

**STUDI KELAYAKAN SISTEM INDUKSI MEDAN MAGNET MENGGUNAKAN
SINGLE TRANCEIVER PADA BAHAN FERROMAGNETIK DAN NON-
FERROMAGNETIK**

***FEASIBILITY STUDY OF MAGNETIC FIELD INDUCTION SYSTEM BY USING
SINGLE TRANCEIVER ON FERROMAGNETIC AND NON-FERROMAGNETIC
MATERIAL***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom

Disusun Oleh :

Dian Arum Novitasari

1104140054



PROGRAM STUDI S1-TEKNIK FISIKA

FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO

UNIVERSITAS TELKOM

BANDUNG

2018

**STUDI KELAYAKAN SISTEM INDUKSI MEDAN MAGNET MENGGUNAKAN
SINGLE TRANCEIVER PADA BAHAN FERROMAGNETIK DAN NON-
FERROMAGNETIK**

***FEASIBILITY STUDY OF MAGNETIC FIELD INDUCTION SYSTEM BY USING
SINGLE TRANCEIVER ON FERROMAGNETIC AND NON-FERROMAGNETIC
MATERIAL***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom

Disusun Oleh :

Dian Arum Novitasari

1104140054



PROGRAM STUDI S1-TEKNIK FISIKA

FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO

UNIVERSITAS TELKOM

BANDUNG

2018

**STUDI KELAYAKAN SISTEM INDUKSI MEDAN MAGNET MENGGUNAKAN
SINGLE TRANCEIVER PADA BAHAN FERROMAGNETIK DAN NON-
FERROMAGNETIK**

***FEASIBILITY STUDY OF MAGNETIC FIELD INDUCTION SYSTEM BY USING
SINGLE TRANCEIVER ON FERROMAGNETIC AND NON-FERROMAGNETIC
MATERIAL***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom

Disusun Oleh :

Dian Arum Novitasari

1104140054



PROGRAM STUDI S1-TEKNIK FISIKA

FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO

UNIVERSITAS TELKOM

BANDUNG

2018

	UNIVERSITAS TELKOM	NO. Dokumen	
	Jl. Telekomunikasi No.1 Ters.Buah Batu Bandung 40257	No. Revisi	
	FORMULIR PERNYATAAN ORISINALITAS	Berlaku efektif	

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

NAMA : Dian Arum Novitasari

NIM : 1104140054

ALAMAT : Jalan Brotojoyo Barat 4 no 20, Semarang.

No.Tlp/HP : 085774738342

E-mail : dianarum.novitasari.da@gmail.com

Menyatakan bahwa Tugas Akhir ini merupakan karya orisinal saya sendiri, dengan judul:

**STUDI KELAYAKAN SISTEM INDUKSI MEDAN MAGNET MENGGUNAKAN
SINGLE TRANCEIVER PADA BAHAN FERROMAGNETIK DAN NON-
FERROMAGNETIK**

Atas pernyataan ini, saya siap menanggung resiko/sanksi yang dijatuhkan kepada saya apabila kemudian ditemukan adanya pelanggaran terhadap kejujuran akademik atau etika keilmuan dalam karya ini, atau ditemukan bukti yang menunjukkan ketidakasilan karya ini.

Bandung, 3 Juli 2018



Dian Arum Novitasari

NIM. 1104140054

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir dengan judul :

**STUDI KELAYAKAN SISTEM INDUKSI MEDAN MAGNET MENGGUNAKAN
SINGLE TRANCEIVER PADA BAHAN FERROMAGNETIK DAN NON-
FERROMAGNETIK**

***FEASIBILITY STUDY OF MAGNETIC FIELD INDUCTION SYSTEM BY USING
SINGLE TRANCEIVER ON FERROMAGNETIC AND NON-FERROMAGNETIC
MATERIAL***

TUGAS AKHIR

Tugas Akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom

Disusun Oleh:

DIAN ARUM NOVITASARI

1104140054

Bandung, 3 Juli 2018

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Dudi Darmawan, S.Si., M.T.
NIP. 99740049-1

Dr. Mahfudz Al Huda, M.Eng
NIP. 197006091988121001

ABSTRAK

Telah dibuat sistem induksi medan magnet yang menggunakan satu koil pemancar dan satu koil penerima. Adanya eksitasi sinyal sinus pada koil pemancar (transmitter) menimbulkan medan magnet yang berubah-ubah sehingga menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) induksi pada koil penerima (receiver). Pengembangan awal ini didasari dengan konsep metoda *Magnetic Inductance Tomography* (MIT). *Magnetic Inductance Tomography* (MIT) dikategorikan sebagai pencitraan pasif dengan teknik *electrodeless* melalui penggunaan eksitasi kumparan untuk menginduksi medan elektromagnetik, yang kemudian diukur pada sisi penerima. Perancangan awal koil dan sistem koil dibantu dengan Simulasi COMSOL 4.4 Multiphysics®. Simulasi COMSOL dapat menunjukkan nilai induktansi, sebaran pola medan magnet. Koil dibuat berupa solenoida menggunakan kawat dengan diameter 0.8 mm, jumlah dan panjang lilitan masing-masing 50 dan 48 mm. Secara keseluruhan perbedaan nilai induktansi pada simulasi dengan eksperimen adalah 0.017 mH. Dengan input sebesar 10 Volt didapatkan jarak maksimum dan minimum koil masing – masing 2 cm dan 11 cm. Frekuensi kerja sistem koil yaitu 5 MHz. Sistem koil ini juga mampu membedakan bahan ferromagnetik dan non-ferromagnetik berupa parafin, campuran paraffin dan besi, besi dan baja. Sistem koil ini mampu membedakan kondisi cacat berupa lubang dengan diameter 16 cm dengan jarak antar koil 4 cm.

Kata kunci : koil, induksi medan magnet, arus eddy

ABSTRACT

A magnetic field induction system has been developed using single transmitting and receiving coils. The presence of a sine signal excitation on the transmitter coil generates an alternating magnetic field causing an induced electromotive force (emf) to the receiver coil (receiver). This initial development is based on the concept of Magnetic Inductance Tomography (MIT) method. Magnetic Inductance Tomography (MIT) is categorized as passive imaging by electrodeless technique through the use of a coil excitation to induce an electromagnetic field, which is then measured at the receiving end. The initial design of coils and coil systems is aided by COMSOL 4.4 Multiphysics® Simulation. COMSOL simulation can show inductance value, magnetic field pattern distribution. The coil is made of a solenoid using a wire of 0.8 mm in diameter, the number and length of windings of 50 and 48 mm respectively. Overall difference of inductance value in simulation with experiment is 0.017 mH. With an input of 10 Volt, the maximum and minimum distance of each coil are 2 cm and 11 cm respectively. The working frequency of the coil system is 5 MHz. The coil system is capable of distinguishing ferromagnetic and non-ferromagnetic materials in the form of paraffin, paraffin and iron mixture, iron and steel. Coil system is able to distinguish the defect condition of a hole with a diameter of 16 cm with a distance between coils 4 cm.

Keywords: Coils, Magnetic field induction, eddy current.

KATA PENGANTAR

Syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmatNya, saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini, yang dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik, Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom.

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangat sulit bagi saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Giyar dan Ibu Rumiasih, serta adikku Muhamad Nur Faizi telah sabar menunggu dan berdoa yang tiada putus kepada penulis hingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Dr. Dudi Darmawan, S.Si., MT., dan Dr. Mahfudz Al Huda sebagai pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Bapak dan Ibu dosen pengajar Prodi S1 Teknik Fisika Universitas Telkom, yang telah memberikan ilmu dan bantuan kepada penulis selama berkuliah.
4. Ctech lab Edwar Technology C-Tech Lab Edwar Technology beserta tim khususnya pak Mahfudz selaku koordinator riset, bagian elektronik CEST (mas Rohmadi, mas Fadlil, dan mas Bambang), bagian HPC (mas Almushfi), dan bagian sensor (mas Yanto dan mas Kuri) yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini.
5. Bella Eliana, terima kasih telah banyak membantu, selalu sabar, selalu memberikan dukungan, semangat, dan pengertian kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini
6. Faris Hamidan, terima kasih telah banyak membantu, selalu sabar, selalu memberikan dukungan, semangat, dan pengertian kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini
7. Mega Muthmainnah, Angistu Palamarta, Muhammad Pandu Aryo Gumilang, dan Ikhwan Permana, terima kasih untuk segala bentuk dukungan dan semangatnya serta canda tawa yang mampu menghilangkan penat selama penulis mengerjakan Tugas Akhir ini.

8. Teman teman seperjuangan NDT Research Group, yang telah banyak mendukung dan memberi semangat.
9. Teman teman lab Sistel, yang telah banyak mendukung dan memberi semangat.
10. Teman-teman TF-38-03 serta Teknik Fisika Angkatan 2014, terima kasih atas persahabatan dan pertemanan dalam menjalani perkuliahan.
11. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan di sini. Semoga Allah SWT memberkati dan membalas semua kebaikan yang telah dilakukan.

Semoga Allah SWT memberikan imbalan yang setimpal pada mereka yang telah memberikan bantuan, dan dapat menjadikan semua bantuan ini sebagai ibadah. Aamiin Yaa Rabbal ‘Alamiin.

Bandung, 3 Juli 2018

Dian Arum Novitasari

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah.....	2
1. 3 Tujuan Penelitian.....	2
1. 4 Batasan Masalah	2
1. 5 Metode Penelitian.....	3
1. 6 Sistematika Penelitian.....	3
BAB II	5
LANDASAN TEORI	5
2. 1 Non- Destructive Testing (NDT).....	5
2. 2 Medan Magnet pada <i>Magnetic Inductance Tomography</i> (MIT)	5
2. 3 Persamaan Maxwell.....	9
2. 4 Arus Eddy	11
2. 5 Frekuensi Resonansi pada Koil	12
2. 6 Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi dan Hukum Faraday	13
2. 7 Sensor.....	14
2.7.1 Induktansi pada Solenoida.....	14

2. 8	Magnetik Permeabilitas	16
2. 9	Problema Maju	17
2.9.1	<i>Finite Element Method</i> (FEM)	17
2.9.2	COMSOL® Multiphysics®	19
BAB III		20
METODE PENELITIAN		20
3. 1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	20
3. 2	Jadwal Pelaksanaan Penelitian	20
3. 3	Diagram alir penelitian	21
3.3.1	Simulasi dan eksperimen.....	21
3. 4	Prosedur Penelitian.....	22
3.4.1	Simulasi Sistem Menggunakan COMSOL Multiphysic 4.4	22
3.4.2	Pengaturan Geometri	22
3.4.3	Pengaturan <i>Material</i>	23
3.4.4	Pengaturan <i>Modul Magnetic Fields</i> (mf).....	24
3.4.5	Pengaturan <i>Modul Electrical Circuit</i> (cir).....	25
3.4.6	Pengaturan <i>Study</i>	25
3.4.7	Pengukuran Induktansi	26
3.4.8	Pengukuran Tegangan	26
BAB IV		27
HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN		27
4. 1	Data Hasil Simulasi COMSOL Multiphysics 4.4	27
4.1.1	Simulasi Induktansi Diri.....	27
4.1.2	Simulasi Sistem Induksi Medan Magnet	29
4. 2	Konfigurasi Sensor Koil.....	31
4. 3	Pengujian Sinyal Output Pemancar.....	31
4.3.1	Pengambilan Data Karakterisasi Sistem Sensor Koil	33

4. 4	Pengambilan data sensitivas sensor terhadap objek normal dengan variasi bahan uji	34
4. 5	Data Tegangan dengan Objek Cacat	37
	KESIMPULAN DAN SARAN	40
5.1	Kesimpulan	40
5.2	Saran.....	40
	DAFTAR PUSTAKA.....	41
	LAMPIRAN	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi dan prinsip dasar MIT[5].	6
Gambar 2. 2. Induksi timbal balik (mutual induction)[7].	6
Gambar 2. 3 Persamaan rangkaian teori induktansi bersama [10].	7
Gambar 2. 4 Daerah Arus Eddy.	10
Gambar 2. 5. Contoh Bentuk Elemen Hingga (FEM). (a) 1D; (b) 2D; (c) 3D[2].	18
Gambar 2. 6. Contoh hasil pemecahan bentuk objek 3D kedalam elemen hingga[2].	18
Gambar 2. 7 Jenis- jenis desain sensor[9].	14
Gambar 2. 8 Lilitan kawat silinder	15
Gambar 3. 1 Blok diagram tahapan penelitian	21
Gambar 3. 2 Prototipe bentuk geometri koil menggunakan COMSOL	23
Gambar 3. 3 Konfigurasi sistem koil.	23
Gambar 3. 4 Pengaturan material udara.	24
Gambar 3. 5 Pengaturan material tembaga pada koil.	24
Gambar 3. 6 Input arah arus.	25
Gambar 3. 7 Pengaturan electrical circuit secara keseluruhan.	25
Gambar 4.1 Pengaturan meshing	27
Gambar 4.2 Pola densitas fluks magnet single koil.	28
Gambar 4.3 Pola densitas fluks magnet sistem koil dengan view (a) 3D (b) 2D	29
Gambar 4.4 Gelombang nilai tegangan penerima terhadap perubahan jarak.	30
Gambar 4.5 Perbandingan bentuk sinyal exciter dengan transmitter.	30
Gambar 4.6 Blok Diagram Pengukuran Output Pemancar Sebelum Terhubung Koil.	32
Gambar 4.7 Blok Diagram Output Pemancar Saat Terhubung Koil.	32
Gambar 4.8 Grafik Karakterisasi Sistem Koil Terhadap Pengaruh Jarak Antar Koil.	34
Gambar 4.9 Posisi Peletakan Besi (10 x 5 x 4) cm beserta penamaan koil.	34
Gambar 4.10 Posisi Peletakan Objek Uji Paraffin.	35
Gambar 4.11 Posisi Peletakan Objek Campuran Paraffin dan Besi.	35
Gambar 4.12 Grafik Sensitivitas Koil terhadap Perubahan Bahan Material.	35
Gambar 4.13 Pengaruh Bentuk Objek Terhadap Perubahan Nilai Tegangan.	36
Gambar 4.14 Pengaruh Material Objek Terhadap Perubahan Nilai Tegangan.	37
Gambar 4.15 Grafik Pengaruh Kondisi Cacat pada Objek dengan Jarak 4 cm.	37
Gambar 4.16 Grafik Pengaruh Kondisi Cacat pada Objek dengan Jarak 6 cm.	38
Gambar 4.17 Grafik Pengaruh Kondisi Cacat pada Objek dengan Jarak 8 cm.	39

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Jadwal pelaksanaan penelitian.....	20
Tabel 3. 2 Spesifikasi Sensor.....	22
Tabel 4.1 Data Induktansi, kapasitansi dan resistansi.	31
Tabel 4. 2 Amplitudo Tegangan Pada Output Pemancar	32

BAB 1

PENDAHULUAN

Bab ini berisi penjelasan umum tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, Batasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan.

1.1 Latar Belakang

Dalam dunia industri *quality control*, mengetahui keadaan atau kondisi internal *material* diperlukan. Khususnya seorang inspektor, untuk menguji dan memeriksa *material* guna menjamin bahwa *material* dengan kondisi yang baik tanpa cacat atau cacat. Seiring perkembangan jaman, menuntut seorang inspektor atau seorang *engineer* untuk dapat melakukan sesuatu yang bertujuan untuk memudahkan pekerjaan dan meningkatkan akurasi sekaligus dalam meningkatkan segi finansial maupun waktu.

