

# DRAFT SKRIPSI\_RADHI RAMADHAN\_3331200026.docx

*by Radhi Ramadhan*

---

**Submission date:** 01-Aug-2024 01:32PM (UTC+0700)

**Submission ID:** 2425687675

**File name:** DRAFT\_SKRIPSI\_RADHI\_RAMADHAN\_3331200026.docx (1.27M)

**Word count:** 12762

**Character count:** 79086

**SIMULASI DETEKSI CACAT PADA PELAT BAJA  
MENGUNAKAN PEMODELAN SENSOR *MAGNETIC  
INDUCTION TOMOGRAPHY (MIT)* DENGAN SOFTWARE  
SIMULASI MULTIPHYSIC**

**TUGAS AKHIR**



Disusun oleh

**Radhi Ramadhan**

**3331200026**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA  
CILEGON – BANTEN  
2024**

**SIMULASI DETEKSI CACAT PADA PELAT BAJA  
MENGUNAKAN PEMODELAN SENSOR *MAGNETIC  
INDUCTION TOMOGRAPHY (MIT)* DENGAN SOFTWARE  
SIMULASI MULTIPHYSIC**

**TUGAS AKHIR**

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S1  
pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Disusun oleh

**Radhi Ramadhan**

**3331200026**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA  
CILEGON – BANTEN  
2024**

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>i</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>iv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....	4
1.5 Metodologi Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1 Pengelasan .....	6
2.2 <i>Non-Destructive Test</i> (NDT) .....	8
2.3 Magnet .....	13
2.4 Induksi .....	13
<b>2.4.1 Hukum Faraday</b> .....	13
<b>2.4.2 Hukum Lenz</b> .....	15
<b>2.4.3 Eddy Current</b> .....	16
2.5 <i>Magnetic Induction Tomography</i> (MIT) .....	18
2.6 Prinsip Dasar MIT .....	19
2.7 Rangkaian Sistem MIT.....	21
2.8 <i>Coil</i> .....	22
2.9 Simulasi Multiphysic .....	23
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>25</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2 Pemodelan Geometri Pelat Baja.....	26
3.3 Desain Sensor MIT .....	27
3.4 Prosedur Simulasi Simulasi .....	28
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>33</b>
4.1 Pemodelan Geometri Simulasi .....	33

4.2	Analisis Hasil Simulasi Frekuensi Optimal .....	35
4.3	Analisis Pengaruh V <sub>Tx</sub> terhadap Coil Voltage R <sub>x</sub> .....	43
4.4	Analisis Pengaruh Ukuran Cacat terhadap Coil Voltage R <sub>x</sub> .....	44
4.5	Analisis Kemampuan Sensor MIT untuk Mendeteksi Cacat di Sumbu Z .....	46
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>55</b>
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran .....	56
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>57</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>61</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Cacat <i>Porosity</i> (Sahlan, 2016).....	7
Gambar 2.2 Cacat <i>Slag Inclusion</i> (Sahlan, 2016) .....	8
Gambar 2.3 Cacat <i>Incomplete Fusion</i> (Rizvia & Alib, 2019).....	8
Gambar 2.4 <i>Radiography Test</i> (Dok. Pribadi) .....	10
Gambar 2.5 <i>Magnetic Test</i> (Dok. Pribadi) .....	11
Gambar 2.6 <i>Penetrant Test</i> (pipingengineer.org) .....	12
Gambar 2.7 Prinsip Kerja <i>Eddy Current Testing</i> .....	17
Gambar 2.8 Prinsip Kerja <i>Magnetic Induction Tomography</i> .....	20
Gambar 2.9 Sketsa Rangkaian Sistem MIT .....	21
Gambar 2.10 Koil Solenoid .....	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Simulasi Sensor MIT .....	26
Gambar 3.2 Pemodelan Geometri Pelat Baja.....	27
Gambar 3.3 Pemodelan Geometri Sensor MIT .....	28
Gambar 3.4 Pemodelan Geometri Benda Kerja dan Sensor MIT .....	29
Gambar 3.5 Pemilihan Fisika <i>Magnetic Field</i> .....	29
Gambar 3.6 <i>Electrical Circuit</i> .....	30
Gambar 3.7 Pengaturan Material .....	30
Gambar 4.1 Ilustrasi Cacat pada Spesimen Uji.....	33

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 <i>Basic Properties of Copper</i> .....	31
Tabel 3.2 <i>Basic Properties of Air</i> .....	31
Tabel 3.3 <i>Basic Properties of Structural Steel</i> .....	31
Tabel 4.1 Hasil Simulasi dengan Resistor 50 $\Omega$ (Ohm) .....	36
Tabel 4.2 Hasil Simulasi dengan Resistor 100 $\Omega$ (Ohm) .....	38
Tabel 4.3 Hasil Simulasi dengan Resistor 1000 $\Omega$ (Ohm) .....	40

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam dunia industri manufaktur pipa, kegiatan pengelasan merupakan salah satu proses yang sangat penting untuk dilakukan. Pengelasan bertujuan untuk menyambungkan satu bagian dengan bagian lainnya dengan tujuan untuk mendapatkan fungsi baru. Untuk memperoleh kualitas sambungan yang terbaik, maka diperlukan inspeksi di setiap sambungan pengelasan yang terdapat pada manufaktur pipa, karena daerah yang memiliki kemungkinan besar terjadinya cacat atau ketidaksempurnaan pada pipa yaitu terletak pada daerah sambungan yang dapat disebabkan oleh adanya cacat dalam proses pengelasan. Inspeksi cacat merupakan langkah kritis untuk memastikan keamanan dan kualitas produk. Inspeksi cacat pada sambungan las merupakan bagian penting dalam industri manufaktur untuk memastikan kualitas produk akhir. Cacat pada pelat baja dapat berupa retak, porositas, atau ketebalan tidak merata, yang dapat mengurangi kekuatan dan keamanan produk. Oleh karena itu, diperlukan metode inspeksi yang efisien dan akurat untuk mendeteksi cacat tersebut dengan akurasi tinggi tanpa mengganggu integritas material.

Inspeksi cacat yang digunakan pada industri manufaktur pipa saat ini yaitu *Ultrasonic Testing* dan *Radiography test*. Dari kedua metode inspeksi tersebut memiliki kekurangan masing-masing yaitu pada *ultrasonic testing* tidak dapat dilakukan pada temperatur yang tinggi disebabkan pada pengujiannya menggunakan media kuplan untuk memudahkan perambatan gelombang suara dari probe, sehingga pada temperatur tinggi kuplan tersebut tidak akan berfungsi yang mempengaruhi hasil dari pengujian *ultrasonic testing*. Pada pengujian metode *radiography test* juga terdapat kekurangan yaitu adanya radiasi sinar x atau sinar  $\gamma$  yang berbahaya bagi kesehatan manusia, instrumen yang digunakan memiliki harga yang cukup mahal, proses pelaksanaan pengujian dilakukan pada lingkungan steril yang tidak

banyak orang dan dibutuhkan keterampilan dan pengalaman operator yang tinggi untuk pemaparan dan interpretasi. Berdasarkan kekurangan dari pengujian tidak merusak yang saat ini digunakan maka diperlukan alternatif metode pengujian yang dapat diterapkan pada industri manufaktur pipa.

Terjadinya perkembangan teknologi penginderaan, perangkat keras, dan perangkat lunak diikuti dengan berkembangnya teknologi pencitraan dan pemrosesan citra. Pengembangan metode pencitraan salah satunya dapat diterapkan untuk pengujian tidak merusak. Teknik pencitraan listrik tertua adalah listrik impedansi tomografi (EIT), yang biasanya melibatkan memasang rangkaian elektroda permukaan di sekitar wilayah tersebut untuk dicitrakan. EIT kadang-kadang disebut sebagai tomografi hambatan listrik (ERT) dalam aplikasi yang permitivitasnya dapat diabaikan. Teknik lainnya, tomografi kapasitansi listrik (ECT), sangat mirip dengan EIT karena ia juga menggunakan array elektroda dan menerapkan medan listrik pada material. ECT hanya berbeda dalam cara pengukurannya, sebaliknya pengukuran transimpedansi yang melibatkan empat elektroda pada suatu waktu, kapasitansi diukur antara pasangan yang berbeda elektroda. ECT dirancang untuk material dengan permitivitas rendah dan konduktivitas yang dapat diabaikan yang dicitrakan melalui isolasi batas. Teknik yang paling baru dan paling sedikit dikembangkan adalah teknik *Magnetic Induction Tomography* (MIT). MIT merupakan salah satu teknik inspeksi non-destruktif yang dapat digunakan untuk mendeteksi cacat pada material konduktif seperti baja. MIT menggunakan medan magnet dan sensor untuk memetakan distribusi konduktivitas listrik dalam objek yang diperiksa. MIT adalah salah satu teknik pencitraan berdasarkan induksi magnet dengan bantuan konduktivitas, permitivitas dan permeabilitas suatu material dengan efek arus eddy. Prinsip kerja MIT yaitu menerapkan medan magnet dari kumparan eksitasi untuk menginduksi arus eddy dalam bahan, kemudian medan magnet dari arus eddy dideteksi oleh koil receiver. Sensor pada MIT memiliki dua kumparan yaitu digunakan sebagai pemancar (*transmitter*) dan penerima (*receiver*).

Pengujian dengan metode MIT ini sebelumnya telah diteliti untuk inspeksi hasil las dengan menggunakan sensor planar 2 channel berbentuk

koil spiral, penelitian ini berhasil menunjukkan adanya indikasi cacat pada hasil lasan baja dengan cara merekonstruksi citra dari data hasil pengujian MIT yang telah dilakukan. Namun hasil dari rekonstruksinya masih terdapat kekurangan, yaitu citra yang diperoleh tidak dapat menunjukkan lokasi cacat secara pasti dan tidak menunjukkan bentuk cacat seperti kondisi nyata (Fitriani, 2016). Penelitian lainnya juga telah melakukan karakterisasi sensor MIT dengan perbandingan 3 model sensor, namun setelah sensor yang dianggap memiliki sensitivitas yang tinggi digunakan untuk mendeteksi cacat porositas yang dilakukan pendekatan dengan membuat lubang bervariasi ukurannya, data yang diperoleh tidak sesuai dengan konsep atau teori yang ada (Saputra, 2024). Dalam beberapa penelitian, kedalaman cacat masih diabaikan. Namun, ketika kedalaman cacat yang sangat dalam diabaikan, itu akan sangat penting untuk pemeriksaan cacat karena dampak dari kedalaman cacat yang tinggi akan sangat besar jika diabaikan.

Terdapat salah satu proses yang harus dilakukan sebelum melakukan eksperimen untuk karakterisasi sensor yaitu dengan cara membuat persamaan matematis dan melakukan simulasi terlebih dahulu. Penelitian mendalam tentang sensor MIT harus dilakukan dengan memodelkan pengembangan sensor MIT 2 kumparan satu sumbu menggunakan *software Simulasi Multiphysic*. Sensor MIT diatur untuk menginduksi medan magnetik dan mendeteksi respons elektromagnetik dari pelat baja. Perubahan medan magnetik yang terdeteksi kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi keberadaan dan karakteristik cacat dalam pelat baja. Penelitian ini diharapkan akan memberikan dasar untuk pengembangan metode dan alat deteksi cacat yang lebih baik.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan uraian pada latar belakang penelitian diketahui terdapat masalah yang diharapkan dapat diselesaikan diantaranya:

1. Bagaimana efektivitas simulasi pemodelan sensor *Magnetic Induction Tomography* (MIT) menggunakan *software Simulasi Multiphysics* dalam mendeteksi cacat pada pelat baja?

2. Bagaimana kemampuan sensor MIT dalam mendeteksi cacat yang berada di bawah permukaan?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Dalam setiap penelitian tentunya memiliki tujuan yang harus dicapai, maka dari itu dalam penelitian tentang sensor MIT ini memiliki tujuan penelitian yaitu:

1. Melakukan simulasi deteksi cacat pada pelat baja menggunakan sensor MIT dengan Simulasi *Multiphysics*.
2. Mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi cacat pada sumbu Z atau di bawah permukaan.

### **1.4 Ruang Lingkup Penelitian**

Berikut ini terdapat ruang lingkup penelitian yang dilakukan.

1. Studi literatur MIT sebagai alternatif pengganti pengujian cacat dalam manufaktur pipa dari berbagai referensi dan jurnal ilmiah
2. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material Maju dan Tomografi Fakultas Teknik Untirta dan PT C-Tech Labs Edwar Technology
3. Simulasi menggunakan *software Simulasi Multiphysics* dengan modul *Electromagnetic Field* dan *Electrical Circuit*.

### **1.5 Metodologi Penelitian**

Metode penelitian yang digunakan untuk melakukan penelitian terhadap pengujian MIT adalah sebagai berikut.

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan dan mengambil sumber-sumber referensi yang dijadikan sebagai bahan studi pustaka. Pada studi literatur ini penulis mengambil dan mengumpulkan data-data yang dapat digunakan untuk melengkapi studi yang berkaitan tentang pengujian MIT, mulai dari hal-hal mendasar dari pengujian seperti bagaimana cara kerja alat, komponen yang digunakan dan lain sebagainya. Beberapa

sumber literatur yang digunakan penulis yaitu mulai dari ebook, jurnal, buku, dan lain sebagainya.

## 2. Tahap Simulasi

Tahap simulasi dilakukan dengan memodelkan sensor MIT yang diujikan kepada bahan uji yang berdimensi 50x50x10mm. Simulasi dilakukan pada software Simulasi *Multiphysics* dengan modul *Electromagnetic Field*. Sensor terdiri dari 2 kumparan yaitu kumparan pemancar dan kumparan penerima. Pemodelan sensor menggunakan geometri silinder yang didefinisikan sebagai kumparan (*Coil*) pada menu *Electromagnetic field* dengan jumlah 115 kumparan untuk pemancar dan 1150 kumparan untuk penerima.

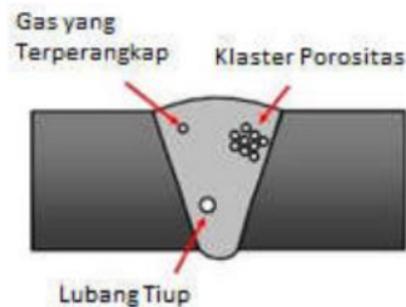
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pengelasan

Pengelasan merupakan kegiatan menyambungkan dua buah logam atau lebih dengan cara memanaskan sampai suhu lebur dengan logam pengisi atau tanpa logam pengisi (Mulyadi et al., 2015). Sambungan yang dihasilkan dari proses pengelasan merupakan sambungan tetap atau permanen, karena untuk melepas sambungannya harus merusak benda tersebut. Sambungan las adalah sambungan yang terletak diantara dua atau lebih permukaan logam dengan cara dilakukan pemanasan lokal pada permukaan benda yang disambung. Kelebihan sambungan las dibandingkan sambungan baut dan mur atau sambungan keling (rivet) adalah biaya untuk pekerjaan dalam jumlah besar lebih murah, kemungkinan tidak ada sambungan yang longgar dan lebih tahan beban fatigue (Endramawan et al., 2017). Pengelasan merupakan kegiatan yang sangat penting dilakukan pada industri fabrikasi untuk menyambungkan satu bagian kepada bagian lainnya agar menjadi satu produk utuh yang memiliki fungsi. Pengelasan tidak selalu sempurna dalam prosesnya, terdapat kemungkinan adanya ketidaksempurnaan pada hasil lasan. Adapun bentuk dari ketidaksempurnaan pada hasil lasan berupa cacat porositas ataupun inklusi.

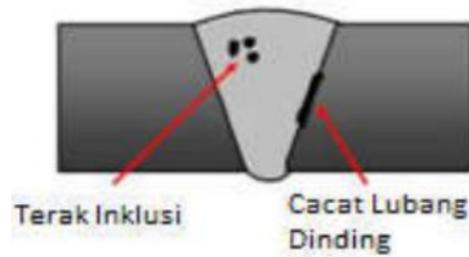
Cacat pengelasan adalah ketidaksempurnaan yang ditemukan pada hasil pengelasan, hal tersebut akan mempengaruhi sifat mekanik dari suatu material seperti kekuatan material akan berbeda dengan hasil lasan yang tidak ada cacat. Terdapat banyak jenis cacat yang dapat ditemukan pada hasil lasan, namun ada beberapa jenis cacat yang umum atau kemungkinan terjadi pada hasil lasan meskipun seorang *welder* yang ahli sekalipun. Cacat yang umum ditemukan dan dapat dilakukan proses perbaikan pada hasil lasan diantaranya yaitu *porosity*, *slag inclusion* dan *incomplete penetration*. Selain itu, terdapat cacat pengelasan yang jika terjadi maka hasil lasan tidak dapat diperbaiki atau dikatakan *reject* yaitu hasil lasan yang terdapat *crack* atau retakan.

