

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

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 *MULTIPHYSICS***

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

TUGAS AKHIR

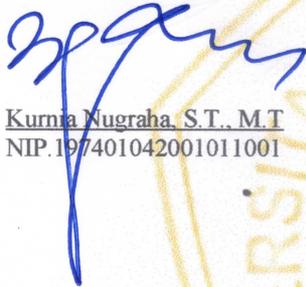
Simulasi Deteksi Cacat pada Pelat Baja Menggunakan Pemodelan Sensor Magnetic Induction Tomography (MIT) dengan Software Simulasi Multiphysics

Dipersiapkan dan disusun Oleh :

Radhi Ramadhan
3331200026

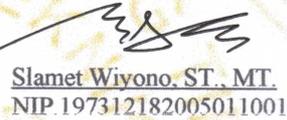
telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
pada tanggal, 16 Agustus 2024

Pembimbing Utama

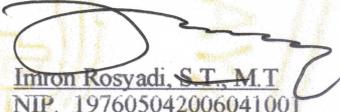


Kurnia Nugraha, S.T., M.T
NIP.197401042001011001

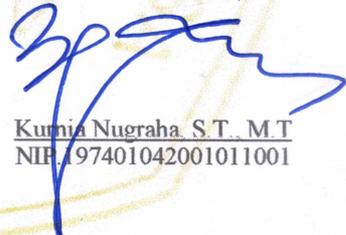
Anggota Dewan Penguji



Slamet Wiyono, ST., MT.
NIP.197312182005011001



Imron Rosyadi, S.T., M.T
NIP. 197605042006041001



Kurnia Nugraha S.T. M.T
NIP.197401042001011001

Tugas Akhir ini sudah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Tanggal, 20 agustus 2024
Ketua Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA



Ir. Bhimas Satria, S.T., M.Eng.
NIP.198305102012121006



PERSETUJUAN

Skripsi

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

Yang dipersiapkan dan disusun oleh

Radhi Ramadhan

3331200026

Telah disetujui oleh dosen pembimbing Skripsi

Pada tanggal 19 Juli 2024

Dosen Pembimbing,



Kurnia Nugraha, S.T., M.T
NIP. 19740104 2001011001

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan

Untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Tanggal 16 Agustus 2024

Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng
NIP. 198305102012121006

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Radhi Ramadhan

NPM : 3331200026

Judul : Simulasi Deteksi Cacat Pada Pelat Baja Menggunakan Pemodelan Sensor *Magnetic Induction Tomography* (MIT) dengan *Software Simulasi Multiphysics*

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,

MENYATAKAN

Bahwa skripsi ini hasil karya sendiri dan tidak ada duplikasi dengan karya orang lain, kecuali untuk yang telah disebutkan sumbernya.

Cilegon, 16 Agustus 2024



Radhi Ramadhan
NPM. 3331200026

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul "*Simulasi Deteksi Cacat pada Pelat Baja Menggunakan Pemodelan Sensor Magnetic Induction Tomography (MIT) dengan Software Simulasi Multiphysics*". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Kurnia Nugraha, S.T., M.T, selaku dosen pembimbing, yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan selama penulisan skripsi ini.
2. Bapak Dhimas Satria, S.T., M.Eng, selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin, yang telah memberikan dukungan dan fasilitas selama masa studi.
3. Ibu Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si. selaku Kepala Laboratorium *Advanced Materials and Tomography*, yang telah memberikan bantuan fasilitas selama penelitian.
4. Bapak Dr. Didied Haryono, S.T., M.T. selaku Dosen Laboratorium *Advanced Materials and Tomography*, yang telah memberikan segala saran dan kritik kepada Penulis selama proses penelitian.
5. Orang tua tercinta yang selalu memberikan doa, dukungan, dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan pendidikan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis terbuka terhadap segala saran dan kritik yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Cilegon, 14 Agustus

Penulis

ABSTRAK

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

Disusun Oleh:

Radhi Ramadhan

NPM. 3331200026

Proses pengelasan adalah tahap penting dalam industri pipa untuk memastikan integritas dan keamanan produk. Inspeksi non-destruktif diperlukan untuk mendeteksi cacat tersembunyi yang dapat menurunkan kualitas material. Penelitian ini menyarankan penggunaan Magnetic Induction Tomography (MIT) sebagai metode inovatif untuk mendeteksi cacat pada pelat baja. MIT dipilih karena kemampuannya memeriksa bagian dalam material tanpa merusaknya, memberikan keunggulan dibandingkan teknik tradisional seperti radiografi atau ultrasonik. Dengan menggunakan perangkat lunak Multiphysics, penelitian ini memodelkan geometri pelat baja dan konfigurasi sensor MIT untuk mengevaluasi performa deteksi cacat di permukaan dan bawah permukaan material. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sensor MIT sangat sensitif terhadap perubahan medan elektromagnetik akibat cacat, terutama pada sumbu z, sehingga memungkinkan deteksi yang presisi. Penelitian ini mengindikasikan bahwa MIT dapat menjadi solusi efektif untuk inspeksi kualitas pengelasan dalam industri pipa, dengan potensi pengembangan lebih lanjut seperti peningkatan resolusi sensor dan optimasi algoritma rekonstruksi citra.

Kata Kunci: *Manufaktur, MIT, Non-Destructive Test, Simulasi Multiphysics*

ABSTRACT

SIMULATION OF DEFECT DETECTION ON STEEL PLATES USING MAGNETIC INDUCTION TOMOGRAPHY (MIT) SENSOR MODELING WITH MULTIPHYSICS SIMULATION SOFTWARE

Disusun Oleh:

Radhi Ramadhan

NPM. 3331200026

The welding process is an important stage in the pipe industry to ensure the integrity and safety of products. Non-destructive inspection is necessary to detect hidden defects that can degrade the quality of the material. This study suggests the use of Magnetic Induction Tomography (MIT) as an innovative method to detect defects in steel plates. MIT was chosen because of its ability to examine the inside of materials without damaging them, giving it an edge over traditional techniques such as radiography or ultrasonics. Using Multiphysics software, the study modeled the geometry of steel plates and the configuration of MIT sensors to evaluate the defect detection performance on the surface and subsurface of the material. The simulation results show that the MIT sensor is highly sensitive to changes in the electromagnetic field due to defects, especially on the z-axis, allowing for precise detection. This research indicates that MIT can be an effective solution for welding quality inspection in the pipeline industry, with the potential for further developments such as increased sensor resolution and optimization of image reconstruction algorithms.