Beberapa metoda yang biasa dilakukan oleh seorang *inspector* untuk menginspeksi salah satunya adalah *non-destructive testing* (NDT). NDT atau pengujian tanpa merusak adalah suatu pengujian yang dilakukan terhadap suatu benda tanpa merusak struktur benda atau *material* tersebut. Sebelumnya, beberapa penelitian mengenai uji NDT telah dilakukan, seperti radiasi elektromagnetik, *ultrasonic*, dan pengujian arus eddy. Salah satu metoda NDT untuk mengetahui kondisi suatu objek yang melalui pemetaan distribusi resistivitas menggunakan metoda tomografi.

Dalam proses tomografi dapat dilihat dari besaran fisis yang dieksitasi dan yang terukur. Dalam penelitian ini pemancar dan penerima berupa kumparan atau biasa disebut *electrodeless*. Metoda tomografi jenis ini adalah *magnetic induction tomography* (MIT). Prinsip pengukuran MIT dengan mengalirkan arus bolak - balik ke dalam koil *exciter* atau pemancar, yang mana akan menghasilkan medan magnet *primer*, kemudian akan diinduksikan ke koil penerima. Dari koil penerima akan didapatkan data tegangan induksi. Namun, jika ada suatu benda yang bersifat konduktif dan diletakkan diantara keduanya, maka arus eddy muncul dan dapat menghasilkan medan magnet, disebut medan magnet sekunder. Karena itu, MIT dapat diaplikasikan karena berpotensi dapat mendeteksi cacat pada logam dan mengacu dari hasil penelitian sebelumnya diantaranya dilakukan oleh thesis Syahrul Ulum.

Pada penelitian ini akan dilakukan studi awal dalam mengembangkan sistem magnetik induktansi, yaitu uji kelayakan pada sistem induksi medan magnet yang cukup layak menghasilkan besaran yang dapat diobservasi pada bahan ferromagnetik dan non-ferromagnetik dan mampu membedakan kondisi pada bahan tersebut. Uji kelayakan sistem induksi medan magnet ini dilakukan melalui studi simulasi dan eksperimen. Hal ini yang menjadi fokus utama pada penelitian tugas akhir ini.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini akan dibahas beberapa masalah antara lain:

1. Bagaimana membuat desain dan merancang sistem koil dengan bantuan COMSOL Multiphysics versi 4.4 ?
2. Bagaimana cara karakterisasi sistem koil dengan objek udara ?
3. Bagaimana pengaruh gaya gerak listrik terhadap jenis objek dan kondisi cacat objek?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian adalah sebagai berikut:

1. Melakukan studi perancangan sistem koil.
2. Melakukan karakterisasi sistem koil.
3. Menguji jenis objek, bentuk dan kondisi objek terhadap variabel terukur.
4. Menguji sensitifitas sistem koil terhadap kecacatan pada objek uji.

1.4 Batasan Masalah

Agar perancangan sistem terfokus, maka penulis membatasi permasalahan dan kondisi yang ideal dalam penelitian ini pada hal-hal berikut:

1. Objek uji yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini yaitu parafin, campuran parafin dan besi, besi, baja dan aluminium.
2. Metoda dalam mendeteksi bahan ferromagnetik dan non-ferromagnetik dibatasi hanya menggunakan sistem koil berhadapan
3. definisi layak berdasarkan alat ukur yang ada di laboratorium seperti function generator, sumber arus, dan voltmeter.

1.5 Metode Penelitian

Penyelesaian tugas akhir ini dilakukan dengan beberapa tahap, yaitu:

1 Studi Literatur

Memahami dasar teori sebagai pendukung yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini seperti jurnal, buku, *paper*, *e-books*, atau referensi lain yang berkaitan dengan tugas akhir ini.

2 Studi Lapangan

Proses pembelajaran dengan cara konsultasi dengan pembimbing, maupun teman-teman.

3 Perancangan Sistem

Proses perancangan dilakukan dengan simulasi dan eksperimen.

4 Pengukuran dan Pengambilan Data

Pengambilan data secara manual menggunakan osiloskop dan *function generator*.

5 Pengolahan Data

Hasil data diolah dengan menampilkan kurva 2D menggunakan *Microsoft Excel*.

6 Analisa Data

Kurva dianalisis untuk membandingkan hasil yang didapatkan dari pengolahan data.

7 Penyusunan Laporan

Menyusun laporan berdasarkan tahapan yang sudah dilakukan.

1.6 Sistematika Penelitian

Sistematika yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang penjelasan secara umum latar belakang penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metode penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini berisi tentang teori-teori yang mendasari penelitian ini yaitu antara lain tentang pengertian NDT, MIT, bentuk sensor.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tahapan penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dilakukan analisa hasil pengukuran dari simulasi dan eksperimen.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh baik dari segi kelebihan maupun kekurangan serta ditambahkan saran-saran yang berguna untuk penelitian lebih lanjut

BAB II

LANDASAN TEORI

2. 1 Non- Destructive Testing (NDT)

Non- Destructive Testing (NDT) adalah pengujian, evaluasi, atau inspeksi pada berbagai macam bahan yang tidak akan merusak fungsi dari objek. Beberapa kemungkinan keuntungan menggunakan metode Non-Destructive Testing (NDT) seperti mengurangi kerusakan komponen dan mencegah kegagalan selama pengerjaan[1].

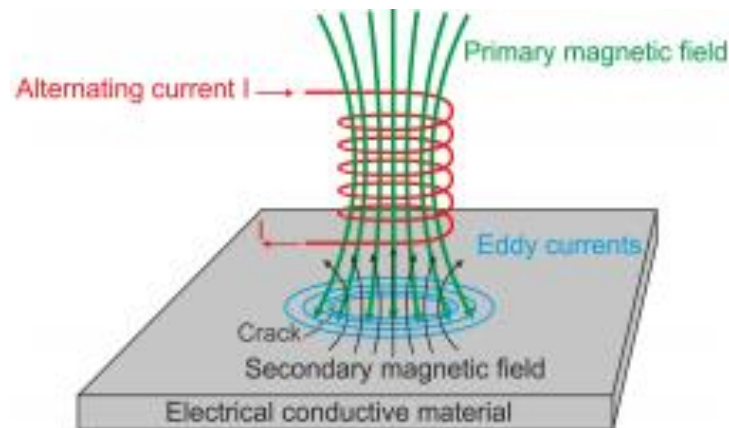
NDT banyak digunakan dalam industri, aerospace, manufaktur dan bidang konstruksi. Ada beberapa macam metoda NDT, seperti *ultrasonic*, *magnetic particle*, *radiographic*, *electromagnetic*, *visual testing*, *liquid penetrant*, *eddy current testing*, dan lain lain[1]. Metoda yang sering digunakan dalam pengujian objek yang bersifat konduktif seperti besi, baja, alumunium dan lain-lain adalah metode *Eddy Current Testing*. Prinsip *Eddy Current Testing* ini didasarkan adanya interaksi antara sumber medan magnet dengan objek uji bersifat konduktif yang akan menimbulkan arus eddy. Dengan prinsip *eddy current* inilah dikembangkan menjadi metoda *Magnetic Inductance Tomography* (MIT). Konsep sistem induktansi medan magnet yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini, yaitu konsep dari *Magnetic Inductance Tomography* (MIT).

2. 2 Medan Magnet pada *Magnetic Inductance Tomography* (MIT)

Magnetic Induction Tomography merupakan teknik pencitraan dengan resolusi rendah yang digunakan untuk merekonstruksi distribusi permeabilitas magnet pada sebuah objek[2]. *Magnetic induction tomography* (MIT), biasa juga disebut sebagai induktansi tomografi atau tomografi *eddy-current*, merupakan teknik tomografi listrik yang paling baru dieksplorasi dibandingkan dengan sistem tomografi listrik lainnya, seperti tomografi impedansi listrik dan kapasitansi listrik.

MIT dikategorikan sebagai keluarga pencitraan pasif dengan teknik *electrodeless* melalui penggunaan eksitasi kumparan untuk menginduksi medan elektromagnetik dalam materi, yang kemudian diukur pada sisi penerima dengan sensor[3]. Prinsip dasar MIT dijelaskan dengan menggunakan teori dasar *Mutual Inductance* dan *eddy current*. Seperti

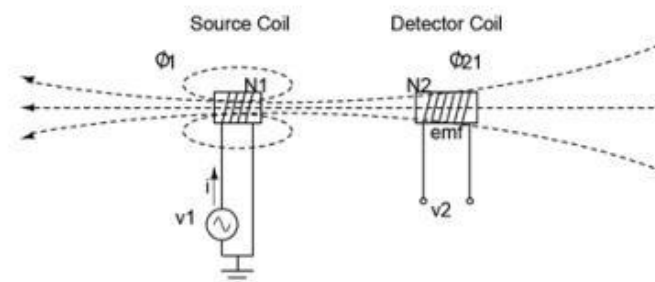
yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Arus bolak - balik dialirkan kedalam koil *transmitter* atau pemancar yang mana akan menghasilkan medan magnet primer kemudian akan diinduksikan ke koil penerima. Dari koil penerima akan didapatkan data tegangan induksi. Namun, jika ada suatu benda yang bersifat konduktif dan diletakkan diantara keduanya, maka arus eddy muncul dan dapat menghasilkan medan magnet disebut medan magnet sekunder.



Gambar 2. 1 Ilustrasi dan prinsip dasar MIT[12].

Jika kita mengasumsikan kondisi ruang obyek berisi udara (permeabilitas relatif ≈ 1) maka sinyal tegangan induksi yang diterima koil 2 atau koil penerima sesuai dengan kondisi atau referensi pengukuran. Distribusi dari medan magnet akan terdistorsi oleh interaksi ferromagnetik (*material* yang memiliki permeabilitas tinggi) dan atau logam (memiliki konduktivitas tinggi) ke dalam ruang obyek. *Material* konduktif akan melemahkan sinyal, menghasilkan pengukuran yang lebih kecil.

Sifat dasar dari MIT sebagai *mutual inductance*. Gambar 2.2 menunjukkan induktansi bersama tanpa adanya pengaruh arus eddy. Arus pada koil pemancar menghasilkan fluks (ϕ), sehingga menginduksi ke koil penerima dan menghasilkan medan magnet sekunder (emf).



Gambar 2. 2. Induksi timbal balik (mutual induction)[7].

Gambar 2.2 menunjukkan bahwa nilai V_2 proporsional dengan perubahan arus pada koil pemancar. Hubungan ini yang disebut induksi timbal balik (mutual induction).

$$V_2 = N \frac{d\phi_{21}}{dt} \quad (2.1)$$

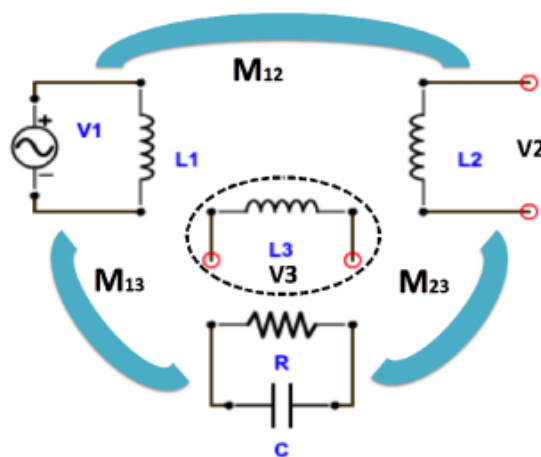
Fluks ϕ_{21} sebanding dengan i_1 , sehingga persamaan dapat menjadi,

$$V_2 = M \frac{di_1}{dt} \quad (2.2)$$

Atau,

$$M = N_2 \frac{d\phi_{21}}{dt} \quad (2.3)$$

Induksi timbal balik disebabkan oleh adanya fluks pada koil penerima dan fluks tersebut terinduksi dari arus koil pemancar. Sehingga dapat didefinisikan bahwa fluks pada suatu koil yang tergantung pada perubahan arus lainnya [7]. Prinsip induktansi bersama ini dapat digambarkan dengan rangkaian listrik seperti gambar 2.3. Koil pemancar dialiri oleh sumber AC. Dengan menganggap koil pemancar sebagai inductor L_1 dan menghitung koil sebagai inductor L_2 . Tegangan yang terhitung pada L_2 disebabkan oleh induksi ditulis U_2 . Sifat – sifat yang menggambarkan objek didefinisikan menggunakan rangkaian R-C. arus eddy terjadi dipermukaan objek, U_3 menggambarkan sumber tegangannya, dan induktansi dari objek adalah L_3 . Induktansi bersama antara L_1, L_2 dan L_3 adalah M_{12}, M_{13}, M_{23} . Tujuannya adalah untuk memperoleh hubungan antara tegangan induksi pada koil pemancar dan tegangan yang diterima akibat adanya pengaruh bahan konduktif pada koil penerima dengan menggunakan rangkaian ekuivalen seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Gambar rangkaian ekuivalen teori induktansi bersama [10].

Dengan menggunakan persamaan fluks magnetik diperoleh:

$$\dot{I} = \frac{d\dot{i}}{dt} = j\omega i = j\omega \frac{\dot{U}}{j\omega L} = \frac{\dot{U}}{L} \quad (2.4)$$

Tegangan induksi $\dot{U}_2$ pada induktor L_2 terdiri dari dua bagian, $\dot{U}'_2$ dan $\dot{U}''_2$. $\dot{U}'_2$ adalah induksi langsung dari tegangan primer $\dot{U}_1$. Tegangan primer ini juga hasil dari $\dot{U}_3$, secara bergiliran menginduksi $\dot{U}''_2$.

$$\dot{U}'_2 = -M_{12} \frac{d\dot{i}_1}{dt} = -M_{12} \frac{\dot{U}_1}{L_1} \quad (2.5)$$

$$\dot{U}''_2 = -M_{23} \frac{d\dot{i}_3}{dt} = -M_{23} j\omega \dot{I}_3 \quad (2.6)$$

$\dot{U}_3$ juga diinduksi dari medan primer, ditulis:

$$\dot{U}_3 = -M_{13} \frac{d\dot{i}_1}{dt} = -M_{13} \frac{\dot{U}_1}{L_1} \quad (2.7)$$

Secara mudah terlihat:

$$Z_3 = (R // \frac{1}{j\omega C}) = \frac{R}{1 + j\omega RC} \quad (2.8)$$

Dimana:

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_3}{Z_3} \quad (2.9)$$

Jika $\dot{U}_2 = \dot{U}'_2 + \dot{U}''_2$, gabungan dari persamaan 2.5 sampai 2.8:

$$\dot{U}_2 = \{-M_{12} + M_{13}M_{23}(j\omega \frac{1}{R} - \omega^2 C)\} \frac{\dot{U}_1}{L_1} \quad (2.10)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.11)$$

Dimana, ω adalah percepatan sudut (rad/s)

f adalah frekuensi (Hz)

$\dot{U}_i$ dan $\dot{I}_i$ adalah tegangan dan arus yang melewati induktor, dan L_i dan M_{ij} adalah induktansi diri dan koefisien induktansi bersama dari masing – masing induktor. Persamaan 2.10 memperlihatkan bahwa tegangan induksi tergantung pada frekuensi dan sifat material bahan.

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \propto \omega(-j\frac{1}{R} + \omega C) \quad (2.12)$$

Diketahui bahwa resistansi dan kapasitansi kedua bahan terdefinisi masing – masing sebagai konduktivitas listrik dan permitivitas bahan. Hubungan antara konduktivitas dan resistansi ditunjukkan pada persamaan dibawah ini:

$$\sigma = \frac{l}{R A} \quad (2.13)$$

Dimana, l adalah panjang objek (m)

A adalah luas penampang objek (m^2)

σ adalah konduktivitas (Ω^{-1})

R adalah hambatan (Ω)

Sama hal nya, permitivitas dapat didefinisikan menggunakan kapasitansi bahan. Secara definisi ditunjukkan sebagai berikut

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.14)$$

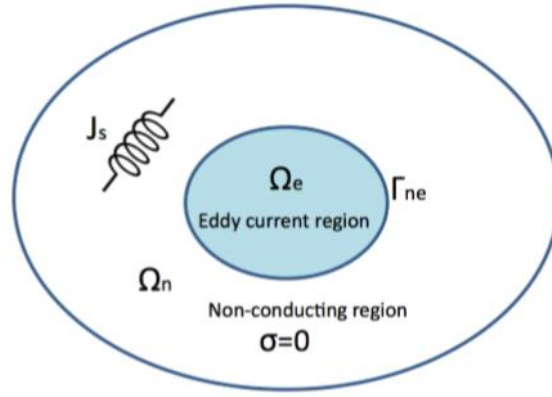
Dimana, A adalah luas penampang masing-masing keping (m^2)

d adalah jarak antar keping (m)

ϵ_0 = permitivitas ruang hampa = $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$.

