

PEMODELAN MEDAN MAGNETIK DUA KAWAT GULUNGAN HELMHOLTZ

MODELLING OF TWO HELMHOLTZ COILS MAGNETIC FIELD

Harry Ramza¹, Kun Fayakun¹, Sugianto², Akhiruddin Maddu³
Latifah Sarah Supian⁴, Mohammad Syuhaimi Ab – Rahman⁵

¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka Jalan Tanah Merdeka No. 6, Kp Rambutan, Jakarta Timur 13830
Telp: +62 21 8400941, Faks: +62 21 87782739, ²Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka Jalan Tanah Merdeka No. 6, Kp Rambutan, Jakarta Timur 13830
Telp: +62 21 8400941, Faks: +62 21 87782739, ³Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor Jalan Meranti, Kampus IPB Dramaga, Babakan, Dramaga, Bogor, Jawa Barat 16680 Telp: (0251) 8625481, ⁴Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering The National Defense University of Malaysia Tingkat 7, Bangunan Bestari, Kem Sungai Besi 57000 Kuala Lumpur, Malaysia Telp: +603-90513400, Faks: +603-90513472, ⁵Department of Electrical, Electronic and System Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia Engineering Building, UKM – Bangi Campus, Bangi 16000, Malaysia
¹hramza@uhamka.ac.id, kun_fayakun@uhamka.ac.id, ²s.arjo@uhamka.ac.id,
³akhiruddin@ipb.ac.id, ⁴cawa711@gmail.com, ⁵syuhaimi@ukm.edu.my

Abstrak

Pemodelan medan magnetik diperlukan sebagai perangkat acuan untuk menentukan nilai dari beberapa variabel pengukuran atau proses pelaksanaan percobaan. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan data simulasi dari data perangkat lunak atau data percobaan. Pemodelan medan magnet digunakan untuk menentukan nilai kuat medan magnet dan nilai kerapatan fluks magnet yang dihasilkan dari dua buah gulungan kawat Helmholtz. Data simulasi diambil menggunakan aplikasi COMSOL 4.2 untuk melihat model medan magnet dan kerapatan fluks magnet dari dua gulungan kawat Helmholtz posisi sejajar. Kedua hasil model medan magnet dan kerapatan fluks magnet diproses menggunakan aplikasi Design Expert 11 untuk mendapatkan persamaan matematika sebagai persamaan pegangan untuk melakukan pengujian atau percobaan yang dilakukan secara berulang-ulang. Penelitian ini merupakan kajian awal untuk mendapatkan persamaan matematika yang berbentuk persamaan kuadrat sebagai kontribusi awal dalam percobaan Medan Magnet pada dua kawat Helmholtz.

Kata Kunci: Kawat Helmholtz, medan magnet, kerapatan fluks magnet, pemodelan matematik. COMSOL 4.2, *Design Expert*.

Abstract

The model of the magnetic field is required as reference devices to determine the value of many of measurement variables or the experimental implementation process. The value of this model is conducted by using the data simulation from the data output of software or data of experiment. Magnetic field model is applied to find the strengthening value of the magnetic field and magnetic flux density from two wires of Helmholtz coil. Data of simulation is taken from the software application COMSOL 4.2 to see the magnetic field model and the density of magnetic flux from two of the parallel coil. Both of result of magnetic field model and magnetic flux density will process by

the DESIGN EXPERT 11 application software. It will produce the mathematical equation as the platform equation for the experiment repetition. This research is a preliminary study to get the mathematical equation that creates the quadratic form as an initial contribution of the magnetic field experiment.

Keywords: Helmholtz coil, magnetic field, magnetic flux density, mathematical model, COMSOL 4.2, Design Expert.

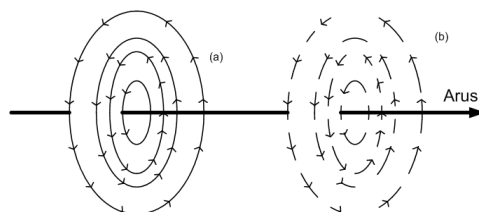
Tanggal Terima Naskah : 22 Maret 2018

Tanggal Persetujuan Naskah : 10 April 2018

1. PENDAHULUAN

Sebuah medan magnetik dapat digambarkan pada setiap titik dalam ruang dan waktu menggunakan vektor \vec{B} sebagai besarnya medan magnet B. Sebuah medan magnetik yang berubah dengan fungsi waktu menghasilkan sebuah medan listrik yang tidak sederhana (*non – conservative*). Fenomena ini dikatakan sebagai induksi elektromagnetik yang ditemukan oleh Faraday, Henry, dan lainnya [1-7]. Medan listrik yang tidak sederhana ini akan menghasilkan sebuah arus dan tegangan dalam setiap gulungan tembaga tersebut. Dengan mengukur tegangan ini pada posisi-posisi yang berbeda dan orientasi setiap gulungan serta variasi waktu medan magnetik yang dihasilkan dengan cara gulungan medan yang besarnya dapat dipetakan serta diperhitungkan. Frekuensi arus sinusoidal akan menjadi cukup rendah sehingga medan magnetik yang dihasilkan oleh setiap gulungan kawat secara identik akan sama dengan medan magnetik yang dihasilkan oleh sebuah medan gulungan yang menghasilkan sebuah arus konstan.

Sebuah kawat yang membawa arus menghasilkan sebuah medan magnetik \vec{B} dimana besaran dan arah pada setiap titik dalam ruang tergantung pada panjang dan bentuk simetris kawat tersebut, arus yang mengalir melalui kawat dan titik lokasi medan magnetik akan dapat ditentukan pula. Cara untuk menggambarkan pola medan magnetik adalah menggambarkan sebuah garis dimana setiap garis selalu sejajar dengan medan magnetik \vec{B} . Pola garis-garis tersebut menunjukkan arah medan magnetik pada setiap ruang. Intensitas medan dilambangkan dengan kerapatan (densitas) garis-garis. Di dalam kasus tertentu, intensitas medan mudah disimpulkan secara alami seperti sebuah pola medan dari sebuah keadaan yang simetris. Sebagai contoh, pola medan magnetik di sepanjang kawat lurus yang mengalirkan arus harus menggambarkan lingkaran kawat terpusat, seperti ditunjukkan pada gambar 1 berikut ini. Arah medan diberikan dengan menggunakan aturan tangan kanan. Kekuatan medan berkurang dengan semakin meningkatnya jarak kuat medan dari gulungan kawat. Hal ini ditunjukkan dengan menggambarkan garis-garis medan dan pelembahan bagian setiap garis tersebut.



Gambar 1. Dua cara untuk menggambarkan medan magnetik dari sebuah kawat lurus yang membawa arus: (a) garis-garis medan, dimana kedekatan setiap garis menunjukkan intensitas medan; dan (b) gambar vektor, dimana arah dan besaran setiap vektor menunjukkan arah dan intensitas medan pada setiap titik. Setiap titik garis medan mempunyai arah yang sama seperti vektor medan [8].