*Porosity* adalah salah satu jenis cacat pada lasan yang disebabkan karena adanya gas yang terjebak dalam jumlah yang banyak sehingga melebihi syarat batas pada daerah lasan. Beberapa penyebab terjadinya cacat *porosity* pada hasil lasan yaitu kondisi pengelasan yang lembab, kampuh las yang basah dan elektroda lembab. Jika ditemukan adanya cacat seperti ini pada hasil lasan dapat mengakibatkan sambungan las lemah, sehingga diperlukan cara penanggulangannya yaitu membuang bagian lasan yang terdapat cacat tersebut dengan cara mengamplas bagian cacat dan menambah lasan yang benar (Warman, 2017). Berikut ini ilustrasi cacat *porosity*.



**Gambar 2.1** Cacat *Porosity* (Sahlan, 2016)

*Slag inclusion* adalah cacat yang terdapat pada hasil pengelasan berupa terak yang terperangkap di dalam lasan. Hal ini dapat terjadi karena pembersihan yang dilakukan saat pengelasan yang berlapis kurang bersih, penggunaan flux pada pengelasan yang berlapis dan ampere yang digunakan pada saat pengelasan bagian root menggunakan ampere yang terlalu rendah. Adapun cara mengatasi cacat seperti ini yaitu untuk sambungan yang kritis, daerah bagian cacat dipotong, kemudian dibentuk gap yang baik dan dilas kembali (Warman, 2017). Berikut ini ilustrasi dari cacat *slag inclusion*.



**Gambar 2.2** Cacat *Slag Inclusion* (Sahlan, 2016)

*Incomplete Fusion* adalah cacat pengelasan yang terjadi ketika *welder* tidak mengelas material secara akurat dan logam yang mengarah ke celah sudah mengeras sehingga celah tidak terisi dengan logam cair (Rizvia & Alib, 2019). Menurut sumber lain, *Incomplete Fusion* merupakan sebuah hasil pengelasan yang tidak diinginkan karena ketidaksempurnaan proses penyambungan antara logam las dengan logam induk (Kurniadi et al., 2022). Cacat ini disebabkan karena ampere yang terlalu rendah, kampuh las sangat besar dan kecepatan menggerakkan elektroda terlalu cepat. Berikut ini contoh gambar dari cacat *incomplete fusion*.



**Gambar 2.3** Cacat *Incomplete Fusion* (Rizvia & Alib, 2019)

#### 4 2.2 *Non-Destructive Test (NDT)*

*Non Destructive Test (NDT)* adalah pengujian suatu material yang bertujuan untuk mencari cacat atau ketidaksempurnaan pada suatu benda dengan tidak merusak benda tersebut (Endramawan et al., 2017). Tujuan dari NDT adalah untuk mendeteksi cacat dengan suatu prosedur tertentu pada suatu benda oleh seseorang yang khusus memiliki sertifikasi untuk

melakukan pekerjaan tersebut. Hasil dari pengujian ini menentukan suatu bagian akan diganti atau diperbaiki tergantung dari jumlah cacat yang ada berdasarkan rujukan suatu standar (Endramawan et al., 2017). NDT merupakan sarana penunjang yang sangat diandalkan untuk pengendalian dan penjamin mutu suatu hasil pengelasan (Sulaiman et al., 2020). NDT mempunyai banyak metode untuk proses pengujiannya, diantara metode tersebut tidak ada yang paling bagus karena dari sekian banyak metode tersebut mempunyai keunggulan masing-masing yang tidak dimiliki oleh metode yang lainnya. NDT yang digunakan secara umum yaitu diantaranya *Radiography Test*, *Ultrasonic Test*, *Magnetic Test* dan *Penetrant Test*.

#### 1. *Radiography Test*

Radiografi adalah salah pengujian tidak merusak yang menggunakan sinar X atau sinar gamma untuk mampu menembus hampir semua logam kecuali timbal dan material padat lainnya sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi cacat atau ketidaksempurnaan dibalik bahan metal atau di dalam bahan itu sendiri. Pada aktivitas pengelasan, pengujian radiografi ini merupakan kegiatan yang sangat penting untuk menentukan mutu internalnya secara cepat sebelum melangkah ke jenis uji mutu lainnya. Radiografi menggunakan *penetrating radiation* yang diarahkan langsung pada material (Sulaiman et al., 2020).

Pada suatu industri yang bergerak di bidang fabrikasi hampir semua hasil pengelasan dilakukan pengujian *radiography test*. Pengujian ini dilakukan untuk melihat cacat pada hasil pengelasan secara detail dan jelas yang dapat dilihat melalui film. Akan tetapi, pengujian ini memiliki kelemahan yaitu resiko bahaya tubuh terpapar radiasi yang tinggi. Jenis cacat yang dapat dilihat dari hasil pengujian *radiography test* yaitu *incomplete fusion*, *incomplete penetration*, porositas dan *crack*. Berikut ini ilustrasi seseorang sedang melakukan proses pelaksanaan untuk pengujian *radiography test*.



**Gambar 2.4** *Radiography Test* (Dok. Pribadi)

## 2. *Ultrasonic Testing*

*Ultrasonic testing* merupakan salah satu metode pengujian dari NDT yang memanfaatkan media gelombang ultrasonik (gelombang suara) yang mempunyai frekuensi tinggi lebih dari 20 Khz. *Ultrasonic testing* dapat digunakan untuk mendeteksi dimensi benda kerja dan kecacatan atau porositas pada benda kerja (Widyawati & Marano, 2021). Menurut sumber lainnya, *ultrasonic testing* memanfaatkan perambatan gelombang dengan frekuensi tinggi, berkisar 1 MHz sampai dengan 10 MHz. Gelombang ultrasonik menembus kedalam suatu bahan, kemudian gelombang ini akan memantul jika menemukan bidang pantul termasuklah cacat (Supriyanto & Syafrizal, 2022). *Ultrasonic testing* mempunyai prinsip kerja yaitu dimana gelombang ultrasonik ini disorotkan ke permukaan bidang yang sedang di uji dengan garis lurus pada kecepatan konstan, kemudian gelombang tersebut dipantulkan lagi dari permukaan atau cacat benda uji tersebut. hal yang diperoleh gelombang suara tersebut akan tampil pada layar monitor berupa tampilan pulsa yang berfungsi untuk mendeteksi tebal serta cacat atau tidaknya benda tersebut (Bina et al., 2018).

## 3. *Magnetic Test*

*Magnetic Particle Testing* (MT) adalah metode pengujian untuk menentukan lokasi kerusakan permukaan (*surface*) dan dibawah permukaan (*subsurface*) pada material yang bersifat *ferromagnetic* (Rais, 2015). *Magnetic Particle Inspection* (MPI) merupakan metode NDT yang digunakan untuk mendeteksi retakan (*crack*) dan diskontinuitas lain

yang berada di permukaan material ferromagnetik. Sensitivitas metode ini baik untuk diskontinuitas di permukaan dan terus menurun dengan semakin dalamnya suatu diskontinuitas yang berada di dekat permukaan. Metode ini khusus dilakukan pada material *ferrous* (Alexandri & Sugandika, 2017). Uji magnetic adalah salah satu metode uji tanpa merusak (NDT) yang dapat mendeteksi adanya cacat pada permukaan dan di bawah permukaan pada suatu bahan ferro-magnetic (Yunianto et al., 2023). Prinsip kerja Uji *Magnetic* yaitu arus listrik digunakan untuk membangkitkan medan magnet dalam bahan, arah medan magnet akan dibelokkan sehingga terjadi kebocoran *flux magnetic* bila melalui cacat. Bocoran *flux magnetic* akan menarik butir-butir ferro-magnetic di permukaan sehingga lokasi cacat dapat ditunjukkan (Yunianto et al., 2023).

Pada prinsipnya metode *Magnetic Test* (MT) adalah metode pengujian tanpa merusak dengan menggunakan bantuan medan magnet yang memungkinkan menampakan diskontinuitas menggunakan suatu media (partikel magnetik) yang memiliki daya tarik magnet. Metode MT bisa digunakan untuk mengetahui cacat yang terdapat di permukaan sebuah benda kerja, cacat bisa berupa retakan, patahan, dan lubang. Partikel magnetik yang digunakan dalam metode MT dapat berupa *visible dry method*, *visible wet method*, *dry fluorescent* dan *wet fluorescent* (Pardede et al., 2015). Berikut ini ilustrasi dari pengujian *Magnetic Test*.



**Gambar 2.5** *Magnetic Test* (Dok. Pribadi)

#### 4. *Penetrant Test*

Metode *penetrant test* merupakan metode NDT yang paling sederhana. Metode ini digunakan untuk menemukan cacat di permukaan terbuka dari komponen solid, baik logam maupun non logam, seperti keramik dan plastik fiber. Melalui metode ini, cacat pada material akan terlihat lebih jelas (Endramawan et al., 2017b). Caranya adalah dengan memberikan cairan berwarna terang pada permukaan yang diinspeksi. Cairan ini harus memiliki daya penetrasi yang baik dan viskositas yang rendah agar dapat masuk pada cacat di permukaan material. Selanjutnya, *penetrant* yang tersisa di permukaan material disingkirkan. Cacat akan nampak jelas jika perbedaan warna *penetrant* dengan latar belakang cukup kontras. Sesuai inspeksi, *penetrant* yang tertinggal dibersihkan dengan penerapan *developer*. Kelemahan dari metode ini antara lain adalah bahwa metode ini hanya bisa diterapkan pada permukaan terbuka. Metode ini tidak dapat diterapkan pada komponen dengan permukaan kasar, berpelasis, atau berpori (Suharyadi, n.d.). Prinsip kerja *penetrant test* adalah ketika cairan penetrant diberikan pada material yang terdapat cacat maka cairan akan masuk ke dalam cacat dan *developer* digunakan untuk mengangkat cairan *penetrant* tersebut agar terlihat secara visual. Pada *penetrant* tipe *flourescent*, pembacaannya menggunakan sinar ultraviolet di ruang gelap (Wicaksono et al., 2022). Berikut ini ilustrasi dari pengujian *penetrant test*.



**Gambar 2.6** *Penetrant Test* (pipingengineer.org)

## 2.3 Magnet

Pada zaman prasejarah sifat magnetic ditemukan dalam jenis tertentu dari mineral bijih besi yang dikenal sebagai magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Studi secara menyeluruh tentang magnetisme pertama kali dilakukan oleh William Gilbert, yang dapat menyimpulkan bahwa bumi bertindak sebagai magnet terbesar. Terdapat kesamaan antara listrik dan magnet, satu manifestasi yang berbeda dari magnet yaitu bahwa magnet merupakan batang bermuatan yang memiliki dua ujung dan sifatnya berlawanan (Sulistiyanti et al., 2017). Dalam magnet, ujung tersebut dinamakan kutub S (selatan) dan kutub U (utara) yang dianalogikan sama halnya dengan kutub planet bumi. Sama halnya listrik memiliki dua varietas yang berbeda yaitu kutub negative (-) dan kutub positif (+).

## 2.4 Induksi

Salah satu efek paling penting dari elektromagnetisme ditemukan pada tahun 1831 oleh Michael Faraday di Inggris dan Joseph Henry di Amerika Serikat, kemampuan medan magnet yang bervariasi untuk menginduksi arus listrik melalui kawat. Karena medan magnet tidak spesifik dari asal-usulnya, efeknya sama tanpa peduli apakah dibuat dengan magnet permanen atau solenoida. Jika medan magnet tidak berubah, arus listrik tidak dihasilkan. Hukum induksi Faraday mengatakan bahwa tegangan yang diinduksi, atau gaya gerak listrik, adalah sama dengan laju perubahan fluks magnet melalui sirkuit.

### 2.4.1 Hukum Faraday

Salah satu dasar teori elektromagnetik adalah penemuan bahwa interaksi medan magnet dengan muatan listrik yang bergerak dapat membuatnya didefleksikan. Generasi bidang listrik dihasilkan oleh muatan listrik yang berubah. Perubahan tegangan pada bahan konduksi menghasilkan arus listrik. Menurut hukum Faraday, suatu tegangan diinduksikan pada suatu rangkaian konduktor jika konduktor tersebut terkena fluks magnet yang berubah terhadap waktu. Akibatnya arus mengalir pada penghantar jika terdapat jalur tertutup. Faktanya, ini adalah prinsip dasar yang menjadi dasar semua perangkat arus eddy.

Fenomena yang sama terjadi ketika sebuah loop konduktor yang sebenarnya dapat dipandang sebagai filamen sebuah benda penghantar masif dikenai medan magnet yang berubah terhadap waktu. Arus eddy dapat muncul di semua mesin dan perangkat elektromagnetik karena semuanya dipengaruhi oleh medan magnet. Oleh karena itu, arus eddy akan muncul pada sirkuit magnet stator dan rotor mesin listrik yang terbuat dari besi setiap kali mesin tersebut terkena medan magnet (Kriezis et al., 2013). Hukum Faraday tentang tegangan induksi yang terjadi pada kumparan yang mengalami perubahan flux magnetik seperti dinyatakan pada persamaan 2.1 berikut ini.

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan:  $\frac{d\phi}{dt}$  : Perubahan fluk magnetic

(-) : Perbedaan polaritas pada tegangan induksi

Tanda minus menunjukkan arah yang diinduksi oleh medan elektromagnetik. Ini terjadi jika berbagai fluks magnet diterapkan ke solenoid, misalnya, tanda-tanda ini muncul di setiap lilitan dan harus ditambahkan. Tegangan yang diinduksi adalah jika koil dibuat dengan luas penampang dan fluks yang sama melewati setiap lilitan.

$$V = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan jumlah lilitan N. Bagi perancang sensor atau insinyur, persamaan ini dapat ditulis ulang dalam bentuk yang menarik.

$$V = -N \frac{d(BA)}{dt} \dots\dots\dots(2.3)$$

Tegangan yang diinduksi dapat dihasilkan baik dengan mengubah amplitudo medan magnet (B) atau dengan mengubah area sirkuit (A). Oleh karena itu, tegangan yang diinduksi tergantung pada hal-hal

berikut. Pergeseran sumber medan magnet (koil pemancar) ke arah koil penerima, variasi arus koil atau kawat yang menghasilkan medan magnet, perubahan orientasi sumber magnet. Menurut hukum Faraday, arus listrik akan muncul di koil kedua jika arus listrik melewati kumparan yang berada di dekat kumparan lain. Namun, medan magnet menembus kedua kumparan. Oleh karena itu, induktansi diri, atau induktansi dari kumparan, didefinisikan sebagai milik kumparan karena menentang perubahan arus yang mengalir melaluinya (Sulistiyanti et al., 2017).

Hubungan antara gaya magnetic dengan listrik dapat menghasilkan suatu bentuk lain dari gaya magnetik yang dinamakan *elektromagnetic*. Oleh karena itu, elektromagnetisme terbentuk oleh efek magnetik dari arus listrik. *Elektromagnetic* akan dihasilkan saat aliran listrik yang mengalir melewati konduktor sederhana seperti halnya kabel dan kawat. Elektron-elektron yang bergerak berhubungan dengan medan magnet; medan magnet yang bergerak dapat menghasilkan arus. efek elektromagnetic dipakai menjadi prinsip dasar dari metode NDT (*Non Destructive Testing*) yang menggunakan prinsip fisika elektromagnetisme (Suseno et al., 2021).

#### 2.4.2 Hukum Lenz

Hukum Lenz merupakan salah satu prinsip dasar dalam elektromagnetisme yang diusulkan oleh Heinrich Lenz pada tahun 1834. Hukum ini berkaitan dengan arah arus induksi yang dihasilkan dalam sebuah konduktor saat ada perubahan dalam medan magnet yang melingkupi konduktor tersebut. Secara spesifik, Hukum Lenz menyatakan bahwa arus induksi yang dihasilkan dalam sebuah rangkaian tertutup akan memiliki arah sedemikian rupa sehingga medan magnet yang dihasilkan oleh arus tersebut akan menentang perubahan dalam fluks magnetik yang menyebabkannya. Hukum Lenz mirip dengan hukum gerak ketiga Newton (yaitu, untuk setiap tindakan selalu ada reaksi yang sama dan berlawanan). Hukum Lenz mengacu pada arus yang diinduksi, yang berarti bahwa ia berlaku hanya di sirkuit

konduksi tertutup. Perhatikan bahwa fluks magnet yang berlawanan pada koil mengurangi induktansi. Hukum Lenz memiliki berbagai aplikasi yang sangat luas, termasuk pengereman elektromagnetik, kompor induksi, detektor logam, dan banyak lainnya.

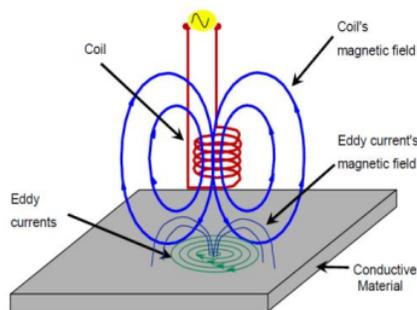
Ketika fluks magnetik yang menembus sebuah loop konduktor berubah, medan magnet yang berubah ini akan menyebabkan terjadinya ggl induksi di dalam konduktor tersebut. Arus induksi yang dihasilkan oleh ggl ini akan menghasilkan medan magnet yang menentang perubahan fluks magnetik yang menyebabkan arus tersebut. Prinsip ini memastikan bahwa tidak ada energi yang diciptakan atau dihancurkan, melainkan hanya ditransfer atau diubah dari satu bentuk ke bentuk lain (Sulistiyanti et al., 2017).