2.3 Persamaan Maxwell

Problema maju diselesaikan dalam kondisi medan elektromagnetik quasi-statis. Dalam kondisi ini, beberapa asumsi perlu dibuat. Pertama, pergeseran arus diabaikan; kedua, material atau bahan dianggap memiliki karakter isotropik; ketiga, efek arus eddy pada sumber arus juga diabaikan. Perhatikan bahwa ada dua daerah pada medan elektromagnetik quasi-statis, daerah non-conducting dan daerah arus eddy yang dapat dilihat pada Gambar 2.4 [5].



Gambar 2. 4 Daerah Arus Eddy[6]

Gambar diatas menunjukkan bahwa pada masing - masing daerah memiliki besaran fisis. Menggunakan notasi *time-harmonic* dari persamaan Maxwell, di daerah arus eddy Ω_e [6]:

$$\text{Hukum Ampere} \quad \nabla \times H = J_{\text{eddy}} \quad (2.15)$$

$$\text{Hukum Faraday} \quad \nabla \times E = -j\omega B \quad (2.16)$$

$$\text{Hukum Gauss untuk medan magnetik} \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (2.17)$$

Di daerah *non-conducting* Ω_n :

$$\text{Hukum Ampere} \quad \nabla \times H = J_s \quad (2.18)$$

$$\text{Hukum Gauss untuk medan magnetik} \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (2.19)$$

Pada masing-masing daerah, medan B dan medan H memastikan bahwa komponen normal dari medan B adalah nol dan komponen tangensial dari medan H adalah nol. Di batas antara dua daerah :

$$B_e \cdot n_e + B_n \cdot n_n = 0 \quad (2.20)$$

$$H_e \times n_e + H_n \times n_n = 0 \quad (2.21)$$

Dimana, J_{eddy} adalah rapat arus eddy pada Ω_e

J_s adalah rapat arus disebabkan oleh eksitasi pada daerah *non-conducting* Ω_n

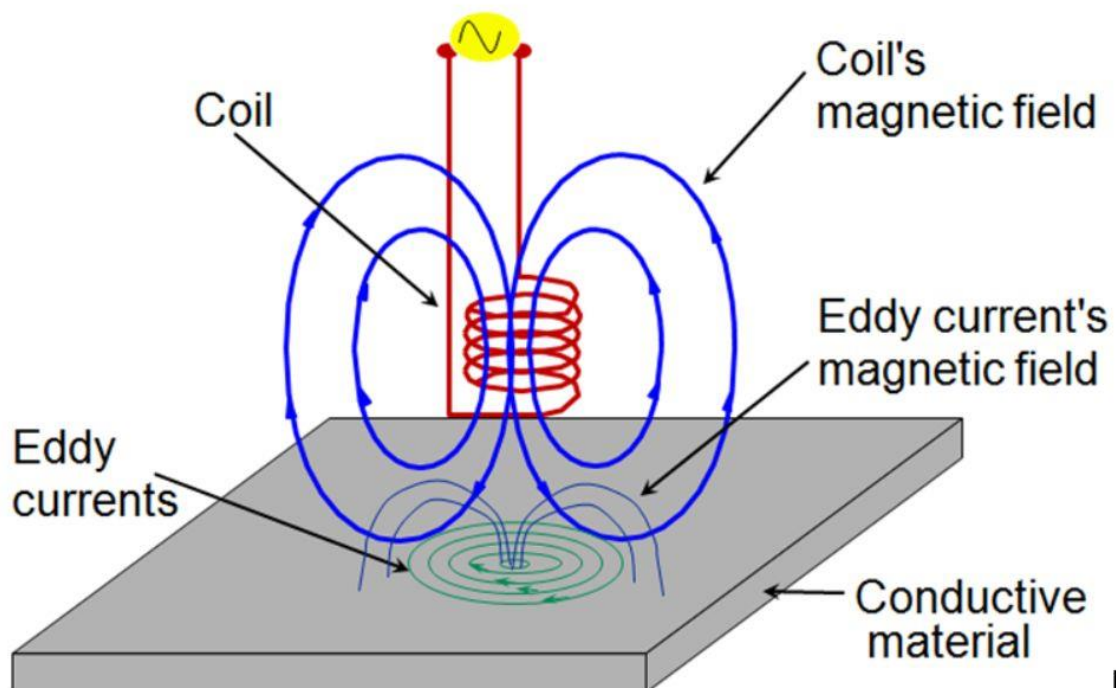
n adalah vektor normal pada batas

$B_e, H_e, n_e, B_n, H_n, n_n$ berturut-turut untuk fluks magnetik, medan magnetik dan vektor normal pada daerah Ω_e , dan Ω_n .

Landasan persamaan diatas berasal dari tiga persamaan dasar yaitu $D = \epsilon E$, $B = \mu H$ dan $J = \sigma E$, dimana H adalah medan magnet (A/m), E adalah medan listrik (V/m), σ adalah konduktivitas (S/m), ϵ adalah permitivitas (F/m), μ adalah permeabilitas (H/m), D adalah vektor rapat fluks (Cm^{-2}).

2.4 Arus Eddy

Arus eddy merupakan arus listrik yang diinduksikan kedalam konduktor dengan mengubah medan magnet konduktor tersebut. Sirkulasi pusaran arus ini memiliki induktansi dan medan magnet. Medan ini dapat menyebabkan tolakan, tarikan, dorongan, dan efek pemanasan. Adapun fenomena arus eddy pada permukaan bahan dapat dilihat pada gambar.



Gambar 2. 5 Arus Eddy pada permukaan bahan [13].

Pada gambar diatas, ketika lilitan dialiri oleh arus bolak-balik, maka akan timbul medan magnet di sekitar kawat penghantar. Medan magnet tersebut besarnya berubah-ubah sesuai dengan arus yang mengalir pada lilitan tersebut. Jika terdapat bahan konduktif disekitar medan magnet yang berubah-ubah, maka pada bahan konduktif tersebut akan mengalir arus yang disebut arus eddy. Jadi arus eddy adalah arus pusar yang diinduksi ke bahan konduktif yang terjadi akibat diletakkan disekitar medan magnetik yang dibangkitkan oleh kawat penghantar yang dialiri arus bolak balik. Akibat munculnya arus eddy maka muncul daya disipasi. Rumus daya disipasi seperti dituliskan dibawah ini :

(2.22)

$$P = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6k\rho D}$$

Dimana

P = daya yang hilang per unit massa (W/kg)

B_p = puncak medan magnet (T)

d = ketebalan lapisan atau diameter kabel (m)

f = frekuensi (Hz)

k = konstanta, 1 untuk lapisan tipis dan 2 untuk kabel

ρ = resistifitas bahan (Ωm)

D = densitas bahan (kg/m^3)

Beberapa faktor utama terjadinya arus eddy adalah konduktivitas bahan berbanding lurus dengan aliran arus eddy pada permukaan bahan, permeabilitas bahan mempengaruhi seberapa mudah sebuah bahan dapat dimagnetisasi, dimana permeabilitas bahan berbanding lurus dengan arus eddy yang dihasilkan. Frekuensi berbanding lurus dengan arus eddy yang dihasilkan, geometri dimana meliputi ketebalan bahan dan kedalaman penetrasi yaitu ketebalan bahan yang lebih kecil daripada kedalaman penetrasi efektif menghasilkan respon arus eddy yang besar dan kedekatan/*Lift-off* dimana semakin dekat sebuah kumparan pada permukaan, maka efek pada kumparan tersebut akan semakin baik.

2.5 Frekuensi Resonansi pada Koil

Setelah diinputkan ke koil *transmitter* atau koil penerima, tegangan eksitasi akan mengalami penurunan atau biasa disebut dengan tegangan jatuh. Tegangan jatuh dapat terjadi karena pada suatu kumparan memiliki nilai impedansi sehingga setiap kali arus mengalir melalui kumparan tersebut, akan ada jatuh tegangan di sepanjang kumparan. Pada tugas akhir ini dibuat rangkaian ekuivalen untuk Dari nilai tegangan pada koil *transmitter* dan tegangan eksitasi mengalami penurunan. Hal ini didasari dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{Koil\ Tx} = \frac{X_l}{\sqrt{X_l^2 + R^2}} V_{sumber} \quad (2.23)$$

Dengan :

X_l : Reaktansi induktif dari koil pemancar (Ω)

$V_{Koil Tx}$: Tegangan pada koil pemancar (V)

V_{sumber} : Tegangan eksitasi (V)

R : Hambatan koil (Ω)

Besar amplitudo V Koil Tx, V_{sumber} , serta hambatan R sudah diketahui, maka menggunakan persamaan 2.23 tersebut dapat diperoleh besarnya reaktansi induktif koil pemancar tersebut.

$$X_l = 2\pi fL \quad (2.24)$$

Dimana:

X_l : Reaktansi induktif dari koil pemancar (Ω)

f : Frekuensi sumber arus atau frekuensi kerja (Hz)

L : Induktansi koil (H)

2. 6 Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi dan Hukum Faraday

Istilah gaya gerak listrik disebabkan karena adanya gaya listrik yang bekerja untuk menggerakkan elektron dalam konduktor[6] yang menyatakan bahwa apabila terjadi perubahan fluks dalam suatu loop maka dihasilkan gaya gerak listrik berupa tegangan induksi yang berbanding lurus dengan laju perubahan fluks[7]. Berdasarkan definisi ggl merupakan medan listrik akibat induksi oleh fluks berubah. Medan listrik di sekeliling rangkaian tertutup sama dengan kerja yang dilakukan per muatan satuan (medan listrik E)[8].

$$\varepsilon = \oint E \cdot dl \quad (2.25)$$

Dimana, ε adalah ggl induksi (volt)

E adalah medan listrik (N/C)

Medan listrik ditimbulkan oleh muatan statik. Medan ini konservatif, yang berarti bahwa integral tertutup medan elektrostatik disekeliling kurva tertutup sama dengan nol. Akan

tetapi, medan listrik yang timbul dari fluks magnetik yang berubah tidak konservatif. Integral tertutup disekeliling kurva sama dengan ggl induksi, yang sama dengan laju perubahan fluks magnetiknya:

$$\varepsilon = \oint E \cdot dl = - \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.26)$$

Dimana , ε adalah GGL Induksi (Volt)

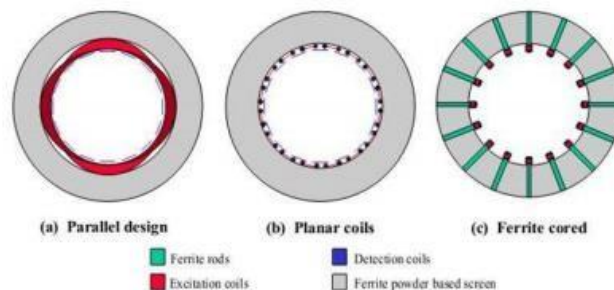
$d\phi$ = Fluks Magnetik (Wb)

dt = Perubahan Waktu (s)

Persamaan diatas dikenal sebagai hukum faraday. Tanda negatif dalam hukum faraday ini berkenaan dengan arah ggl induksinya.

2. 7 Sensor

Susunan sensor dimana sebuah koil atau kelompok koil diberi arus listrik secara bergantian dan diukur dari koil yang tersisa. Bentuk sensor adalah sebuah kawat yang dililitkan yang disebut koil. Secara singkat terlihat pada gambar 2.6.



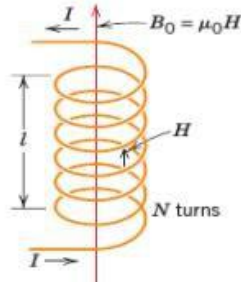
Gambar 2. 6 Jenis- jenis desain sensor[9].

Gambar (a) desain paralel biasanya mengelilingi objek, pemindaian dilakukan secara bergiliran dan memiliki data pengukuran yang terbatas. Gambar (b) adalah desain planar desain koil ini diletakkan pada benda segi empat dengan pemancar dan penerima saling menempel satu sama lain dengan tujuan meminimal kan jarak pasangan koil. Gambar (c) desain koil dengan penambahan inti *ferrite*.

2.7.1 Induktansi pada Solenoida

Sensor berbentuk koil solenoida, adalah kawat yang dililitkan berbentuk silinder, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Apabila solenoida dialiri arus konstan searah maka akan menimbulkan beda potensial antara dua ujung solenoid hampir nol karena

beda potensial sama dengan perkalian arus dan hambatan solenoid[7]. Tegangan yang melewati didefinisikan sebagai perubahan arus terhadap waktu yang melewati kumparan tersebut. Jika terjadi perubahan arus, maka akan terjadi perubahan fluks, sehingga menimbulkan terjadinya perubahan induksi.



Gambar 2. 7 Lilitan kawat silinder[2]

Besar induksi magnet pada pusat kumparan solenoid yang panjangnya l dan jumlah lilitan N dinyatakan dengan[2] :

$$B = \frac{\mu_0 I N}{l} \quad (2.27)$$

Dimana, B = Induksi magnet (T)

N = Jumlah Lilitan

μ_0 = Permeabilitas ruang hampa ($4\pi \times 10^{-7}$ Wb/Am)

I = Arus listrik (A)

l = panjang lilitan (m)

Sedangkan besar induksi magnet di tepi (ujung solenoid) adalah[2] :

$$B = \frac{\mu_0 I N}{2 l} \quad (2.28)$$

Untuk mengetahui nilai induktansi diri dari masing-masing koil dapat dijelaskan melalui persamaan sebagai berikut[11] :

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} \quad (2.29)$$

Dimana, A adalah luas penampang (m^2)

l adalah panjang solenoid (m)

Formula ini hanya untuk kepentingan akademis dan tidak cocok untuk perhitungan koil *real*, karena hanya berlaku untuk solenoid yang panjangnya tak terbatas, yang tidak ada dalam praktik. *Single-layer air core inductor* dapat dihitung dengan metode numerik,

menggunakan rumus Maxwell's o Nagaoka untuk solenoid. Namun, formula empiris modern yang lebih sederhana memberikan akurasi perhitungan yang sangat tinggi dan cukup memadai untuk tujuan praktis. Ulasan dan seleksi formula empiris dimulai dengan persamaan H.A.Wheeler's yang paling terkenal. Biasanya formula ini sering digunakan dalam berbagai program, kalkulator *online*, buku dan artikel yang dikhususkan untuk perhitungan induktansi. Adapun persamaannya sebagai berikut[11] :

$$L = \frac{a^2 N^2}{(9a + 10b)} \quad (2.30)$$

Dimana, N adalah jumlah lilitan

a adalah jari-jari koil (inci)

b adalah panjang koil (inci)

Beradaptasi formula ini untuk sistem metrik (bukan sistem satuan CGS) dan mengubah radius ke diameter, maka persamaan[11] :

$$L = \frac{D^2 N^2}{(45D + 100l)} \quad (2.31)$$

dimana :

L = Induktansi Diri (H)

N = Jumlah lilitan

D = Diameter Koil (m)

l = Panjang Koil (m)

Persamaan ini memiliki nilai error mencapai 1% ketika $1/D > 0,4$, yaitu jika koil tidak terlalu pendek. Persamaan ini tidak berlaku untuk koil yang pendek[11].