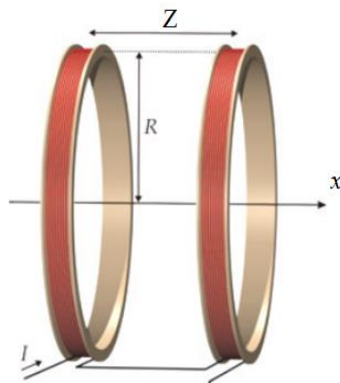
Misalkan kawat yang lurus dibengkokkan ke dalam sebuah bentuk lingkaran gulungan tipis, dengan celah kawat gulungan yang rapat. Medan pada setiap posisi apapun merupakan jumlah kontribusi dari beberapa elemen kawat gulungan pendek yang tersusun sepanjang kawat gulungan.

2. PERSAMAAN GULUNGAN HELMHOLTZ

Pada bidang sumbu medan karena satu lingkaran kawat dari hukum Biot – Savart, dimana medan magnetik B yang mempunyai arah – z ditunjukkan dalam persamaan berikut [8-11]

$$B = \frac{\mu_0 N I R^2}{2(R^2+z^2)^{3/2}} \dots\dots\dots(1)$$

dimana B dalam satuan Tesla, jika:
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ dalam permeabilitas ruang vakum.
 N adalah jumlah lilitan dari medan gulungan kawat.
 I adalah arus yang mengalir pada kawat dalam satuan ampere.
 R merupakan jari-jari gulungan dalam satuan meter
 Z merupakan jarak antar gulungan dalam satuan meter



Gambar 2. Bentuk skema gulungan Helmholtz [11]

Pada gambar 2, gulungan terdiri dari beberapa lingkaran kawat, maka arus total pada gulungan diberikan persamaan:

$$NI = \text{Arus total} \dots\dots\dots(2)$$

Di dalam sebuah gulungan Helmholtz, titik tengah dari setengah lintasan sumbu x yang berada di antara dua lingkaran dengan jari-jari R mempunyai sebuah persamaan:

$$Z = \frac{R}{2} \dots\dots\dots(3)$$

dengan mengganti persamaan (2) dan (3) ke dalam persamaan (1), maka dapat dihitung kerapatan fluks magnet B yaitu [11]:

$$B = \frac{\mu_0 N I R^2}{2\left(R^2 + \left(\frac{R}{2}\right)^2\right)^{3/2}} \dots\dots\dots(4)$$

Karena ada dua gulungan yang bekerja secara bersamaan maka persamaan 4 dikali dengan 2 dan menjadi persamaan yang singkat [11],

$$B = 1.3975 \mu_0 \frac{NI}{R} \text{ (dalam Tesla) (5)}$$

atau disingkat menjadi persamaan [11],

$$B = 0.899 \frac{NI}{R} \text{ (dalam Gauss)..... (6)}$$

maka persamaan fluks magnet dapat dituliskan [11]:

$$\phi = B.A \text{ (dalam satuan Weber)..... (7)}$$

dimana A merupakan luas penampang gulungan Helmholtz dengan satuan m².

3. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk mendapatkan perancangan dan hasil penelitian model persamaan matematik dapat dibagi menjadi dua metode penelitian:

- a. Metode simulasi dan analisis teori tentang gulungan Helmholtz.
Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan aplikasi COMSOL versi 4.2 [9-11]. Hasil yang ditampilkan adalah pola medan dan kuat medan magnetik yang dibangkitkan oleh gulungan Helmholtz. Karakteristik yang digunakan adalah diameter gulungan, jumlah gulungan dan jarak antar gulungan Helmholtz, serta diameter kawat gulungan.
- b. Metode pengukuran statistik melalui Perancangan Percobaan.
Perancangan dan pengukuran percepatan pertumbuhan tanaman padi pada kawasan dan lahan pertanian. Pengujian ini dilakukan dengan melakukan validasi internal dengan membandingkan pengujian percepatan pertumbuhan tanpa dipengaruhi medan magnetik. Pada proses ini, penelitian dilakukan dengan waktu pelaksanaan selama satu tahun.

4. RANCANGAN PENELITIAN

Pada penelitian ini, disusun langkah kerja secara rinci, yaitu:

- a. Identifikasi parameter-parameter yang diperlukan dalam membangkitkan medan magnetik, seperti: jari – jari gulungan Helmholtz, jarak antar gulungan, variasi arus, dan variasi tegangan.
- b. Melakukan pengambilan data dari hasil identifikasi parameter-parameter dengan menggunakan perangkat aplikasi COMSOL 4.2 [9].
- c. Melengkapi data dari variabel nilai jarak antara dua gulungan Helmholtz yang dapat disusun untuk mendapatkan nilai optimum.
- d. Melakukan analisis data untuk mendapatkan persamaan model matematika untuk studi percepatan pertumbuhan tanaman padi.
- e. Melakukan pengujian dengan menggunakan aplikasi Design Expert Versi 11 berdasarkan perancangan data yang telah diolah [12].
- f. Variasi yang ditentukan didasarkan sumbu X (bagian mendatar) dengan nilai 15 cm dan (-15 cm).
- g. Variasi yang ditentukan didasarkan sumbu Z (bagian tegak) dengan nilai 15 cm dan (-15 cm).
- h. Melakukan proses analisis statistik DOE “*Sequential Model Sum of Squares*” dengan tujuan untuk menentukan model persamaan yang disarankan pada model simulasi ini [12].

- i. Melakukan proses ANOVA dari tahapan ke-8 [12].
- j. Melakukan proses analisis model grafik [12].

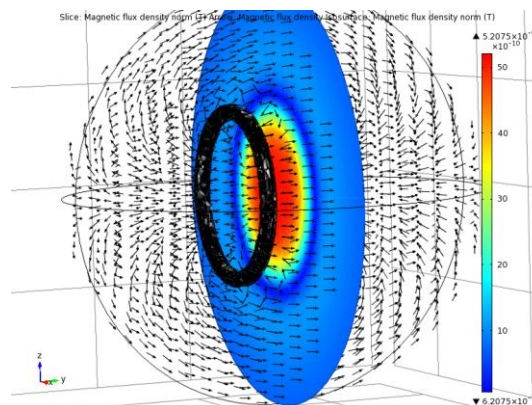
5. HASIL SIMULASI

Pada tahap ini dapat dihasilkan data potongan vertikal kerapatan fluks magnetik. Pada pengaturan awal yang ditunjukkan persamaan (3), terlihat bahwa:

- a. Jari – jari, R pada gulungan Helmholtz ini ditetapkan sebesar 15 cm (atau diameter 30 cm).
- b. Jarak antar gulungan Z sebesar 15 cm.
- c. Kerapatan Arus, J (*Current Density*) sebesar 1 A/m².
- d. Vektor potensial magnetik, A sebesar 1 Wb/m untuk bidang vektor x, y, dan z.

Pada gambar 3 berikut ini menunjukkan arah medan magnetik yang bergerak dari kiri ke kanan yang ditunjukkan garis arah panah. Bentuk yang terlihat pada bagian ini ialah bentuk lingkaran sesuai dengan gulungan Helmholtz.