### 2.4.3 Eddy Current

*Eddy current* adalah arus listrik yang diinduksi pada konduktor dan mengalir kedalam jalur melingkar. Fenomena arus *eddy* pertama kali diamati oleh François Arago pada tahun 1824. Pengamatan yang dilakukan dinamakan magnet berputar dan kebanyakan material konduktor menjadi termagnetisasi dan dijelaskan secara lengkap oleh Faraday. Pengujian arus *Eddy* sebagian besar dimulai sebagai hasil penemuan induksi elektromagnetik oleh ilmuwan Inggris Michael Faraday pada tahun 1831. Faraday menemukan bahwa ketika medan magnet melewati sebuah konduktor atau ketika sebuah konduktor melewati magnet medan, arus listrik akan mengalir melalui konduktor jika ada jalur tertutup di mana arus dapat bersirkulasi (Suwarno, 2016).

*Eddy current* dapat dimanfaatkan untuk melakukan pengujian tidak merusak terhadap benda uji, pengujian ini dinamakan *Eddy Current Testing* (ECT). ECT merupakan salah satu metode dari teknik pengujian tidak merusak yang memanfaatkan proses induksi elektromagnetik untuk <sup>5</sup> untuk mendeteksi dan mendapatkan ukuran suatu crack, korosi, dan <sup>5</sup> diskontinuitas material. Selain itu, ECT juga dapat digunakan untuk mengukur ketebalan material, mengukur ketebalan coating dan, mengukur konduktivitas suatu material. Prinsip

kerja pada metode *eddy current* adalah induksi elektromagnetik. Arus eddy yang dihasilkan dari induksi elektromagnetik kemudian diinduksikan kepada material atau bagian yang terletak berdekatan dengan medan fluks yang dihasilkan oleh arus bolak balik pada *Coil probe* (Suseno et al., 2021). ECT bekerja berdasarkan prinsip dari induksi elektromagnetik. Pada metode ini, kumparan (probe dan sensor) tereksitasi dengan sinusoidal arus bolak-balik (Chandra & Bhagi, 2014). Mengikuti hukum Ampere, arus ini menghasilkan medan magnet primer di sekitar kumparan. Ketika sebuah bahan yang dapat menghantarkan listrik adalah didekatkan ke kumparan ini, arus diinduksi dalam material menurut hukum Faraday. Berikut ini ilustrasi dari prinsip kerja ECT.



**Gambar 2.7** Prinsip Kerja *Eddy Current Testing* (Johanes et al., 2021)

Berdasarkan gambar di atas dapat menjelaskan prinsip kerja ECT bahwa ketika arus bolak balik (AC) dialirkan pada kumparan, maka dari kumparan tersebut akan tercipta medan magnet primer di sekitarnya. Pada saat kumparan diletakkan pada konduktor, maka akan tercipta arus *eddy* pada konduktor tersebut, yang kemudian akan menciptakan medan magnet sekunder. Medan magnet sekunder akan berlawanan dengan medan magnet primer, sehingga akan menyebabkan perubahan pada medan magnet primer yang berakibat perubahan impedansi pada

kumparan. Perubahan impedansi pada kumparan tersebut yang akan dideteksi oleh ECT.

Dalam proses pengujiannya metode ECT memiliki faktor penting diantaranya konduktivitas, permeabilitas, frekuensi, *lift-off*, *skin effect* dan *signal to noise ratio*. Konduktivitas menjadi faktor penting dalam ECT dikarenakan arus *eddy* akan mengalir pada benda yang memiliki konduktivitas yang tinggi, sehingga memiliki hambatan yang rendah. Permeabilitas menjadi faktor yang penting dikarenakan permeabilitas adalah kemampuan sebuah material untuk memusatkan garis gaya magnet. Faktor akan berpengaruh jika material uji bersifat *ferromagnetic*. Perubahan sinyal yang terjadi pada *eddy current* ketika probe dijauhkan dari permukaan material yang diuji merupakan faktor penting dalam pengujian teknik ECT, biasa disebut dengan *lift-off*. *Lift-off* berfungsi untuk mencari diskontinuitas pada material yang diuji (Johanes et al., 2021).

## 2.5 *Magnetic Induction Tomography (MIT)*

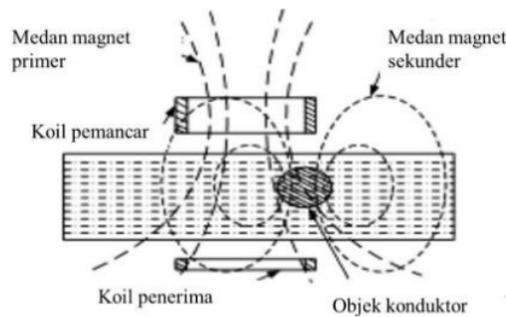
*Magnetic Induction Tomography (MIT)*, yaitu sering disebut sebagai induktansi timbal balik tomografi atau tomografi arus eddy. Pada saat ini mengeksplorasi teknik tomografi listrik MIT yang paling banyak digunakan, dibandingkan dengan sistem tomografi listrik lainnya, seperti *electrical impedance* dan *electrical capacitance tomography*. Namun yang menjadi ciri khas dalam sistem MIT ini, kumparan digunakan sebagai pemancar dan penerima. Dengan membentuk arus sinusoidal pada kumparan transmisi, perubahan fluks magnet diatur, yang menginduksi tegangan terminal kumparan penerima. Sinyal yang diinduksi ini diambil oleh kumparan penginderaan sebanding dengan medan magnet lokal kekuatan B, yang disebut sebagai sinyal latar belakang atau primer, dan direpresentasikan sebagai fasor (H. Y. Wei & Wilkinson, 2011). MIT adalah teknik pengujian non-destruktif untuk menggambarkan distribusi spasial konduktivitas listrik atau permeabilitas magnetik pada objek yang diperiksa. Sinyal yang diperoleh dengan bantuan teknik seperti itu sangatlah kecil, terutama ketika menguji

bahan dengan konduktivitas listrik rendah. Untuk memberikan sensitivitas tertinggi, sistem MIT harus dirancang dengan sangat hati-hati (Ziolkowski & Gratkowski, 2009).

*Magnetic Induction Tomography* (MIT) adalah sistem pencitraan elektromagnetik tanpa kontak. MIT memiliki potensi untuk digunakan dalam banyak aplikasi tomografi industri dan biologi. Dalam dunia industri MIT berpotensi dapat digunakan untuk pengujian hasil pengelasan ataupun pengujian bahan baku, untuk mengetahui cacat atau *discontinuity*. MIT dapat menggambarkan distribusi spasial konduktivitas listrik dan permeabilitas magnetik pada daerah yang menjadi perhatian khusus. Hal ini dilakukan dengan satu set pengukuran menggunakan kumparan induktif yang didistribusikan sekitar pinggiran sampel (H. Wei & Soleimani, 2012). MIT adalah teknik pencitraan yang digunakan untuk menggambarkan sifat elektromagnetik suatu objek dengan menggunakan efek arus eddy. MIT juga dikenal sebagai tomografi induksi elektromagnetik, tomografi elektromagnetik (EMT), tomografi arus eddy, dan pengujian arus eddy. Metode yang digunakan bersifat *nondestructive test* dan geofisika, memiliki aplikasi potensial dalam prosesnya industri dan juga di bidang kedokteran (Saiful et al., 2015).

## **2.6 Prinsip Dasar MIT**

MIT menerapkan medan magnet dari kumparan eksitasi untuk menginduksi arus eddy pada material. Jadi distribusi medan magnet eksitasi diubah oleh arus eddy, dan medan magnet yang dihasilkan kemudian dideteksi oleh kumparan penginderaan. Pada gambar 2.8 menunjukkan arus eddy yang dihasilkan dari objek yang sedang diselidiki. Dalam aplikasi medis, medan arus eddy akan berubah ketika konduktivitas jaringan diubah oleh penyakit. Akibatnya sinyal pengukuran juga akan berubah dan patologi jaringan dapat direfleksikan dengan menganalisis sinyal ini (Saiful et al., 2015). Berikut ini ilustrasi dari prinsip kerja MIT.



**Gambar 2.8** Prinsip Kerja *Magnetic Induction Tomography* (Saiful et al., 2015)

MIT adalah teknik pencitraan non-invasif yang digunakan untuk menghasilkan gambaran distribusi konduktivitas listrik atau permeabilitas magnetik di dalam objek atau sampel yang diamati. Persamaan dasar yang terkait dengan MIT adalah persamaan Maxwell yang dimodifikasi untuk menggambarkan fenomena pada sistem MIT. Persamaan Maxwell merupakan kumpulan persamaan diferensial parsial yang menjelaskan perilaku medan listrik dan medan magnet, serta hubungan antara keduanya. Dalam konteks MIT, persamaan Maxwell digunakan untuk memodelkan interaksi antara medan magnet yang dihasilkan dan distribusi konduktivitas dalam objek yang diamati. Ketika kumparan pemancar dialirkan arus listrik, akan muncul medan magnet disekitarnya. Fenomena ini dijelaskan dengan Hukum Ampere-Maxwell sebagai persamaan berikut:

$$\nabla \times H = (\sigma + j\omega\varepsilon)E \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana  $\nabla$  adalah operator divergen,  $H$  adalah medan magnet,  $\sigma$  adalah konduktivitas,  $j$  adalah kepadatan arus total,  $\omega$  adalah kecepatan sudut,  $\varepsilon$  adalah permitivitas, dan  $E$  adalah medan listrik. Hukum ampere menyatakan bahwa rotasi dari medan magnetik di suatu titik dalam ruang adalah sama dengan jumlah arus listrik yang melewati titik tersebut ditambah dengan perubahan dari kerapatan fluks listrik terhadap waktu. Medan magnet yang terbentuk di sekitar kumparan pemancar disebut medan magnet primer ( $B$ ). Jika terdapat benda konduktif seperti pelat baja pada daerah medan magnet

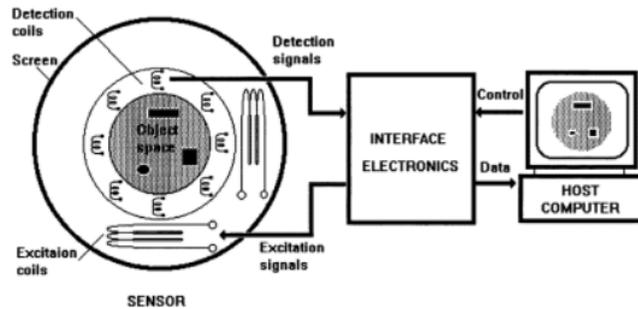
primer, maka akan terbentuk arus eddy di dalam pelat baja tersebut. Arus Eddy yang diinduksi pada pelat baja terjadi berdasarkan Faraday. Salah satu persamaan yang penting adalah persamaan Maxwell yang menggambarkan hukum Faraday. Teori dasar di balik MIT adalah hukum Faraday induksi elektromagnetik. Hukum ini menyatakan bahwa perubahan medan magnet yang melintasi suatu konduktor akan menghasilkan arus listrik dalam konduktor tersebut. Berikut ini persamaan dari hukum Faraday:

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana  $\mu$  adalah permeabilitas. Arus Eddy mengalir pada baja pelat juga menghasilkan medan magnet yang disebut medan sekunder medan magnet ( $\Delta B$ ). Medan magnet primer (B) dan medan magnet sekunder ( $\Delta B$ ) kemudian akan menginduksi tegangan pada koil penerima (Huda et al., 2020).

### 2.7 Rangkaian Sistem MIT

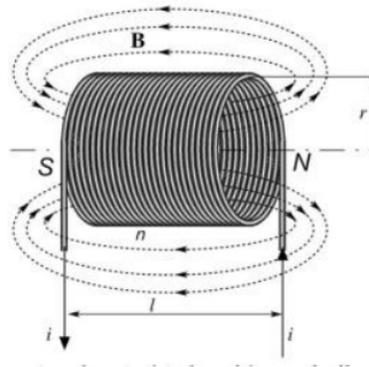
Sistem MIT dalam proses kerjanya memiliki beberapa komponen yang dirangkai menjadi satu kesatuan. Sehingga dari sistem yang dirangkai tersebut menghasilkan satu fungsi dan saling keterikatan. Adapun rangkaian dalam sistem MIT terdiri dari sensor, sistem akuisisi data dan computer. Setiap komponen tersebut memiliki fungsi masing-masing untuk mendukung proses pengambilan data. Berikut ini ilustrasi dari rangkaian MIT.



**Gambar 2.9** Sketsa Rangkaian Sistem MIT  
(Peyton et al., 1996)

## 2.8 Coil

*Coil* adalah lilitan kawat panjang yang berfungsi untuk membawa arus listrik dan berfungsi sebagai alat praktis untuk menghasilkan medan magnet. *Coil* juga sering digunakan sebagai aktuator untuk mengubah arus listrik menjadi gaya mekanik (Sulistiyanti et al., 2017). Sensor biasanya bergantung pada *Coil* untuk mendeteksi perubahan. Dalam sistem MIT, *Coil* atau kumparan memainkan peran penting sebagai komponen utama untuk menghasilkan dan menerima medan elektromagnetik. *Coil* berfungsi sebagai penghasil medan magnet primer dengan cara mengalirkan arus bolak-balik (AC). Medan magnet ini menembus objek yang diperiksa dan menginduksi arus eddy di dalam objek tersebut. *Coil* juga bertindak sebagai penerima medan magnet sekunder yang dihasilkan oleh arus eddy yang diinduksi dalam objek. Arus eddy ini menghasilkan medan magnet sekunder yang kemudian ditangkap oleh *Coil* penerima. *Coil* penerima mengukur perubahan medan magnet sekunder yang disebabkan oleh variasi konduktivitas listrik dalam objek (Cao et al., 2024). Salah satu jenis *Coil* yang digunakan pada sistem MIT yaitu *Coil* solenoid, yang pada dasarnya menjadi lembaran arus silinder. Berikut ini ilustrasi dari bentuk solenoid.



**Gambar 2.10** Koil Solenoid  
(Sulistiyanti et al., 2017)

Ketika solenoid dialiri arus listrik maka akan terbentuk medan magnet di sekitarnya. Hukum ampere dapat diterapkan untuk mengetahui besarnya medan magnet pada solenoid dengan parameter seperti jumlah lilitan, bahan

dari kawat yang dililit dan arus yang diberikan. Berikut ini persamaan hukum ampere yang dapat diterapkan pada *Coil*.

$$B = \mu_0 i_0 n \dots\dots\dots(2.5)$$

di mana  $\mu_0$  adalah permeabilitas bahan, <sup>1</sup> $n$  adalah jumlah lilitan per satuan panjang, dan  $i_0$  adalah arus yang mengalir melalui kawat solenoid.

## 2.9 Simulasi Multiphysic

*Multiphysics* adalah program simulasi interaktif yang kuat yang dapat digunakan untuk memodelkan dan memecahkan berbagai masalah teknik dan ilmiah. Dengan *Multiphysics*, perangkat lunak ini dapat dengan mudah memperluas model konvensional untuk satu jenis fisika menjadi model multifisika yang memecahkan fenomena fisika gabungan dan melakukannya secara bersamaan. Perangkat lunak ini juga menyediakan tampilan desktop terintegrasi yang kuat dengan Model Builder, yang memberikan gambaran lengkap tentang model dan akses ke semua fungsionalitas. Untuk menggunakan perangkat ini, tidak diperlukan pengetahuan matematika atau analisis numerik yang mendalam (*Multiphysics*, 2015).

Kita dapat membuat model dengan menentukan besaran fisika yang relevan seperti sifat material, beban, batasan, sumber, dan fluks dengan menggunakan antarmuka fisika bawaan dan dukungan lanjutan untuk sifat material. Ini berbeda dengan mendefinisikan persamaan dasar. Dengan software Simulasi *Multiphysics* dapat menerapkan variabel, ekspresi, atau angka ini ke domain padat dan cair, batas, tepi, dan titik yang berbeda dari mesh komputasi. Selanjutnya, serangkaian persamaan yang membentuk model secara keseluruhan disusun secara internal oleh perangkat lunak Simulasi *Multiphysics* (*Multiphysics*, 2015).