Keywords: *Manufacturing, MIT, Non-Destructive Test, Multiphysics Simulation*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	
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
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pengelasan	6
2.2 <i>Non-Destructive Test</i> (NDT)	8
2.3 Magnet.....	12
2.4 Induksi	13
2.4.1 Hukum Faraday	13
2.4.2 Hukum Lenz	15
2.4.3 <i>Eddy Current</i>	15
2.5 <i>Magnetic Induction Tomography</i> (MIT)	17
2.6 Prinsip Dasar MIT	18
2.7 Rangkaian Sistem MIT.....	20
2.8 <i>Coil</i>	21
2.9 Simulasi <i>Multiphysics</i> (Comsol 6.2).....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	

3.1	Diagram Alir Penelitian.....	24
3.2	Desain Geometri Pelat Baja.....	25
3.3	Desain Sensor MIT	26
3.4	Prosedur Simulasi <i>Multiphysics</i>	27

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Pemodelan Geometri Simulasi	33
4.2	Analisis Hasil Simulasi Frekuensi Optimal.....	35
4.3	Analisis Pengaruh V_{Tx} terhadap Coil Voltage Rx.....	42
4.4	Analisis Pengaruh Ukuran Cacat terhadap Coil Voltage Rx	44
4.5	Analisis Kemampuan Sensor MIT untuk Mendeteksi Cacat di Sumbu Z	46
4.6	Validasi Deteksi Cacat Hasil Simulasi dengan Eksperimen	51

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan.....	54
5.2	Saran	55

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Cacat <i>Porosity</i>	7
Gambar 2.2 Cacat <i>Slag Inclusion</i>	7
Gambar 2.3 Cacat <i>Incomplete Fusion</i>	8
Gambar 2.4 <i>Radiography Test</i>	9
Gambar 2.5 <i>Magnetic Test</i>	11
Gambar 2.6 <i>Penetrant Test</i>	12
Gambar 2.7 Prinsip Kerja <i>Eddy Current Testing</i>	16
Gambar 2.8 Prinsip Kerja <i>Magnetic Induction Tomography</i>	19
Gambar 2.9 Sketsa Rangkaian Sistem MIT	20
Gambar 2.10 Koil Solenoid.....	21
Gambar 2. 11 <i>Geometry Primitives and Geometry Toolbar Buttons</i>	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Simulasi Sensor MIT	25
Gambar 3.2 Dimensi Spesimen Uji.....	26
Gambar 3.3 Pemodelan Geometri Sensor MIT	27
Gambar 3.4 Pemodelan Geometri Benda Kerja dan Sensor MIT	28
Gambar 3.5 Pemilihan Fisika <i>Magnetic Field</i>	28
Gambar 3.6 <i>Electrical Circuit</i>	29
Gambar 3.7 Pengaturan Material	29
Gambar 3.8 Hasil <i>Meshing</i> pada Model Geometri.....	31
Gambar 4.1 Ilustrasi Cacat pada Spesimen Uji.....	33
Gambar 4.2 Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 50 Ohm.....	37
Gambar 4.3 Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 100 Ohm.....	38
Gambar 4.4 Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 1000 Ohm.....	40
Gambar 4.5 Grafik Frekuensi terhadap Voltage Rx dengan Variasi Resistor	41
Gambar 4.6 Grafik Variasi Voltage Tx dengan Voltage Rx dan Frekuensi	43
Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Defect terhadap Coil Voltage Rx pada Frekuensi 100 kHz.....	44
Gambar 4.8 Grafik Spesimen Normal vs Cacat	47
Gambar 4.9 Grafik Spesimen Normal vs Cacat 0,5 mm.....	48

Gambar 4.10 Grafik Spesimen Cacat 0,5 mm vs Cacat 1 mm.....	48
Gambar 4.11 Grafik Spesimen Cacat 1 mm dan Cacat 1,5 mm	50
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Hasil Simulasi dengan Eksperimen pada Frekuensi 300 kHz	52

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 <i>Basic Properties of Copper</i>	30
Tabel 3.2 <i>Basic Properties of Air</i>	30
Tabel 3.3 <i>Basic Properties of Structural Steel</i>	30
Tabel 4.1 Hasil Simulasi dengan Resistor 50 Ω (Ohm).....	36
Tabel 4.2 Hasil Simulasi dengan Resistor 100 Ω (Ohm).....	38
Tabel 4.3 Hasil Simulasi dengan Resistor 1000 Ω (Ohm).....	39

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 γ 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 [1]. 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 [2]. 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 Multiphysics*. 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 100x100x10mm. 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.

3. Tahap Validasi

Tahap validasi adalah proses yang penting untuk memastikan bahwa model simulasi yang dibangun dapat dipercaya dan akurat dalam merepresentasikan sistem yang sebenarnya. Dalam penelitian ini validasi yang dilakukan yaitu dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan data eksperimen dengan menggunakan parameter yang sama pada saat simulasi. Jika hasil simulasi mendekati data eksperimen atau tren yang terbentuk sama, maka model tersebut dapat dianggap valid.

BAB II

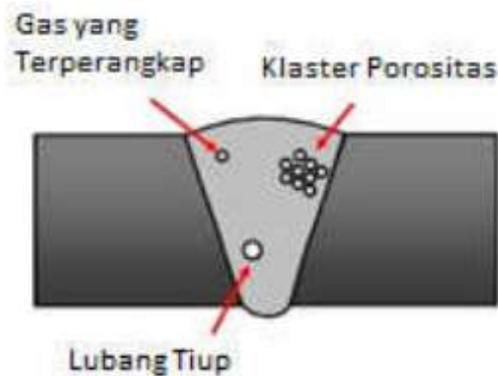
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan

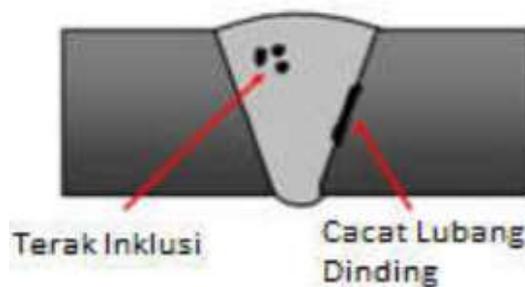
Pengelasan merupakan kegiatan menyambungkan dua buah logam atau lebih dengan cara memanaskan sampai suhu lebur dengan logam pengisi atau tanpa logam pengisi [3]. Sambungan yang dihasilkan dari proses pengelasan merupakan sambungan tetap atau permanen, karena untuk melepas sambungannya harus merusak benda 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 [4]. 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 [5]. Berikut ini ilustrasi cacat *porosity*.