Potongan medan magnetik (B) pada bidang pada gambar 3 ialah bidang x-z yang memperlihatkan posisi vertikal. Dari potongan kerapatan fluks magnetik B akan terlihat bahwa nilai tertinggi pada kerapatan ini berada pada bagian tengah, dengan nilai maksimum sebesar $5,2075 \times 10^{-9}$ Tesla serta nilai minimum sebesar $6,2075 \times 10^{-11}$ Tesla. Gambar berikut menunjukkan arah fluks magnetik (warna hitam) bergerak dari kanan menuju bagian kiri.



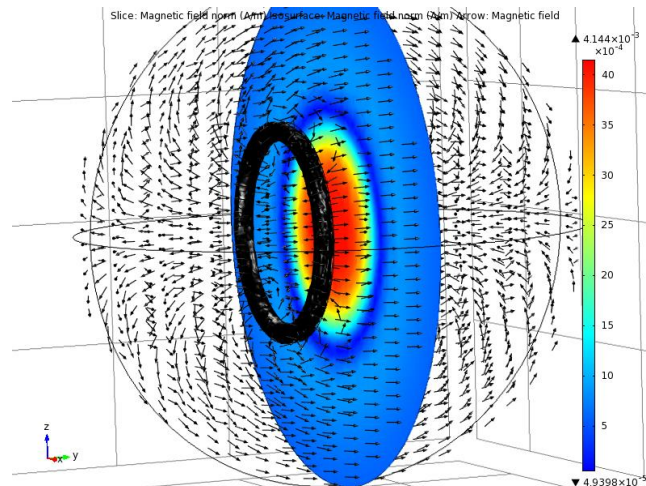
Gambar 3. Bentuk Kerapatan Fluks Medan Magnetik (B) dengan potongan vertikal

Jumlah posisi jejaring kerapatan fluks magnet ditetapkan sebanyak:

- a. x – *grid points* sebanyak 7 posisi titik.
- b. y - *grid points* sebanyak 7 posisi titik.
- c. z – *grid points* sebanyak 7 posisi titik.
- d. Faktor skala perhitungan sebesar 0.5.

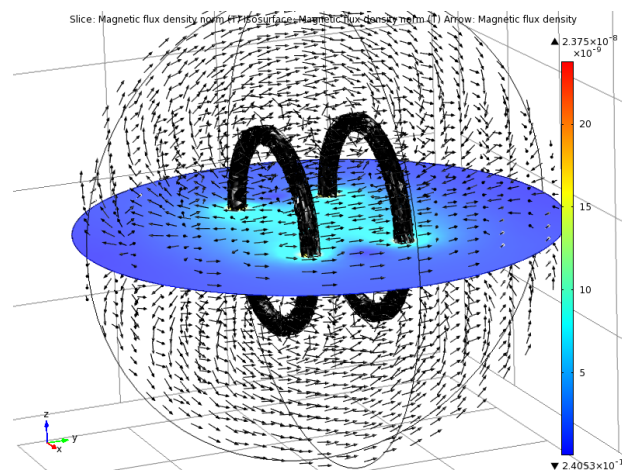
Demikian juga dengan hasil simulasi yang ditunjukkan pada gambar 4, dengan kondisi arah yang sama untuk arah medan magnet dari kanan ke arah kiri pada gambar. Nilai tertinggi medan magnetik maksimum didapat $4,144 \times 10^{-3}$ A/m dan nilai terendah sebesar $4,939 \times 10^{-5}$ A/m. Untuk jumlah posisi jejaring ditetapkan:

- a. x – *grid points* sebanyak 10 posisi titik.
- b. y - *grid points* sebanyak 10 posisi titik.
- c. z – *grid points* sebanyak 40 posisi titik.
- d. Faktor skala perhitungan sebesar 0,5.



Gambar 4. Bentuk medan magnetik (H) dengan posisi potongan vertikal

Gambar 5 berikut ini menunjukkan potongan horizontal untuk kerapatan fluks magnetik. Dari keadaan posisi bidang y-x ini tidak dapat dilihat perbedaan kerapatan yang ditimbulkan oleh dua gulungan Helmholtz.



Gambar 5. Bentuk Kerapatan Fluks Medan Magnetik dengan potongan horizontal

Gambar 5 juga menunjukkan arah medan dari kanan ke arah kiri pada bidang gambar. Kerapatan fluks magnet pada bagian tengah gulungan Helmholtz memberikan nilai sebesar $5,06 \text{ E-}09$ Tesla.

5. 1. Data Medan Magnetik

Bagian ini menunjukkan hasil perhitungan simulasi yang dihasilkan oleh *simulator*. Beberapa ketentuan yang harus dipenuhi dengan batasan-batasan berikut:

- Penilaian titik-titik menggunakan metode Titik Secara Reguler, dengan batas nilai normalisasi tertinggi 1 dan nilai normalisasi terendah -1.
- Jumlah titik pada arah sumbu x sebesar 10 *point*.
- Jumlah titik pada arah sumbu y sebesar 1 *point*.
- Jumlah titik pada arah sumbu z sebesar 10 *point*.

Hasil data yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk tabel 1 berikut ini, serta evaluasi medan magnetik dilakukan dengan cara menentukan titik-titik Gauss dan orde titik Gauss sebesar 1. Pengaturan data atau kehalusan data dilakukan otomatis secara internal oleh *simulator*.

Tabel 1. Hasil simulasi Normalisasi Medan Magnetik

penelitian harry 2.mph				
% Model	COMSOL 4.2.0.150			
% Version	Feb 22 2018, 17:19			
% Date	3			
% Dimension	100			
% Nodes	1			
% Expressions	Magnetic field norm			
% Description				
No	x	y	z	Medan Magnetik Normalisasi [H (A/m)]
1	-0.9	0	-0.9	NaN
2	-0.7	0	-0.9	NaN
3	-0.5	0	-0.9	NaN
4	-0.3	0	-0.9	6.09E-04
5	-0.1	0	-0.9	6.40E-04
6	0.1	0	-0.9	6.40E-04
7	0.3	0	-0.9	6.08E-04
8	0.5	0	-0.9	NaN
9	0.7	0	-0.9	NaN
10	0.9	0	-0.9	NaN
11	-0.9	0	-0.7	NaN
12	-0.7	0	-0.7	5.82E-04
13	-0.5	0	-0.7	6.82E-04
14	-0.3	0	-0.7	7.68E-04
15	-0.1	0	-0.7	8.17E-04
16	0.1	0	-0.7	8.17E-04
17	0.3	0	-0.7	7.64E-04
18	0.5	0	-0.7	6.74E-04
19	0.7	0	-0.7	5.84E-04
20	0.9	0	-0.7	NaN
21	-0.9	0	-0.5	NaN
22	-0.7	0	-0.5	6.76E-04
23	-0.5	0	-0.5	8.15E-04
24	-0.3	0	-0.5	8.28E-04
25	-0.1	0	-0.5	4.85E-04
26	0.1	0	-0.5	4.32E-04
27	0.3	0	-0.5	8.40E-04
28	0.5	0	-0.5	8.12E-04
29	0.7	0	-0.5	6.78E-04
30	0.9	0	-0.5	NaN
31	-0.9	0	-0.3	6.09E-04
32	-0.7	0	-0.3	7.63E-04
33	-0.5	0	-0.3	8.01E-04
34	-0.3	0	-0.3	7.48E-04
35	-0.1	0	-0.3	0.002927303
36	0.1	0	-0.3	0.002926352
37	0.3	0	-0.3	7.88E-04
38	0.5	0	-0.3	8.19E-04
39	0.7	0	-0.3	7.62E-04
40	0.9	0	-0.3	6.09E-04
41	-0.9	0	-0.1	6.38E-04
42	-0.7	0	-0.1	8.18E-04
43	-0.5	0	-0.1	3.98E-04
44	-0.3	0	-0.1	0.002913757
45	-0.1	0	-0.1	0.004020795
46	0.1	0	-0.1	0.00402696
47	0.3	0	-0.1	0.002925019
48	0.5	0	-0.1	4.27E-04

