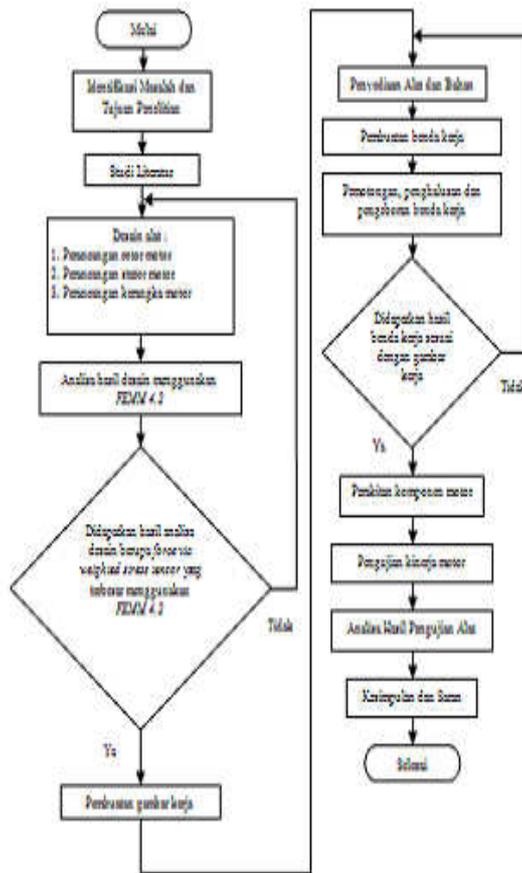
Gambar 5 *Permanen-magnet motor*

## METODE PENELITIAN

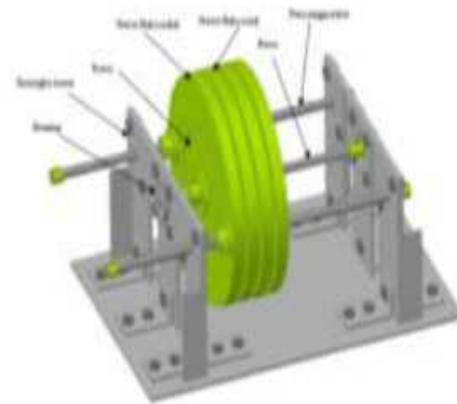
Penelitian ini meliputi tahap perancangan, pembuatan, perakitan dan uji kinerja. Pada tahap awal dilakukan perancangan komponen-komponen motor magnet permanen metode halbach array yang terdiri dari perancangan komponen rotor motor, perancangan komponen stator motor dan perancangan kerangka motor, yang dilakukan dengan bantuan software AutoCAD 2007 untuk desain gambar kerja dan software Finite Element Method Magnetics (FEMM) 4.2 untuk analisa hasil desain.

Proses penelitian yang akan dilaksanakan adalah sebagai berikut :

- a. Studi Literatur
  - Mengumpulkan dan mempelajari literature penunjang penelitian ini seperti jurnal, buku, teks dan artikel.
- b. Perancangan dan pembuatan
  - Merancang dan membuat komponen-komponen dari motor, adapun proses perancangan dan pembuatan berupa:
    - Perancangan dan pembuatan rotor motor magnet permanen, yaitu menentukan susunan magnet, jumlah magnet, serta dimensi dari rotor.
    - Perancangan dan pembuatan stator motor magnet permanen, yaitu menentukan susunan magnet, jumlah magnet, serta dimensi dari stator.
    - Perancangan dan pembuatan kerangka motor magnet permanen, yaitu penentuan bentuk, dimensi dari kerangka mesin yang disesuaikan dengan ukuran stator, rotor pada motor.
- c. Perakitan Mesin
  - Menyatukan semua hasil perancangan berupa rotor, stator dan kerangka motor magnet permanen, sehingga menjadi suatu mesin yang utuh.
- d. Pengujian dan Pengukuran
  - Melakukan pengujian terhadap mesin, untuk mengetahui kinerja dari hasil pembuatan motor magnet permanen metode halbach array dan pengukuran untuk mengetahui persentase kesalahan pembuatan mesin, serta mengetahui besarnya medan magnet yang dihasilkan secara terukur.
- e. Pencatatan Hasil Pengujian dan Pengukuran