Gambar 2.1 Cacat *Porosity* [6]



Gambar 2.2 Cacat *Slag Inclusion* [6]

Slag inclusion adalah cacat yang terdapat pada hasil pengelasan berupa terak yang terperangkap di dalam lasan. Ilustrasi dari cacat *slag inclusion* ditunjukkan pada gambar 2.2, 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 [5].

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 [7]. Menurut sumber lain, *Incomplete Fusion* merupakan sebuah hasil pengelasan yang tidak diinginkan karena ketidaksempurnaan proses penyambungan antara logam las dengan logam induk [8]. Cacat ini disebabkan karena ampere yang terlalu rendah, kampuh las sangat besar dan kecepatan menggerakkan elektroda terlalu cepat. Gambar dari cacat *incomplete fusion* dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Cacat *Incomplete Fusion* [7]

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 [4]. 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 [4]. NDT merupakan sarana penunjang yang sangat diandalkan untuk pengendalian dan penjamin mutu suatu hasil pengelasan [9]. 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 satu 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 di balik 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 [9]. Berikut ini ilustrasi seseorang sedang melakukan proses pelaksanaan untuk pengujian *radiography test*.



Gambar 2.4 *Radiography Test*

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*.

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 [10]. 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 [11]. *Ultrasonic testing* mempunyai prinsip kerja yaitu dimana gelombang ultrasonic 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 [12].

3. *Magnetic Test*

Magnetic Particle Testing (MT) adalah metode pengujian untuk menentukan lokasi kerusakan permukaan (*surface*) dan di bawah permukaan (*subsurface*) pada material yang bersifat *ferromagnetic* [13]. *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* [14]. 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 [15]. 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 [15].

Pada prinsipnya metode *Magnetic Test* (MT) adalah metode pengujian tanpa merusak dengan menggunakan bantuan medan magnet yang memungkinkan menampakkan 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* [16]. Berikut ini ilustrasi dari pengujian *Magnetic Test*.



Gambar 2.5 *Magnetic Test*

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 [17]. 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 [18]. 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 [19]. Berikut ini ilustrasi dari pengujian *penetrant test*.



Gambar 2.6 *Penetrant Test*

2.3 Magnet

Pada zaman prasejarah sifat magnetic ditemukan dalam jenis tertentu dari mineral bijih besi yang dikenal sebagai magnetit (Fe_3O_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 [20]. 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 [21]. 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 [20].

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 [22].

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.

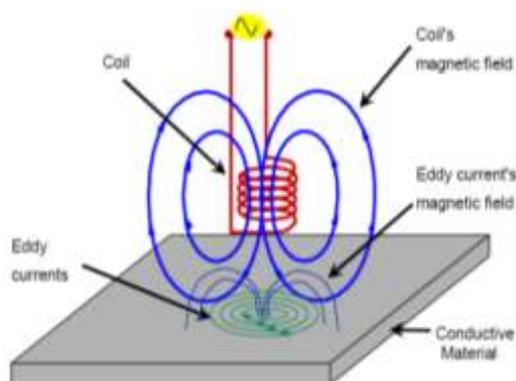
Ketika fluks magnetik yang menembus sebuah loop konduktor berubah, medan magnet yang berubah ini akan menyebabkan terjadinya ggl induksi di dalam konduktor tersebut. Arus induksi yang dihasilkan oleh ggl ini akan menghasilkan medan magnet yang menentang perubahan fluks magnetik yang menyebabkan arus tersebut. Prinsip ini memastikan bahwa tidak ada energi yang diciptakan atau dihancurkan, melainkan hanya ditransfer atau diubah dari satu bentuk ke bentuk lain [20].

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 [23].

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 mendeteksi dan mendapatkan ukuran suatu crack, korosi, dan 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* [22]. ECT bekerja berdasarkan prinsip dari induksi elektromagnetik. Pada metode ini, kumparan (probe dan sensor) tereksitasi dengan sinusoidal arus bolak-balik [24]. 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* [25]

Berdasarkan gambar 2.7 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 [25].

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

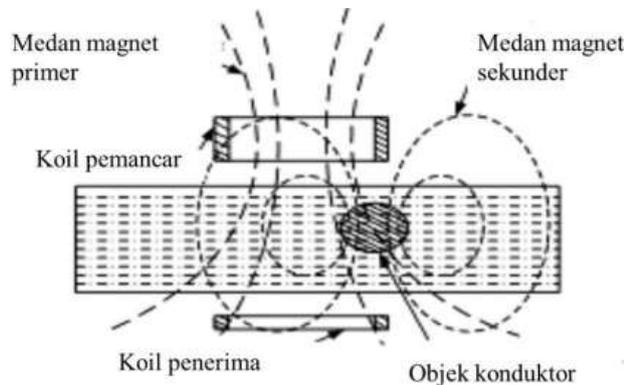
penginderaan sebanding dengan medan magnet lokal kekuatan B , yang disebut sebagai sinyal latar belakang atau primer, dan direpresentasikan sebagai fasor [26]. MIT adalah teknik pengujian non-destruktif untuk menggambarkan distribusi spasial konduktivitas listrik atau permeabilitas magnetik pada objek 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.

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 [27]. 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 [28].

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 [28]. Berikut ini ilustrasi dari prinsip kerja MIT.



Gambar 2.8 Prinsip Kerja *Magnetic Induction Tomography* [28]

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:

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

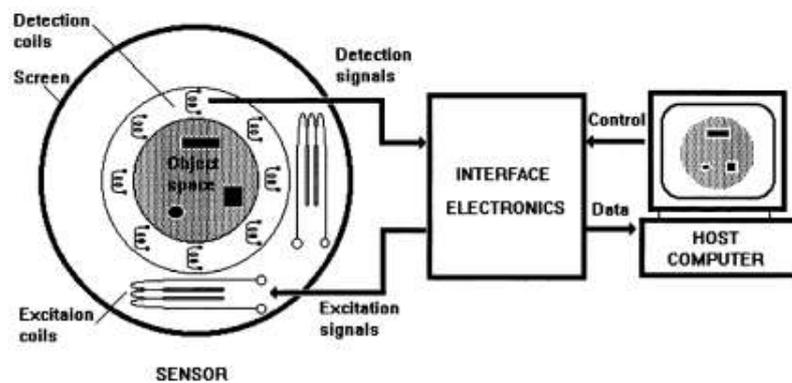
Dimana ∇ adalah operator divergen, H adalah medan magnet, σ adalah konduktivitas, j adalah kepadatan arus total, ω adalah kecepatan sudut, ϵ adalah permitivitas, dan E adalah medan listrik. Hukum ampere menyatakan bahwa rotasi dari medan magnetik di suatu titik dalam ruang adalah sama dengan jumlah arus 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 μ adalah permeabilitas. Arus Eddy mengalir pada baja pelat juga menghasilkan medan magnet yang disebut medan sekunder medan magnet (ΔB). Medan magnet primer (B) dan medan magnet sekunder (ΔB) kemudian akan menginduksi tegangan pada koil penerima [29].