2. 8 Magnetik Permeabilitas

Magnetik permeabilitas μ adalah skalar dalam media isotropik. Ruang bebas memiliki karakteristik permeabilitas yang konstan. Dalam banyak kasus permeabilitas bahan dinyatakan sebagai permeabilitas relative dalam ruang bebas, seperti pada persamaan (2.32):

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_r \mu_0; \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2 \end{aligned} \quad (2.32)$$

Ditinjau dari permeabilitas relatifnya, bahan dapat dikelompokkan dalam ferromagnetik, diamagnetik dan paramagnetik.

- **Bahan Ferromagnetik**

Bahan ini sangat mudah dipengaruhi medan magnetik karena memiliki nilai suseptibilitas tinggi dan sangat positif sekitar 10^6 sehingga jika diberi medan magnet dari luar maka elektron elektron nya akan berusaha untuk menimbulkan medan magnet atomis tiap tiap atom searah dengan medan magnet luar. Sedangkan permeabilitas bahan ferromagnetik jauh lebih besar dibandingkan dengan bahan lainnya yaitu $\mu_r \gg 1$. Contoh bahan ini antara lain besi kobalt, nikel dan lain-lainnya.

- **Bahan Paramagnetik**

Bahan paramagnetik dapat dipengaruhi medan magnetik luar, tetapi tidak semudah bahan ferromagnetik. Suseptibilitas dari bahan ferromagnetik positif tapi sangat kecil sekitar 10^{-5} sampai 10^{-2} . Contoh bahan paramagnetik adalah aluminium, magnesium dan lain lain.

- **Bahan Diamagnetik**

Bahan ini sangat sulit dipengaruhi oleh medan magnetik luar. Berdasarkan nilai suseptibilitasnya bahan ini memiliki nilai yang negative (sekitar -10^{-5}). Contoh bahan ini antara lain: tembaga, emas, silver dan lain lain.

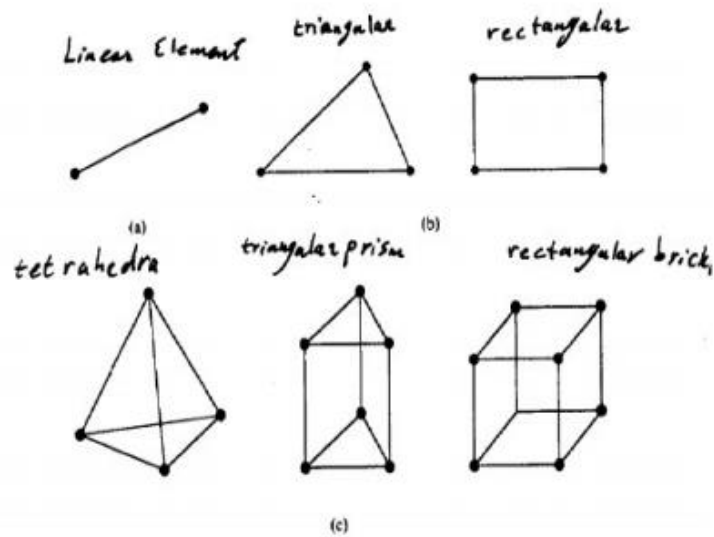
2.9 Problema Maju

Problema maju dalam MIT dapat diartikan sebagai bentuk permasalahan pemodelan fisis MIT berdasarkan pada suatu geometri dan syarat batas tertentu[4]. Hal ini tentunya mengacu pada penyelesaian persamaan Maxwell sehingga problema maju pada sistem MIT menjadi kompleks. Salah satu metode numerik yang sangat sering digunakan adalah metoda elemen hingga atau yang dikenal dengan *Finite Element Method* (FEM).

2.9.1 *Finite Element Method* (FEM)

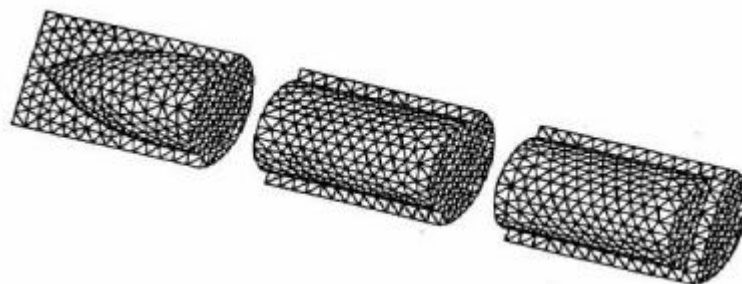
Finite Element Method (FEM) merupakan metode numerik yang pada umumnya digunakan untuk menentukan solusi aproksimasi permasalahan persamaan diferensial bersyarat batas. Ide utama metoda ini adalah pembagian *domain* permasalahan kedalam kumpulan *subdomain* atau yang dikenal sebagai elemen hingga (finite element), lalu permasalahan diselesaikan dengan menemukan solusi aproksimasi disetiap elemen[4].

Bentuk dari elemen ini bermacam-macam bergantung pada dimensi *domain* permasalahan. Untuk masing-masing kasus misalnya satu dimensi (1D) bentuk elemen berupa elemen linier, kasus dua dimensi (2D) dapat berupa segitiga maupun persegi panjang, dan untuk tiga dimensi (3D) dapat berupa tetrahedra, prisma segitiga atau kubus. Gambar 2.8 menggambarkan bentuk elemen hingga pada kasus satu dimensi (1D), dua dimensi (2D), tiga dimensi (3D).



Gambar 2. 8. Contoh Bentuk Elemen Hingga (FEM). (a) 1D; (b) 2D; (c) 3D[2].

Berbagai elemen seperti diatas merupakan elemen yang digunakan untuk memecah atau membagi *domain* utama atau objek utama. Hasil pemecahan dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9. Contoh hasil pemecahan bentuk objek 3D kedalam elemen hingga[2].

Terkait dengan besarnya tingkat kebutuhan FEM, saat ini banyak tersedia perangkat lunak komputer yang bersifat *open source* maupun komersil. Perangkat lunak FEM yang banyak digunakan yaitu seperti ANSYS® Maxwell®, Infolytica® Magnet® dan COMSOL® Multiphysics®.

2.9.2 COMSOL® Multiphysics®

COMSOL® Multiphysics® merupakan salah satu perangkat lunak FEM komersial yang digunakan untuk menyelesaikan komputasi problema maju dan simulasi sistem pada beberapa modalitas tomografi elektrik seperti EIT, ECT, maupun MIT. COMSOL pada dasarnya memiliki beberapa macam *modul* permasalahan yang dibedakan berdasarkan tema fisisnya yaitu seperti elektromagnetik frekuensi rendah dan tinggi, termal, optik dan fluida. Untuk elektromagnetik frekuensi rendah, COMSOL memiliki *modul* dinamakan AC/DC *modul*.

Dalam *modul* AC/DC ini, COMSOL menawarkan segala macam bentuk pemodelan fisis dari elektrostatik (cir), magnetostatik (mf) hingga elektrodinamika frekuensi rendah. Jenis studi setiap permasalahan dapat ditinjau berupa tinjauan static, *domain* frekuensi, ataupun transien. Selain itu, COMSOL juga menyediakan elemen FEM dengan bentuk, ukuran, distribusi serta orde fungsi interpolasi seperti linier, kuadratik, ataupun orde banyak[4].

BAB III

METODE PENELITIAN

Bab ini akan membahas mengenai penelitian yang dilakukan, meliputi proses simulasi dan eskperimen. Gambar 3.1 merupakan diagram alir penelitian yang dilakukan secara keseluruhan.

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Proses perancangan, pembuatan, dan pengambilan dilaksanakan pada bulan Mei 2017 sampai dengan Juni 2018 di CTech Lab Edwar Teknologi dan laboratorium NDT Universitas Telkom.

3.2 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Adapun jadwal pelaksanaan tugas akhir ini, yaitu:

Tabel 3. 1 Jadwal pelaksanaan penelitian.

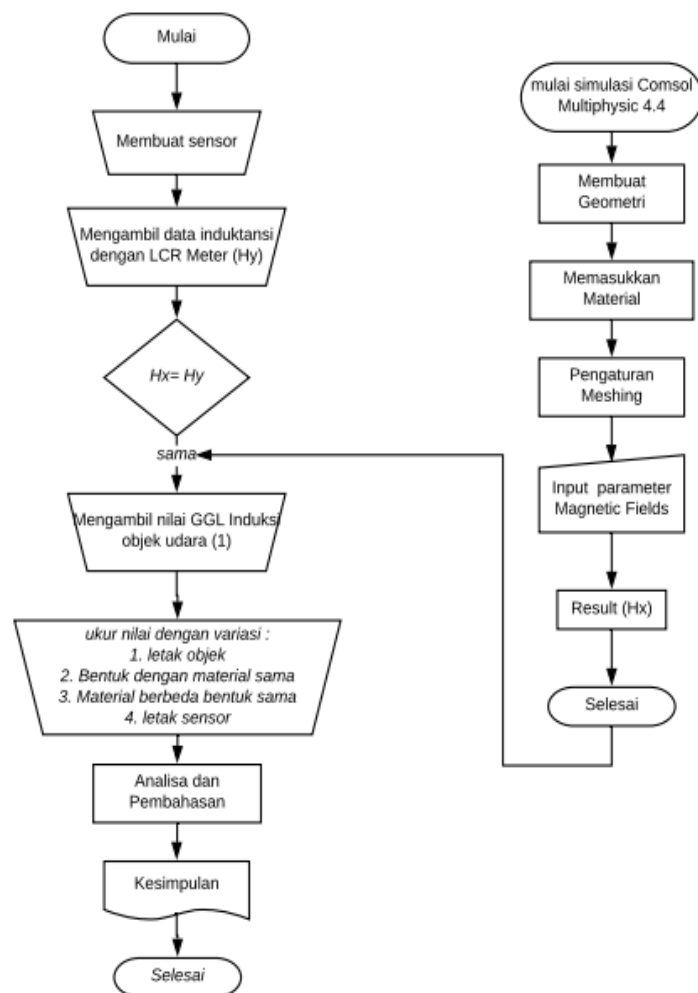
No	Kegiatan Penelitian	2017					2018					
		Agu	Sep	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun
1	Studi literatur											
2	Desain simulasi COMSOL											
3	Pembuatan serta konfigurasi koil											
4	Pengambilan data potensial dari koil penerima											
5	Analisis data hasil											

	pengukuran potensial											
6	Penulisan laporan tugas akhir											

3.3 Diagram alir penelitian

3.3.1 Simulasi dan eksperimen

Blok diagram 3.1 menunjukkan tahapan secara keseluruhan dari proses penelitian. Penelitian dimulai dengan tahap simulasi desain sistem induksi medan magnet menggunakan COMSOL Multiphysics 4.4 sebagai acuan awal dan melihat sebaran medan magnet. Tahap selanjutnya, pembuatan koil dan pemasangan sistem koil dilanjut dengan pengambilan data secara manual.



Gambar 3. 1 Blok diagram tahapan penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Simulasi Sistem Menggunakan COMSOL Multiphysic 4.4

Komputasi dan sistem dilakukan dengan menggunakan software COMSOL Multiphysics versi 4.4 modul *Magnetic Fields (mf)* dan *Electrical Circuit (cir)*. Modul *Magnetic Fields* digunakan untuk mensimulasikan distribusi medan magnet dan arus induksi di dalam dan di sekitar koil, konduktor dan magnet. Sedangkan modul *electrical circuit (cir)* digunakan untuk memodelkan besarnya arus dan tegangan pada suatu rangkaian termasuk penggunaan sumber arus, tegangan, resistor, kapasitor, induktor dan perangkat semikonduktor. Modul *electrical circuit* ini memungkinkan untuk pemilihan jenis sumber tegangan sinus serta pengaturan amplitudo dan frekuensinya.

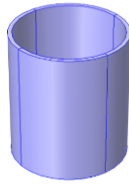
Pemilihan *Study* dipilih pada *coil current calculation* dan *time dependent*. *Study coil current calculation* digunakan untuk menghitung besar arus pada setiap koil karena *input* yang diberikan berupa tegangan. Sedangkan *time dependent* untuk mensimulasikan adanya perubahan medan magnet (fluks magnet) akibat perubahan tegangan sinus pada koil pemancar serta efek tegangan induksi pada koil penerima akibat adanya perubahan fluks pada koil pemancar.

3.4.2 Pengaturan Geometri

Geometri koil dibuat berbentuk silinder berlubang dengan jari-jari dalam 21.5 mm. Secara keseluruhan sistem memiliki dua buah sensor koil yang disusun berhadapan. Jarak antar koil dibuat variasi yaitu 20 mm, 60 mm, 80 mm dan 110 mm. Spesifikasi koil terlampir pada tabel 3.2.

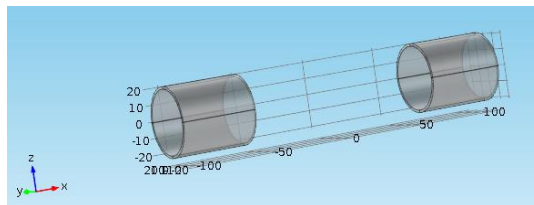
Tabel 3. 2 Spesifikasi Sensor.

1	Diameter dalam koil	40.4 mm
2	Diameter luar koil	42 mm
3	Diameter kawat	0.8 mm
4	Jumlah lilitan	50
5	Panjang lilitan	48 mm



Gambar 3. 2 Prototipe bentuk geometri koil menggunakan COMSOL

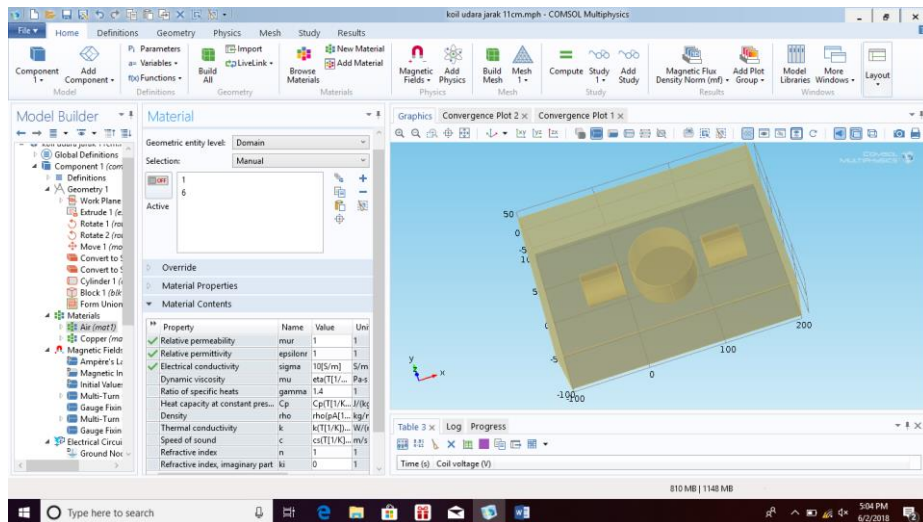
Gambar 3.2 merupakan prototipe koil pada simulasi COMSOL. Untuk meringankan beban komputasi pada saat proses *meshing*, koil dibuat dengan bentuk silinder berlubang. Meskipun koil ini hanya berbentuk silinder berlubang, COMSOL menyediakan fasilitas *multi-turn coil domain* yang mengakomodir jumlah lilitan pada koil yang akan disimulasikan. Secara keseluruhan sistem memiliki dua buah sensor koil yang diletakkan berhadapan, seperti tergambar pada Gambar 3.3 posisi koil antar koil sebesar 110 cm. Masing – masing koil dinamakan koil Tx atau koil *transmitter* atau koil pemancar dan koil penerima.