Pada *software* Simulasi *Multiphysics* terdapat langkah-langkah yang perlu dilakukan untuk mensimulasikan model yang telah dibentuk. Untuk membuat model yang akan disimulasikan langkah awalnya yaitu membuat model geometri yang bentuknya menyerupai atau melakukan pendekatan

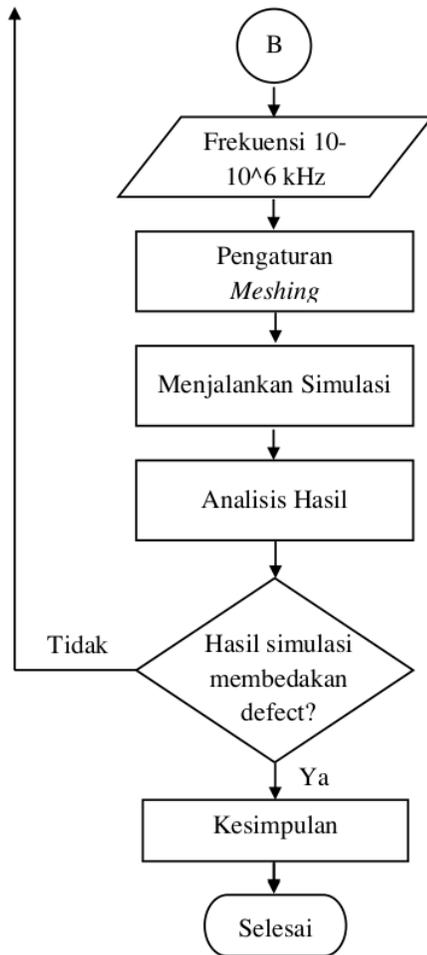
dengan bentuk yang sebenarnya. Dalam membuat bentuk geometri dibutuhkan gabungan dari beberapa geometri yang disatukan sehingga membuat pemodelan sensor dan spesimen uji yang akan dilakukan pengujian. Adapun bentuk-bentuk geometri yang dapat dibentuk terdapat pada gambar berikut ini.

BUTTON	NAME	SPACE DIMENSION	BUTTON	NAME	SPACE DIMENSION
	Bézier Polygon	2D, 3D		Interval	1D
	Block	3D		Line Segment	2D, 3D
	Circle	2D		Parametric Curve	2D, 3D
	Circular Arc	2D		Parametric Surface	3D
	Composite Curve	2D		Point	1D, 2D, 3D
	Cone	3D		Polygon	2D, 3D
	Cubic Bézier	2D, 3D		Pyramid	3D
	Cylinder	3D		Quadratic Bézier	2D, 3D
	Eccentric Cone	3D		Rectangle	2D
	Ellipse	2D		Sphere	3D
	Ellipsoid	3D		Square	2D
	Helix	3D		Tetrahedron	3D
	Hexahedron	3D		Torus	3D
	Interpolation Curve	2D, 3D			

**Gambar 2.11** *Geometry Primitives and Geometry Toolbar Buttons*  
(*Multiphysics*, 2015)

Pemilihan fisika yang akan disimulasikan pada *software* Simulasi Multiphysics merupakan hal yang sangat penting karena untuk memasukkan parameter yang akan diteliti. Sensor MIT, ketika dilihat dari sudut pandang ilmu fisika berkaitan tentang fenomena medan magnet yang terjadi karena adanya arus listrik yang mengalir pada suatu koil yang dijadikan sebagai sensor. Koil tersebut memiliki peran sebagai pemancar dan penerima sinyal. Fenomena fisika medan magnet dalam *software* Simulasi *Multiphysics* termasuk kedalam modul *AC/DC Electromagnetic*. Setelah pemilihan fisika, selanjutnya terdapat parameter-parameter yang harus diketahui seperti jumlah lilitan koil pemancar dan penerima, material dari spesimen uji, pemberian kondisi batas sesuai hal apa yang ingin diketahui dalam simulasi yang dilakukan tersebut (Simulasi, 2012).

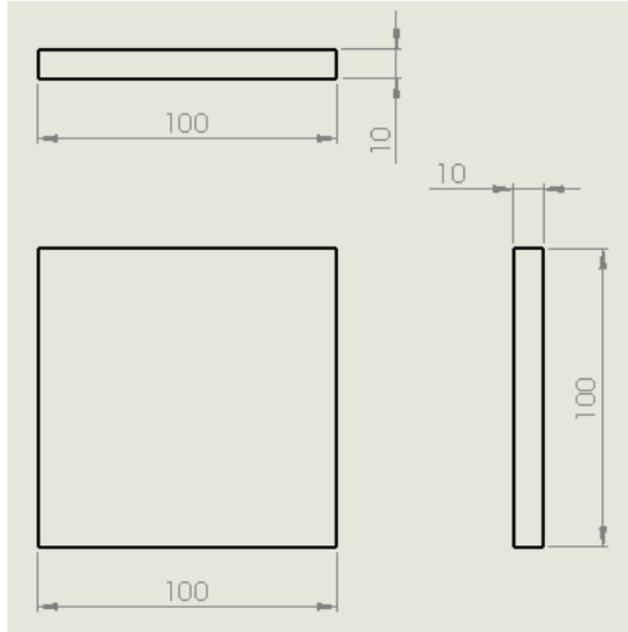




**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian Simulasi Sensor MIT

### 3.2 Desain Geometri Pelat Baja

Geometri pelat baja yang dimodelkan yaitu berbentuk block atau kubur dengan dimensi panjang 50 mm, lebar 50 mm dan tebal 10 mm. Pada model pelat baja ini ditambahkan cacat berupa bentuk silinder yang memiliki diameter dan tebal, kemudian ukuran diameter cacatnya divariasikan. Untuk penempatan cacat yaitu diposisikan berada di bagian permukaan benda kerja dan ditengah pelat baja. Berikut ini ilustrasi dimensi dari spesimen uji berbahan pelat baja yang diuji menggunakan simulasi Multiphysics dengan modul *magnetic field*.



**Gambar 3.2** Dimensi Spesimen Uji

### 3.3 Desain Sensor MIT

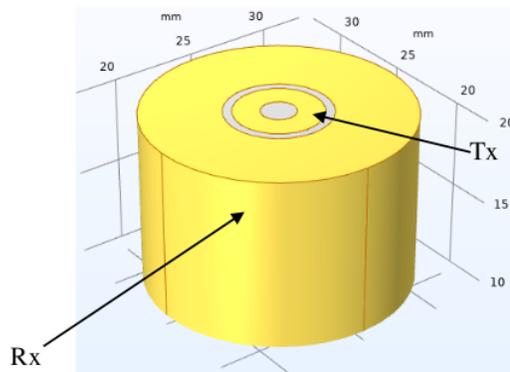
Pembuatan model simulasi dilakukan langsung pada *software* Simulasi Multiphysic dengan bentuk geometri *block* untuk memodelkan spesimen uji dan pemodelan sensor pada simulasi ini merupakan bentuk *cylinder* yang pendekatan pada bentuk aslinya yaitu berupa koil. Pada sensor MIT menggunakan 2 jenis koil yaitu koil *transmitter* (Tx) dan koil *receiver* (Rx), yang mana keduanya memiliki fungsi sebagai pengirim dan penerima sinyal. Dalam pemodelan simulasi sensor ini terdiri dari 2 bentuk *cylinder* yaitu untuk memodelkan koil Tx dan Rx. Sensor MIT yang dimodelkan tersebut memiliki parameter yang dapat dilihat pada tabel berikut ini.

**Tabel 3.1** Parameter Sensor *Magnetic Induction Tomography* (MIT)

Parameter	Keterangan
Jenis Koil	Solenoide
Jumlah Lilitan Tx	115 lilitan
Jumlah Lilitan Rx	1150 lilitan

Diameter Luar Tx	5 mm
Diameter Dalam Tx	3 mm
Diameter Luar Rx	15 mm
Diameter Dalam Rx	6 mm
Ketinggian Koil (mm)	10 mm

Desain sensor MIT yang dimodelkan yaitu terdiri dari 2 jenis koil, koil pengirim dan koil penerima dengan ukuran diameter masing-masing koil yaitu 15 mm untuk diameter luar koil penerima dan 5 mm untuk diameter koil pengirim. Tinggi dari kedua kumparan yaitu sama berukuran 10 mm. Kumparan ini terletak pada satu sumbu yang sama dengan *core* berbentuk lubang yang berisi udara. Berikut ini ilustrasi dari pemodelan geometri sensor MIT.



**Gambar 3.3** Pemodelan Geometri Sensor MIT

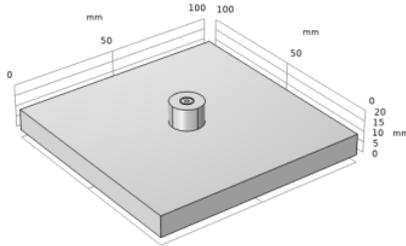
### 3.4 Prosedur Simulasi Simulasi

Untuk mensimulasikan model yang telah dibentuk pada *software Simulasi Multiphysics* terdapat langkah-langkah yang perlu dilakukan, adapun langkahnya sebagai berikut.

#### 1. Pemodelan Geometri

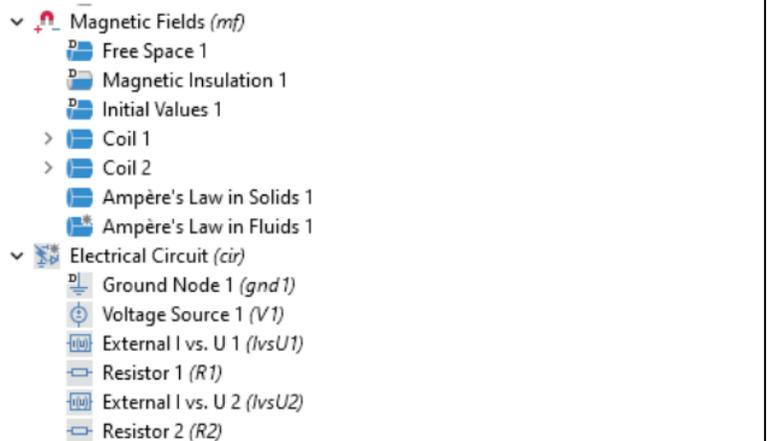
Bangun model geometri yang sesuai dengan sistem yang ingin kita simulasi. Ini bisa berupa benda logam, magnet, atau struktur lainnya yang memengaruhi medan magnet. Berdasarkan pengujian yang ingin dilakukan yaitu menggunakan sistem *Magnetic Induction Tomography*

(MIT), model geometri yang dibentuk yaitu berupa bentuk block dibentuk sesuai dimensi benda kerja yaitu 50x50x10 mm, yang kemudian diatas bagian tengah block tersebut terdapat *cylinder* yang menganalogikan sebuah sensor. Berikut ini ilustrasi dari model geometri yang dibuat.



**Gambar 3.4** Pemodelan Geometri Benda Kerja dan Sensor MIT

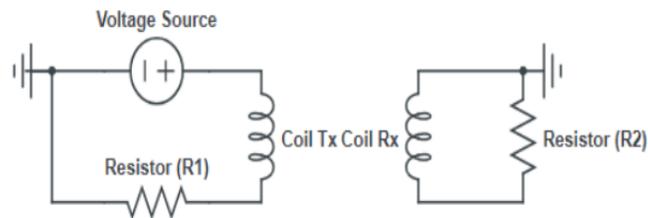
**2. Pemilihan Fisika:** Pilih modul dalam SIMULASI *Multiphysics* yang sesuai dengan tujuan simulasi. Dalam hal ini modul yang dipilih yaitu *AC/DC Electromagnetic Field (Magnetic Field)*.



**Gambar 3.5** Pemilihan Fisika *Magnetic Field*

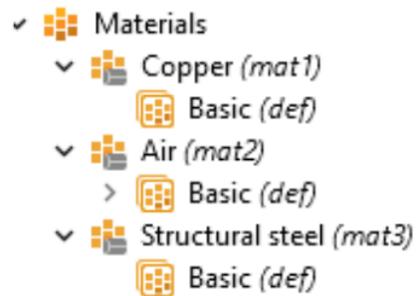
Simulasi *magnetic field* yang dilakukan pada software simulasi *Multiphysics* diperlukan rangkaian listrik untuk pemodelan pada koil pemancar dan penerima. Rangkaian *electrical* pada software yaitu dikenal dengan *electrical circuit*. Adapun komponen yang digunakan pada rangkaian koil pemancar yaitu *ground*, *voltage source*, *Terminal I vs U*

(Coil Tx) dan Resistor yang disusun secara seri. Sedangkan pada rangkaian koil penerima, komponen yang digunakan yaitu *ground*, *Terminal I vs U* (Coil Rx) dan Resistor yang disusun secara paralel. Berikut ini ilustrasi dari rangkaian electric dari setiap koil.



**Gambar 3.6** *Electrical Circuit*

**3. Pengaturan Properti Material:** Tetapkan sifat-sifat material yang sesuai untuk benda-benda dalam model kita. Misalnya, tentukan permeabilitas magnetik, konduktivitas listrik, dan lain-lain. Material yang digunakan yaitu *cooper* digunakan untuk material koil, udara digunakan pada daerah kosong pemisah antara koil pemancar dan penerima serta pada bagian *core* dan *structural steel* merupakan material dari spesimen uji.



**Gambar 3.7** Pengaturan Material

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa material yang digunakan yaitu *Copper*, *Air* dan *Structural Steel*. Dari masing-masing material *properties* yang digunakan yaitu *properties basic*. Berikut ini *properties basic* dari masing-masing material dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 3.1 Basic Properties of Copper**

<b>Property</b>	<b>Expression</b>
<i>Relative permeability</i>	1
<i>Electrical conductivity</i>	5.998e7[S/m]
<i>Coefficient of thermal expansion</i>	17e-6[1/K]
<i>Heat capacity at constant pressure</i>	385[J/(kg*K)]
<i>Relative permittivity</i>	1
<i>Density</i>	8960[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Thermal conductivity</i>	400[W/(m*K)]
<i>Resistivity</i>	0.000000168 ( $\Omega \cdot m$ )

**Tabel 3.2 Basic Properties of Air**

<b>Property</b>	<b>Expression</b>
<i>Bulk viscosity</i>	0.0000145 [Pa.s]
<i>Density</i>	1.2041 kg/m <sup>3</sup>
<i>Dynamic viscosity</i>	eta(T)
<i>Electrical conductivity</i>	0[S/m]
<i>Mean molar mass</i>	0.02897[kg/mol]
<i>Ratio of specific heats</i>	1.4
<i>Relative permeability</i>	1
<i>Relative permittivity</i>	1
<i>Resistivity</i>	10e+16 $\Omega \cdot m$
<i>Thermal conductivity</i>	0.03 W/(m·K)

**Tabel 3.3 Basic Properties of Structural Steel**

<b>Property</b>	<b>Expression</b>
<i>Isotropic structural loss factor</i>	0.02
<i>Relative permeability</i>	1
<i>Heat capacity at constant pressure</i>	475[J/(kg*K)]
<i>Thermal conductivity</i>	44.5[W/(m*K)]
<i>Electrical conductivity</i>	4.032e6[S/m]

<i>Relative permittivity</i>	1
<i>Coefficient of thermal expansion</i>	12.3e-6[1/K]
<i>Density</i>	7850[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Resistivity</i>	5x10 <sup>-7</sup> Ω·m

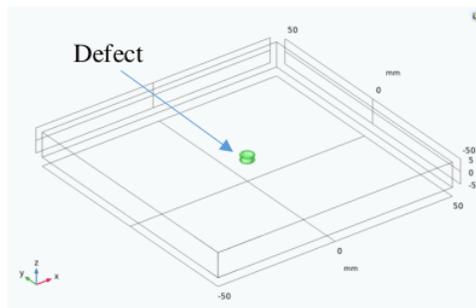
4. **Definisikan Boundary Conditions:** Tentukan kondisi batas yang sesuai untuk model kita, seperti medan magnet yang diberikan oleh solenoid dengan parameter yang telah ditentukan pada tabel 3.1.
5. **Pilih Solvers:** Pilih jenis solver yang sesuai untuk simulasi kita. Simulasi *Multiphysics* menawarkan berbagai solver untuk berbagai jenis aplikasi, termasuk elektromagnetik. Dalam hal ini solver yang dipilih yaitu *Coil Geometri Analysis* dan *Frequency Domain*. *Coil Geometri Analysis* digunakan untuk menghitung distribusi arus ketika *Domain Coil* ditambahkan ke model dan mungkin diperlukan sebelum menjalankan analisis Medan Magnet lain yang didukung. Untuk model konduktor "Multiturn terhomogenisasi", hal ini diperlukan jika jenis Kumparan diatur ke "Numerik", dan menghasilkan kerapatan arus yang sesuai dengan rangkaian listrik konduktif yang dihubungkan secara seri yang dijelaskan pada pemilihan fisika dengan menambahkan modul *electrical circuit*. *Frequency Domain* digunakan untuk menghitung respons model linier atau linier yang dikenai eksitasi harmonik untuk satu atau beberapa frekuensi. Dalam hal ini frkuensi yang digunakan yaitu berkisar dari 10 kHz hingga 1 GHz.
6. **Simulasikan Model:** Jalankan simulasi untuk mendapatkan persebaran medan magnet dalam domain yang Kita definisikan. Berikut ini hasil semula menggunakan modul *Magnetic Field*.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pemodelan Geometri Simulasi

Simulasi pemodelan sensor MIT untuk mendeteksi cacat pada pelat baja SS400 dilakukan menggunakan *software* simulasi *Multiphysics*. Cacat yang dimodelkan pada spesimen uji divariasikan ukurannya mulai dari 1 mm hingga 5 mm. Posisi cacat diletakkan dibawah permukaan dengan jarak 1 mm dan dibawah sensor MIT. Sensor MIT ini menggunakan sumber masukan berupa voltage sebesar 10 volt. Sensor MIT disimulasikan menggunakan frekuensi sebesar 10 kHz hingga 10 MHz, simulasi dilakukan pada rentang frekuensi tersebut dengan tujuan untuk menentukan frekuensi resonan

Simulasi sensor MIT dilakukan untuk mengetahui parameter sensor yang terbaik untuk digunakan pada pengujian cacat. Sensor yang baik tidak hanya dapat mendeteksi cacat pada bagian permukaan saja, akan tetapi dapat mendeteksi cacat pada bagian bawah permukaan juga. Parameter sensor yang digunakan pada pengujian kali ini, sebelumnya sudah diuji untuk mendeteksi cacat pada bagian permukaan. Cacat yang terletak pada bagian bawah permukaan dapat diuji menggunakan *software* simulasi *Multiphysic* dengan memodelkan cacatnya dibawah permukaan spesimen uji atau di bagian dalam spesimen uji. Berikut ini ilustrasi dari cacat yang terletak pada spesimen benda uji.