Tabel 1. Hasil simulasi Normalisasi Medan Magnetik (Lanjutan)

% Model		penelitian harry 2.mph		
% Version		COMSOL 4.2.0.150		
% Date		Feb 22 2018, 17:19		
% Dimension		3		
% Nodes		100		
% Expressions		1		
% Description		Magnetic field norm		
No	x	y	z	Medan Magnetik Normalisasi [H (A/m)]
48	0.5	0	-0.1	4.27E-04
49	0.7	0	-0.1	8.16E-04
50	0.9	0	-0.1	6.39E-04
51	-0.9	0	0.1	6.35E-04
52	-0.7	0	0.1	8.14E-04
53	-0.5	0	0.1	4.60E-04
54	-0.3	0	0.1	0.002974099
55	-0.1	0	0.1	0.004062778
56	0.1	0	0.1	0.004009257
57	0.3	0	0.1	0.002899144
58	0.5	0	0.1	4.49E-04
59	0.7	0	0.1	8.13E-04
60	0.9	0	0.1	6.38E-04
61	-0.9	0	0.3	6.10E-04
62	-0.7	0	0.3	7.62E-04
63	-0.5	0	0.3	8.30E-04
64	-0.3	0	0.3	8.10E-04
65	-0.1	0	0.3	0.00292026
66	0.1	0	0.3	0.002958655
67	0.3	0	0.3	8.27E-04
68	0.5	0	0.3	7.92E-04
69	0.7	0	0.3	7.66E-04
70	0.9	0	0.3	6.10E-04
71	-0.9	0	0.5	NaN
72	-0.7	0	0.5	6.75E-04
73	-0.5	0	0.5	8.16E-04
74	-0.3	0	0.5	7.96E-04
75	-0.1	0	0.5	4.30E-04
76	0.1	0	0.5	4.33E-04
77	0.3	0	0.5	8.14E-04
78	0.5	0	0.5	8.12E-04
79	0.7	0	0.5	6.72E-04
80	0.9	0	0.5	NaN
81	-0.9	0	0.7	NaN
82	-0.7	0	0.7	5.83E-04
83	-0.5	0	0.7	6.72E-04
84	-0.3	0	0.7	7.64E-04
85	-0.1	0	0.7	8.14E-04
86	0.1	0	0.7	8.14E-04
87	0.3	0	0.7	7.63E-04
88	0.5	0	0.7	6.75E-04
89	0.7	0	0.7	5.82E-04
90	0.9	0	0.7	NaN
91	-0.9	0	0.9	NaN
92	-0.7	0	0.9	NaN
93	-0.5	0	0.9	NaN
94	-0.3	0	0.9	6.08E-04
95	-0.1	0	0.9	6.40E-04

Tabel 1. Hasil simulasi Normalisasi Medan Magnetik (Lanjutan)

% Model	penelitian harry 2.mph			
% Version	COMSOL 4.2.0.150			
% Date	Feb 22 2018, 17:19			
% Dimension	3			
% Nodes	100			
% Expressions	1			
% Description	Magnetic field norm			
No	x	y	z	Medan Magnetik Normalisasi [H (A/m)]
96	0.1	0	0.9	6.38E-04
97	0.3	0	0.9	6.09E-04
98	0.5	0	0.9	NaN
99	0.7	0	0.9	NaN
100	0.9	0	0.9	NaN

Dari tabel 1 terlihat bahwa jumlah potongan vertikal medan magnetik memberikan nilai data kedudukan titik bernilai 0. Variasi nilai hanya diberikan pada arah sumbu x dan z dengan jumlah variasi data sebanyak 100 buah (10 titik sumbu X \times 10 titik sumbu Z). Nilai normalisasi yang diberikan untuk masing-masing sumbu tertinggi sebesar 0,9 dan terendah sebesar -0,9.

5. 2. Data Kerapatan Fluks Magnet

Bagian ini menunjukkan hasil simulasi yang dihasilkan oleh *simulator*. Beberapa ketentuan yang harus dipenuhi untuk menghasilkan data seperti yang ditunjukkan pada tabel 2 berikut ini:

- Penilaian titik-titik menggunakan metode titik secara reguler, dengan batas nilai normalisasi tertinggi 1 dan nilai normalisasi terendah -1.
- Jumlah titik pada arah sumbu x sebesar 10 *point*.
- Jumlah titik pada arah sumbu y sebesar 1 *point*.
- Jumlah titik pada arah sumbu z sebesar 10 *point*.

Sama halnya seperti yang telah ditetapkan pada tabel 1, hasil data yang diperoleh ditampilkan dalam tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Hasil Simulasi Normalisasi Kerapatan Fluks Magnet

% Model	penelitian harry 2.mph COMSOL			
% Version	4.2.0.150			
% Date	Feb 22 2018, 17:19			
% Dimension	3			
% Nodes	100			
% Expressions	1			
% Description	Magnetic flux density norm			
No	x	y	z	Kerapatan Fluks Magnet Normalisasi [normB (Tesla)]
1	-0.9	0	-0.9	NaN
2	-0.7	0	-0.9	NaN
3	-0.5	0	-0.9	NaN
4	-0.3	0	-0.9	7.65E-10
5	-0.1	0	-0.9	8.04E-10
6	0.1	0	-0.9	8.04E-10
7	0.3	0	-0.9	7.64E-10
8	0.5	0	-0.9	NaN
9	0.7	0	-0.9	NaN
10	0.9	0	-0.9	NaN