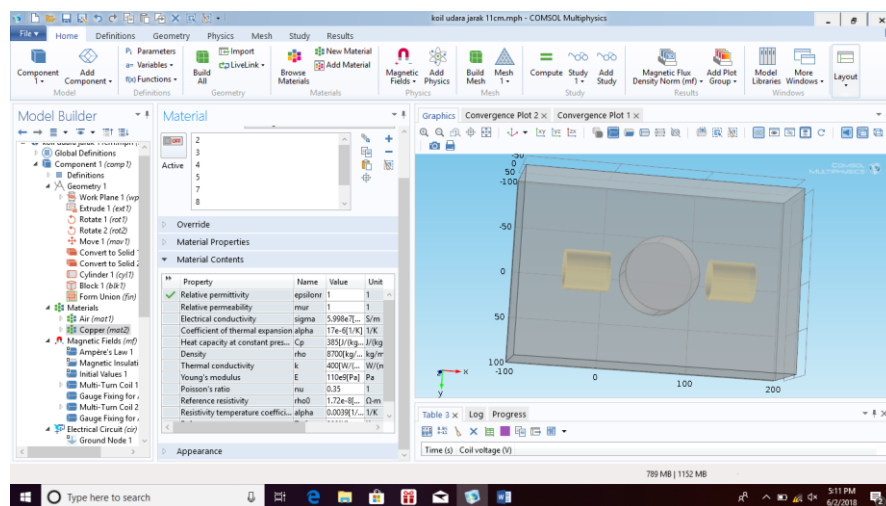
Gambar 3. 3 Konfigurasi sistem koil

3.4.3 Pengaturan *Material*

Penambahan *material* berupa udara dan tembaga. *Material* udara ditambahkan pada objek dan *material* tembaga ditambahkan pada masing-masing koil. Hal-hal yang perlu diperhatikan pada bagian ini yaitu permeabilitas relatif, permitivitas relatif dan konduktifitas listrik. Relative permeability dan permitivitas listrik untuk udara yaitu 1, sedangkan konduktifitas listrik udara adalah 10 S/m. Pemberian nilai 10 ini, untuk memudahkan atau meringankan komputasi, secara jelas ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Pengaturan *material udara*.

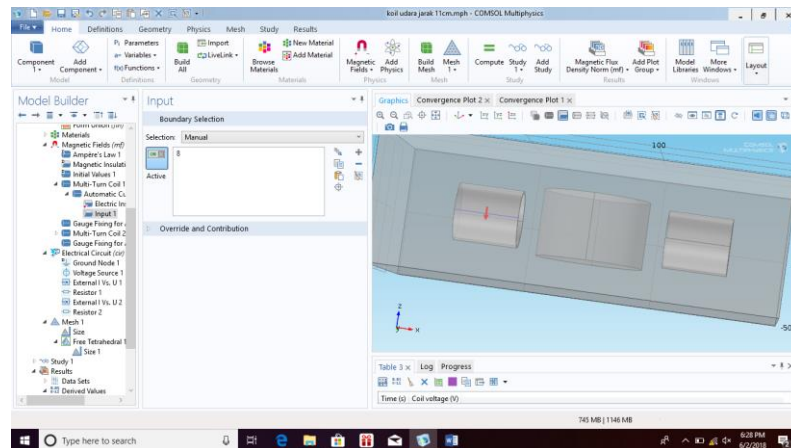


Gambar 3. 5 Pengaturan *material tembaga pada koil*.

Bagian berwarna kuning pada gambar 3.4 dan 3.5 menunjukkan *domain* yang dipilih. Dua koil pada gambar 3.5 menunjukkan koil pemancar dan koil penerima. Sedangkan gambar 3.4 menunjukkan bahwa batasan sistem koil berupa udara.

3.4.4 Pengaturan *Modul Magnetic Fields (mf)*

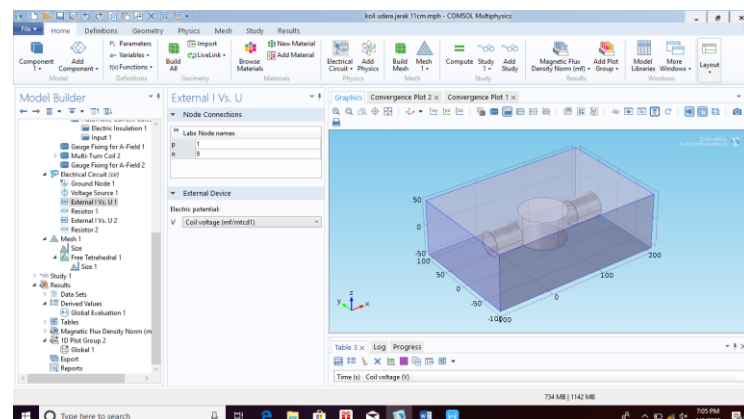
Beberapa fitur pada *multi-turn* koil *domain* yang perlu diatur adalah nama koil, jumlah lilitan dan sumber eksitasi koil. Jumlah lilitan adalah 50 lilitan. Penggunaan *multi-turn* koil perlu pengaturan *automatic current calculation*. Pada bagian ini menyediakan fasilitas *electric insulation* untuk mengisolasi masing masing *domain* pada koil. Setelah itu, diatur arah *input* arus. Pengaturan *modul Magnetic Fields (mf)* dilakukan pada masing - masing koil. Gambar 3.5 menunjukkan arah *input* arus.



Gambar 3. 6 *Input* arah arus.

3.4.5 Pengaturan Modul *Electrical Circuit* (cir)

Fasilitas yang diberikan pada *modul* ini yaitu *Voltage Source*, *External I vs U*, dan resistor pada masing - masing koil. *Modul* ini digunakan untuk mengatur koil pada sumber *exciter*. Sumber tegangan berupa gelombang sinus dengan amplitudo 10 Volt dan frekuensi 5 Mhz. Sumber tegangan sinus serta koil dan resistor yang disusun secara seri. Resistor pada rangkaian pemancar berfungsi sebagai pembatas arus. Sedangkan pada rangkaian penerima, resistor disusun secara parallel. Fungsi rangkaian ini sebagai penarik arus. Pengaturan *electrical circuit* (cir) secara garis besar ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Pengaturan *electrical circuit* secara keseluruhan.

3.4.6 Pengaturan *Study*

Penelitian ini menggunakan dua jenis *study* yaitu *Coil Current Calculation* dan *Time Dependent*. *Coil Current Calculation* digunakan untuk menghitung arus pada koil

sehingga pengaturan nama disesuaikan dengan nama koil. *Study Coil Current Calculation* dibuat sebanyak jumlah koil. *Study time dependent* digunakan untuk mensimulasikan sistem terhadap perubahan waktu.

3.4.7 Pengukuran Induktansi

Pengukuran dilakukan dengan menggunakan LCR-821 GW-Instek. Berikut langkah-langkah pengukuran:

- a. Kalibrasi alat dengan cara sebagai berikut:
 -  Tekan tombol menu.
 -  Tekan *offset*.
 -  Tekan tombol *CAP OFFSET* untuk melakukan open test, posisi klip tidak terhubung.
 -  Selesai
- b. Sambungkan klip tes ke ujung lilitan.
- c. Catat nilai induktansi, reaktansi dan impedansi yang terbaca.
- d. Lakukan minimal sebanyak 3 kali.

3.4.8 Pengukuran Tegangan

Pengukuran tegangan dilakukan dengan menggunakan *function generator* GW-Instek SFG 2120, Osiloskop GW Instek GDS 2204 dan multimeter digital Tektronix DMM 4020 5-1/2. Dengan koil nomor 5 sebagai penerima, dan koil nomor 6 sebagai pemancar.

- Kalibrasi osiloskop dengan cara berikut :
 4. 1 Pasangkan *probe*/ kabel penghubung ke channel 1 atau 2.
 4. 2 *Volt/div* dan *time/div* nya diatur biar gambar pada osiloskop.
 4. 3 Kemudian salah satu ujung *probe* (*Probe* ch1 atau 2) kita hubungkan pada tempat kalibrasi.
- Tekan tombol *channel* yang terpakai untuk mengganti menjadi sinyal AC.
- Caput *probe* dari *function generator* ke koil pemancar.
- Caput kan *probe channel* 1 atau 2 dari osiloskop ke koil pemancar secara paralel.
- Atur *input* tegangan masukan sebesar 10 volt dan frekuensinya.
- Caput kan *probe* sisanya ke koil penerima untuk melihat gelombang dan tegangan yang terbaca pada koil penerima.
- Catat tegangan yang terbaca.

BAB IV

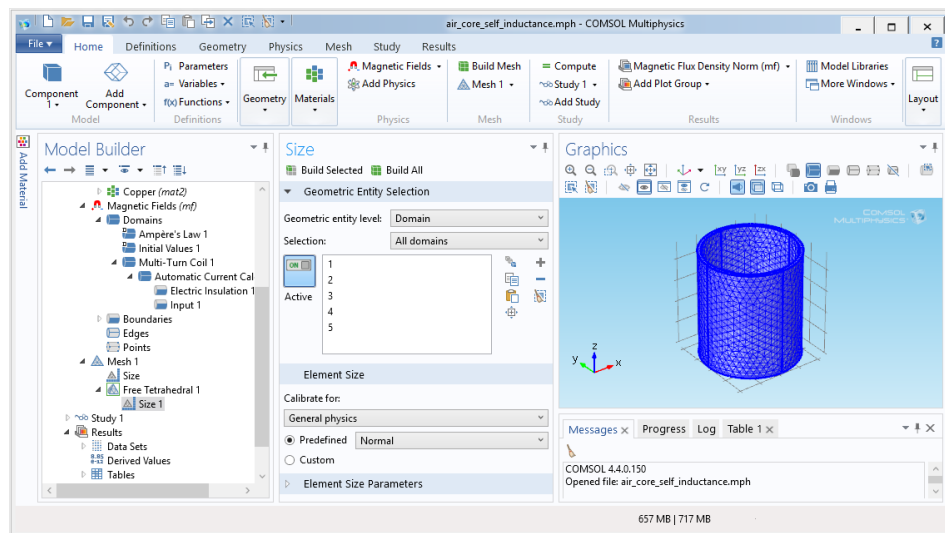
HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini ditampilkan data-data hasil simulasi dan pengukuran sistem koil yang telah dibuat serta dilakukan pembahasan terhadap data-data tersebut dengan disertai grafik pengukuran.

4.1 Data Hasil Simulasi COMSOL Multiphysics 4.4

4.1.1 Simulasi Induktansi Diri

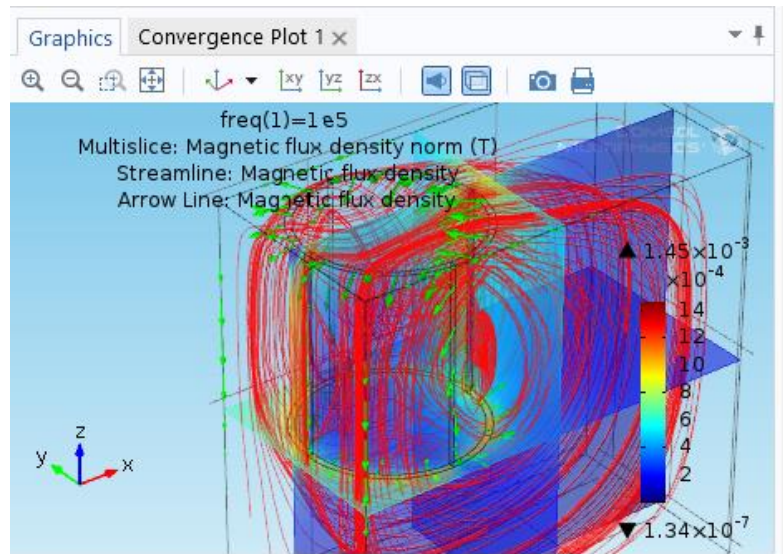
Simulasi induktansi ini dilakukan tanpa menambahkan *modul electrical circuit* (cir) dan hanya menggunakan satu koil. Untuk mengeluarkan nilai induktansi perlu dilakukan *meshing* terlebih dahulu untuk membentuk *finite element*. Pengaturan *meshing* disesuaikan dengan sistem komputer yang digunakan. Pada simulasi ini, digunakan *meshing* ukuran normal seperti ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pengaturan *meshing*

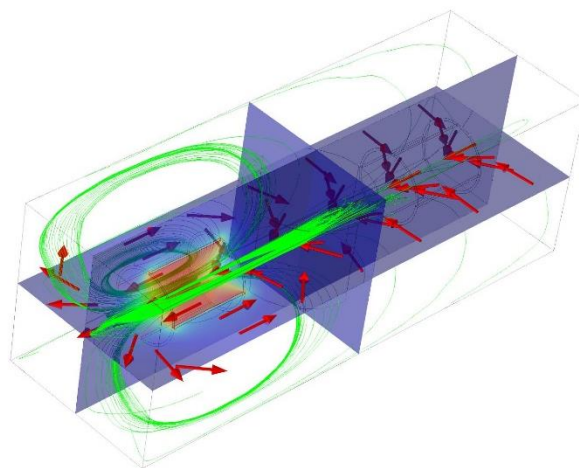
Kemudian dilakukan pemilihan *result* untuk memilih parameter fisis yang ingin diamati atau dicari. Dalam hal ini, yang akan dicari nilai induktansi dan pola densitas fluks magnet dari koil yang disimulasikan. Hasil pengaturan *result* setelah diberikan *input* tegangan menunjukkan nilai induktansi koil solenoida dengan spesifikasi seperti tabel 3.2 sebesar 0.05162 mH. Untuk menunjukkan sejauh mana sebaran medan magnet, simulasi dibuat dengan memasang koil yang mempunyai parameter yang sama seperti tabel 3.2.

Masing-masing berlaku sebagai koil pemancar dan penerima. Gambar 4.2 dan gambar 4.3 secara berurutan memperlihatkan pola densitas fluks magnet dengan satu koil dan dua koil yang berjarak 11cm.

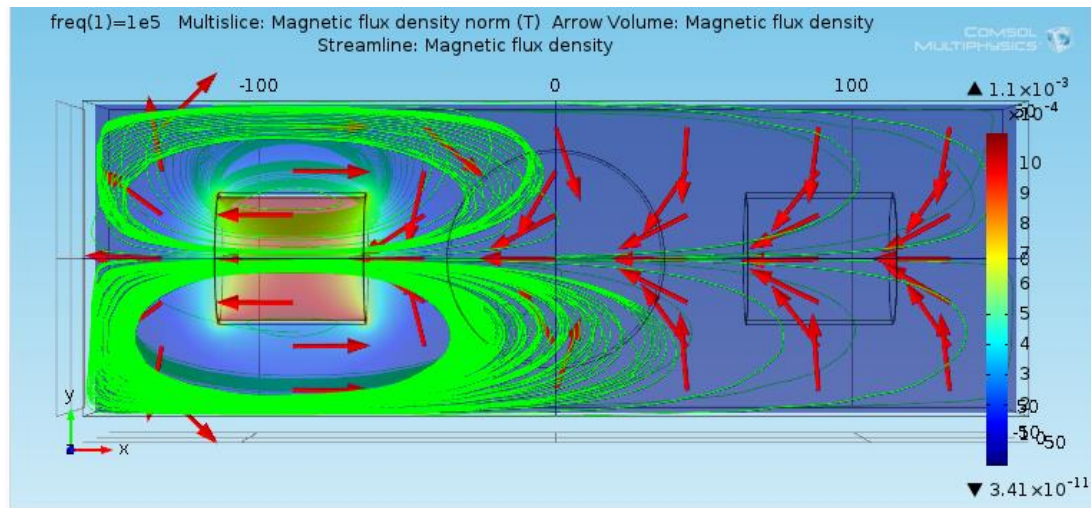


Gambar 4.2 Pola densitas fluks magnet *single* koil.