Gambar 6 Diagram alir penelitian



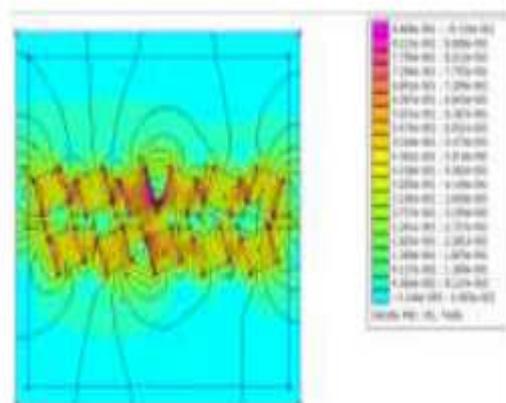
Gambar 7 Motor magnet permanen metode halbach array tampak 3 dimensi

#### 4.1.1 Analisa perubahan sudut polaritas magnet permanen pada rotor dan stator fluks radial motor magnet permanen

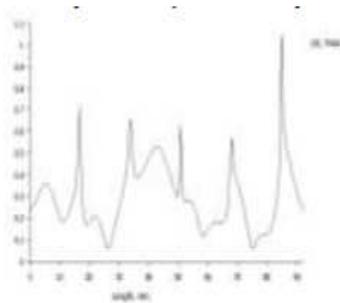
Analisa perubahan sudut polaritas magnet permanen dilakukan dengan mengubah sudut polaritas magnet permanen pada stator dan rotor. Analisa sudut polaritas magnet permanen dilakukan untuk mencari pembentukan gaya yang maksimal agar didapatkan torsi yang besar pada saat pembuatan motor magnet permanen yaitu dengan bantuan perangkat lunak FEMM (Finite Element Method Magnetics) 4.2. Sudut polaritas magnet yang akan dianalisa adalah 20°, 30°, 40°, 50° dan 60°.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

**Visualisasi Proses Desain Motor Magnet Permanen.** Agar dapat menerapkan metode halbach array maka desain motor magnet permanen terdiri dari rotor dan stator yang memanfaatkan penyebaran fluks secara radial dan penyebaran fluks secara axial, sehingga motor terdiri dari empat layer. Magnet permanen pada dua layer yang memanfaatkan penyebaran fluks secara radial didesain dengan kemiringan sudut dan dua layer yang akan memanfaatkan penyebaran fluks secara axial akan menyesuaikan susunan magnet pada rotor dan stator fluks radial. Kemiringan sudut penempatan magnet permanen pada komponen radial stator dan rotor motor magnet permanen dimaksudkan agar membantu pembentukan vektor kerapatan fluks yang berputar sehingga dapat memicu gerakan pada rotor. Desain dasar komponen motor magnet permanen dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 8 Hasil running analysis value density plot model linier motor magnet permanen dengan sudut polaritas magnet sebesar 20°



Gambar 9 Hasil running analysis magnitude of flux density model linier motor magnet permanen dengan sudut polaritas magnet sebesar 20°

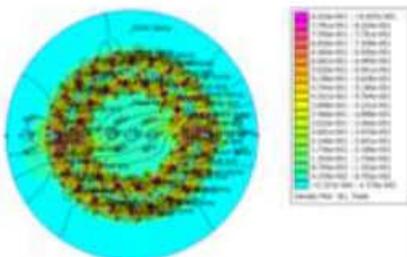
Tabel 2 Hasil running analysis model linier motor magnet permanen

Sudut Magnet (°)	Magnetic field energy (Joule)	Force via weighted stress tensor (Newton)	
		x-component	y-component
20	2,13313	0,46587	0,05369
30	2,30937	2,52606	0,07038
40	2,35738	0,05055	0,00144
50	2,38343	0,36993	0,05053
60	2,40755	0,87121	0,09623

Untuk mendapatkan nilai torka yang besar agar dapat menggerakkan rotor motor maka diperlukan gaya yang paling besar dari hasil desain pada Tabel 2.

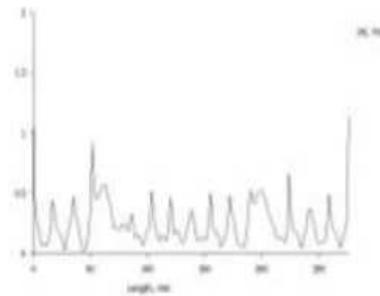
#### 4.1.2 Analisa model silinder dari rotor dan stator

Fluks radial motor magnet permanen Model silinder dari motor magnet permanen didesain dengan sudut polaritas magnet permanen sebesar 30°.