Tabel 2. Hasil Simulasi Normalisasi Kerapatan Fluks Magnet (Lanjutan)

penelitian harry 2.mph COMSOL				
% Model				
% Version	4.2.0.150			
% Date	Feb 22 2018, 17:19			
% Dimension	3			
% Nodes	100			
% Expressions	1			
% Description	Magnetic flux density norm			
No	x	y	z	Kerapatan Fluks Magnet Normalisasi .[normB (Tesla)]
11	-0.9	0	-0.7	NaN
12	-0.7	0	-0.7	7.31E-10
13	-0.5	0	-0.7	8.56E-10
14	-0.3	0	-0.7	9.65E-10
15	-0.1	0	-0.7	1.03E-09
16	0.1	0	-0.7	1.03E-09
17	0.3	0	-0.7	9.60E-10
18	0.5	0	-0.7	8.47E-10
19	0.7	0	-0.7	7.33E-10
20	0.9	0	-0.7	NaN
21	-0.9	0	-0.5	NaN
22	-0.7	0	-0.5	8.50E-10
23	-0.5	0	-0.5	1.02E-09
24	-0.3	0	-0.5	1.04E-09
25	-0.1	0	-0.5	6.10E-10
26	0.1	0	-0.5	5.43E-10
27	0.3	0	-0.5	1.06E-09
28	0.5	0	-0.5	1.02E-09
29	0.7	0	-0.5	8.51E-10
30	0.9	0	-0.5	NaN
31	-0.9	0	-0.3	7.65E-10
32	-0.7	0	-0.3	9.59E-10
33	-0.5	0	-0.3	1.01E-09
34	-0.3	0	-0.3	9.40E-10
35	-0.1	0	-0.3	3.68E-09
36	0.1	0	-0.3	3.68E-09
37	0.3	0	-0.3	9.90E-10
38	0.5	0	-0.3	1.03E-09
39	0.7	0	-0.3	9.58E-10
40	0.9	0	-0.3	7.65E-10
41	-0.9	0	-0.1	8.01E-10
42	-0.7	0	-0.1	1.03E-09
43	-0.5	0	-0.1	5.00E-10
44	-0.3	0	-0.1	3.66E-09
45	-0.1	0	-0.1	5.05E-09
46	0.1	0	-0.1	5.06E-09
47	0.3	0	-0.1	3.68E-09
48	0.5	0	-0.1	5.36E-10
49	0.7	0	-0.1	1.03E-09
50	0.9	0	-0.1	8.03E-10
51	-0.9	0	0.1	7.98E-10
52	-0.7	0	0.1	1.02E-09
53	-0.5	0	0.1	5.79E-10
54	-0.3	0	0.1	3.74E-09
55	-0.1	0	0.1	5.11E-09
56	0.1	0	0.1	5.04E-09
57	0.3	0	0.1	3.64E-09
58	0.5	0	0.1	5.64E-10

Tabel 2. Hasil Simulasi Normalisasi Kerapatan Fluks Magnet (Lanjutan)

% Model penelitian harry 2.mph COMSOL				
% Version 4.2.0.150				
% Date Feb 22 2018, 17:19				
% Dimension 3				
% Nodes 100				
% Expressions 1				
% Description Magnetic flux density norm				
No	x	y	z	Kerapatan Fluks Magnet Normalisasi .[normB (Tesla)]
59	0.7	0	0.1	1.02E-09
60	0.9	0	0.1	8.02E-10
61	-0.9	0	0.3	7.66E-10
62	-0.7	0	0.3	9.58E-10
63	-0.5	0	0.3	1.04E-09
64	-0.3	0	0.3	1.02E-09
65	-0.1	0	0.3	3.67E-09
66	0.1	0	0.3	3.72E-09
67	0.3	0	0.3	1.04E-09
68	0.5	0	0.3	9.95E-10
69	0.7	0	0.3	9.62E-10
70	0.9	0	0.3	7.66E-10
71	-0.9	0	0.5	NaN
72	-0.7	0	0.5	8.49E-10
73	-0.5	0	0.5	1.03E-09
74	-0.3	0	0.5	1.00E-09
75	-0.1	0	0.5	5.40E-10
76	0.1	0	0.5	5.44E-10
77	0.3	0	0.5	1.02E-09
78	0.5	0	0.5	1.02E-09
79	0.7	0	0.5	8.44E-10
80	0.9	0	0.5	NaN
81	-0.9	0	0.7	NaN
82	-0.7	0	0.7	7.32E-10
83	-0.5	0	0.7	8.44E-10
84	-0.3	0	0.7	9.60E-10
85	-0.1	0	0.7	1.02E-09
86	0.1	0	0.7	1.02E-09
87	0.3	0	0.7	9.59E-10
88	0.5	0	0.7	8.48E-10
89	0.7	0	0.7	7.31E-10
90	0.9	0	0.7	NaN
91	-0.9	0	0.9	NaN
92	-0.7	0	0.9	NaN
93	-0.5	0	0.9	NaN
94	-0.3	0	0.9	7.64E-10
95	-0.1	0	0.9	8.04E-10
96	0.1	0	0.9	8.02E-10
97	0.3	0	0.9	7.65E-10
98	0.5	0	0.9	NaN
99	0.7	0	0.9	NaN
100	0.9	0	0.9	NaN

Hasil yang diperoleh ini akan diproses untuk dilakukan analisis yang menghasilkan kontribusi persamaan ilmiah. Persamaan fundamental ini akan digunakan sebagai dasar untuk melakukan eksperimen lapangan.

6. PENGOLAHAN DATA

Data yang diperoleh akan diolah menggunakan aplikasi Design Expert atau konsep *Design of Experiment* (DOE). DOE merupakan sebuah pendekatan terencana untuk menentukan penyebab atau efek keterkaitan, serta hanya dapat digunakan untuk setiap proses dengan nilai masukan dan keluaran yang terukur. Konsep DOE dikembangkan pada mulanya untuk penggunaan pertanian serta menjadi sebuah perangkat proses untuk perbaikan kualitas dengan menggunakan pengaturan proses statistik atau *Statistical Process Control* (SPC). DOE juga telah banyak digunakan pada proses industri (seperti: kimia, makanan, farmasi) disebabkan penggunaan yang mudah dan praktis bagi ilmuwan dan praktisi sehingga dapat melakukan proses rekayasa, seperti: waktu, temperatur, tekanan, dan nilai aliran. Kemunculan komputer sebagai perangkat hitung menjadi sebuah katalisator dalam penggunaan metode DOE secara numerik.

6.1 Rancangan Pemodelan Data Simulasi

Pada bagian awal perancangan dilakukan percobaan simulasi pemodelan statistik Design Expert dimana data diperoleh dari hasil simulasi pola medan magnet dan kerapatan fluks magnet yang didapat dari perangkat lunak COMSOL. Untuk tahapan ini pembahasan mengenai pengolahan data Medan Magnet yang telah dihasilkan ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4.

6.1.1. Pemodelan Medan Magnet

Rancangan percobaan pemodelan ditetapkan menggunakan metode *Central Composite Design* (CCD). Jumlah hasil pengulangan percobaan disesuaikan dengan jumlah simulasi sebelumnya, yaitu sebanyak 100 pengulangan.