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya gambar 4.2 menunjukkan pola densitas fluks magnet. Dengan melihat pola densitas ini, kita mampu melihat arah medan magnet yang terjadi pada koil hal ini digambarkan dengan arrow line berwarna hijau dan juga melihat sebaran kuat medan magnet yang dihasilkan hal ini ditunjukkan dengan fasilitas streamline berwarna garis merah.



(a)



(b)

Gambar 4.3 Pola densitas fluks magnet sistem koil dengan view (a) 3D (b) 2D

Gambar 4.3 merupakan gambar 3D dari sistem koil yang dibuat pada software COMSOL. Anak panah yang berwarna merah menunjukkan arah medan yang terbentuk pada koil penerima atau koil *transmitter*. Arah medan bergerak keluar, dengan pemberian arah arus yang sudah dilakukan sebelumnya yaitu melingkar kekanan. Hasil ini sesuai dengan teori kaidah tangan kanan untuk kawat melingkar berarus.

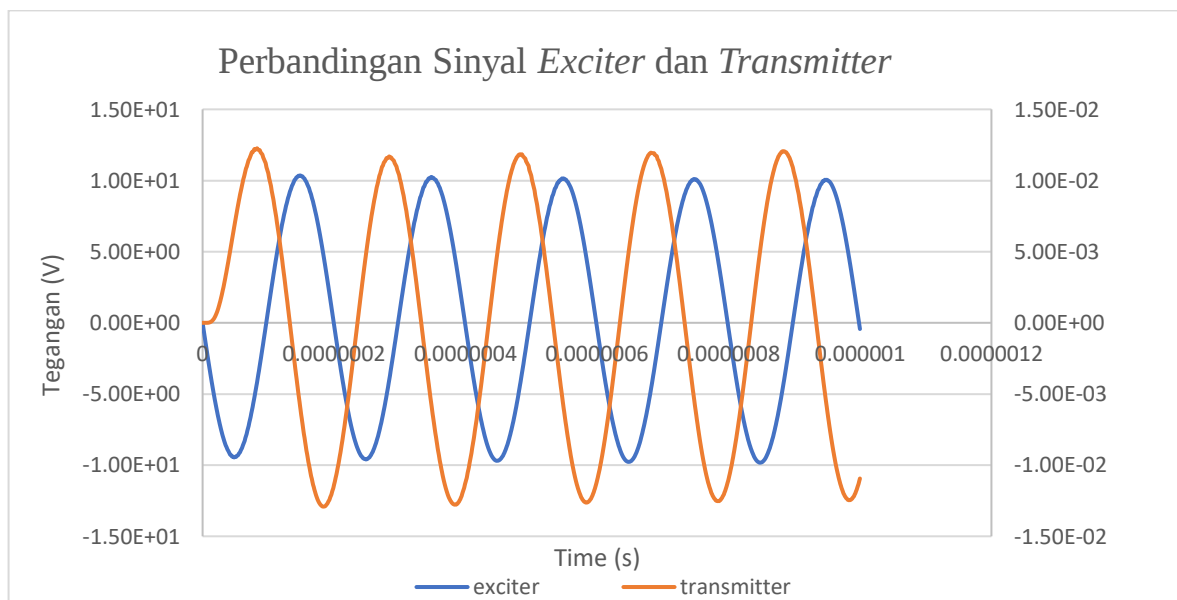
4.1.2 Simulasi Sistem Induksi Medan Magnet

Karena dalam simulasi COMSOL ini koil yang digunakan sebagai pemancar dan penerima memiliki komposisi yang sama, maka nilai induktansi juga sama. Hasil percobaan induksi medan magnet menggunakan COMSOL dimulai dengan memberikan tegangan eksitasi pada salah satu koil dan yang lainnya sebagai penerima. Adanya arus listrik tersebut menimbulkan medan magnet. Densitas fluks magnet berubah menghasilkan tegangan induksi pada koil penerima. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai tegangan induksi adalah jarak antar koil. Untuk melihat perubahan ini, ditambahkan frekuensi kerja 5 MHz karena pada frekuensi tersebut tegangan tidak mengalami *voltage drop* dan terjadi perubahan nilai tegangan yang signifikan serta perubahan fasa. Hal ini terlihat dari Gambar 4.4 yang menunjukkan semakin dekat jarak antar koil maka semakin besar nilai tegangan induksi.



Gambar 4.4 Gelombang nilai tegangan penerima terhadap perubahan jarak.

Data awal simulasi menunjukkan koil dapat menginduksi dengan jarak terjauh 11 cm dan jarak paling dekat 2 cm dengan masing masing mendapatkan tegangan 0.3 Volt dan 0.012262 Volt. Gambar 4.5 memperlihatkan pada sisi output koil pemancar (transmitter). Bentuk sinyal pada koil pemancar memiliki bentuk yang sama dengan sinyal *exciter* dari *function generator* yaitu gelombang sinus. Sinyal output pada koil pemancar mengalami pergeseran fasa. Hal ini dikarenakan besarnya tegangan induksi pada koil pemancar sebanding dengan minus laju perubahan fluks yang diakibatkan oleh sinyal *exciter*.



Gambar 4.5 Perbandingan bentuk sinyal *exciter* dengan *transmitter*.

Jika dilihat dari nilai tegangan pada *koil transmitter* dan tegangan *exciter* mengalami penurunan. Hal ini didasari dengan persamaan (2.23 dan 2.4). Penurunan ini sering dikenal dengan voltage drop. Penurunan tegangan ini diakibatkan oleh arus yang tinggi, dan

impedansi pada koil. Nilai ini menjadi dasar awal pada saat proses pengambilan data secara manual.

4.2 Konfigurasi Sensor Koil

Koil dililit secara manual menggunakan kawat tembaga berdiameter 0,8 mm pada pipa PVC yang berdiameter 42 mm dan tebal 1.3 mm. Koil dibuat dengan satu lapis lilitan (single layer) yang berjumlah 50 lilitan. Jumlah keseluruhan panjang kawat tembaga yang digunakan adalah 6,75 meter.

Besar nilai induktansi koil diukur dengan menggunakan alat ukur LCR meter Gw-INSTEK LCR-821. Tahapan pengukuran seperti yang sudah dijelaskan di bab 3. Secara lengkap nilai induktansi, kapasitansi dan resistansi koil ditulis pada tabel di bawah ini:

Tabel 4.1 Data Induktansi, kapasitansi dan resistansi.

Percobaan	Koil Tx				Koil Rx			
	L (mH)	C (uF)	R (Ω)	Q	L (mH)	C (uF)	R (Ω)	Q
1	0.069	-3.6549	1.247	3.496	0.06983	-3.626	1.2479	3.512
2	0.0694	-3.6549	1.247	3.495	0.06983	-3.6259	1.2476	3.516
3	0.06993	-3.6549	1.247	3.495	0.06984	-3.626	1.2476	3.517
4	0.06942	-3.6548	1.247	3.398	0.06983	-3.6259	1.2476	3.517
5	0.06942	-3.6548	1.247	3.496	0.06947	-3.6259	1.2475	3.52
Rata-rata	0.069434	-3.65486	1.247	3.476	0.06976	-3.62594	1.24764	3.5164

Pada tabel 4.1 nilai induktansi rata-rata adalah 0.069434 mH dan 0.06976 mH. Nilai ini tidak jauh berbeda, sehingga koil ini dapat digunakan pada penelitian tugas akhir. Pada tabel diatas juga diambil nilai kapasitansi, resistansi, faktor Q ntuk mengetahui parameter sensor koil yang identik. Sensor koil yang identik ini dibutuhkan untuk pengembangan sistem planar induksi medan magnet ke arah tomografi atau pencitraan. Nilai yang diperoleh berbeda dengan simulasi COMSOL yang dihitung pada pembahasan sebelumnya, yaitu sebesar 0.05162 mH. Hal ini dapat diakibatkan adanya perbedaan kondisi saat pengukuran dan simulasi.

4.3 Pengujian Sinyal Output Pemancar

Pengujian sinyal output dari blok pemancar sangat diperlukan dalam pengambilan data karakterisasi sensor koil. Pengambilan data dilakukan sebelum terhubung koil dan saat

terhubung koil. Gambar 4.6 menunjukkan blok diagram pengukuran *output* pemancar sebelum terhubung koil.



Gambar 4.6 Blok Diagram Pengukuran *Output* Pemancar Sebelum Terhubung Koil.

Pengukuran selanjutnya adalah pengukuran *output* pemancar pada saat terhubung dengan koil. Gambar 4.7 menunjukkan blok diagram pengukuran *output* pemancar pada saat terhubung koil.



Gambar 4.7 Blok Diagram *Output* Pemancar Saat Terhubung Koil.

Tabel 4.2 menunjukkan nilai tegangan pada bagian pemancar. Nilai tersebut diambil pada saat frekuensi sebesar 10 khz sampai 10 Mhz. Dari data tersebut terlihat adanya perbedaan amplitudo tegangan saat koil belum terpasang dengan saat koil terpasang.

Tabel 4. 2 Amplitudo Tegangan Pada Output Pemancar

Sebelum Terpasang Koil		Sesudah Terpasang Koil	
Frekuensi (kHz)	Tegangan (V)	Frekuensi (kHz)	Tegangan (V)
100	10	100	6.64
200	10	200	8.72
300	10	300	9.36
400	10	400	9.6
500	10	500	9.76
600	10	600	9.84
700	10	700	9.92
800	10	800	9.92
900	10	900	9.92
1000	10	1000	9.9
2000	10	2000	9.92
3000	10	3000	9.92
4000	10	4000	9.92

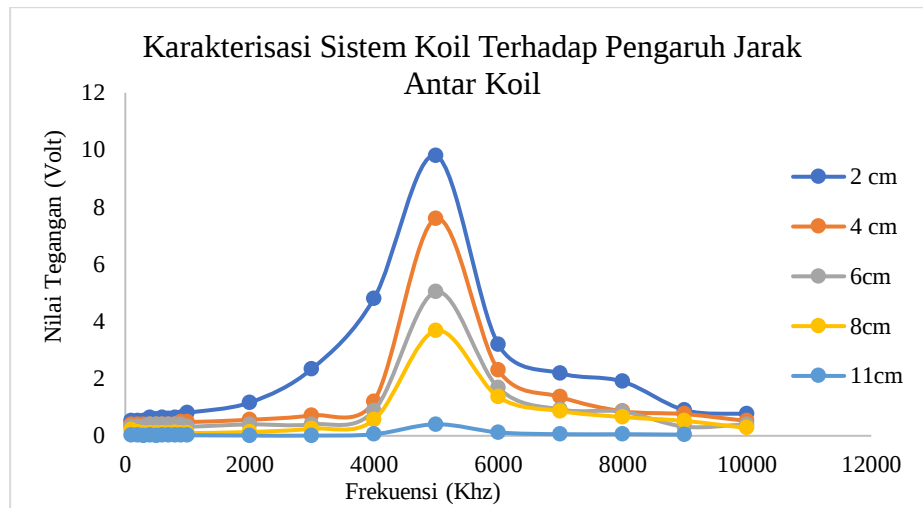
5000	10	5000	9.92
6000	10	6000	9.92
7000	10	7000	9.9
8000	10	8000	9.8
9000	10	9000	9.8
10000	10	10000	9.8

Pada frekuensi 10 Khz sampai 800 Khz mengalami tegangan jatuh hal ini terjadi karena penurunan nilai impedansi akibat reaktansi induktif dari koil. Semakin rendah impedansi maka tegangan pada koil pemancar juga semakin rendah begitu sebaliknya. pada frekuensi 1MHz- 10 MHz nilai tegangan pada pemancar semakin mendekati nilai tegangan *exciter*. Pada tabel 4.2 juga didasari persamaan 4.1. Oleh karena itu, terpilih frekuensi kerja pada sistem koil ini adalah 5 MHz.

4.3.1 Pengambilan Data Karakterisasi Sistem Sensor Koil

Setelah mendapatkan frekuensi kerja koil, dilakukan pengambilan data karakterisasi. Pengambilan data karakterisasi dilakukan manual secara langsung menggunakan metoda *trial* dan *error* dengan mengacu pada literatur yang telah ada dan simulasi yang telah dibuat. Dengan menyesuaikan objek yang akan diamati disertai pengamatan terhadap besaran fisis berupa nilai tegangan pada koil pemancar dan penerima.

Pada hasil simulasi, besarnya tegangan pada penerima salah satunya dipengaruhi oleh jarak. Maka dari itu, diperlukan validasi kondisi sesungguhnya. Data sensitivitas koil penerima terhadap jarak dan frekuensi disajikan dalam bentuk grafik. Pada Gambar 4.8 tegangan pada koil pemancar tetap atau konstan untuk melihat respon optimum pada koil pemancar. Dalam hal ini, tegangan pemancar terbaca sebesar 9.8 V menggunakan sinyal dari *function generator* dengan rentang frekuensi 100kHz - 10 MHz. Pada pengambilan data ini kondisi sistem sensor tidak meletakkan objek uji atau objek udara.

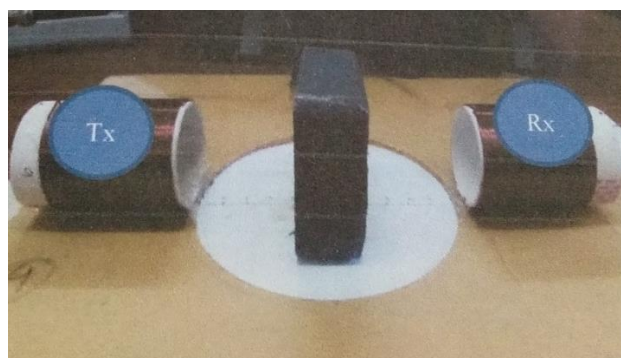


Gambar 4.8 Grafik Karakterisasi Sistem Koil Terhadap Pengaruh Jarak Antar Koil.

Dari yang terbaca pada lampiran A. tegangan maksimum yang terbaca pada koil penerima yaitu sebesar 7.8 Volt pada jarak 2 cm dan frekuensi 5 MHz. Dan tegangan minimum yang sebesar 0.2 Volt pada jarak 11 cm. pada jarak 2 cm koil penerima menerima medan magnet yang lebih besar dibandingkan dengan yang lainnya. Semakin jauh jarak, semakin kecil medan magnet yang diterima oleh koil penerima.

4.4 Pengambilan data sensitivitas sensor terhadap objek normal dengan variasi bahan uji

Setelah pengambilan data tanpa objek dilakukan, kemudian dilakukan pengambilan data saat ada objek. Pengujian ini bertujuan untuk melihat sensitivitas terhadap benda yang bersifat ferromagnetik maupun non-ferromagnetik. Dalam proses pengujian jarak antar koil adalah 11 cm dan objek uji diletakkan ditengah - tengah antar koil seperti Gambar 4.9,4.10, 4.11 dimensi objek uji paraffin, campuran paraffin dan besi, besi masing masing adalah (21 x 11 x 3.5) cm, (21 x 11 x 4) cm, dan (10 x 5 x 4) cm.



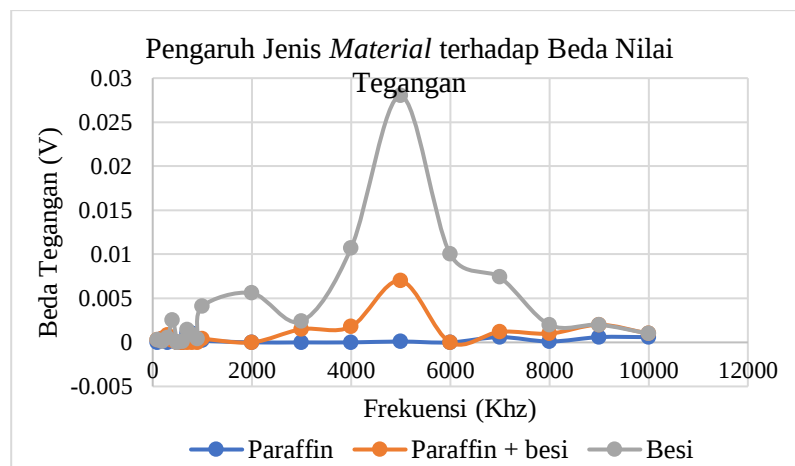
Gambar 4.9 Posisi Peletakan Besi (10 x 5 x 4) cm beserta penamaan koil.