Gambar 10 Hasil running analysis value density plot model silinder rotor dan stator fluks radial

Hasil analisa nilai kerapatan fluks (B) yang tersebar memiliki nilai tertinggi yaitu 0,86566 T dan nilai yang terendah yaitu  $5,32675 \times 10^{-4}$  T.

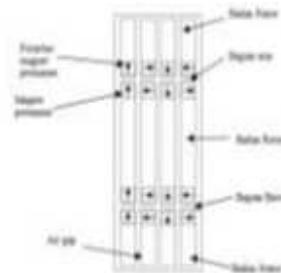


Gambar 11 Hasil running analysis magnitude of flux density model silinder rotor dan stator fluks radial

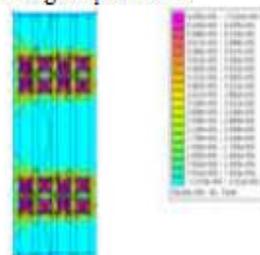
Hasil analisa nilai magnitud tertinggi dari kerapatan fluks (B) yaitu 0,92091 T pada posisi 51,89359 mm dan nilai terendah yaitu  $0,927138 \times 10^{-2}$  T pada posisi 44,48022 mm.

#### 4.1.3 Analisa susunan halfbach magnet permanen pada motor magnet permanen

Magnet permanen pada motor magnet permanen yang dirancang tersusun secara linier.

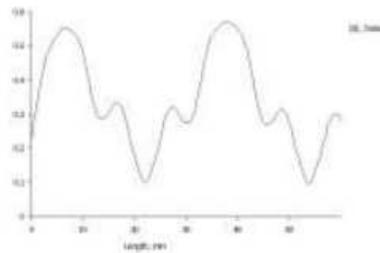


Gambar 12 Model linier susunan magnet permanen metode halfbach array pada stator dan rotor motor magnet permanen



Gambar 13 Hasil running analysis value density plot model linier susunan magnet permanen metode halfbach pada motor magnet permanen

hasil analisa nilai kerapatan fluks (B) yang tersebar memiliki nilai tertinggi yaitu 0,70213 T dan nilai yang terendah yaitu  $0,12155 \times 10^{-4}$  T.

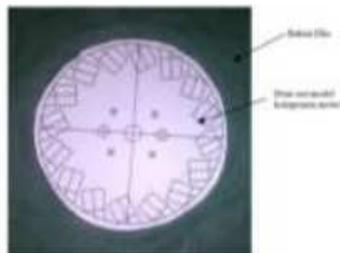


Gambar 14 Hasil running analysis magnitude of flux density model linier susunan magnet permanen metode halbach pada motor magnet permanen bagian atas

Hasil analisa nilai magnitud tertinggi dari kerapatan fluks ( $B$ ) untuk model linier susunan magnet permanen metode halbach pada motor magnet permanen bagian atas yaitu  $0,57085$  T pada posisi  $37,85235$  mm dan nilai terendah yaitu  $0,09579$  T pada posisi  $53,95973$  mm.

#### Pembuatan Cetakan Komponen Motor.

Proses pembuatan cetakan komponen rotor digunakan bahan lunak yang mudah dibentuk yaitu terbuat dari bahan lilin. Bahan lilin akan dibentuk di atas print out dari gambar cetakan yang telah didesain dan diprinting menggunakan kertas ukuran  $215 \times 297$  mm.