2.7 Rangkaian Sistem MIT



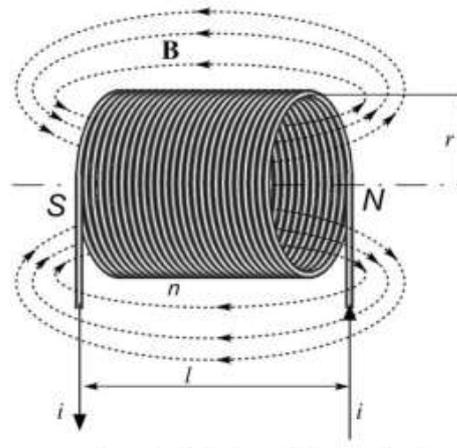
Gambar 2.9 Sketsa Rangkaian Sistem MIT [30]

Gambar di atas menggambarkan sketsa 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.

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 [20]. 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 [31]. 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 [20]

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 μ_0 adalah permeabilitas bahan, n adalah jumlah lilitan per satuan panjang, dan i_0 adalah arus yang mengalir melalui kawat solenoid.

2.9 Simulasi *Multiphysics* (Comsol 6.2)

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 [32].

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* [32].

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			

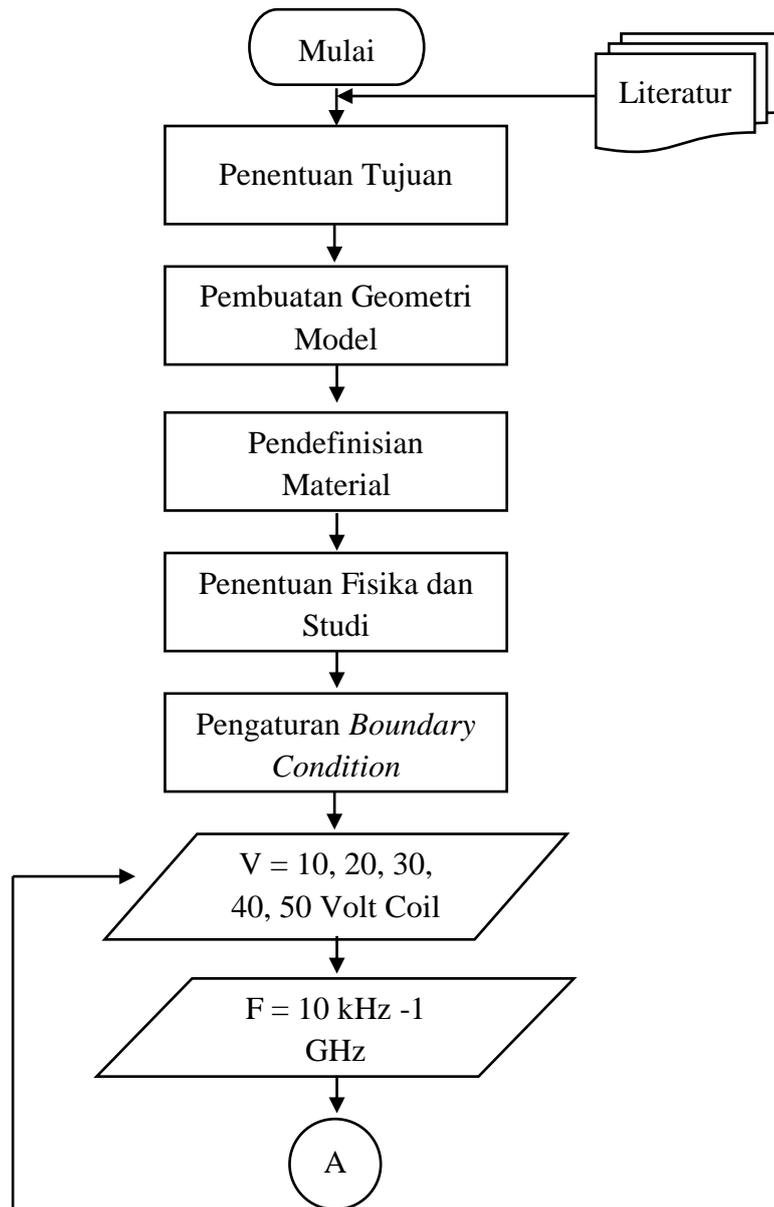
Gambar 2. 11 *Geometry Primitives and Geometry Toolbar Buttons* [32]