Gambar 4.10 Posisi Peletakan Objek Uji Paraffin.



Gambar 4.11 Posisi Peletakan Objek Campuran Paraffin dan Besi.



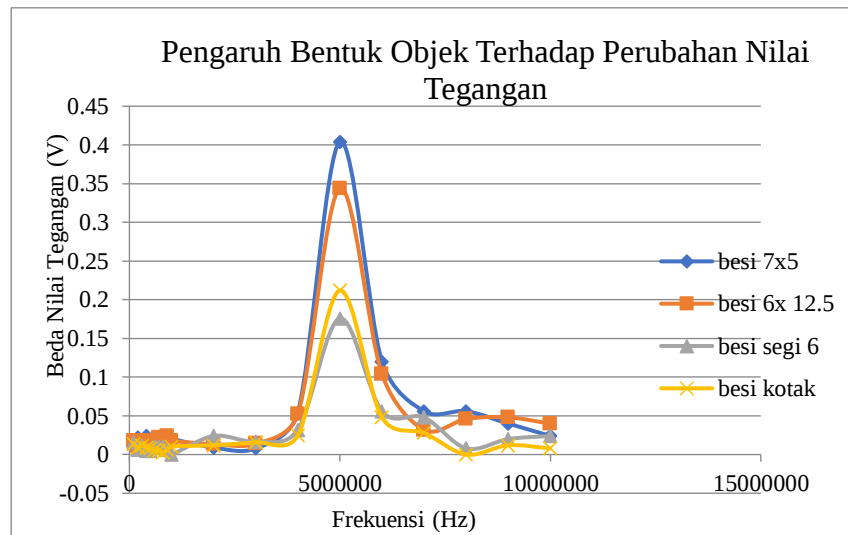
Gambar 4.12 Grafik Sensitivitas Koil terhadap Perubahan Bahan *Material*.

Gambar 4.12 memperlihatkan sistem koil ini mampu membedakan ferromagnetik dan non-ferromagnetik. Beda tegangan yang terlampir pada lampiran B. diambil ketika kondisi sistem koil sebelum atau tanpa objek dan sesudah atau ada objek. Perubahan nilai tegangan paling besar adalah besi. Pada objek besi bersifat ferromagnetik dan pada objek paraffin bersifat non-ferromagnetik, dimana nilai konduktivitas listrik material ferromagnetik

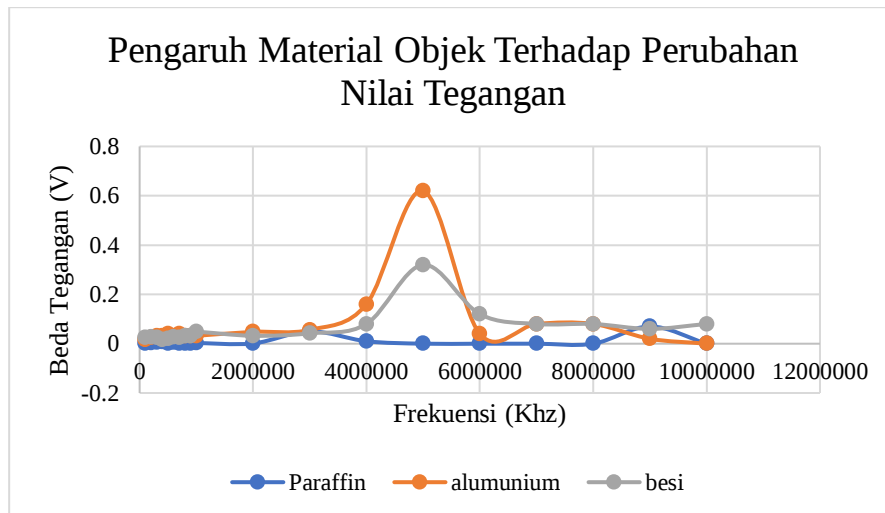
lebih besar dari material non-ferromagnetik. Dimana nilai konduktivitas listrik berbanding terbalik dengan nilai resistivitas bahan tersebut. Nilai resistivitas dari besi sebesar $9,71 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, sedangkan resistivitas *paraffin* berada pada rentang nilai $10^{13} \Omega\text{m}$ sampai dengan $10^{17} \Omega\text{m}$.

Sehingga, bisa dikatakan sistem sensor koil ini mampu membedakan *material* pada bahan uji. Karena pada saat uji sensitivitas bahan ferromagnetik dan non-ferromagnetik bahan uji memiliki dimensi yang berbeda maka pada uji selanjutnya perlu menguji sensitivitas bentuk objek terhadap bahan uji yang sama dan bahan uji yang beda namun dimensi yang sama. Gambar 4.13 dan gambar 4.14 secara berturut-turut menunjukkan grafik sensitivitas koil terhadap bentuk objek dan bahan uji yang beda namun dimensi yang sama.

Lampiran C. menunjukkan nilai maksimum beda tegangan yaitu pada saat objek besi dengan diameter 7 cm dan tinggi 5 cm. Hal ini dikarenakan objek besi ini memiliki penampang yang paling dekat dengan sumber pemancar. Dan sebaliknya penampang paling jauh dengan sumber akan memiliki perbedaan tegangan yang paling kecil. Akan tetapi dari hasil ini sistem tidak bisa disebut mampu mendeteksi bentuk karena untuk mengidentifikasi bentuk diperlukan proses lanjutan yaitu proses tomografi.



Gambar 4.13 Pengaruh Bentuk Objek Terhadap Perubahan Nilai Tegangan.

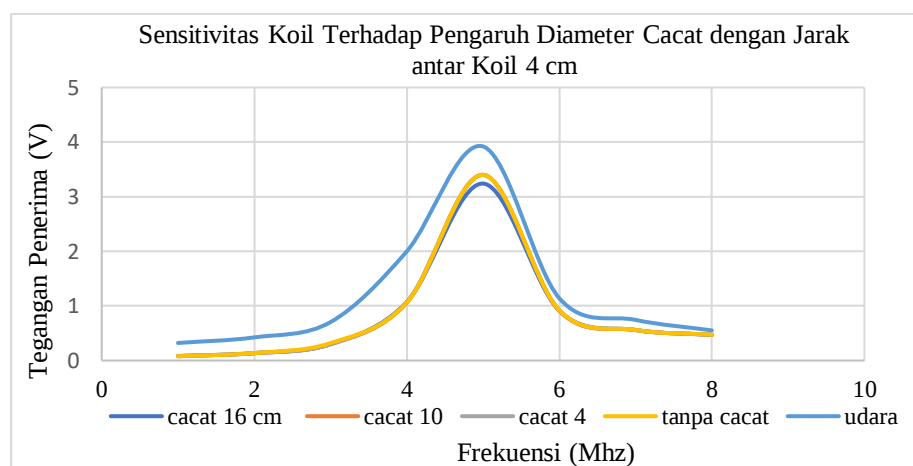


Gambar 4.14 Pengaruh *Material* Objek Terhadap Perubahan Nilai Tegangan.

Dari grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.14 nilai beda tegangan pada bahan aluminium paling tinggi hal ini disebabkan karena nilai konduktifitas aluminium lebih tinggi dari pada besi maupun paraffin. Nilai beda tegangan maksimum dilampirkan pada lampiran D.

4.5 Data Tegangan dengan Objek Cacat

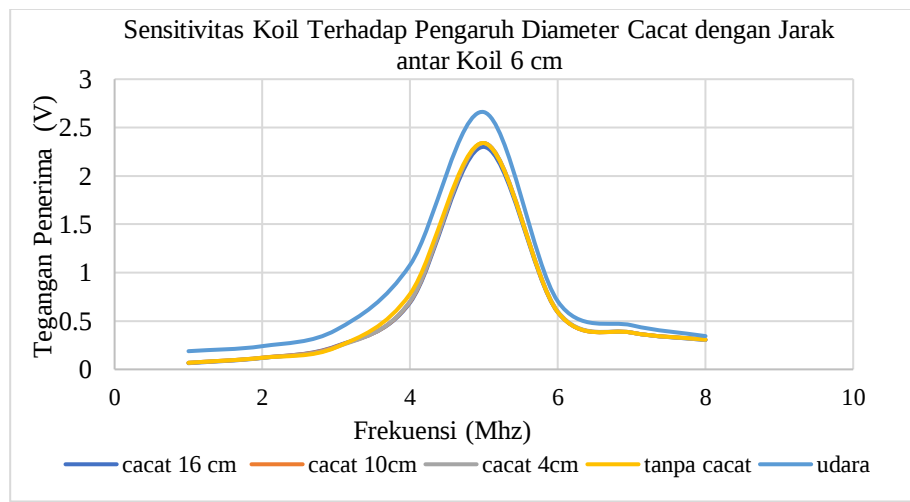
Pada penelitian ini juga melihat sejauh mana sensitivitas sistem koil terhadap objek lempengan baja yang diberi anomali berupa lubang. Anomali berupa lubang ini berada tepat ditengah objek baja dengan dimensi 8 cm x 8 cm x 1 cm. Ukuran lubang ini divariasikan dengan diameter 4 cm, 10 cm dan 16 cm. Jarak antar koil yang digunakan juga divariasikan yaitu 4 cm, 6 cm, 8 cm. Tegangan eksitasi yang digunakan adalah 10 Vpp



Gambar 4.15 Grafik Pengaruh Kondisi Cacat pada Objek dengan Jarak 4 cm.

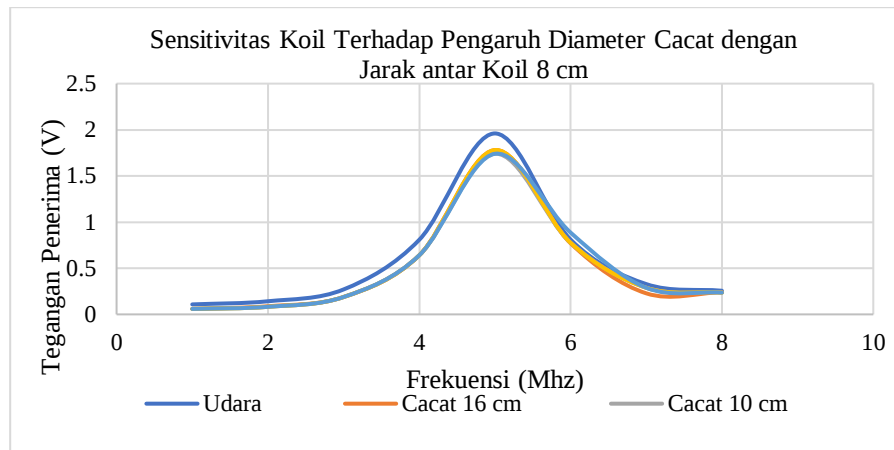
Pada Gambar 4.15. menunjukkan hasil pengujian pada objek baja yang diberi anomali berupa lubang di tengah objek dengan diameter yang berbeda-beda. Dari hasil di

atas diperoleh bahwa perbedaan tegangan induksi yang dihasilkan tidak signifikan untuk perbedaan ukuran anomali dengan diameter 10 cm, dan 4 cm tetapi terlihat sedikit mengalami perbedaan tegangan pada anomali dengan diameter 16 cm. Data tegangan induksi koil penerima pada objek baja yang sudah diberi anomali saat diberi frekuensi dengan rentang 1 MHz – 8 MHz. Pada grafik di atas perbedaan tegangan induksi koil penerima dapat dilihat bedanya pada frekuensi 5 MHz, dengan begitu frekuensi 5 MHz dapat dikatakan sebagai frekuensi yang optimum dalam membedakan tegangan induksi koil penerima dari masing-masing diameter anomali.



Gambar 4.16 Grafik Pengaruh Kondisi Cacat pada Objek dengan Jarak 6 cm.

Pada Gambar 4.16. menunjukkan hasil pengujian pada objek baja yang diberi anomali berupa lubang di tengah objek dengan diameter yang berbeda-beda. Dari hasil di atas diperoleh bahwa perbedaan tegangan induksi yang dihasilkan tidak signifikan untuk perbedaan ukuran anomali dengan diameter 4 cm, 10 cm, dan 16 cm. Data tegangan induksi koil penerima pada objek baja yang sudah diberi anomali saat diberi frekuensi dengan rentang 1 MHz – 8 MHz. Pada grafik di atas perbedaan tegangan induksi koil penerima dapat dilihat bedanya pada frekuensi 5 MHz, dengan begitu frekuensi 5 MHz dapat dikatakan sebagai frekuensi yang optimum dalam membedakan tegangan induksi koil penerima dari masing-masing diameter anomali.



Gambar 4.17 Grafik Pengaruh Kondisi Cacat pada Objek dengan Jarak 8 cm.

Pada Gambar 4.17 menunjukkan hasil pengujian pada objek baja yang diberi anomali berupa lubang di tengah objek dengan diameter yang berbeda-beda. Dari hasil di atas diperoleh bahwa perbedaan tegangan induksi yang dihasilkan tidak signifikan untuk perbedaan ukuran anomali dengan diameter 4 cm, 10 cm, dan 16 cm. Data tegangan induksi koil penerima pada objek baja yang sudah diberi anomali saat diberi frekuensi dengan rentang 1 MHz – 8 MHz. Pada grafik di atas perbedaan tegangan induksi koil penerima dapat dilihat bedanya pada frekuensi 5 MHz, dengan begitu frekuensi 5 MHz dapat dikatakan sebagai frekuensi yang optimum dalam membedakan tegangan induksi koil penerima dari masing-masing diameter anomali.

Yang terlihat dari 3 gambar diatas disimpulkan bahwa sistem koil dapat mendeteksi perbedaan cacat pada objek baja dengan jarak antar koil 4 cm dan diameter cacat 16 cm. Besar nilai tegangan induksi koil penerima pada objek baja beranomali dipengaruhi oleh besar diameter lubang pada lempengan baja. Seperti yang ditampilkan pada gambar grafik di atas, semakin kecil diameter anomalnya, maka nilai tegangan induksi koil penerimanya akan semakin mendekati nilai tegangan induksi pada lempengan baja tanpa anomali. Sedangkan, semakin besar diameter anomalnya, maka nilai tegangan induksi koil penerima pun semakin mendekati nilai tegangan induksi pada objek udara. Hal ini disebabkan oleh luasan lempengan baja yang berkurang terisi oleh udara sehingga informasi yang dibaca sensor koil tak hanya objek berupa lempengan baja tetapi juga objek berupa udara. Sehingga, nilai tegangan induksi koil penerima pada lempengan baja beranomali yang dibaca tidak kurang dari nilai tegangan induksi pada objek udara dan juga tidak lebih dari nilai tegangan induksi pada objek lempengan baja.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari penelitian baik dari segi kelebihan maupun kekurangan serta ditambahkan saran-saran yang berguna untuk pengembangan lebih lanjut.