**Gambar 4.1** Ilustrasi Cacat pada Spesimen Uji

Berdasarkan gambar 4.1 menunjukkan bahwa pemodelan cacat yang diuji dengan software simulasi *Multiphysics*. Cacat diletakkan pada bagian tengah dan dibawah permukaan spesimen uji, peletakkan cacat didalam permukaan merupakan salah satu upaya untuk membuktikan sensor MIT bahwa dapat mendeteksi cacat pada bagian dalam atau sumbu axial (Z), tidak hanya bagian sumbu X dan Y saja. Cacat yang dimodelkan dalam simulasi deteksi cacat ini bervariasi dari ukuran 0,5 mm hingga 3 mm. Cacat divariasikan agar dapat mengetahui bahwa sensor MIT juga dapat mendeteksi cacat dengan berbagai ukuran. Selain itu juga data spesimen uji yang tidak ada cacat diuji agar mengetahui perbedaan nilai yang didapatnya.

Dalam simulasi sensor MIT ini memiliki prinsip kerja yang hampir sama dengan pengujian *nondestructive test eddy current testing*, yaitu *probe* dialiri arus listrik bolak-balik (AC), kemudian *probe* didekatkan kepada permukaan benda uji akan menghasilkan arus *eddy*, yang mana ketika terdapat cacat pada benda uji arus eddy yang akan terbentuk semakin luas dan jangkauannya semakin lebar sehingga mengakibatkan adanya perubahan nilai voltage lebih besar. Namun, terdapat perbedaan dalam simulasi sensor MIT dalam mendeteksi cacat buatan yang dimodelkan melalui software simulasi *Multiphysics*, yaitu voltage yang dihasilkan berdasarkan simulasi *magnetic field* atau distribusi persebaran medan magnet yang terjadi pada spesimen uji.

Hukum yang mendasari simulasi deteksi cacat menggunakan sensor MIT yaitu Hukum Faraday. Menurut Hukum Faraday, suatu tegangan diinduksikan pada suatu rangkaian konduktor jika konduktor tersebut terkena fluks magnet yang berubah terhadap waktu. Dalam simulasi sensor MIT ini Hukum Faraday diaplikasikan kepada komponen induktif seperti kumparan yang ada pada koil pemancar yang digunakan dalam rangkaian elektronik untuk menyimpan energi dalam medan magnet. Dalam hal ini koil pemancar yang digunakan yaitu koil jenis solenoid dengan jumlah kumparan 115 lilitan dan panjang lilitan sejauh 10 mm. Koil pemancar diberikan input tegangan agar bisa menginduksikan spesimen uji dan mendeteksi cacat pada spesimen uji. Tegangan yang diberikan divariasikan dengan tujuan mengetahui *voltage input* yang baik untuk mendeteksi cacat pada bagian bawah permukaan atau

sumbu aksial (Z) spesimen uji. Variasi tegangan yang diberikan yaitu 10 Volt, 50 Volt dan 100 Volt. Selain itu juga dalam melakukan simulasi pada software *Multiphysics* diperlukan *electrical circuit*, yang mana dalam rangkaianannya terdapat komponen resistor dengan ukuran resistansi yang perlu ditentukan. Adapun ukuran resistansi yang digunakan yaitu 50 Ohm, 100 Ohm dan 1000 Ohm. Dalam rangkaian *electrical* terdapat 2 rangkaian yaitu rangkaian untuk koil pemancar dan rangkaian untuk koil penerima, besaran resistansi yang ditentukan dari masing-masing rangkaian yaitu 1:1 yang artinya ketika rangkaian koil pemancar menggunakan resistor dengan ukuran resistansi 100 Ohm, maka pada rangkaian koil penerima juga menggunakan resistor dengan ukuran resistansi 100 Ohm. Resistor dalam konfigurasi 1:1 dapat membantu menstabilkan tegangan dan arus di rangkaian pemancar dan penerima. Ini sangat penting untuk memastikan bahwa sinyal yang dikirim dan diterima memiliki amplitudo yang konsisten dan tidak terpengaruh oleh variasi dalam rangkaian.

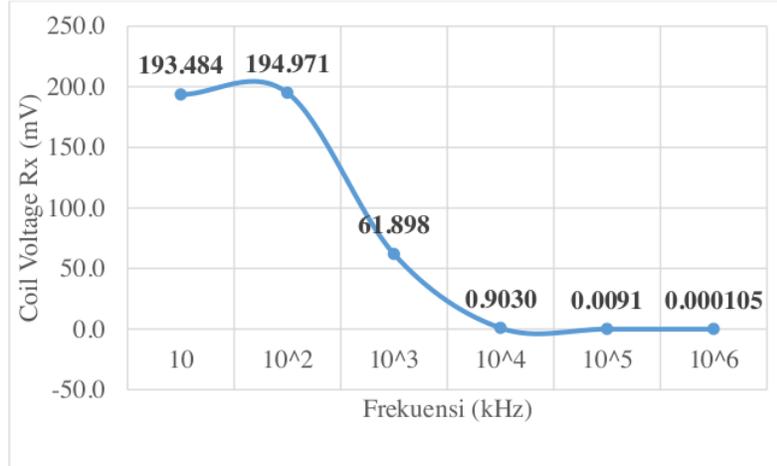
#### **4.2 Analisis Hasil Simulasi Frekuensi Optimal**

Simulasi sensor MIT menggunakan software yang pertama dilakukan yaitu mengetahui bahwa sensor MIT secara optimal mendeteksi cacar pada frekuensi tertentu. Untuk mengetahui frekuensi yang optimal digunakan pada sensor MIT untuk mendeteksi cacat yaitu dengan cara melakukan simulasi sensor MIT yang diinduksikan tegangan, kemudian di dekatkan kepada spesimen uji yang berbahan *structural steel*. Simulasi sensor MIT untuk menentukan frekuensi optimal dilakukan dengan mensimulasikan rentang frekuensi dari 10 kHz hingga 1 GHz, dari rentang frekuensi yang ditentukan tersebut didapatkan data *voltage* Rx dan dicari titik maksimum atau frekuensi resonansi untuk sensor MIT ini. Dalam hal ini pada rangkaian listrik menggunakan resistor sebesar 50 Ohm, 100 Ohm dan 1000 Ohm. Data yang diperoleh dari hasil simulasi rentang frekuensi 10 kHz-1 GHz dapat dilihat pada tabel berikut ini.

**Tabel 4.1** Hasil Simulasi dengan Resistor 50  $\Omega$  (Ohm)

<b>Frekuensi (kHz)</b>	<b>Coil Voltage Rx (mV)</b>
<b>10<sup>1</sup></b>	193.484
<b>10<sup>2</sup></b>	194.971
<b>10<sup>3</sup></b>	61.898
<b>10<sup>4</sup></b>	0.9030
<b>10<sup>5</sup></b>	0.0091
<b>10<sup>6</sup></b>	0.000105

Berdasarkan data pada tabel diatas menunjukkan bahwa adanya perbedaan nilai coil voltage Rx di setiap frekuensi dan resistor yang berbeda. Pada frekuensi 10 Hz, tegangan koil terukur sebesar 193.484 mV. Ketika frekuensi dinaikkan menjadi 100 kHz, tegangan koil sedikit meningkat menjadi 194.971 mV. Namun, pada frekuensi 1 MHz, tegangan koil mengalami penurunan drastis menjadi 61.898 mV. Penurunan ini berlanjut secara signifikan pada frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0.9030 mV pada 10 MHz, 0.0091 mV pada 100 MHz dan mencapai nilai yang sangat kecil sebesar 0.000105 mV pada 1 GHz. Dari data yang didapat diatas untuk memudahkan dalam menganalisanya, maka perlu dibuat grafik antara frekuensi dengan coil voltage Rx berdasarkan resistor yang digunakan. Grafik ini dibuat untuk mengetahui bagaimana bentuk data yang didapatkan dari masing-masing resistor dengan ukuran resistansi yang berbeda. Berikut ini grafik dari data yang menggunakan resistor 50 Ohm.



**Gambar 4.2** Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 50 Ohm

Berdasarkan grafik diatas nilai coil voltage tertinggi berada pada frekuensi 100 kHz dengan nilai 194,971 mV. Frekuensi 100 Hz sebagai titik puncak coil voltage Rx tertinggi, akan tetapi memiliki selisih yang kecil dengan 10 kHz sehingga terbentuk garis horizontal yang terlihat hampir sama atau rata. Berbeda dengan frekuensi 100kHz ke 1000 kHz memiliki nilai coil voltage Rx yang turun sehingga membentuk garis vertikal yang turun drastis dari 194,971 mV ke 61,89 mV. Berdasarkan grafik tersebut pada resistor 50 Ohm rentang frekuensi yang optimal digunakan yaitu 10 kHz hingga 100 kHz karena dari data yang didapatkan nilai voltage masih diatas 100 mV sehingga ketika menggunakan resistor 50 Ohm dengan rentang frekuensi tersebut akan mudah membaca atau mendapatkan perbedaan ketika digunakan untuk mendeteksi cacat pada spesimen uji. Sedangkan pada frekuensi 10 MHz hingga 1 GHz coil voltage Rx yang didapatkan sangat rendah yaitu sebesar 0,9030 mV pada frekuensi 10 MHz, 0,0091 mV untuk frekuensi 100 MHz dan 0,000105 mV untuk frekuensi 1 GHz.

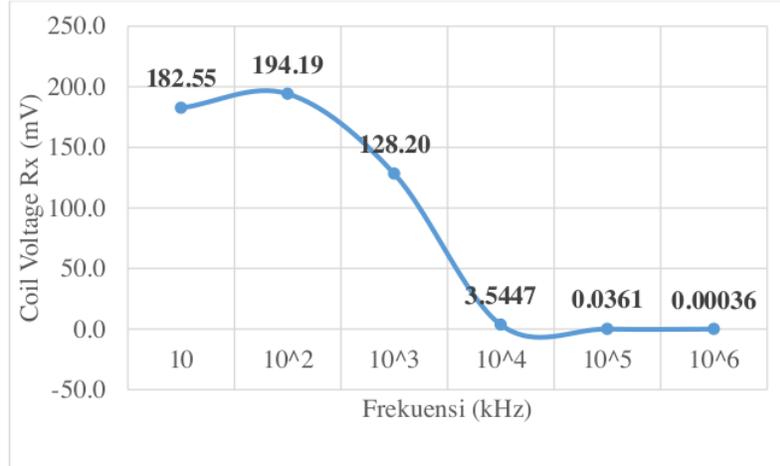
Grafik diatas menunjukkan perubahan tegangan koil pada berbagai nilai frekuensi. Grafik tersebut menggambarkan bahwa tegangan koil berkurang drastis seiring dengan peningkatan frekuensi, menunjukkan karakteristik respons frekuensi dari spesimen uji yang diukur. Dengan hasil coil voltage Rx yang didapatkan pada frekuensi tersebut sangat kecil maka dapat

dikatakan tidak optimal, jika sensor MIT dengan rangkaian elektrik yang menggunakan resistor 50 Ohm diaplikasikan dengan frekuensi diatas 1 MHz. Hal tersebut tidak optimal dikarenakan ketika eksperimen dilakukan bisa saja nilai tersebut tidak terbaca dan harus menggunakan satuan yang sangat rendah, contohnya seperti satuan dibawah mili volt (mV) agar perbedaan nilai dapat terbaca. Berikut ini data hasil simulasi sensor MIT dengan Resistor 100 Ohm.

**Tabel 4.2** Hasil Simulasi dengan Resistor 100  $\Omega$  (Ohm)

<b>Frekuensi (kHz)</b>	<b>Coil Voltage Rx (mV)</b>
<b>10<sup>1</sup></b>	182.55
<b>10<sup>2</sup></b>	194.19
<b>10<sup>3</sup></b>	128.20
<b>10<sup>4</sup></b>	3.5447
<b>10<sup>5</sup></b>	0.0361
<b>10<sup>6</sup></b>	0.00036

Rangkaian elektrik dengan resistor 100 Ohm nilai coil voltage Rx pada frekuensi 10 kHz sebesar 182,53 mV. Nilai coil voltage terbesar terletak pada 100 kHz dengan nilai sebesar 194,19 mV. Pada frekuensi 1 MHz nilai coil voltage Rx yang diterima yaitu sebesar 128,20 mV. Pada frekuensi 10 MHz dan 100 MHz coil voltage Rx yang diterima sebesar 3,5447 mV dan 0,0361 mV. Nilai coil voltage Rx terendah terletak pada 1 GHz dengan nilai *voltage* sebesar 0,00036 mV. Nilai coil voltage Rx yang tertinggi pada saat menggunakan resistor 50 Ohm dan 100 Ohm yaitu terletak pada frekuensi 100 kHz, namun yang membedakan adalah selisih antara frekuensi 10 kHz dengan 100 kHz pada resistor 50 Ohm memiliki selisih yang sangata kecil yaitu kurang dari 1 mV sedangkan pada resistor 100 Ohm memiliki selisih lebih dari 10 mV. Berikut ini grafik yang dihasilkan dari data hasil simulasi menggunakan resistor dengan ukuran resistansi sebesar 100 Ohm.



**Gambar 4.3** Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 100 Ohm

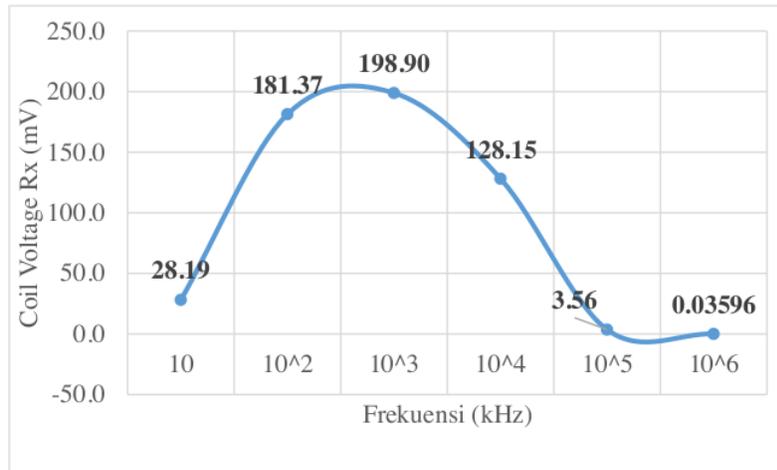
Grafik yang terbentuk pada resistor 100 Ohm hampir sama dengan grafik yang menggunakan resistor 50 Ohm, namun terdapat perbedaan nilai dan bentuk garis yang terbentuk anatar 10 kHz dengan 100 kHz pada grafik ini terlihat cenderung meningkat dari 10 kHz menuju titik puncak pada 100 kHz dengan selisih nilai lebih dari 10 mV. Sedangkan pada grafik sebelumnya garis yang terbentuk hampir sama atau tidak terlihat meningkat dikarenakan selisih coil voltage Rx antara frekuensi 10 kHz dengan 100 kHz kurang dari 1 mV. Garis yang terbentuk dari frekuensi 100 kHz ke 1 MHz terlihat cenderung menurun akan tetapi nilai coil voltage Rx yang diterima pada 1 MHz masih berada di angka 128,20 mV yang mana nilai tersebut masih dapat dibaca dengan jelas jika dilakukan eksperimen pengujian deteksi cacat kedepannya. Sedangkan garis yang terbentuk dari 1 MHz ke 10 MHz terlihat turun dengan drastis dikarenakan coil voltage Rx yang didapatkan pada frekuensi 10 MHz tergolong rendah yaitu sebesar 3,5447 mV. Hal tersebut mengalami penurunan lebih dari 100 mV. Pada frekuensi yang lebih besar dari 10 MHz nilai coil voltage semakin menurun yaitu di frekuensi 100 MHz dan 1 GHz nilai coil voltage kurang dari 1 mV yaitu 0,0361 mV dan 0,00036 mV sehingga garis yang terbentuk semakin turun dari frekuensi 100 kHz hingga 1 GHz.