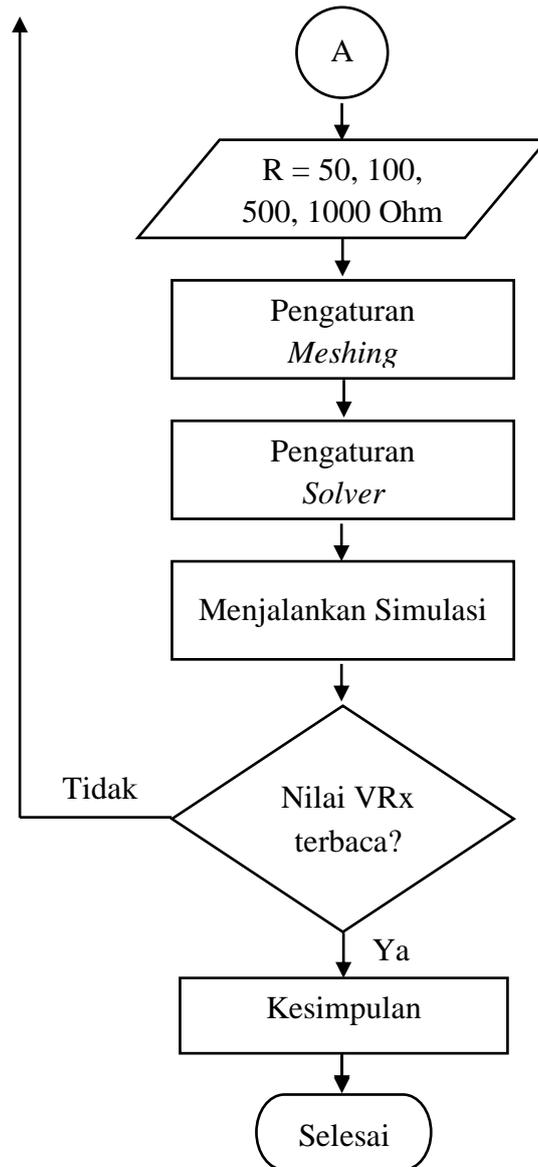
Pemilihan modul fisika yang tepat dalam *software* Simulasi *Multiphysics* sangat krusial karena menentukan parameter yang akan dianalisis. Dalam konteks sensor MIT, fenomena medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir melalui koil sensor menjadi fokus utama. Koil ini berfungsi sebagai pemancar dan penerima sinyal. Fenomena medan magnet tersebut dalam Simulasi *Multiphysics* diakomodasi oleh modul AC/DC Electromagnetic. Setelah modul dipilih, parameter-parameter penting seperti jumlah lilitan pada koil, material spesimen uji, dan penetapan kondisi batas harus ditentukan sesuai dengan tujuan simulasi yang ingin dicapai [33].

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir di bawah ini mengilustrasikan langkah-langkah utama yang dilakukan saat ingin melakukan simulasi pada penelitian ini. Setiap tahap penting dalam proses ini membantu memastikan bahwa penelitian dilakukan dengan cara yang paling efisien dan efektif.

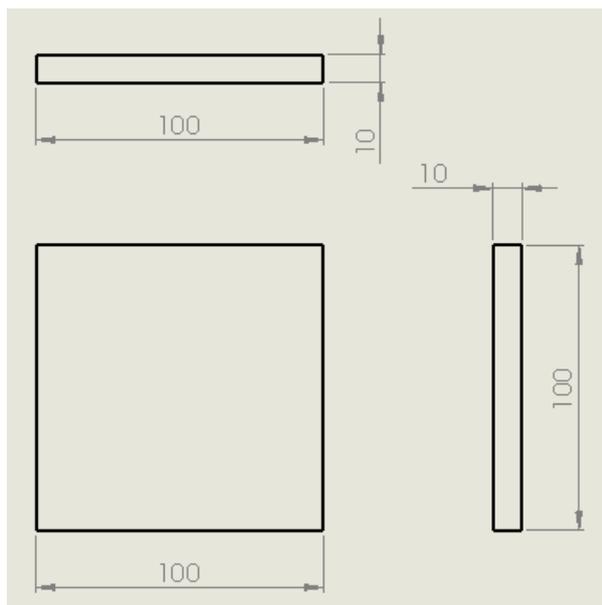




Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Simulasi Sensor MIT

3.2 Desain Geometri Pelat Baja

Geometri pelat baja yang dimodelkan yaitu berbentuk block atau kubur dengan dimensi panjang 100 mm, lebar 100 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. Pada gambar 3.2 menunjukkan 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

Berikut ini parameter sensor *Magnetic Induction Tomography* (MIT) yang digunakan pada penelitian saat ini.

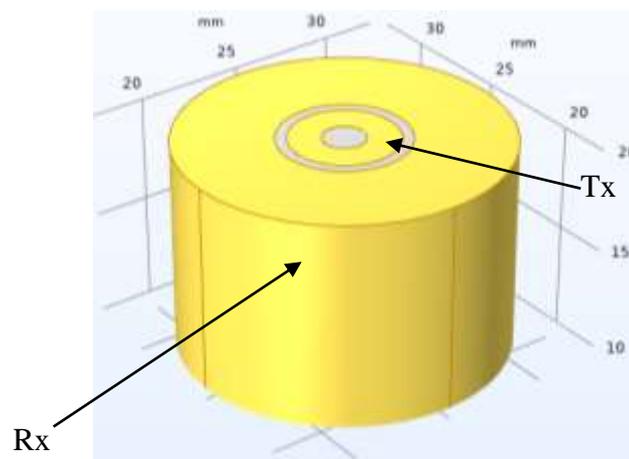
Tabel 3.1 Parameter Sensor *Magnetic Induction Tomography* (MIT)

Parameter	Keterangan
Jenis Koil	Solenoid
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

Pembuatan model simulasi dilakukan langsung pada *software* Simulasi *Multiphysics* 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 3.1 di atas.

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

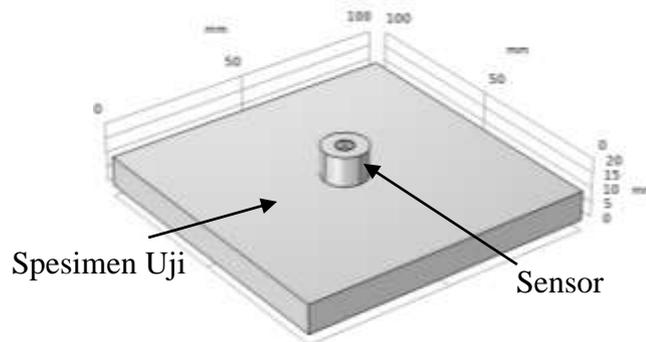
3.4 Prosedur Simulasi *Multiphysics*

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

1. Pemodelan Geometri

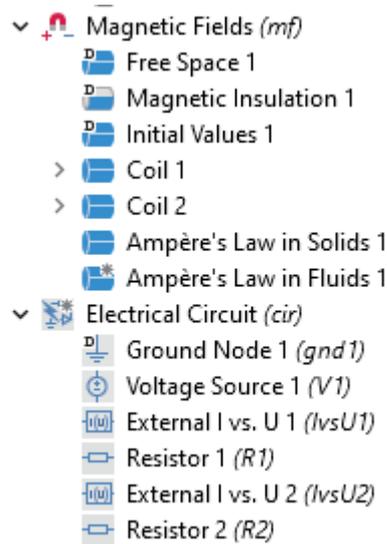
Bangun model geometri yang sesuai dengan sistem yang ingin kita simulasi. Ini bisa berupa benda logam, magnet, atau struktur lainnya yang memengaruhi medan magnet. Berdasarkan pengujian yang ingin dilakukan yaitu menggunakan sistem *Magnetic Induction Tomography* (MIT), model geometri yang dibentuk yaitu berupa bentuk block dibentuk sesuai dimensi benda kerja yaitu 100x100x10 mm, yang kemudian di atas