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan perancangan sistem koil yang telah dibuat, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dibuat prototipe sistem koil dengan menggunakan COMSOL Multiphysics 4.4 untuk memudahkan pengaturan parameter koil.
2. Besar induktansi kedua koil pada eksperimen dan simulasi masing masing adalah 0.069434 mH, 0.06979 mH dan 0.05612mH
3. Hasil pengukuran secara manual didapatkan dengan letak koil berhadap jarak minimum 2 cm dan jarak maksimum 11 cm.
4. Sensor sistem koil dapat mendeteksi cacat pada objek pelat baja dengan jarak 4 cm dengan diameter 16 cm.
5. Sistem sensor koil dapat membedakan bahan yang bersifat ferromagnetik dan non-ferromagnetik.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan, sistem koil masih memiliki banyak keterbatasan. Berikut beberapa saran untuk optimalisasi sistem koil pada penelitian selanjutnya:

1. Melakukan penelitian lanjutan mengenai parameter koil dan sistem sensor untuk meningkatkan sensitivitas koil.
2. Perlu ditambah hardware untuk menyesuaikan data real time dan dapat digunakan dengan frekuensi lebih rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdullah, N.R. Abdullah, S.A. Hussain, M. (2006). "Application of Lamb Waves (*Ultrasonic Waves*) In Wear Detection on Alummunium Plate". University of Mara Technology, Malaysia.
- [2] Puji, Muhammad Nurul. (2015). "Perancangan Sistem Volumetric Magnetic Induction Tomography Menggunakan 8 Koil Pemancar dan 8 Koil Penerima". Universitas Indonesia, Depok.
- [3] Z. Zakaria, R.A. Rahim, M.S.B. Mansor, S. Yaacob, N. M. N. Ayub, S. Z. M. Muji, M. H. F. Rahiman, and S. M. K. S. Aman, "Advancements in Pemancars and Sensors for Biological Tissue Imaging in Magnetic Induction Tomography," *Sensors*, vol. 12, no. 6, pp. 7126-7156, Jan. 2012
- [4] R.Reinaldo. 2013. "Pengembangan Awal Sistem Magnetic Induction Tomography untuk Pencitraan Objek Logam,".
- [5] Ma, Lu. (2014). "Magnetic Induction Tomography for Non-Destructive Evaluation and Process Tomography," University of Bath..
- [6] Darmawan, Dudi. 2010. "Diktat Kuliah Fisika II". Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [7] "Chapter 11. Inductance and Magnetic Energy". [Online] Available at : <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide11.pdf> [diakses 5 Mei 2018].
- [8] Ma, Lu., & Soleimani, Manuchehr. 2017. *Magnetic Induction Tomography Methods and Application : a Review. Measurement Science and Technology*, Vol. 28, No. 7.
- [9] Peyton, A.J, Beck, M.S, Borges, A.R , Oliveira, J.E de. Lyon, G.M, Yu, Z.Z, Brown, M.W, Ferrera, J. (1999). *Development of Electromagnetic Tomography (EMT) for Industrial Applications. Part 1: Sensor Design and Instrumentation*. Department of Electrical Engineering and Electronics, Lancaster University.
- [10] A. Korjenevsky, V. Cherepenin, dan S. Sapetsky. "Magnetic Induction Tomography: experimental realization". *Physiological Measurement*, 21(1):89,2000.
- [11] [Online] Available at : <http://coil32.net/single-layer-coil.html> [diakses 10 Juli 2018].

[12] [Online] Available at : www.alatuji.com/article/detail/680/eddy-current-testing
[diakses 27 Juli 2018]

[13] Razak, Ahmad Sabri AB. (1990). *Eddy Current Level II*. Classroom Training Handbook

LAMPIRAN

Lampiran A.

Nilai Tegangan pada koil penerima akibat variasi jarak antar koil yang diberikan.

Tegangan Set : 10 Volt

Alat Ukur : *Function Generator* GW-Instek SFG 2120, *Osiloskop* GW Instek GDS 2204

Pengukuran : 1x

FREKUENSI (KHZ)	JARAK ANTAR KOIL				
	11 cm	8 cm	6 cm	4 cm	2 cm
100	-	0.2	0.32	0.48	0.52
200	-	0.1	0.32	0.4	0.52
300	-	0.092	0.32	0.4	0.58
400	-	0.092	0.4	0.52	0.64
500	-	0.098	0.4	0.48	0.58
600	-	0.088	0.4	0.48	0.64
700	-	0.096	0.4	0.48	0.6
800	-	0.106	0.4	0.4	0.64
900	-	0.098	0.4	0.48	0.64
1000	0.05	0.094	0.32	0.48	0.8
2000	0.04	0.134	0.4	0.56	0.82
3000	0.04	0.248	0.4	0.72	1.16
4000	0.078	0.56	0.88	1.2	2.34
5000	0.2	3.68	5.04	7.6	16.8
6000	0.104	1.36	1.68	2.32	4.8
7000	0.064	0.865	0.92	1.36	3.2
8000	0.048	0.657	0.844	0.86	2.19
9000	0.039	0.52	0.32	0.76	2
10000	0.026	0.274	0.4	0.52	0.896

LAMPIRAN B.

Sensitifitas Sistem Koil terhadap Bahan Material

Tegangan Set : 10 Volt

Alat Ukur : *Function Generator* GW-Instek SFG 2120, *Osiloskop* GW Instek GDS 2204

Jarak Sistem : 11 cm

Frekuensi (KHz)	Receiver (V) (paraffin)		beda Volt	Receiver (V) (paraffin + besi)		beda Volt	Receiver (V) (besi)		beda Volt
	Sebelum	Sesudah		Sebelum	Sesudah		Sebelum	Sesudah	
10	0.014	0.0144	0.0004	0.014	0.016	0.002	0.014	0.0158	0.0018
20	0.017	0.017	0	0.017	0.019	0.002	0.017	0.0181	0.0011
30	0.0186	0.0184	0.0002	0.0186	0.019	0.0004	0.0186	0.018	0.0006
40	0.014	0.0142	0.0002	0.014	0.0131	0.0009	0.014	0.013	0.001
50	0.014	0.0136	0.0004	0.014	0.0132	0.0008	0.014	0.0146	0.0006
60	0.014	0.014	0	0.014	0.0145	0.0005	0.014	0.015	0.001
70	0.015	0.0143	0.0007	0.015	0.0157	0.0007	0.015	0.0157	0.0007
80	0.016	0.015	0.001	0.016	0.0158	0.0002	0.016	0.0158	0.0002
90	0.0124	0.013	0.0006	0.0124	0.0134	0.001	0.0124	0.0134	0.001
100	0.016	0.016	0	0.016	0.0157	0.0003	0.016	0.0157	0.0003
200	0.0136	0.014	0.0004	0.0136	0.014	0.0004	0.0136	0.0135	1E-04
300	0.016	0.016	0	0.016	0.0152	0.0008	0.016	0.0155	0.0005
400	0.0142	0.014	0.0002	0.0142	0.014	0.0002	0.0142	0.0167	0.0025

500	0.014	0.014	0	0.014	0.014	0	0.014	0.014	0
600	0.014	0.014	0	0.014	0.014	0	0.014	0.0139	0.0001
700	0.012	0.013	0.001	0.012	0.012	0	0.012	0.0134	0.0014
800	0.016	0.015	0.001	0.016	0.016	0	0.016	0.0151	0.0009
900	0.0164	0.016	0.0004	0.0164	0.0164	0	0.0164	0.016	0.0004
1000	0.0168	0.017	0.0002	0.0168	0.0172	0.0004	0.0168	0.0209	0.0041
2000	0.016	0.016	0	0.016	0.016	0	0.016	0.0216	0.0056
3000	0.0176	0.0176	0	0.0176	0.0191	0.0015	0.0176	0.0152	0.0024
4000	0.0302	0.0302	0	0.0302	0.032	0.0018	0.0302	0.0409	0.0107
5000	0.244	0.2441	0.0001	0.244	0.251	0.007	0.244	0.272	0.028
6000	0.055	0.055	0	0.058	0.058	0	0.058	0.068	0.01
7000	0.0406	0.04	0.0006	0.0406	0.0418	0.0012	0.0406	0.048	0.0074
8000	0.032	0.0321	1E-04	0.032	0.031	0.001	0.032	0.03	0.002
9000	0.032	0.0314	0.0006	0.032	0.034	0.002	0.032	0.03	0.002
10000	0.029	0.0296	0.0006	0.029	0.03	0.001	0.029	0.028	0.001

LAMPIRAN C.

Sensitifitas Sistem Koil terhadap Bentuk Material Besi

Tegangan Set : 10 Volt

Alat Ukur : *Function Generator* GW-Instek SFG 2120, Osiloskop GW Instek GDS 2204

Jarak Sistem : 11 cm

Frekuensi (Hz)	Tegangan Receiver (Volt)		Beda Tegangan (besi 6)	Tegangan Receiver (Volt)		Beda tegangan (Segi 6)
	sebelum	sesudah		sebelum	sesudah	
100000	0.24	0.238	0.002	0.248	0.272	0.024
200000	0.328	0.36	0.032	0.336	0.344	0.008
300000	0.312	0.328	0.016	0.352	0.392	0.04
400000	0.356	0.384	0.028	0.376	0.416	0.04
500000	0.368	0.408	0.04	0.376	0.416	0.04
600000	0.36	0.392	0.032	0.368	0.4	0.032
700000	0.392	0.448	0.056	0.376	0.416	0.04
800000	0.392	0.416	0.024	0.368	0.432	0.064
900000	0.392	0.44	0.048	0.376	0.408	0.032
1000000	0.408	0.424	0.016	0.368	0.416	0.048
2000000	0.408	0.448	0.04	0.36	0.408	0.048
3000000	0.4	0.34	0.06	0.336	0.408	0.072
4000000	0.392	0.48	0.088	0.272	0.344	0.072
5000000	0.706	0.284	0.422	0.848	0.288	0.56
6000000	0.488	0.408	0.08	0.704	0.624	0.08
7000000	0.472	0.504	0.032	0.624	0.584	0.04
8000000	0.496	0.472	0.024	0.6	0.584	0.016
9000000	0.472	0.456	0.016	0.576	0.528	0.048
10000000	0.52	0.528	0.008	0.648	0.536	0.112

Tegangan Receiver		Beda Tegangan (besi 6)	Tegangan Receiver		beda Tegangan (segi 6)	Tegangan Receiver		Beda Tegangan (kotak)
sebelum	sesudah		sebelum	sesudah		sebelum	sesudah	
0.264	0.264	0	0.264	0.264	0	0.264	0.265	0.001
0.344	0.352	0.008	0.344	0.352	0.008	0.344	0.351	0.007
0.376	0.384	0.008	0.376	0.384	0.008	0.376	0.368	0.008
0.384	0.408	0.024	0.384	0.408	0.024	0.384	0.384	0
0.416	0.416	0	0.416	0.416	0	0.416	0.408	0.008
0.392	0.408	0.016	0.392	0.408	0.016	0.392	0.392	0
0.384	0.408	0.024	0.384	0.408	0.024	0.384	0.448	0.064
0.368	0.392	0.024	0.368	0.392	0.024	0.368	0.416	0.048
0.376	0.4	0.024	0.376	0.4	0.024	0.376	0.44	0.064
0.392	0.416	0.024	0.392	0.416	0.024	0.392	0.424	0.032
0.376	0.416	0.04	0.376	0.416	0.04	0.376	0.448	0.072
0.352	0.376	0.024	0.352	0.376	0.024	0.352	0.34	0.012
0.288	0.32	0.032	0.288	0.32	0.032	0.288	0.308	0.02
0.704	0.496	0.208	0.704	0.496	0.208	0.704	0.608	0.096
0.704	0.688	0.016	0.704	0.688	0.016	0.704	0.684	0.02
0.64	0.592	0.048	0.64	0.592	0.048	0.64	0.592	0.048
0.536	0.52	0.016	0.536	0.52	0.016	0.536	0.56	0.024
0.536	0.536	0	0.536	0.536	0	0.536	0.55	0.014
0.552	0.552	0	0.552	0.552	0	0.552	0.552	0

LAMPIRAN D

Sensitifitas Sistem Koil terhadap Bahan Material (Bentuk Silinder diameter 7 cm)

Tegangan Set : 10 Volt

Alat Ukur : *Function Generator* GW-Instek SFG 2120, Osiloskop GW Instek GDS 2204

Jarak Sistem : 11 cm

frekuensi (Hz)	Tegangan Receiver (Volt)		beda tegangan (besi)	Tegangan Receiver (Volt)		beda tegangan (alumunium)	Tegangan Receiver (Volt)		beda tegangan (parafin)
	sebelum	sesudah		sebelum	sesudah		sebelum	sesudah	
100000	0.26	0.284	0.024	0.312	0.328	0.016	0.286	0.285	0.001
200000	0.344	0.372	0.028	0.408	0.432	0.024	0.376	0.372	0.004
300000	0.38	0.404	0.024	0.432	0.464	0.032	0.406	0.4	0.006
400000	0.404	0.42	0.016	0.448	0.48	0.032	0.426	0.418	0.008
500000	0.408	0.428	0.02	0.456	0.496	0.04	0.432	0.43	0.002
600000	0.412	0.44	0.028	0.48	0.512	0.032	0.446	0.441	0.005
700000	0.416	0.44	0.024	0.488	0.528	0.04	0.452	0.45	0.002
800000	0.452	0.484	0.032	0.496	0.528	0.032	0.474	0.472	0.002
900000	0.48	0.512	0.032	0.504	0.536	0.032	0.492	0.491	0.001
1000000	0.616	0.664	0.048	0.512	0.544	0.032	0.564	0.561	0.003
2000000	0.624	0.656	0.032	0.632	0.68	0.048	0.628	0.627	0.001
3000000	0.968	1.01	0.042	0.984	1.04	0.056	0.976	0.926	0.05
4000000	2.54	2.62	0.08	2.54	2.7	0.16	2.54	2.53	0.01
5000000	4.24	4.56	0.32	4.28	4.9	0.62	4.26	4.26	0
6000000	1.4	1.52	0.12	1.44	1.48	0.04	1.42	1.42	0
7000000	0.88	0.96	0.08	0.92	1	0.08	0.9	0.9	0
8000000	0.68	0.76	0.08	0.72	0.8	0.08	0.7	0.7	0
9000000	0.56	0.62	0.06	0.6	0.62	0.02	0.58	0.51	0.07
10000000	0.5	0.58	0.08	0.54	0.54	0	0.52	0.52	0

LAMPIRAN E.

Sensitifitas Sistem Koil terhadap Cacat pada Material Pelat Baja (Tebal = 10.22 mm)

Tegangan Set : 10 Volt

Alat Ukur : *Function Generator* GW-Instek SFG 2120, *Osiloskop* GW Instek GDS 2204

Jarak	frekuensi (MHz)	full (tanpa cacat)	16 cm	10 cm	4 cm	udara
4 cm	1	0.079	0.084	0.081	0.079	0.322
	2	0.137	0.134	0.136	0.138	0.424
	3	0.32	0.3	0.3	0.298	0.704
	4	1.06	1.07	1.06	1.07	2
	5	3.4	3.24	3.4	3.48	3.92
	6	0.92	0.912	0.91	0.918	1.14
	7	0.56	0.559	0.559	0.558	0.744
	8	0.474	0.47	0.47	0.472	0.552
6 cm	1	0.068	0.064	0.068	0.068	0.188
	2	0.12	0.118	0.121	0.12	0.24
	3	0.228	0.24	0.236	0.23	0.408
	4	0.78	0.69	0.7	0.704	1.08
	5	2.34	2.3	2.34	2.34	2.66
	6	0.592	0.59	0.592	0.593	0.704
	7	0.38	0.38	0.38	0.38	0.456
	8	0.308	0.304	0.308	0.308	0.344
8 cm	1	0.059	0.059	0.059	0.059	0.108
	2	0.082	0.088	0.082	0.082	0.142
	3	0.188	0.188	0.188	0.188	0.27
	4	1.74	1.78	1.78	1.78	1.96
	5	0.64	0.64	0.64	0.64	0.808
	6	0.776	0.77	0.778	0.776	0.81
	7	0.288	0.288	0.289	0.288	0.328
	8	0.236	0.24	0.24	0.236	0.216