Frekuensi berpengaruh besar terhadap tegangan coil. Pada frekuensi yang lebih rendah, tegangan coil lebih tinggi, sementara pada frekuensi yang lebih tinggi, tegangan coil lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi mempengaruhi kemampuan sensor dalam mendeteksi cacat. Pada frekuensi yang sangat tinggi, seperti 1 GHz, tegangan coil sangat rendah, yaitu 0.00036 mV. Hal ini menunjukkan bahwa pada frekuensi yang sangat tinggi, kualitas suatu sensor MIT sangat buruk dalam mendeteksi cacat. Dalam simulasi sensor menggunakan 3 variasi rangkaian electric dengan resistor yang berbeda ukuran resistansinya. Berikut ini data hasil simulasi ketiga yaitu menggunakan resistor yang ukuran resistansinya sebesar 1000 Ohm dapat dilihat pada tabel dibawah.

**Tabel 4.3** Hasil Simulasi dengan Resistor 1000  $\Omega$  (Ohm)

<b>Frekuensi (kHz)</b>	<b>Coil Voltage Rx (mV)</b>
<b><math>10^1</math></b>	28,19
<b><math>10^2</math></b>	181,37
<b><math>10^3</math></b>	198,90
<b><math>10^4</math></b>	128,15
<b><math>10^5</math></b>	3,56
<b><math>10^6</math></b>	0,03596

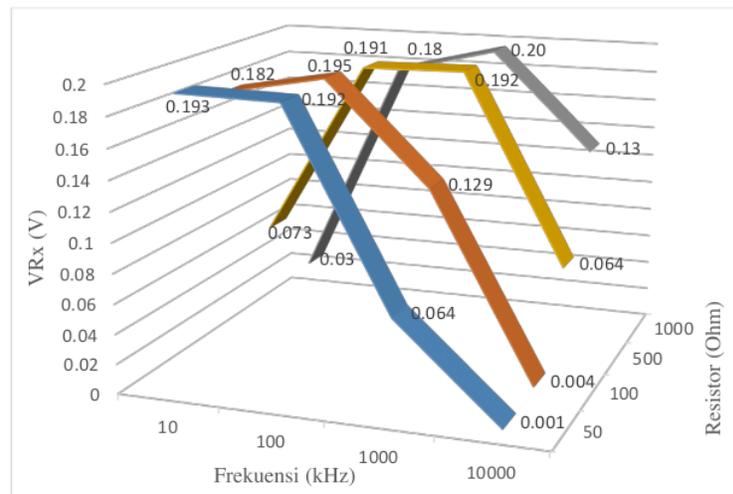
Dari data diatas terdapat hal menarik yang dapat kita amati yaitu pada frekuensi 10 kHz nilai coil voltage Rx yang diterima lebih kecil dari kedua data sebelumnya yaitu sebesar 28,19 mV. Jika dibandingkan dengan data yang lainnya pada frekuensi 100 kHz nilai coil voltage Rx yang diterima tetap konstan berada diatas 100 mV yaitu sebesar 181,37 mV. Namun terdapat perbedaan frekuensi yang memiliki nilai *voltage* tertinggi yaitu pada resistor dengan resistansi 1000 Ohm, adapun nilai *voltage* tertinggi terletak pada frekuensi 1000 kHz dengan nilai sebesar 198,9011 mV dan nilai terendah pada frekuensi 1 GHz yaitu sebesar 0,03596 mV. Berikut ini bentuk grafik yang terbentuk berdasarkan data hasil simulasi menggunakan resistor 1000 Ohm.



**Gambar 4.4** Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 1000 Ohm

Grafik yang terbentuk pada resistor 1000 Ohm memiliki perbedaan yang sangat signifikan yaitu terlihat bahwa nilai coil voltage Rx yang diterima pada frekuensi 10 kHz lebih rendah dibanding kedua data sebelumnya sehingga garis yang terbentuk yaitu cenderung naik atau meningkat dari 10 kHz menuju ke 100 kHz dengan nilai coil voltage sebesar 182,37 mV. Titik puncak atau frekuensi resonansi pada resistor 1000 Ohm ini terletak pada frekuensi 1 MHz dengan nilai coil voltage Rx sebesar 198,90 mV. Pada frekuensi selanjutnya yaitu 10 MHz hingga 1 GHz coil voltage Rx yang diterima semakin turun yaitu 128,15 mV, 3,56 mV dan 0,03596 mV sehingga membentuk garis yang menurun pada grafik. Dari ketiga grafik diatas yang menunjukkan bahwa frekuensi yang optimal digunakan untuk sensor MIT yaitu disesuaikan dengan resistor yang digunakan karena setiap resistor memiliki rentang frekuensi yang berbeda, akan tetapi dapat kita lihat bahwa dari ketiga resistor pada frekuensi 100 kHz terlihat nilai yang konstan, sekalipun terjadi perubahan nilai tetapi perubahan yang tidak signifikan. Berdasarkan 3 grafik diatas bahwa frekuensi yang optimal digunakan yaitu pada frekuensi 100 kHz karena memiliki nilai yang konsisten. Maka dari itu dapat kita lihat secara jelas bahwa frekuensi 100 kHz menghasilkan voltage

Rx yang konsisten pada grafik 3 sumbu dengan menggunakan variasi resistor berikut ini.



**Gambar 4.5** Grafik Variasi Resistor terhadap Frekuensi dan VRx

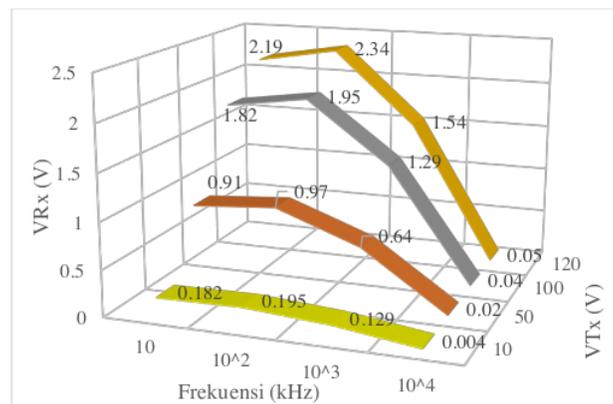
Gambar diatas adalah menampilkan grafik tiga dimensi yang menggambarkan hubungan antara tegangan VRx (V) terhadap frekuensi (kHz) dan resistansi (Ohm). Sumbu horizontal (x) menunjukkan frekuensi dalam kilohertz (kHz), sumbu vertikal (y) menunjukkan tegangan VRx dalam volt (V), dan sumbu diagonal (z) menunjukkan resistansi dalam ohm (Ohm). Grafik menunjukkan bahwa tegangan VRx bervariasi dengan perubahan frekuensi dan nilai resistansi. Pada frekuensi yang lebih rendah, tegangan VRx cenderung lebih tinggi dan menurun dengan peningkatan frekuensi.

Ada titik-titik data di mana nilai frekuensi tertentu menunjukkan tegangan VRx yang berbeda-beda tergantung pada nilai resistansinya. Pada setiap nilai resistansi, tegangan VRx menunjukkan perilaku yang berbeda terhadap perubahan frekuensi. Nilai tegangan maksimum VRx terlihat pada frekuensi yang lebih rendah dan menurun seiring peningkatan frekuensi. Pada resistansi tertentu, tegangan VRx mulai dari nilai tinggi pada frekuensi rendah dan berkurang drastis hingga mencapai nilai rendah pada frekuensi tinggi. Dari hasil simulasi tersebut dapat diketahui bahwa untuk mendapatkan hasil

pengujian yang terbaik harus disesuaikan dengan frekuensi, ukuran resistor yang digunakan pada rangkaian listrik dan tegangan input ( $V_{Tx}$ ) yang diberikan.

#### 4.3 Analisis Pengaruh $V_{Tx}$ terhadap Coil Voltage Rx

Untuk mengetahui pengaruh tegangan input ( $V_{Tx}$ ) terhadap coil voltage penerima ( $V_{Rx}$ ) yaitu dengan mensimulasikan melalui software simulasi *Multiphysi*. Simulasi dilakukan dengan mengatur *parametric sweep* yaitu memvariasikan tegangan input ( $V_{Tx}$ ) yang akan disimulasikan pada sensor MIT. Berikut ini grafik hasil simulasi dengan parametric sweep variasi tegangan input ( $V_{Tx}$ ).



**Gambar 4.6** Grafik Variasi Voltage Tx dengan Voltage Rx dan Frekuensi

Gambar di atas menunjukkan hubungan antara frekuensi (kHz), tegangan yang diterima ( $V_{Rx}$ ), dan tegangan yang dikirim ( $V_{Tx}$ ). Grafik ini menggambarkan bagaimana perubahan frekuensi mempengaruhi  $V_{Rx}$  dengan voltage input yang berbeda mulai dari 10 volt, 50 volt, 100 volt dan 120 volt. Berdasarkan gambar diatas dapat diketahui bahwa Voltage Tx sangat berpengaruh terhadap hasil voltage Rx yang diterima. dibuktikan dengan grafik diatas bahwa ketika voltage Tx ditingkatkan sebanyak 5 kali hasil voltage Rx yang diterima mengikuti hasilnya yaitu 5 kali dari voltage Rx sebelumnya, begitu seterusnya ketika ditingkatkan sebanuak 10 kali dan

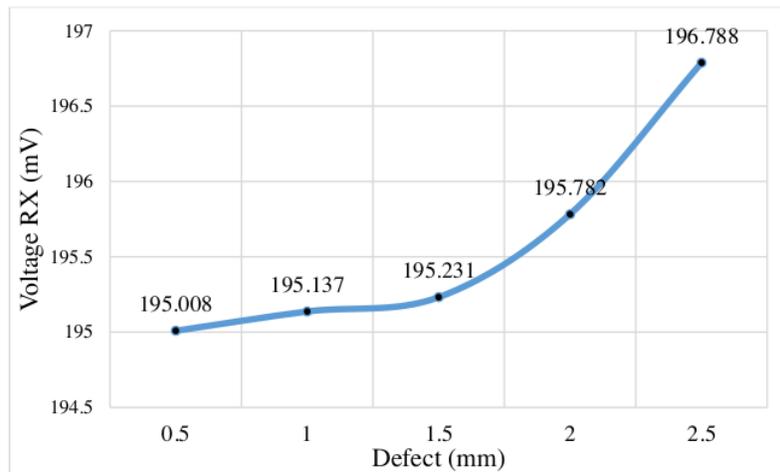
12 kali. Hasil voltage Rx yang diperoleh meningkat sebanyak 10 kali dan 12 kali beriringan dengan meningkatnya voltage pengirim (Tx). Dalam hal ini voltage yang besar akan membuat hasil dari voltage Rx semakin besar dan baik saat menggunakan resistor tertentu.

#### 4.4 Analisis Pengaruh Ukuran Cacat terhadap Coil Voltage Rx

Dalam simulasi menggunakan software simulasi Multiphysics ini memodelkan cacat pada bagian dalam permukaan spesimen uji dengan tujuan untuk membuktikan sensor MIT dalam mendeteksi cacat didalam permukaan. Cacat yang dimodelkan divariasikan ukurannya untuk membuktikan sensor MIT juga yang sebelumnya telah diuji untuk medeteksi cacat pada permukaan dengan ukuran cacat divariasikan agar dapat membedakan ukuran cacat yang berbeda. Hal yang dapat mewakili dalam membedakan ukuran cacat yaitu dengan mengetahui nilai coil voltage Rx. Voltage Rx menerima respon tegangan setelah diinduksikan pada spesimen uji, ketika terdapat cacat jangkauan arus eddy berubah sehingga berpengaruh terhadap medan magnet yang terbentuk. Dalam hal ini persamaan yang mewakili kejadian ini yaitu persamaan dari Hukum Faraday berikut.

$$V = -N \frac{d(BA)}{dt} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dalam persamaan diatas terdapat parameter A yaitu area yang dilalui medan magnet. Ketika terdapat cacat maka area yang dilalui tersebut semakin jauh atau luas jangkauannya sehingga berbanding lurus dengan Voltage yang diterima oleh Coil Rx. ukuran cacat yang lebih besar akan menyebabkan perubahan yang signifikan pada medan magnet yang terdeteksi oleh coil Rx. Grafik yang membuktikan bahwa semakin besar cacat yang ada pada spesimen uji maka berdampak semakin besar juga voltage Rx yang diterima dapat dilihat pada gambar berikut ini.



**Gambar 4.7** Grafik Pengaruh Defect terhadap Coil Voltage Rx pada Frekuensi 100 kHz

Gambar diatas menunjukkan hubungan antara ukuran cacat dengan voltage Rx yang diterima pada frekuensi optimal yaitu 100 kHz. Dari grafik diatas membentuk garis yang cenderung meningkat dari ukuran cacat 0,5 mm hingga 2,5 mm. Coil voltage Rx yang diterima semakin besar ketika cacat yang dimodelkan semakin besar. Pengaruh ukuran cacat terhadap voltage penerima (Rx) yang diterima dalam *Magnetic Induction Tomography* (MIT), kita bisa menggunakan konsep induksi elektromagnetik dan analisis medan magnet. Salah satu persamaan yang dapat menyelesaikan permasalahan ini adalah persamaan 4.1 yang menjelaskan bahwa di mana B adalah medan magnet, dan A adalah area permukaan yang dilalui medan magnet. Ketika terdapat cacat pada spesimen uji hal yang terjadi adalah area yang dialiri medan magnet akan berubah sehingga mempengaruhi perubahan medan magnet. Coil voltage penerima dapat dinyatakan sebagai:

$$V_{Rx} = k \cdot \Delta B_{cacat} \dots\dots\dots(4.3)$$

Dimana k adalah konstanta yang mencakup faktor-faktor seperti sensitivitas coil.  $\Delta B_{cacat}$  merupakan perubahan medan magnet akibat cacat yang bergantung pada ukuran cacat dan sifat cacat yang ada. Dapat

diasumsikan bahwa perubahan medan magnet sebanding dengan ukuran cacat (d) dan konduktivitas ( $\sigma$ ). Sehingga dapat ditulis persamaan  $\Delta B_{cacat}$  sebagai berikut:

$$\Delta B_{cacat} \propto d \cdot \sigma \dots\dots\dots(4.4)$$

Sehingga dapat dituliskan persamaan dari coil voltage Rx sebagai:

$$V_{Rx} = k \cdot d \cdot \sigma \dots\dots\dots(4.5)$$

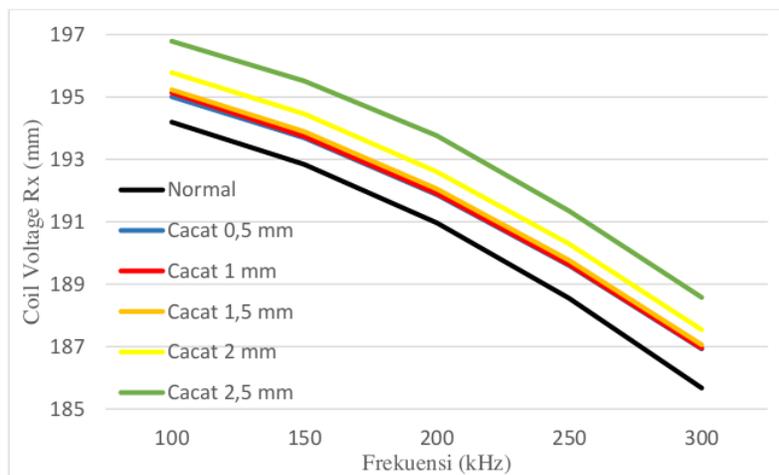
Persamaan yang dituliskan dalam konteks ini adalah persamaan yang mencoba menggambarkan hubungan antara ukuran cacat (d), konduktivitas ( $\sigma$ ), dan coil voltage penerima ( $V_{Rx}$ ) dalam sistem MIT. Dari persamaan ini dapat dilihat bahwa coil voltage Rx memiliki nilai berbanding lurus dengan ukuran cacat. Maka dari hasil simulasi deteksi cacat dengan variasi ukuran cacat diketahui bahwa ukuran cacat dapat mempengaruhi hasil coil voltage Rx yang diterima.

#### 4.5 Analisis Kemampuan Sensor MIT untuk Mendeteksi Cacat di Sumbu Z

Berdasarkan beberapa hal diatas, selanjutnya akan mensimulasikan sensor MIT ini untuk mendeteksi perbedaan spesimen uji yang tidak ada cacat dengan yang terdapat cacat. Dalam pengujian ini menggunakan frekuensi 100 kHz hingga 300 kHz, frekuensi tersebut akan disimulasikan satu persatu tidak menjadi rentang frekuensi dikarenakan dalam simulasi ini sensor MIT diletakkan diatas spesimen uji yang dibawahnya terdapat cacat, sehingga sensor MIT tidak digerakkan. Data yang diambil untuk membedakan adanya cacat atau tidak yaitu dengan data sinyal *coil voltage* Rx yang diterima. Cacat yang dimodelkan pada simulasi sensor MIT ini berada di dalam permukaan, yang mana sebelumnya pengujian deteksi cacat menggunakan sensor MIT hanya dipermukaan, saat ini membuktikan bahwa sensor MIT dapat digunakan untuk mendeteksi bagian dalam permukaan.