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

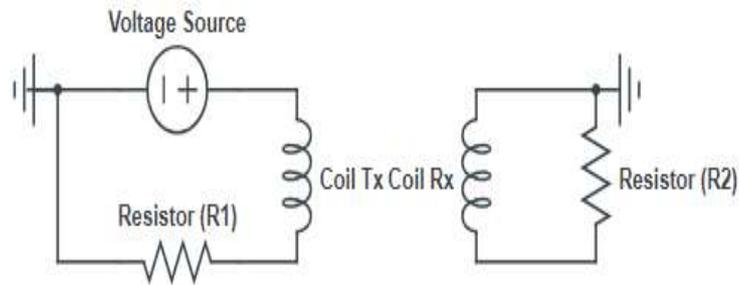
2. Pemilihan Fisika: Pilih modul dalam SIMULASI *Multiphysics* yang sesuai dengan tujuan simulasi. Dalam hal ini modul yang dipilih yaitu *AC/DC Electromagnetic Field (Magnetic Field)*.



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.

- ✓  Materials
 - ▼  Copper (*mat1*)
 -  Basic (*def*)
 - ▼  Air (*mat2*)
 - >  Basic (*def*)
 - ▼  Structural steel (*mat3*)
 -  Basic (*def*)

Gambar 3.7 Pengaturan Material

Dari gambar 3.7 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

Property	Expression
<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 ³]
<i>Thermal conductivity</i>	400[W/(m*K)]
<i>Resistivity</i>	0.0000000168 ($\Omega \cdot m$)

Tabel 3.2 Basic Properties of Air

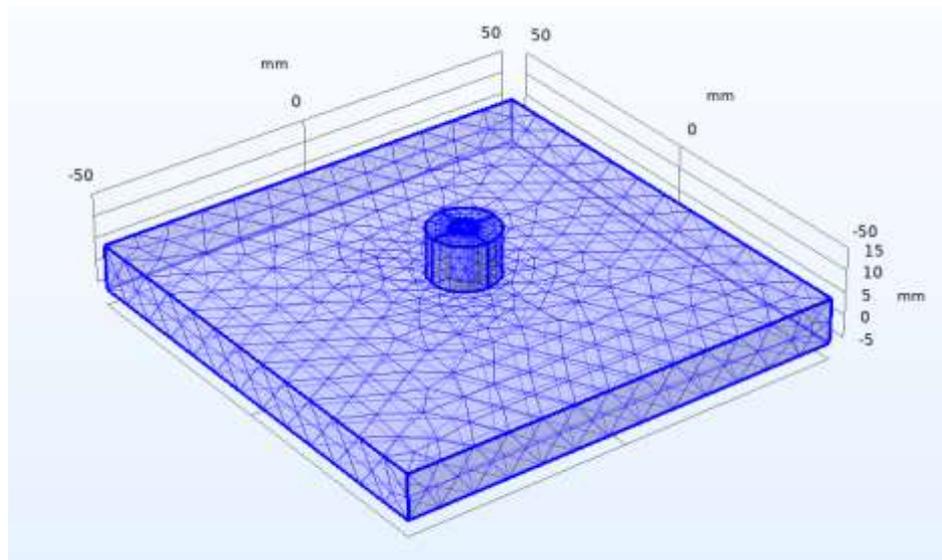
Property	Expression
<i>Bulk viscosity</i>	0.0000145 [Pa.s]
<i>Density</i>	1.2041 kg/m ³
<i>Dynamic viscosity</i>	eta(T)
<i>Electrical conductivity</i>	0[S/m]
<i>Mean molar mass</i>	0.02897[kg/mol]
<i>Ratio of specific heats</i>	1.4
<i>Relative permeability</i>	1
<i>Relative permittivity</i>	1
<i>Resistivity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

Tabel 3.3 Basic Properties of Structural Steel

Property	Expression
<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 ³]
<i>Resistivity</i>	5x10 ⁻⁷ $\Omega \cdot m$

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. **Pembentukan Mesh:** Mesh merupakan pembagian geometri menjadi elemen-elemen kecil yang akan digunakan dalam perhitungan numerik

dalam simulasi. Dalam hal ini mesh yang digunakan yaitu free tetrahedral dengan size menggunakan finer untuk bagian sensor dan benda kerja yang terdapat cacat. Setelah menggunakan metode *calibrate for general physics* dengan tingkat kehalusan mesh yang *predefined finer* dengan elemen size parameter minimum 0,6 mm, maximum 8,25 mm, maximum *element growth rate* 1,4 dan *curvature factor* 0,4 serta *resolution of narrow regions* 0,7. Maka terbentuklah penyatuan dari lima *object solid*. Geometri yang diselesaikan memiliki 11 domain, 62 batas, 100 sisi, dan 54 simpul. Mesh yang dihasilkan terdiri dari 44.037 elemen domain, 5.542 elemen batas, dan 632 elemen tepi. Berikut ini ilustrasi hasil meshing.



Gambar 3.8 Hasil *Meshing* pada Model Geometri

- 6. 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 frekuensi yang digunakan yaitu berkisar dari 10 kHz hingga 1 GHz.

- 7. Simulasikan Model:** Jalankan simulasi untuk mendapatkan persebaran medan magnet dalam domain yang kita definisikan.

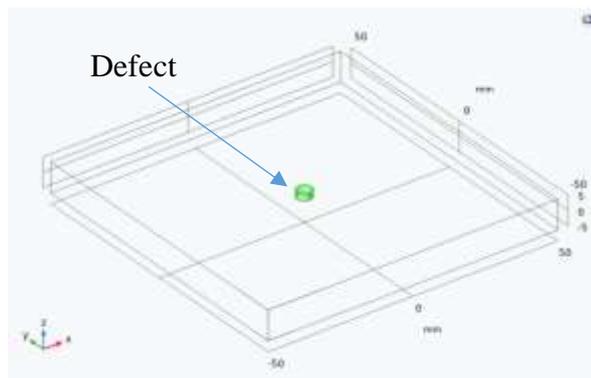
BAB IV

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 di bawah permukaan dengan jarak 1 mm dan di bawah 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. Dalam penelitian ini dilakukan pengembangan untuk pengujian deteksi cacat pada bagian bawah permukaan spesimen uji menggunakan *software* simulasi *Multiphysics* (Comsol 6.2). Ilustrasi dari pemodelan cacat yang terletak pada spesimen benda uji ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Ilustrasi Cacat pada Spesimen Uji

Berdasarkan gambar 4.1 model cacat diletakkan pada bagian tengah dan di bawah 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 dan dibandingkan dengan hasil pengukuran yang tidak ada cacat sehingga diketahui perbedaannya.