Gambar 15 Cetakan komponen rotor fluks radial motor magnet permanen

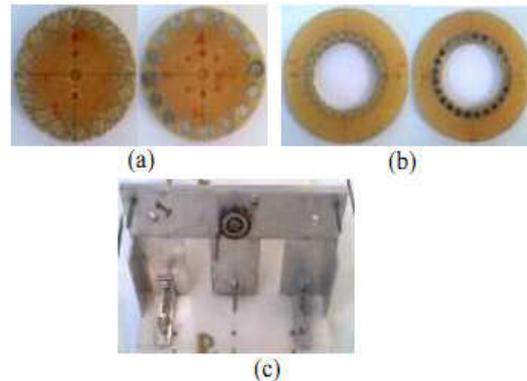
**Proses Polimerisasi Dan Ikatan Antara Bahan Resin Epoxy Dan Hardener.** Bahan pembuatan komponen motor magnet permanen terbuat dari bahan hasil polimerisasi dan ikatan antara resin epoxy dan hardener. Resin epoxy merupakan bahan non-logam sehingga penggunaan bahan ini pada pembuatan komponen motor magnet permanen dimaksudkan agar tidak mempengaruhi kerja dari magnet permanen yang dipasang pada komponen-komponen motor magnet permanen. Berdasarkan aturan pakai, proses polimerisasi dan ikatan antara resin epoxy dan hardener dilakukan dengan perbandingan  $1:1$  untuk berat atau  $1:1,2$  untuk volume yang dilakukan di atas sebuah wadah kosong.



Gambar 16 Proses polimerisasi dan ikatan antara resin epoxy dan hardener

#### Proses Penghalusan, Pemotongan Dan Pengeboran Komponen Komponen Motor Magnet Permanen.

Komponen-komponen motor magnet permanen yang sudah dicetak akan dilakukan penghalusan dan penglubangan, sedangkan untuk kerangka motor yang berbahan aluminium siku akan dilakukan dengan proses pemotongan dan penglubangan dengan menggunakan proses gerinda dan proses pengeboran.

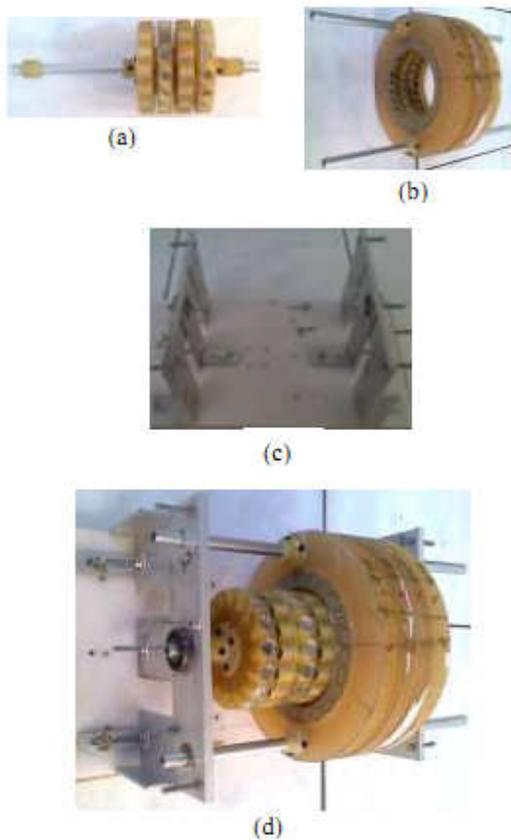


Gambar 17

- (a) Hasil penghalusan dan pengeboran komponen rotor fluks radial dan fluks axial motor magnet permanen
- (b) Hasil penghalusan dan pengeboran komponen stator fluks radial dan fluks axial motor magnet permanen
- (c) Hasil proses pemotongan, pengeboran dan penghalusan kerangka motor magnet permanen

#### Proses Perakitan Komponen-Komponen Motor Magnet Permanen.

Metode yang digunakan untuk menggabungkan tiap komponen motor magnet permanen yaitu menggunakan sekrup, baut dan perekat.



Gambar 18

- (a) Hasil proses perakitan rotor motor magnet permanen
- (b) Hasil proses perakitan stator motor magnet permanen
- (c) Hasil proses perakitan kerangka motor magnet permanen
- (d) Hasil proses perakitan motor magnet permanen metode halbach array

**Pengujian Dimensi Komponen-Komponen Motor Magnet Permanen**

Tabel 3 Keterangan dari gambar kerja dan benda kerja 1 rotor motor magnet permanen fluks radial

Keterangan, simbol	Nilai (mm)
Diameter rotor pada gambar kerja, $d_g$	87,92
Tinggi rotor pada gambar kerja, $t_g$	12
Diameter rotor pada benda kerja, $d_b$	86,5
Tinggi rotor pada benda kerja, $t_b$	12,2