Adanya cacat pada spesimen uji diartikan sebagai adanya tambahan hambatan pada material spesimen uji. Menurut Hukum Ohm, besar tegangan

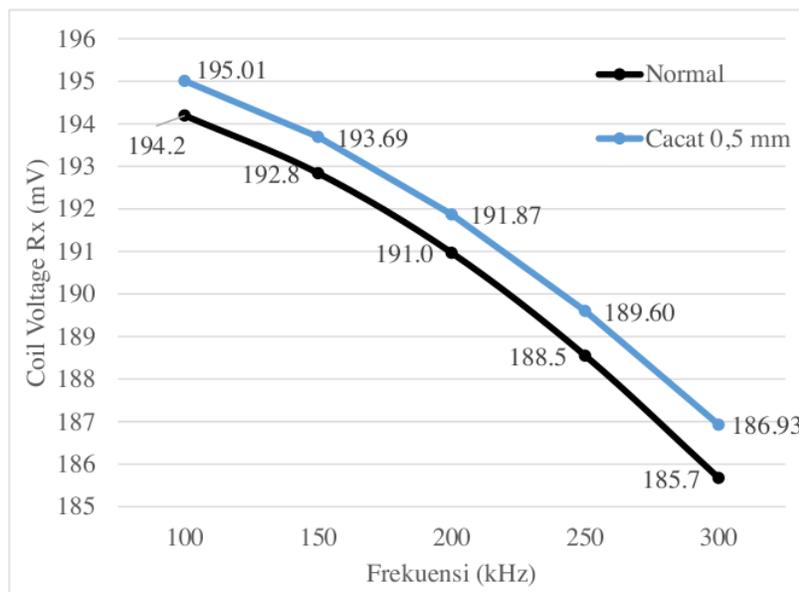
(voltage) yang dihasilkan berbanding lurus dengan hambatan ketika arusnya konstan. Dapat diartikan semakin besar cacat maka akan semakin besar juga voltage yang diinduksikan dan yang diterima oleh koil Rx. Begitu pula dengan prinsip *eddy current* ketika terdeteksi adanya cacat maka jangkauan arus akan semakin luas yang menyebabkan besarnya tegangan meningkat. Untuk membuktikan hal itu maka dilakukan simulasi sensor MIT dengan cara membandingkan data coil voltage Rx Normal dengan Cacat. Dalam hal ini cacat pada spesimen terletak dibagian dalam permukaan spesimen uji atau secara sumbu z (aksial). Hal ini dilakukan sebagai salah satu cara untuk membuktikan bahwa sensor MIT dapat mendeteksi cacat pada 3 sumbu sehingga kedepannya dapat digunakan untuk mendeteksi cacat secara 3 dimensi. Berikut ini grafik perbedaan tegangan koil penerima antara spesimen normal dan cacat.



**Gambar 4.8** Grafik Spesimen Normal vs Cacat

Berdasarkan gambar diatas menunjukkan bahwa sensor MIT yang dilakukan simulasi mendapatkan data coil voltage Rx yang berbeda-beda dari berbagai cacat yang dimodelkan. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa sensor MIT dapat digunakan untuk mendeteksi cacat yang berada dibagian bawah permukaan, selain itu juga sensor dapat membedakan berbagai ukuran cacat. Gambar diatas menunjukkan bahwa semakin besar cacat yang ada pada spesimen uji maka berpengaruh terhadap coil voltage Rx yang diterima yaitu

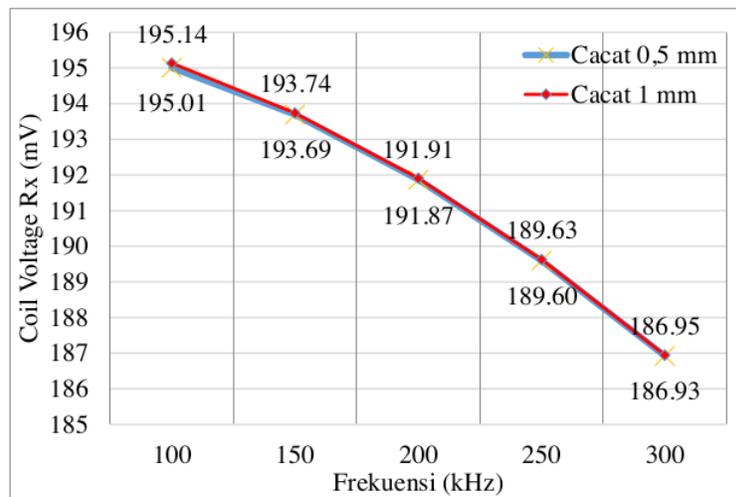
semakin besar voltage Rx yang diterima. Sedangkan semakin besar frekuensi yang diberikan berpengaruh juga terhadap coil voltage Rx yang diterima semakin kecil dari setiap variasi yang dimodelkan. Garis yang hitam paling bawah merupakan data yang diambil pada spesimen uji yang tidak memiliki cacat atau dapat dikatakan normal. Dari gambar tersebut menjelaskan bahwa spesimen normal memiliki coil voltage Rx paling rendah atau lebih rendah daripada spesimen cacat. Selisih antara coil voltage Rx normal dengan cacat 0,5 mm dapat dilihat pada gambar berikut ini.



**Gambar 4.9** Grafik Spesimen Normal vs Cacat 0,5 mm

Berdasarkan gambar diatas menjelaskan bahwa sensor MIT dapat membedakan spesimen uji yang normal dengan spesimen uji yang terdapat cacat pada bagian dalam permukaan sebesar 0,5 mm. Hal itu ditandai dengan perbedaan garis yang terbentuk dari nilai coil voltage Rx yang diterima pada spesimen normal dan spesimen cacat 0,5 mm, Nilai coil voltage yang diterima pada spesimen cacat 0,5 mm lebih besar dibandingkan nilai coil voltage yang diterima pada saat simulasi spesimen normal. Dalam hal ini dapat disimpulkan bahwa sensor MIT ini dapat membedakan spesimen normal

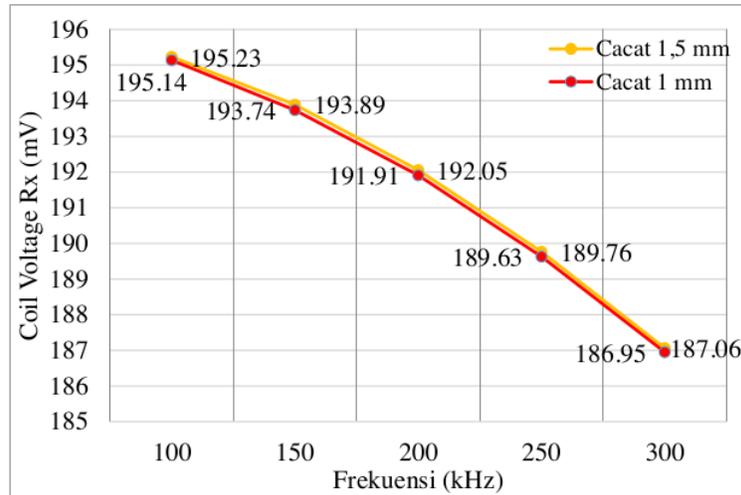
dengan spesimen cacat. Selain itu hal yang harus diuji yaitu mensimulasikan bagaimana sensor MIT dapat membedakan ukuran cacat yang ada pada spesimen uji. Pada gambar 4.5 terlihat garis antara cacat 0,5-1,5 mm terlihat menempel sehingga dapat diperjelas dengan membandingkan antara garis yang terbentuk pada cacat 0,5 mm dengan 1 mm terlebih dahulu. Berikut ini grafik perbedaan antara cacat 0,5 dan 1 mm.



**Gambar 4.10** Grafik Spesimen Cacat 0,5 mm vs Cacat 1 mm

Dari gambar diatas menunjukkan perbedaan cacat 0,5 mm dengan cacat 1 mm berdasarkan hubungan antara coil voltage Rx dengan frekuensi yang digunakan. Dari kedua data terlihat trend grafiknya sama yaitu semakin besar frekuensi yang digunakan berpengaruh kepada coil voltage Rx yang diterima yaitu semakin rendah. Secara kasat mata garis yang terbentuk terlihat menempel dikarena nilai yang diperoleh memiliki selisih yang sangat kecil yaitu dibawah 1 mV. Pada frekuensi 100-250 kHz coil voltage Rx yang diterima yaitu sebesar 195,01 mV hingga 186,93 mV untuk cacat 0,5 mm dan 195,14 mV hingga 186,95 mV untuk cacat 1 mm. perbedaan nilai coil voltage yang diterima pada cacat 0,5 mm dan cacat 1 mm memiliki selisih yang sangat rendah, sehingga membuat grafik yang terbentuk terlihat menempel. Namun, ketika dilihat dari nilai yang tertera yaitu coil voltage Rx pada cacat 1 mm

lebih besar rata-rata 0,4 mV daripada nilai coil voltage Rx yang diterima pada cacat 0,5 mm. Dalam hal ini berarti bahwa semakin besar cacat maka berpengaruh terhadap nilai coil voltage Rx yang diperoleh. Selanjutnya kita melihat grafik perbedaan antara cacat 1 mm dengan cacat 1,5 mm. Berikut ini grafiknya dapat dilihat pada gambar dibawah.



**Gambar 4.11** Grafik Spesimen Cacat 1 mm dan Cacat 1,5 mm

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara frekuensi (kHz) dan coil voltage Rx (mV) untuk dua kondisi cacat dengan ukuran yang berbeda yaitu cacat 1,5 mm dan cacat 1 mm. Pada sumbu horizontal (x) ditampilkan frekuensi dalam satuan kHz, sementara pada sumbu vertikal (y) ditampilkan coil voltage Rx dalam satuan mV. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa coil voltage Rx cenderung menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi untuk kedua kondisi cacat. Pada frekuensi sekitar 100 kHz, coil voltage Rx untuk cacat 1,5 mm dimulai dari 195,14 mV dan cacat 1 mm dari 195,23 mV. Ketika frekuensi meningkat hingga sekitar 300 kHz, tegangan kumparan turun menjadi 186,95 mV untuk cacat 1,5 mm dan 187,06 mV untuk cacat 1 mm. Meskipun ada sedikit perbedaan dalam nilai tegangan pada tiap frekuensi, pola penurunan coil voltage Rx untuk kedua kondisi cacat ini hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi mempengaruhi coil

coltage Rx secara konsisten, terlepas dari ukuran cacat. Penurunan coil coltage Rx yang terjadi bisa diinterpretasikan sebagai interaksi sensor MIT pada frekuensi tertentu dengan material spesimen uji. Semakin besar frekuensi yang diberikan maka penyebaran induksi magnet semakin menyebar dan rendahnya penetrasi kedalaman, dalam hal ini cacat dimodelkan didalam permukaan sehingga ketika frekuensi yang digunakan semakin besar maka cacat yang berada dibawah permukaan tersebut sulit untuk terdeteksi. Secara tidak langsung ketika sensor MIT mampu mendeteksi cacat pada bagian dalam permukaan, maka sensor MIT ini dapat bekerja pada 3 sumbu yaitu sumbu x secara mendatar, sumbu y melintang dan sumbu z secara aksial. Dalam simulasi ini hanya mengambil data cacat yang terletak pada bagian aksial karena untuk membuktikan bahwa sensor dapat mendeteksi dalam sumbu aksial atau sumbu z. Sehingga dari data yang didapat ini dapat membukrikan bahwa sensor MIT ini dapat digunakan untuk pengambilan cacat dalam bentuk 3 dimensi.

#### **4.6 Validasi Deteksi Cacat Hasil Simulasi dengan Eksperimen**

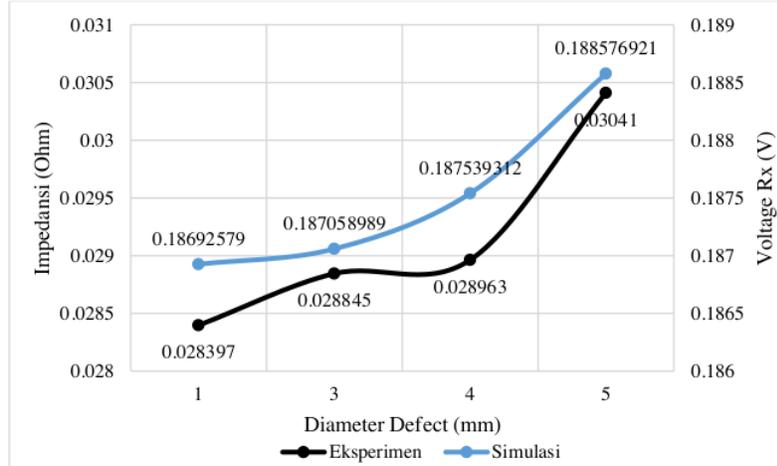
Validasi hasil deteksi cacat yang diperoleh dari simulasi dengan menggunakan data eksperimen. Proses ini sangat penting dilakukan untuk memastikan bahwa model simulasi yang digunakan mampu menggantikan kondisi sebenarnya secara akurat. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil deteksi cacat dari simulasi dengan hasil yang diperoleh dari eksperimen fisik atau pengujian lapangan. Parameter yang dibandingkan ukuran cacat yang dideteksi memiliki ukuran yang sama, akan tetapi dicari perbedaan yang menandakan bahwa terdapat cacat. Dengan melakukan validasi ini, kita dapat mengevaluasi kehandalan dan akurasi model simulasi, serta mengidentifikasi dan memperbaiki ketidakakuratan atau ketidaksesuaian yang mungkin ada. Hasil validasi yang memuaskan menunjukkan bahwa model simulasi dapat diandalkan untuk digunakan dalam aplikasi praktis, sementara hasil yang tidak memuaskan memberikan informasi berharga untuk penyempurnaan lebih lanjut dari model tersebut.

Untuk melakukan validasi dari hasil simulasi yaitu dengan melakukan eksperimen deteksi cacat menggunakan sensor MIT dengan menggunakan parameter yang sama seperti saat simulasi. Pada saat melakukan eksperimen menggunakan sistem yang terdiri dari layar monitor/laptop, VNA dan sensor. Sebelum melakukan pengambilan data eksperimen terlebih dahulu menentukan frekuensi yang ingin digunakan dan berapa data yang diambil dari masing masing titik eksperimen. Kemudian, mengkalibrasi sistem MIT yang digunakan melalui monitor yang sudah terinstal dalam sistem kalibrasi yang dilakukan yaitu pada VNA memiliki 2 port yang masing-masing port memiliki 3 jenis seperti *short*, *open* dan *load*. Kalibrasi dapat dikatakan berhasil ketika muncul frekuensi dan berapa data yang akan diambil.

Speismen uji yang digunakan untuk pengambilan data eksperimen yaitu dibuat matriks terlebih dahulu agar mempermudah dalam pengambilan datanya. Data yang dihasilkan dari sistem MIT itu berupa impedansi real dan impedansi imajiner yang perlu diolah kembali menjadi impedansi total. Pengolahan dilakukan menggunakan software python yang didalamnya memasukkan logika rumus impedansi berikut ini.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \dots\dots\dots(4.6)$$

Dimana Z adalah impedansi total, R merupakan nilai impedansi ril yang didapatkan dari hasil eksperimen dan X merupakan nilai impedansi imajiner yang didapatkan dari hasil eksperimen. Persamaan 4.6 tersebut digunakan dalam software python agar memudahkan pengolahan data yang sangat banyak. Dari data yang didapatkan tersebut kemudian dibuat grafik sehingga dapat mengetahui pengaruh defect terhadap impedansi pada material. Berikut ini grafik yang dibuat dari hasil eksperimen yang telah dilakukan.



**Gambar 4.12** Grafik Perbandingan Hasil Simulasi dengan Eksperimen pada Frekuensi 300 kHz

Grafik yang ditampilkan menunjukkan perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi terkait hubungan antara diameter cacat dalam milimeter dengan impedansi dalam Ohm serta tegangan Rx dalam Volt. Pada grafik ini, terdapat dua kurva yaitu kurva hitam yang mewakili hasil eksperimen dan kurva biru yang mewakili hasil simulasi. Dari kurva Eksperimen, pada diameter cacat 1 mm, impedansi yang diukur adalah sekitar 0.028397 Ohm. Saat diameter cacat meningkat menjadi 3 mm, impedansi naik menjadi 0.028845 Ohm. Pada diameter 4 mm, impedansi sedikit meningkat menjadi 0.028963 Ohm. Pada diameter 5 mm, terjadi lonjakan signifikan dalam impedansi yang tercatat sebesar 0.03041 Ohm.