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 cacat 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 4.1.

Berdasarkan data pada tabel 4.1 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

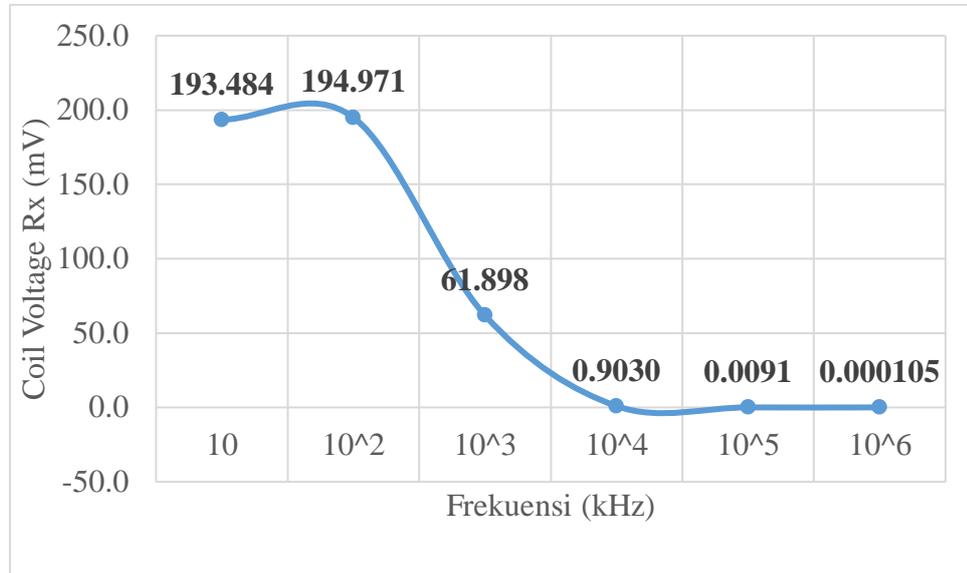
dinaikkan menjadi 100 kHz, tegangan koil sedikit meningkat menjadi 194.971 mV. Namun, pada frekuensi 1 MHz, tegangan koil mengalami penurunan drastis menjadi 61.898 mV. Penurunan ini berlanjut secara signifikan pada frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0.9030 mV pada 10 MHz, 0.0091 mV pada 100 MHz dan mencapai nilai yang sangat kecil sebesar 0.000105 mV pada 1 GHz. Dari data yang didapat di atas untuk memudahkan dalam menganalisisnya, 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.

Tabel 4.1 Hasil Simulasi dengan Resistor 50 Ω (Ohm)

Frekuensi (kHz)	Coil Voltage Rx (mV)
10^1	193.484
10^2	194.971
10^3	61.898
10^4	0.9030
10^5	0.0091
10^6	0.000105

Berdasarkan grafik pada gambar 4.2 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 di atas 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.



Gambar 4.2 Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 50 Ohm

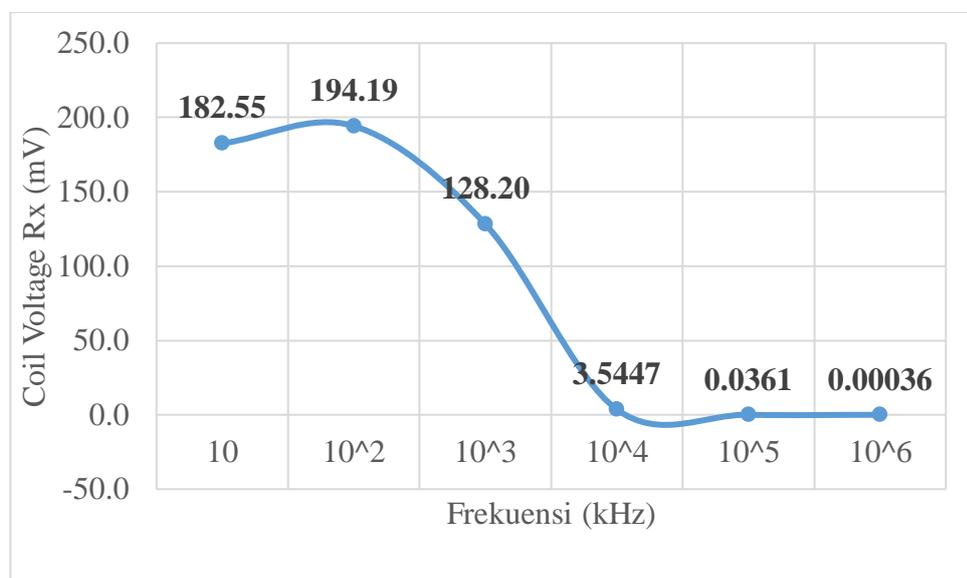
Grafik di atas menunjukkan perubahan tegangan koil pada berbagai nilai frekuensi. Grafik tersebut menggambarkan bahwa tegangan koil berkurang drastis seiring dengan peningkatan frekuensi, menunjukkan karakteristik respons frekuensi dari spesimen uji yang diukur. Dengan hasil coil voltage Rx yang didapatkan pada frekuensi tersebut sangat kecil maka dapat dikatakan tidak optimal, jika sensor MIT dengan rangkaian elektrik yang menggunakan resistor 50 Ohm diaplikasikan dengan frekuensi di atas 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 di bawah mili volt (mV) agar perbedaan nilai dapat terbaca.

Data hasil simulasi sensor MIT dengan Resistor 100 Ohm ditampilkan pada tabel 4.2. 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 sangat kecil yaitu kurang dari 1 mV sedangkan pada resistor 100 Ohm memiliki selisih lebih dari 10 mV. Pada gambar 4.3 menunjukkan grafik yang dihasilkan dari data hasil simulasi menggunakan resistor dengan ukuran resistansi sebesar 100 Ohm.