Perhitungan selisih antara diameter rotor pada gambar kerja dan benda kerja:

$$\Delta d = d_b - d_g$$

$$\Delta d = 86,5 - 87,92$$

$$\Delta d = -1,42 \text{ mm}$$

Perhitungan selisih antara tinggi rotor pada gambar kerja dan benda kerja:

$$\Delta t = t_b - t_g$$

$$\Delta t = 12,2 - 12$$

$$\Delta t = +0,2 \text{ mm}$$

Perhitungan dimensi rotor pada gambar kerja dapat dilakukan dengan persamaan (5) untuk mencari volume tabung atau silinder:

$$V_{\text{tabung}} = \pi \times r^2 \times t$$

$$V_g = \pi \times \left(\frac{d_g}{2}\right)^2 \times t_g$$

$$V_g = 3,14 \times \left(\frac{87,92}{2}\right)^2 \times 12$$

$$V_g = 72815,91 \text{ mm}^3$$

Perhitungan dimensi rotor pada benda kerja dapat dilakukan dengan persamaan (5) untuk mencari volume tabung atau silinder:

$$V_{\text{tabung}} = \pi \times r^2 \times t$$

$$V_b = \pi \times \left(\frac{d_b}{2}\right)^2 \times t_b$$

$$V_b = 3,14 \times \left(\frac{86,5}{2}\right)^2 \times 12,2$$

$$V_b = 71657,51 \text{ mm}^3$$

Perhitungan selisih antara dimensi rotor pada gambar kerja dan benda kerja:

$$\Delta V = V_b - V_g$$

$$\Delta V = 71657,51 - 72815,91$$

$$\Delta V = -1158,4 \text{ mm}^3$$

Perhitungan persentase kesalahan dapat dilakukan dengan persamaan (7) :

$$Pk = \left|\frac{\Delta V}{V_g}\right| \times 100\%$$

$$Pk = \left|\frac{-1158,4}{72815,91}\right| \times 100\%$$

$$Pk = 1,59 \%$$

Tabel 4 Keterangan dari gambar kerja dan benda kerja stator 1 motor magnet permanen fluks radial

Keterangan, simbol	Nilai (mm)
Diameter dalam stator pada gambar kerja, $d_{g-in}$	94,10
Diameter luar stator pada gambar kerja, $d_{g-out}$	120,23
Tinggi stator pada gambar kerja, $t_g$	12
Diameter dalam stator pada benda kerja, $d_{b-in}$	93,50
Diameter luar stator pada benda kerja, $d_{b-out}$	119,5
Tinggi stator pada benda kerja, $t_b$	11,8

Perhitungan selisih antara diameter dalam stator pada gambar kerja dan benda kerja:

$$\begin{aligned}\Delta d_{in} &= d_{b-in} - d_{g-in} \\ \Delta d_{in} &= 93,50 - 94,10 \\ \Delta d_{in} &= -0,6 \text{ mm}\end{aligned}$$

Perhitungan selisih antara diameter luar stator pada gambar kerja dan benda kerja:

$$\begin{aligned}\Delta d_{out} &= d_{b-out} - d_{g-out} \\ \Delta d_{out} &= 119,5 - 120,23 \\ \Delta d_{out} &= -0,73 \text{ mm}\end{aligned}$$

Perhitungan selisih antara tinggi stator pada gambar kerja dan benda kerja:

$$\begin{aligned}\Delta t &= t_b - t_g \\ \Delta t &= 11,8 - 12 \\ \Delta t &= -0,2 \text{ mm}\end{aligned}$$

Perhitungan dimensi stator pada gambar kerja dapat dilakukan dengan persamaan (6) untuk mencari volume silinder berlubang:

$$\begin{aligned}V_{\text{silinder berlubang}} &= \pi t(R^2 - r^2) \\ V_g &= \pi t(R^2 - r^2) \\ V_g &= 3,14 \times 12 \times \left( \frac{120,23^2}{2} - \frac{94,10^2}{2} \right) \\ V_g &= 52756,17 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

Perhitungan dimensi stator pada benda kerja dapat dilakukan dengan persamaan (6) untuk mencari volume silinder berlubang:

$$\begin{aligned}V_{\text{silinder berlubang}} &= \pi t(R^2 - r^2) \\ V_b &= \pi t(R^2 - r^2) \\ V_b &= 3,14 \times 12 \times \left( \frac{119,5^2}{2} - \frac{93,50^2}{2} \right) \\ V_b &= 51298,5 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

Perhitungan selisih antara dimensi stator pada gambar kerja dan benda kerja:

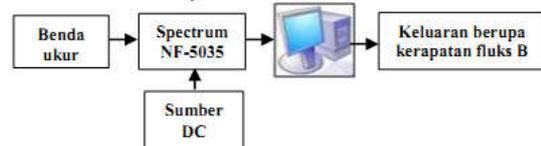
$$\begin{aligned}\Delta V &= V_b - V_g \\ \Delta V &= 52756,17 - 51298,5 \\ \Delta V &= -1457,67 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

Perhitungan persentase kesalahan dapat dilakukan dengan persamaan (8):

$$\begin{aligned}Pk &= \left| \frac{\Delta V}{V_g} \right| \times 100\% \\ Pk &= \left| \frac{-1457,67}{52756,17} \right| \times 100\% \\ Pk &= 2,76 \%\end{aligned}$$

Dari semua hasil perhitungan persentase kesalahan pembuatan komponen-komponen magnet permanen didapatkan nilai persentase kesalahan terkecil yaitu 0,13 % dan persentase kesalahan terbesar yaitu 8,15 %.

**Pengujian Medan Magnet Motor Magnet Permanen Metode Halbach Array Dengan Bantuan Instrumen Ukur SPECTRUM NF 5035.** Pengujian medan magnet pada motor magnet permanen metode halbach array yaitu dikerjakan dengan melakukan pengukuran menggunakan bantuan instrumen ukur Spectrum NF-5035, pengukuran dilakukan pada beberapa titik dari komponen utama motor magnet permanen metode halbach array



Gambar 19 Diagram skematik alat ukur Spectrum NF-5035

Tabel 5 Keterangan hasil perhitungan FEMM dan pengukuran Spectrum NF-5035

Keterangan	Magnitud Kerapatan Fluks	
	Sumbu-x (T)	Sumbu-y (T)
Perhitungan FEMM	0,0015	0,5342
Pengukuran Spectrum NF-5035	311,2283x10 <sup>-6</sup>	33,2662x10 <sup>-6</sup>

Perhitungan selisih antara magnitud kerapatan fluks hasil perhitungan dan pengukuran di sumbu-x:

$$\begin{aligned}\Delta B_x &= B_{x-ukur} - B_{x-hitung} \\ \Delta B_x &= 311,2283 \times 10^{-6} - 0,0015 \\ \Delta B_x &= -1,1888 \times 10^{-3} \text{ T}\end{aligned}$$

Perhitungan selisih antara magnitud kerapatan fluks hasil perhitungan dan pengukuran di sumbu-y:

$$\begin{aligned}\Delta B_y &= B_{y-ukur} - B_{y-hitung} \\ \Delta B_y &= 33,2662 \times 10^{-6} - 0,5342 \\ \Delta B_y &= -0,5341667 \text{ T}\end{aligned}$$

Perhitungan persentase kesalahan antara magnitud kerapatan fluks hasil perhitungan dan pengukuran di sumbu-x:

$$\begin{aligned}Pk &= \left| \frac{\Delta B_x}{B_{x-hitung}} \right| \times 100\% \\ Pk &= \left| \frac{-1,1888 \times 10^{-3}}{0,0015} \right| \times 100\% \\ Pk &= 79,25 \%\end{aligned}$$

Perhitungan persentase kesalahan antara magnitud kerapatan fluks hasil perhitungan dan pengukuran di sumbu-y:

$$\begin{aligned}Pk &= \left| \frac{\Delta B_y}{B_{y-hitung}} \right| \times 100\% \\ Pk &= \left| \frac{-0,5341667}{0,5342} \right| \times 100\% \\ Pk &= 99,99 \%\end{aligned}$$

Diperoleh persentase error yang tinggi mencapai 99,99 %, hal ini disebabkan berkurangnya kerapatan fluks magnet permanen akibat pemanasan dan pemukulan pada saat pemasangan magnet pada komponen-komponen motor magnet permanen.

**Pengujian unjuk kerja motor magnet permanen metode halbach array.** Proses penggeseran stator hingga posisi dua buah layer dari stator dan rotor saling berhadapan, didapatkan hasil berupa putaran pada rotor sejauh setengah putaran dengan arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Setelah mencapai setengah putaran, terjadi hentakan pada rotor yang membuat rotor tidak dapat melanjutkan putaran dan menyebabkan terjadinya resonansi, hal ini terjadi akibat adanya interaksi gaya tarik-menarik dari medan magnet permanen pada stator dan rotor yang memiliki kutub tak senama dan gaya tarik tersebut saling berlawanan sehingga akan terjadi kesetimbangan yang menyebabkan torsi yang timbul pada rotor adalah nol.