Dalam kurva Simulasi, pada diameter cacat 1 mm, tegangan Rx yang diukur adalah sekitar 0.18692579 V. Ketika diameter cacat meningkat menjadi 3 mm, tegangan Rx naik menjadi 0.187058989 V. Pada diameter 4 mm, tegangan Rx meningkat lagi menjadi 0.187539312 V. Pada diameter 5 mm, tegangan Rx yang tercatat adalah 0.188576921 V. Dari grafik ini, kita dapat melihat bahwa baik hasil eksperimen maupun simulasi menunjukkan tren yang mirip, yaitu peningkatan nilai (impedansi untuk eksperimen dan tegangan untuk simulasi) seiring dengan bertambahnya diameter cacat. Namun, terdapat perbedaan pada besaran nilai yang diperoleh dari

eksperimen dan simulasi. Peningkatan yang paling tajam terlihat pada diameter 5 mm baik untuk impedansi (hasil eksperimen) maupun tegangan Rx (hasil simulasi). Hal ini mengindikasikan bahwa cacat yang lebih besar dalam material cenderung menghasilkan peningkatan nilai impedansi dan tegangan yang signifikan. Dalam hal ini, pengekspresian dari keduanya berbeda yaitu menggunakan Impedansi pada hasil eksperimen dikarenakan sistem yang digunakan untuk melakukan eksperimen sensor MIT mengeluarkan hasil berupa data impedansi dan Voltage Rx digunakan pada simulasi dikarenakan jika mengambil data impedansi pada simulasi, hasil yang ditampilkan berupa impedansi dari rangkaian elektroniknya saja aka dari itu data yang diambil pada simulasi yaitu voltage Rx karena merupakan hasil dari interaksi antara koil Tx dengan material yang diuji. Voltage dengan impedansi memiliki hubungan yaitu berdasarkan hukum Ohm pada rangkaian AC. Dalam rangkaian AC, resistansi digantikan oleh impedansi Z yang mencakup resistansi R dan reaktansi X. Oleh karena itu, Hukum Ohm dalam rangkaian AC dinyatakan sebagai:

$$V = I Z \dots\dots\dots(4.7)$$

Dimana V adalah tegangan dalam volt. I adalah arus yang mengalir melalui komponen atau rangkaian dalam ampere. Z adalah impedansi atau hambatan total yang mencakup resistansi R dan reaktansi X. Persamaan diatas dapat menjelaskan hubungan antara Voltage dengan Impedansi, bahwa jika impedansi meningkat, tegangan juga akan meningkat dengan faktor yang sama, selama arus tetap konstan. Sehingga dari data grafik diatas dapat memvalidasi hasil simulasi yang telah dilakukan. Meskipun terdapat perbedaan nilai yang didapat, bisa dipengaruhi beberapa faktor salah satunya ketika melakukan eksperimen terdapat noise yang mengganggu proses pengambilan data sedangkan pada simulasi tidak ada noise. Walaupun nilainya berbeda tetapi tren yang terbentuk hampir sama atau mirip.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Penelitian yang telah dilakukan dengan cara simulasi sensor MIT untuk mendeteksi cacat menggunakan software simulasi *Multiphysics* menghasilkan data yang dapat digunakan untuk membuktikan sensor MIT mempunyai kemampuan untuk mendeteksi cacat pada 3 sumbu yang salah satunya dibuktikan pada penelitian ini untuk mendeteksi cacat pada sumbu z (aksial) yaitu pada bagian dalam spesimen uji. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa:

1. Penelitian ini berhasil melakukan simulasi deteksi cacat pada pelat baja menggunakan sensor MIT melalui pendekatan Simulasi *Multiphysic*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam mengidentifikasi berbagai ukuran cacat pada permukaan dan di bawah permukaan pelat baja. Penggunaan sensor MIT dalam simulasi ini juga menunjukkan potensi untuk diterapkan pada tahap eksperimen dan implementasi pemeriksaan non-destruktif dalam industri manufaktur dan konstruksi.
2. Berdasarkan hasil simulasi dengan pemodelan cacat yang diletakkan pada bagian bawah permukaan atau didalam spesimen uji, sensor MIT terbukti mampu mendeteksi cacat yang berada di sumbu z atau di bawah permukaan pelat baja. Sensor ini dapat mengidentifikasi kedalaman dan ukuran cacat dengan akurasi yang cukup tinggi dengan frekuensi yang optimal yaitu 100 kHz, semakin besar ukuran cacat yang terdeteksi maka mempengaruhi luas area yang dilalui oleh magnet. Semakin luas area yang dilalui oleh magnet maka voltage Rx yang diterima akan semakin besar, hal tersebut berdasarkan hukum faraday tentang induksi magnet. Temuan ini menegaskan bahwa sensor MIT memiliki keunggulan dalam aplikasi deteksi cacat yang memerlukan identifikasi cacat didalam permukaan, menjadikannya alat yang berharga untuk inspeksi material yang

memerlukan deteksi cacat di bawah permukaan. Akan tetapi konfigurasi seperti penggunaan frekuensi dan rangkaian harus disesuaikan dengan kebutuhan.

## **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan dalam penelitian sensor MIT untuk melakukan pengembangan pada peniliran selanjutnya yaitu

1. Mengubah parameter sensor MIT agar dapat mendeteksi cacat yang halus dan dapat membedakan ukuran cacat dengan perbedaan secara signifikan
2. Diperlukan uji coba di lapangan untuk memvalidasi hasil simulasi. Pengujian langsung pada pelat baja yang digunakan dalam industri akan memberikan gambaran yang lebih nyata tentang efektivitas metode ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alexandri, A., & Sugandika, T. (2017). Magnetic Particle Inspection (Mpi) Sebagai Salah Satu Metode Inspeksi Menara Pengeboran. *Forum Teknologi*, 07(1), 76–91.
- Bina, D., Kompetensi, S., & Pelatihan, D. A. N. (2018). *BUKU INFORMASI MELAKUKAN ULTRASONIC TEST ( UT )*.
- Cao, Z., Ye, B., Cao, H., Zou, Y., Zhu, Z., & Xing, H. (2024). Biplane Enhancement Coil for Magnetic Induction Tomography of Cerebral Hemorrhage. *Biosensors*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/bios14050217>
- Chandra, P., & Bhagi, R. (2014). *Basics Eddy Current Testing : Basics*. May.
- Comsol. (2012). Comsol Multiphysics User's Guides. In *U.S. Patents 7,519,518; 7,596,474; and 7,623,991* (Version 4.).
- Endramawan, T., Haris, E., Dionisius, F., & Prika, Y. (2017a). Analisa Hasil Pengelasan SMAW 3G Butt Joint Menggunakan Non Destructive Test Penetrant Testing ( NDT-PT ) Berdasarkan Standar ASME. *Politeknik Negeri Indramayu*, 8–12.
- Endramawan, T., Haris, E., Dionisius, F., & Prika, Y. (2017b). APLIKASI NON DESTRUCTIVE TEST PENETRANT TESTING ( NDT-PT ) UNTUK ANALISIS HASIL PENGELASAN SMAW 3G BUTT JOINT. *Jurnal Teknologi Terapan*, 3(September), 44–48.
- Fitriani, A. N. (2016). *INSPEKSI CACAT PADA SAMBUNGAN LAS PELAT BAJA KARBON RENDAH MENGGUNAKAN MAGNETIC INDUCTION TOMOGRAPHY DENGAN SENSOR PLANAR 2 CHANNEL*.
- Huda, M. Al, Haryono, D., Nugraha, H., Fitriani, A. N., & Purwo Taruno, W. (2020). Characterization of Magnetic Induction Coil Sensor for VOID Detection in Steel Plate. *Proceeding - ICoSTA 2020: 2020 International Conference on Smart Technology and Applications: Empowering Industrial IoT by Implementing Green Technology for Sustainable Development*, 2, 2–6. <https://doi.org/10.1109/ICoSTA48221.2020.1570610828>
- Johanes, S., Hendropasetyo, W., & Putra, A. (2021). *Analisis Kemampuan*

- Pendeteksian Pengujian Eddy Current Testing ( ECT ) terhadap Crack pada Bollard dengan Bahan Casting. 10(1), 36–43.*
- Kriezis, E. ., Tsiboukis, T., Panas, S. M., & Tegopoulos, A. (2013). *Eddy Currents : Theory and Applications. June.* <https://doi.org/10.1109/5.168666>
- Kurniadi, F., Handoko, F., & Priyasmanu, T. (2022). ANALISIS WELDING DEFECT”RATE DAN PENANGANANNYA DENGAN”METODE”SIX SIGMA”DAN FMEA (STUDI KASUS: PT. MEINDO ELANG INDAH, MUARA JAWA, KUTAI KARTANEGARA, KALTIM). *Jurnal Valtech, 5(1), 15–24.*
- Multiphysics, C. (2015). The COMSOL Multiphysics Reference Manual. In *U.S. Patents.* [www.comsol.com/blogs](http://www.comsol.com/blogs)
- Mulyadi, Iswanto, Jamaluddin, Nashrullah, M., & Prajati, A. Y. (2015). *Buku Ajar Teknologi Pengelasan.*
- Pardede, L., Hendroprasetyo, W., & Putra, A. (2015). Analisa Perbandingan Sensitivitas Metode Magnetic Partikel Inspection (MPI) Menggunakan Metode Visible Dry, Visible Wet, dan Wet Fluorescent Terhadap Pendeteksian Panjang Retak pada Permukaan dan Toe Sambungan Las di Kapal yang Dilapisi Nonconductive Coat. *Jurnal Sains Dan Seni ITS, 4(1), 103–111.*
- Peyton, A. J., Yu, Z. Z., Lyon, G., & Ferreira, J. (1996). *An overview of electromagnetic inductance tomography: description of three different systems. March.* <https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/3/006>
- Rais, R. (2015). STUDI PERBANDINGAN KECEPATAN DAN KETELITIAN PENGUJIAN MAGNETIC PARTICLE TESTING (MT) DAN EDDY CURRENT TESTING (ECT) PADA MATERIAL BAJA KARBON. *TUGAS AKHIR – MN 141581, 1–69.*
- Rizvia, S. A., & Alib, W. (2019). *Welding defects , Causes and their Remedies : A Review. 2(2), 39–47.*
- Sahlan, S. (2016). Analisis Cacat Las Incomplete Fusion Dan Retak Memanjang Pada Waterwall Tube Boiler PLTU Paiton Unit 1. *Semesta Teknik, 18(1), 10–20.* <https://doi.org/10.18196/st.v18i1.701>
- Saiful, M., Mansor, B., Zakaria, Z., & Sahlan, S. (2015). *Magnetic Induction Tomography: A Brief Review Jurnal Teknologi Magnetic Induction*

*Tomography : A Brief Review. November.*  
<https://doi.org/10.11113/jt.v73.4252>

- Saputra, A. Y. (2024). *KARAKTERISASI DESAIN SENSOR MAGNETIC INDUCTION TOMOGRAPHY UNTUK INSPEKSI JENIS CACAT LAS PADA UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA CILEGON - BANTEN.*
- Suharyadi, I. (n.d.). *METODE HIGH FREQUENCY ELECTRICAL RESISTANCE WELDING PADA PROSES PEMBUATAN PIPA BAJA STKM 13B.* 12–22.
- Sulaiman, S., Utomo, B., & Ardi Wijana, I. P. A. (2020). Analisis Uji Tidak Merusak Pada Sambungan Las Lambung Frame 103 Bagian Kamar Mesin Kapal Patroli 73 Dengan Metode Radiography Test. *Gema Teknologi*, 20(4), 146–152. <https://doi.org/10.14710/gt.v20i4.28516>
- Sulistiyanti, S. R., Purwiyanti, S., & Pauzi, G. A. (2017). Sensor dan Prinsip Kerjanya. In *Jurnal Sains dan Seni ITS* (Vol. 6, Issue 1). <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf%0Ahttp://fiskal.kemenkeu.go.id/ejournal%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006%0Ahttps://doi.org/10.1>
- Supriyanto, A. A., & Syafrizal. (2022). Penentuan Cacat Dengan Metode Ultrasonic Testing. *Jurnal Ramatekno*, 2(1), 7–13. <https://ejournal.pei.ac.id/index.php/JRT1/article/view/33>
- Suseno, A., Prayuda, T., & Akbar, H. (2021). Analisis Kemampuan Pendeteksi Pengujian Eddy Current terhadap Crack Toe pada Sambungan Tee Material Aluminium 5083 yang Dilapisi Non-Conductive Coating dengan Variasi Kedalaman dan Panjang Crack. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), 14–21.
- Suwarno, D. U. (2016). Alat Peraga Efek Arus Eddy Dengan Menggunakan Piringan Magnet Berputar. *PROSIDING SNIPS 2016*, 268–274.
- Warman, S. P. P. (2017). ANALISIS FAKTOR PENYEBAB CACAT PENGELASAN PADA PIPA (Study Kasus Pada Pipa Distribusi PDAM Kabupaten Kutai Barat). *Jurnal Mekanikal*, 8(2), 730–736.
- Wei, H., & Soleimani, M. (2012). A Magnetic Induction Tomography System for Prospective Industrial Processing Applications. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(2), 406–410. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60404-](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60404-)

- Wei, H. Y., & Wilkinson, A. J. (2011). Design of a sensor coil and measurement electronics for magnetic induction tomography. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(12), 3853–3859. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2147590>
- Wicaksono, Y. G., Rahmatullah, H. F., Artika, R., Ismarwanti, S., & Sigit, R. (2022). SIMULASI UJI TAK MERUSAK PELAT ELEMEN BAKAR PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE PENETRANT TEST. *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, 28(3), 143–152.
- Widyawati, F., & Marano, L. (2021). Identifikasi Cacat Lasan Fcaw Pada Fondasi Mesin Kapal Menggunakan Metode Ultrasonic Testing. *Jurnal TAMBORA*, 5(2), 53–58. <https://doi.org/10.36761/jt.v5i2.1124>
- Yunianto, B., Wicaksana, P., Sudharto, J., UNDIP Tembalang, K., & Tengah, J. (2023). Analisis Cacat Hasil Pengelasan Pada Pipa ASTM A106 Grade B Menggunakan Magnetic Particle Test dan Liquid Penetrant Test di Workshop Las dan Inspeksi PPSDM Migas Cepu. *Jurnal ROTASI*, 25(2), 54–60.

## LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Simulasi Frekuensi 10 kHz – 1 GHz

Lampiran 2. Data Hasil Simulasi Spesimen Normal dan Cacat

Defect (mm)	Frekuensi (kHz)	Coil Voltage Rx (mV)
Normal	100	194.1939
	150	192.8374
	200	190.9649
	250	188.5488
	300	185.6719
0.5	100	195.0085
	150	193.6905
	200	191.8681
	250	189.599
	300	186.9258
1	100	195.1368
	150	193.7361
	200	191.9057
	250	189.6287
	300	186.949
1.5	100	195.2313
	150	193.8887
	200	192.0528
	250	189.7635
	300	187.059
2	100	195.7821
	150	194.4576
	200	192.6014
	250	190.2907
	300	187.5393
2.5	100	196.7877
	150	195.5129
	200	193.7598
	250	191.346
	300	188.5769

ORIGINALITY REPORT

6%

SIMILARITY INDEX

6%

INTERNET SOURCES

0%

PUBLICATIONS

2%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	<a href="http://repository.lppm.unila.ac.id">repository.lppm.unila.ac.id</a> Internet Source	2%
2	<a href="http://media.neliti.com">media.neliti.com</a> Internet Source	1%
3	<a href="http://indoweldingengineering.blogspot.com">indoweldingengineering.blogspot.com</a> Internet Source	1%
4	<a href="http://journal.portalgaruda.org">journal.portalgaruda.org</a> Internet Source	1%
5	<a href="http://ejurnal.its.ac.id">ejurnal.its.ac.id</a> Internet Source	1%
6	<a href="http://repository.its.ac.id">repository.its.ac.id</a> Internet Source	1%
7	<a href="http://pdfcoffee.com">pdfcoffee.com</a> Internet Source	1%

Exclude quotes On

Exclude matches < 1%

Exclude bibliography On

# DRAFT SKRIPSI\_RADHI RAMADHAN\_3331200026.docx

---

PAGE 1

---

PAGE 2

---

PAGE 3

---

PAGE 4

---

PAGE 5

---

PAGE 6

---

PAGE 7

---

PAGE 8

---

PAGE 9

---

PAGE 10

---

PAGE 11

---

PAGE 12

---

PAGE 13

---

PAGE 14

---

PAGE 15

---

PAGE 16

---

PAGE 17

---

PAGE 18

---

PAGE 19

---

PAGE 20

---

PAGE 21

---

PAGE 22

---

PAGE 23

---

PAGE 24

---

PAGE 25

---

PAGE 26

---

PAGE 27

---

PAGE 28

---

PAGE 29

---

PAGE 30

---

PAGE 31

---

PAGE 32

---

PAGE 33

---

PAGE 34

---

PAGE 35

---

PAGE 36

---

PAGE 37

---

PAGE 38

---

PAGE 39

---

PAGE 40

---

PAGE 41

---

PAGE 42

---

PAGE 43

---

PAGE 44

---

PAGE 45

---

PAGE 46

---

PAGE 47

---

PAGE 48

---

PAGE 49

---

PAGE 50

---

PAGE 51

---

PAGE 52

---

PAGE 53

---

PAGE 54

---

PAGE 55

---

PAGE 56

---

PAGE 57

---

PAGE 58

---

PAGE 59

---

PAGE 60

---

PAGE 61

---

PAGE 62

---

PAGE 63

---

PAGE 64

---

PAGE 65

---

PAGE 66

---

PAGE 67

---