Tabel 3. Rancangan pemodelan Medan Magnet

	Factor 1	Factor 2	Response 1		Factor 1	Factor 2	Response 1
Run	A:Sumbu X	B:Sumbu Z	Medan Magnet	Run	A:Sumbu X	B:Sumbu Z	Medan Magnet
	Point	Point	A/m		Point	Point	A/m
1	0.1	-0.5	4.32E-04	51	0.7	-0.7	5.84E-04
2	-0.5	-0.7	6.82E-04	52	-0.9	0.1	6.35E-04
3	-0.9	-0.5	0.00E+00	53	0.3	0.9	6.09E-04
4	0.9	0.9	0.00E+00	54	0.9	-0.9	0.00E+00
5	0.9	0.3	6.10E-04	55	0.9	-0.3	6.09E-04
6	-0.9	0.1	6.35E-04	56	-0.9	-0.5	0.00E+00
7	0.1	-0.9	6.40E-04	57	0.9	0.3	6.10E-04
8	-0.9	0.1	6.39E-04	58	-0.5	0.9	0.00E+00
9	0.1	-0.9	6.40E-04	59	0.1	-0.9	6.40E-04
10	-0.9	0.1	6.35E-04	60	-0.1	0.5	4.30E-04
11	0.9	0.3	6.10E-04	61	0.9	-0.3	6.09E-04
12	-0.5	-0.1	3.98E-04	62	0.7	-0.7	5.84E-04
13	-0.5	-0.1	3.98E-04	63	0.5	0.1	4.49E-04
14	-0.1	0.5	4.30E-04	64	-0.9	-0.5	0.00E+00
15	0.7	-0.7	5.84E-04	65	0.5	0.1	4.49E-04
16	-0.7	0.5	6.75E-04	66	0.1	-0.5	4.32E-04
17	-0.5	-0.1	3.98E-04	67	0.3	0.9	6.09E-04
18	-0.7	0.5	6.75E-04	68	0.7	-0.7	5.84E-04

Tabel 3. Rancangan pemodelan Medan Magnet (Lanjutan)

	Factor 1	Factor 2	Response 1		Factor 1	Factor 2	Response 1
Run	A:Sumbu X	B:Sumbu Z	Medan Magnet	Run	A:Sumbu X	B:Sumbu Z	Medan Magnet
	Point	Point	A/m		Point	Point	A/m
19	-0.9	-0.9	0.00E+00	69	-0.5	0.9	0.00E+00
20	0.3	0.9	6.09E-04	70	-0.9	-0.5	0.00E+00
21	-0.7	0.5	6.75E-04	71	-0.5	-0.7	6.82E-04
22	0.1	-0.5	4.32E-04	72	0.1	-0.9	6.40E-04
23	0.7	-0.7	5.84E-04	73	-0.5	-0.1	3.98E-04
24	0.9	-0.3	6.09E-04	74	-0.1	0.5	4.30E-04
25	0.9	0.3	6.10E-04	75	0.7	0.7	5.82E-04
26	-0.9	0.9	0.00E+00	76	-0.1	0.1	4.06E-03
27	0.5	0.1	4.49E-04	77	0.5	0.1	4.49E-04
28	-0.7	0.5	6.75E-04	78	-0.5	0.9	0.00E+00
29	-0.1	0.5	4.30E-04	79	0.9	0.9	0.00E+00
30	0.1	-0.5	4.32E-04	80	-0.1	0.5	4.30E-04
31	-0.5	-0.7	6.82E-04	81	-0.9	-0.9	0.00E+00
32	0.9	-0.9	0.00E+00	82	-0.5	-0.1	3.98E-04
33	0.1	-0.5	4.32E-04	83	0.5	0.1	4.49E-04
34	0.1	-0.5	4.32E-04	84	0.7	0.7	5.82E-04
35	0.9	-0.3	6.09E-04	85	0.5	0.1	4.49E-04
36	-0.1	0.1	4.06E-03	86	0.1	-0.5	4.32E-04
37	0.7	0.7	5.82E-04	87	0.3	0.9	6.09E-04
38	-0.5	-0.7	6.82E-04	88	0.7	0.7	5.82E-04
39	-0.1	0.5	4.30E-04	89	-0.1	0.5	4.30E-04
40	-0.5	-0.1	3.98E-04	90	-0.5	-0.7	6.82E-04
41	-0.7	0.5	6.75E-04	91	0.5	0.1	4.49E-04
42	0.1	-0.5	4.32E-04	92	-0.1	0.5	4.30E-04
43	0.7	0.7	5.82E-04	93	0.7	0.7	5.82E-04
44	0.5	0.1	4.49E-04	94	-0.5	-0.7	6.82E-04
45	-0.7	0.5	6.75E-04	95	-0.9	0.9	0.00E+00
46	-0.7	0.5	6.75E-04	96	-0.5	-0.1	3.98E-04
47	-0.1	0.5	4.30E-04	97	0.7	0.7	5.82E-04
48	0.7	-0.7	5.82E-04	98	-0.5	-0.1	3.98E-04
49	-0.5	0.9	0.00E+00	99	0.5	0.1	4.49E-04
50	0.7	-0.7	5.84E-04	100	-0.5	-0.7	6.82E-04

6. 1. 2. Pemodelan Kerapatan Fluks Magnet

Metode pemodelan yang digunakan ialah *Central Composite Design* (CCD). Jumlah pengulangan harus disesuaikan dengan jumlah pengulangan pada simulasi sebelumnya.

Tabel 4. Rancangan pemodelan Kerapatan Fluks Magnet

Run	Factor 1 A:Sumbu X Point	Factor 2 B:Sumbu Z Point	Response 1 Kerapatan Fluks Magnet Tesla	Run	Factor 1 A:Sumbu X Point	Factor 2 B:Sumbu Z Point	Response 1 Kerapatan Fluks Magnet Tesla
1	0.1	-0.5	5.43E-10	51	0.7	-0.7	7.33E-10
2	-0.5	-0.7	8.56E-10	52	-0.9	0.1	7.98E-10
3	-0.9	-0.5	0.00E+00	53	0.3	0.9	7.65E-10
4	0.9	0.9	0.00E+00	54	0.9	-0.9	0.00E+00
5	0.9	0.3	7.66E-10	55	0.9	-0.3	7.65E-10
6	-0.9	0.1	7.98E-10	56	-0.9	-0.5	0.00E+00
7	0.1	-0.9	8.04E-10	57	0.9	0.3	7.66E-10
8	-0.9	0.1	7.98E-10	58	-0.5	0.9	0.00E+00
9	0.1	-0.9	8.04E-10	59	0.1	-0.9	8.04E-10
10	-0.9	0.1	7.98E-10	60	-0.1	0.5	5.40E-10
11	0.9	0.3	7.66E-10	61	0.9	-0.3	7.65E-10
12	-0.5	-0.1	5.00E-10	62	0.7	-0.7	7.33E-10
13	-0.5	-0.1	5.00E-10	63	0.5	0.1	5.64E-10
14	-0.1	0.5	5.40E-10	64	-0.9	-0.5	0.00E+00
15	0.7	-0.7	7.33E-10	65	0.5	0.1	5.64E-10
16	-0.7	0.5	8.49E-10	66	0.1	-0.5	5.43E-10
17	-0.5	-0.1	5.00E-10	67	0.3	0.9	7.65E-10
18	-0.7	0.5	8.49E-10	68	0.7	-0.7	7.33E-10
19	-0.9	-0.9	0.00E+00	69	-0.5	0.9	0.00E+00
20	0.3	0.9	7.65E-10	70	-0.9	-0.5	0.00E+00
21	-0.7	0.5	8.49E-10	71	-0.5	-0.7	8.56E-10
22	0.1	-0.5	5.43E-10	72	0.1	-0.9	8.04E-10
23	0.7	-0.7	7.33E-10	73	-0.5	-0.1	5.00E-10
24	0.9	-0.3	7.65E-10	74	-0.1	0.5	5.40E-10
25	0.9	0.3	7.66E-10	75	0.7	0.7	7.31E-10
26	-0.9	0.9	0.00E+00	76	-0.1	0.1	5.11E-09
27	0.5	0.1	5.64E-10	77	0.5	0.1	5.64E-10
28	-0.7	0.5	8.49E-10	78	-0.5	0.9	0.00E+00
29	-0.1	0.5	5.40E-10	79	0.9	0.9	0.00E+00
30	0.1	-0.5	5.43E-10	80	-0.1	0.5	5.40E-10
31	-0.5	-0.7	8.56E-10	81	-0.9	-0.9	0.00E+00
32	0.9	-0.9	0.00E+00	82	-0.5	-0.1	5.00E-10
33	0.1	-0.5	5.43E-10	83	0.5	0.1	5.64E-10
34	0.1	-0.5	5.43E-10	84	0.7	0.7	7.31E-10
35	0.9	-0.3	7.65E-10	85	0.5	0.1	5.64E-10
36	-0.1	0.1	5.11E-09	86	0.1	-0.5	5.43E-10
37	0.7	0.7	7.31E-10	87	0.3	0.9	7.65E-10
38	-0.5	-0.7	8.56E-10	88	0.7	0.7	7.31E-10
39	-0.1	0.5	5.40E-10	89	-0.1	0.5	5.40E-10
40	-0.5	-0.1	5.00E-10	90	-0.5	-0.7	8.56E-10