Selanjutnya proses penggeseran stator hingga posisi empat layer stator dan rotor saling berhadapan seperti pada, maka didapatkan hasil berupa rotor berputar sejauh setengah putaran dari posisi sebelumnya sehingga total putaran rotor yaitu sejauh  $360^\circ$  atau satu putaran penuh dengan arah berlawanan dengan arah jarum jam. Setelah mencapai satu putaran, terjadi hentakan pada rotor yang membuat rotor tidak dapat melanjutkan putaran dan menyebabkan terjadinya resonansi hingga akhirnya rotor terdiam. hal ini terjadi akibat adanya interaksi gaya tarik-menarik dari medan magnet permanen pada stator dan rotor yang memiliki kutub tak senama dan gaya tarik tersebut saling berlawanan sehingga akan terjadi kesetimbangan yang menyebabkan torsi yang timbul pada rotor adalah nol.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan, yaitu:

1. Rancangan motor magnet permanen metode halbach array terdiri dari empat buah layer, dengan layer pertama dan ketiga memanfaatkan fluks magnet pada komponen radial dengan sudut polaritas magnet permanen pada stator dan rotor sebesar  $30^\circ$ , untuk layer kedua dan

keempat memanfaatkan fluks magnet pada komponen axial pada stator dan rotornya.

2. Vektor kerapatan fluks celah udara yang berputar ke kiri menyebabkan rotor dapat berputar berlawanan arah putar jarum jam.
3. Magnitud kerapatan fluks (B) pada celah udara rotor dan stator dengan bantuan software FEMM 4.2 diperoleh komponen radial bernilai maksimum yaitu 0,57085 T dan komponen aksial bernilai minimum yaitu 0,09579 T.
4. Magnitud kerapatan fluks magnet memiliki nilai persentase error yang tinggi antara analisa FEMM dan pengukuran Spectrum NF-5035, akibat dari pemanasan dan pemukulan pada saat pemasangan magnet.
5. Motor magnet permanen berhasil mengkonversi tenaga magnet permanen menjadi tenaga putaran pada rotor sebanyak satu kali putaran atau berotasi sejauh  $360^\circ$  dengan arah putaran berlawanan dengan jarum jam.

## SARAN

Adapun saran-saran dari penelitian ini adalah, pada saat melakukan proses perancangan terlebih dahulu melakukan peninjauan bahan komponen yang ada pada pasaran baik berupa dimensi dan bentuk dari bahan, agar didapatkan dimensi yang sesuai keadaan sebenarnya pada saat proses perancangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2007. Permanent magnet selection and design handbook. U.S: National Impots LLC.
- Baltzis, Konstantinos B. 2010. The Finite Element Method Magnetics (FEMM) Freeware Package: May it Serve as an Educational Tool in Teaching electromagnetics. Greece: Aristotle University of Thessaloniki.
- Fitzgerald, A. E. Kingsley, Charles. Umans, JR., Stephen D. 1997. Mesin-Mesin Listrik. Jakarta: Erlangga.
- Hariadi, Eko. 2004. Kemagnetan dan Induksi Elektromagnetik. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.
- Meeker, David. 2010. User's Manual: Finite Element Method Magnetics.

- Merritt, Bernard T., Robert, F. Post., Gary, R. Dreifuerst., Donald, A. Bender. 1994. Halbach Array Motor/Generators-A Novel Generalized Electric Machine. U.S: Lawrence Livermore National Laboratory.
- Pujiaty. TG,. Sigit. 2009. Pembelajaran Pengukuran Luas Bangun Datar dan Volume Bangun Ruang Di SD. Departemen Pendidikan Nasional.
- Valone, Thomas F. 2010. Permanent Magnet Spiral Motor for Magnetic Gradient Energy Utilization: Axial Magnetic Field. Beltsvile: Integrity research institute.
- Yan, liang. Zhang, lei. wang, tianyi. Jiao, zongxia. Chen, chin-yin, and chen, i-ming. 2012. Magnetic Field Of Tubular Linear Machines With Dual Halbach Array. China: Beihang University..