Tabel 4. Rancangan pemodelan Kerapatan Fluks Magnet (Lanjutan)

Run	Factor 1 A:Sumbu X	Factor 2 B:Sumbu Z	Response 1 Kerapatan Fluks Magnet Tesla	Run	Factor 1 A:Sumbu X	Factor 2 B:Sumbu Z	Response 1 Kerapatan Fluks Magnet Tesla
41	-0.7	0.5	8.49E-10	91	0.5	0.1	5.64E-10
42	0.1	-0.5	5.43E-10	92	-0.1	0.5	5.40E-10
43	0.7	0.7	7.31E-10	93	0.7	0.7	7.31E-10
44	0.5	0.1	5.64E-10	94	-0.5	-0.7	8.56E-10
45	-0.7	0.5	8.49E-10	95	-0.9	0.9	0.00E+00
46	-0.7	0.5	8.49E-10	96	-0.5	-0.1	5.00E-10
47	-0.1	0.5	5.40E-10	97	0.7	0.7	7.31E-10
48	0.7	-0.7	7.33E-10	98	-0.5	-0.1	5.00E-10
49	-0.5	0.9	0.00E+00	99	0.5	0.1	5.64E-10
50	0.7	-0.7	7.33E-10	100	-0.5	-0.7	8.56E-10

6. 2. Analisis Model Data Simulasi

Dari tabel 3 dan tabel 4 diperoleh data-data statistik yang telah diproses oleh aplikasi *simulator* untuk mendapatkan persamaan matematik sebagai persamaan dasar untuk melakukan percobaan lapangan.

6. 2. 1. Analisis Model Medan Magnetik

Dari hasil rancangan eksperimen menggunakan perangkat aplikasi Design Expert memberikan keterangan ringkasan statistik pemodelan yang akan diolah. Dari hasil proses pemodelan diperoleh bahwa persamaan yang disarankan oleh aplikasi tersebut adalah persamaan Kuadratik, seperti yang ditunjukkan pada tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	PRESS	
Linear	0.0006	0.0039	-0.0166	-0.0298	0.0000	
2FI	0.0006	0.0039	-0.0272	-0.0423	0.0000	
Quadratic	0.0005	0.1353	0.0893	0.0597	0.0000	Suggested
Cubic	0.0005	0.1616	0.0777	0.0649	0.0000	
Quartic	0.0005	0.2068	0.0761	0.0173	0.0000	
Fifth	4.392E-07	1.0000	1.0000	1.0000	2.600E-11	Aliased

Pemilihan dipusatkan untuk memaksimalkan model persamaan kepada nilai penyesuaian R² (Adjusted R²) dan nilai prediksi R² (Predicted R²).

Tabel 6 berikut ini merupakan urutan jenis persamaan model sesuai dengan hasil jumlah kuadratnya. Urutan model Kuadratik terhadap *Two Factor Interaction* (2FI) merupakan pemilihan yang disarankan karena pemilihan ini berdasarkan persamaan polynomial orde yang tertinggi serta bagian-bagian tambahan sangat mendekati perhitungan sehingga pada model ini tidak terjadi kesalahan dalam perhitungan.

Tabel 6. *Sequential Model Sum of Squares [Type I]*

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Mean vs Total	0.0000	1	0.0000		
Linear vs Mean	1.192E-07	2	5.959E-08	0.1913	0.8262
2FI vs Linear	2.776E-10	1	2.776E-10	0.0009	0.9764
Quadratic vs 2FI	3.984E-06	2	1.992E-06	7.14	0.0013 Suggested
Cubic vs Quadratic	7.979E-07	4	1.995E-07	0.7058	0.5900
Quartic vs Cubic	1.372E-06	5	2.743E-07	0.9691	0.4415
Fifth vs Quartic	0.0000	5	4.813E-06	2.495E+07	< 0.0001 Aliased
Residual	1.543E-11	80	1.929E-13		
Total	0.0001	100	5.816E-07		

Tabel 7 memberikan keterangan tentang uji ketidaksesuaian dalam pemilihan sumber persamaan polynomial. Model yang dipilih harus memiliki kekurangan yang tidak signifikan. Pemilihan sumber model persamaan orde – 5 (*Fifth*) terlihat bahwa hasil model persamaan akan menghasilkan kesalahan dalam pembentukan persamaan model matematik.

Tabel 7. Uji Ketidaksesuaian (*Lack of Fit Tests*)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Linear	0.0000	17	1.778E-06	9.217E+06	< 0.0001
2FI	0.0000	16	1.889E-06	9.793E+06	< 0.0001
Quadratic	0.0000	14	1.874E-06	9.716E+06	< 0.0001 Suggested
Cubic	0.0000	10	2.544E-06	1.319E+07	< 0.0001
Quartic	0.0000	5	4.813E-06	2.495E+07	< 0.0001
Fifth	0.0000	0			Aliased
Pure Error	1.543E-11	80	1.929E-13		

6. 2. 2. Analisis Model Kerapatan Fluks Magnet

Analisis data eksperimen perangkat simulasi memberikan ringkasan statistik pemodelan. Tabel 8 menunjukkan pemilihan sumber persamaan model yang difokuskan kepada nilai penyesuaian R^2 (*Adjusted R²*) dan nilai prediksi R^2 (*Predicted R²*). Untuk pengaruh dari 1.0000: PRESS secara statistik tidak dijelaskan pada tabel 8 berikut ini. Statistik PRESS merupakan ukuran bagaimana model persamaan sesuai dengan nilai-nilai rancangan. Koefisien untuk model persamaan dihitung tanpa nilai rancangan awal. Hal ini dilakukan untuk setiap nilai data perulangan dan selanjutnya dilakukan penjumlahan sisa kuadrat.

Tabel 8. *Model Summary Statistics*

Source	Std. Dev.	R^2	<i>Adjusted R²</i>	<i>Predicted R²</i>	PRESS
Linear	7.020E-10	0.0039	-0.0166		*
2FI	7.056E-10	0.0039	-0.0272		*
Quadratic	6.644E-10	0.1352	0.0892		* Suggested
Cubic	6.686E-10	0.1615	0.0776		*
Quartic	6.692E-10	0.2066	0.0759		*
Fifth	0.0000	1.0000	1.0000		* Aliased

Tabel 9 menunjukkan urutan sumber model persamaan berdasarkan jumlah kuadrat. Pemilihan juga berdasarkan persamaan polinomial orde tertinggi dimana bagian-bagian

tambahan sangat mendekati perhitungan dan pada model ini tidak terjadi kesalahan dalam perhitungan.

Tabel 9. *Sequential Model Sum of Squares* [Type I]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Mean vs Total	4.392E-17	1	4.392E-17		
Linear vs Mean	1.874E-19	2	9.368E-20	0.1901	0.8272
2FI vs Linear	4.888E-22	1	4.888E-22	0.0010	0.9751
Quadratic vs 2FI	6.300E-18	2	3.150E-18	7.14	0.0013 Suggested
Cubic vs Quadratic	1.261E-18	4	3.152E-19	0.7051	0.5905
Quartic vs Cubic	2.166E-18	5	4.331E-19	0.9670	0.4427
Fifth vs Quartic	3.807E-17	5	7.614E-18		<i>Aliased</i>
Residual	0.0000	80	0.0000		
Total	9.191E-17	100	9.191E-19		

Tabel 10 menunjukkan hasil uji ketidaksesuaian dalam pemilihan sumber persamaan polynomial. Model yang dipilih harus memiliki kekurangan yang tidak signifikan. Model Kuadratik merupakan pilihan yang disarankan dalam pengujian ini.

Tabel 10. *Lack of Fit Tests*

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Linear	4.780E-17	17	2.812E-18		
2FI	4.780E-17	16	2.987E-18		
Quadratic	4.150E-17	14	2.964E-18		
Cubic	4.024E-17	10	4.024E-18		
Quartic	3.807E-17	5	7.614E-18		
Fifth	0.0000	0			
Pure Error	0.0000	80	0.0000		

6. 3. Kontribusi Ilmiah Eksperimen Simulasi

Dari hasil analisis didapat kontribusi ilmiah dalam bentuk persamaan matematik. Persamaan ini digunakan sebagai persamaan asas untuk digunakan secara nyata atau lapangan.

Persamaan akhir untuk faktor aktual pada Medan Magnetik dapat diberikan:

$$\begin{aligned} \text{Medan Magnet} = & 0.000874 + 0.000076 \text{ Sumbu X} - 7.92751 \cdot 10^{-06} \text{ Sumbu Z} \\ & - 1.70274 \cdot 10^{-06} \text{ Sumbu X} \cdot \text{Sumbu Z} - 0.000459 \text{ Sumbu X}^2 \\ & - 0.000512 \text{ Sumbu Z}^2 \quad \left(\text{dalam satuan } \frac{\text{Ampere}}{\text{meter}} \right) \end{aligned}$$

Persamaan akhir untuk faktor aktual pada Kerapatan Fluks Magnet dapat diberikan:

$$\begin{aligned} \text{Kerapatan Fluks Magnet} = & 1.09875 \cdot 10^{-09} + 9.54857 \cdot 10^{-11} \text{ Sumbu X} \\ & - 9.75920 \cdot 10^{-12} \text{ Sumbu X} \cdot \text{Sumbu Z} - 5.76962 \cdot 10^{-10} \text{ Sumbu X}^2 \\ & - 6.43663 \cdot 10^{-10} \text{ Sumbu Z}^2 \quad \left(\text{dalam satuan Tesla} \right) \end{aligned}$$

Persamaan nilai aktual dari faktor-faktor yang ditentukan dapat digunakan untuk membuat prediksi tentang respon pada tingkat masing-masing faktor yang telah ditetapkan. Nilai tingkatan harus ditentukan dalam satuan asli. Persamaan ini tidak dapat digunakan untuk menentukan dampak relatif masing-masing faktor karena koefisien diskalakan untuk menampung unit masing-masing faktor dan *intercept* yang tidak berada pada ruang atau kawasan nilai rancangan.

7. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi telah dapat dibentuk persamaan fundamental untuk digunakan dalam keadaan nyata atau lapangan. Beberapa ketentuan penggunaan persamaan yang dimaksudkan adalah nilai jarak harus sesuai dengan nilai sebenarnya; sumber potensial magnetik adalah 1 Wb/m atau sama dengan 1 Volt.sec/m; faktor yang digunakan adalah koordinat pada sumbu Z untuk arah vertikal dan sumbu X pada arah horizontal, dan faktor koordinat pada sumbu y tidak digunakan karena persamaan digunakan untuk satu arah potongan

REFERENSI

- [1] M. Florez, E. Martinez, and M. V. Carbonell, "Effect of Magnetic Field Treatment on Germination of Medicinal Plants *Salvia Officinalis L* and *Calendula Officinalis L*," *Pol. J. Environ. Stud*, vol.21, no.1, pp. 57-63, 2012.
- [2] E. Fu, "The effects of magnetic fields on plant growth and health," *Young Scientists Journal*, vol.5, no.11, p. 38, 2012.
- [3] H.-H. Huang and S. R. Wang, "The effects of 60 Hz magnetic fields on plant growth," *Nature and Science*, vol.5, no.1, pp. 60-68, 2007.
- [4] D. R. Mane and V. S. Sawant, "Comparative Study of Effect of Magnetic Field and Magnetically Treated Water on Growth of Plants and Crop Yield," *International Journal for Scientific Research & Development*, vol.3, no.2, 2015.
- [5] M. Racuciu, H. Olosutean, and M. Perju, "Experimental results of laboratory simulation of extremely low frequency magnetic field pretreatment of Barley seeds influence," *Romanian Journal of Physics*, vol.62, no.802, pp. 1-13, 2016.
- [6] S. Sasaki and T. Miao, "The effect of zero magnetic fields on initial growth of rice," *Subtle Energies and Energy Medicine*, vol.13, no.1, pp. 61-73, 2012.
- [7] Y. K. Tsang, "Magnetic Fields due to Currents," in *Module of Experiment Physics II*, ed. Leeds: School of Mathematics, University of Leeds, 2004.
- [8] Anonymous, "Introductory Experimental Physics II in Magnetic Field of a Circular Coil," in *Experiment Module*, ed. New York: New York University, 2017, pp. 1-10.
- [9] Anonymous, "Magnetic Field of a Helmholtz Coil," in *COMSOL Multiphysics*, ed. Burlington, MA, USA: COMSOL, Inc, 2016, pp. 1-14.
- [10] V. E. Baranova and P. F. Baranov, "The Helmholtz coils simulating and improved in COMSOL," in *2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, 2014, pp. 1-4.
- [11] V. Bhatt, et al, "Design & Development of Helmholtz Coil for Hyperpolarized MRI," in *COMSOL Conference*, ed. Bangalore, India: COMSOL, 2010.
- [12] M. J. Anderson and P. J. Whitcomb, *DOE Simplified; Practical Tools for Effective Experimentation*, 2 ed. vol. 1. New York: Productivity Press, 2007.