Tabel 4.2 Hasil Simulasi dengan Resistor 100 Ω (Ohm)

Frekuensi (kHz)	Coil Voltage Rx (mV)
10^1	182.55
10^2	194.19
10^3	128.20
10^4	3.5447
10^5	0.0361
10^6	0.00036



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 anantara 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.

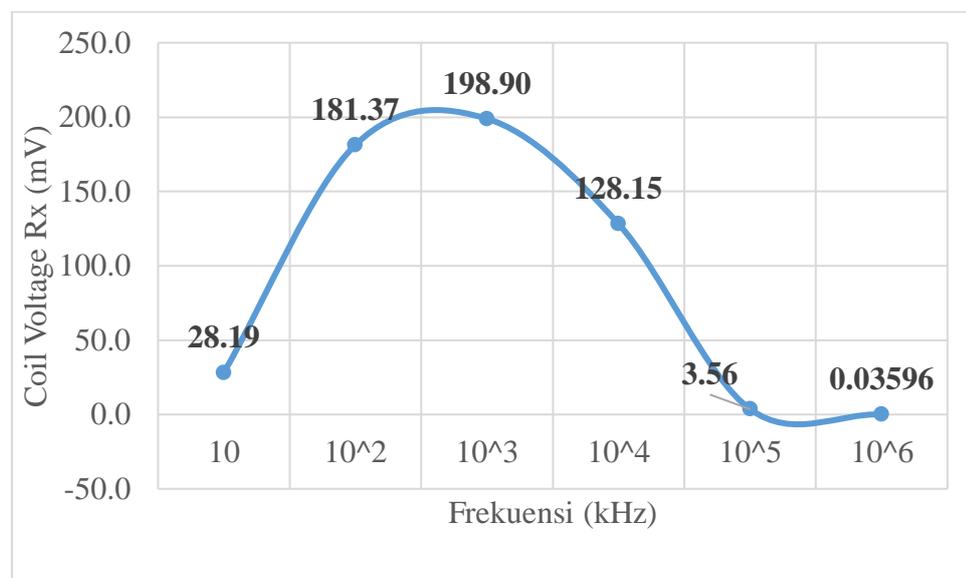
Tabel 4.3 Hasil Simulasi dengan Resistor 1000 Ω (Ohm)

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

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

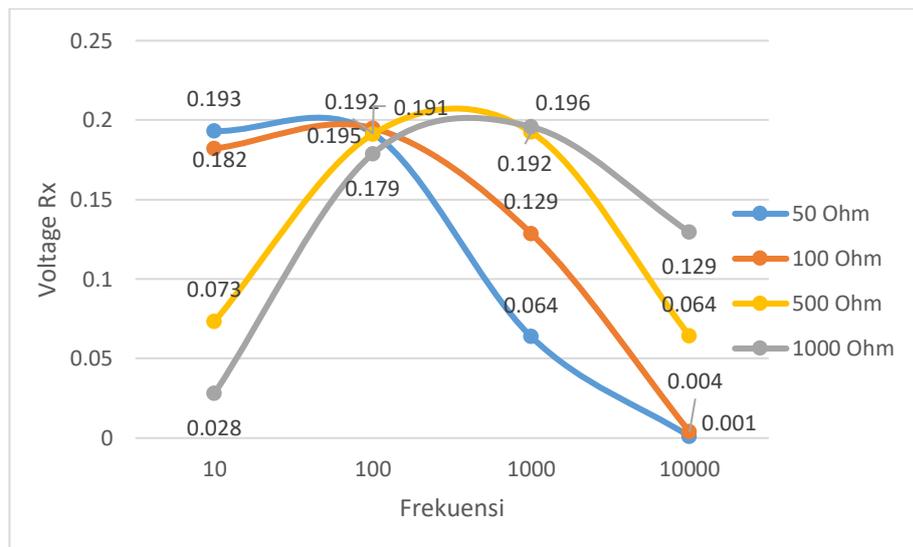
frekuensi yang sangat tinggi, seperti 1 GHz, tegangan coil sangat rendah, yaitu 0.00036 mV. Hal ini menunjukkan bahwa pada frekuensi yang sangat tinggi, kualitas suatu sensor MIT sangat buruk dalam mendeteksi cacat. Dalam simulasi sensor menggunakan 3 variasi rangkaian electric dengan resistor yang berbeda ukuran resistansinya. Data hasil simulasi ketiga yaitu menggunakan resistor yang ukuran resistansinya sebesar 1000 Ohm dapat dilihat pada tabel 4.3.

Dari data di atas 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 di atas 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 di atas 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 di atas bahwa frekuensi yang optimal digunakan yaitu disesuaikan dengan resistor yang digunakan.



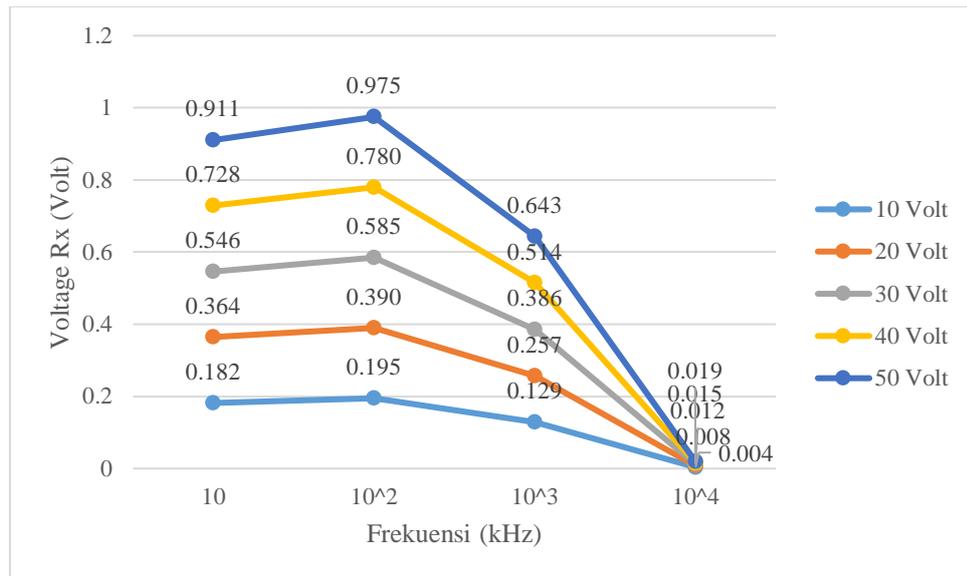
Gambar 4.5 Grafik Frekuensi terhadap Voltage Rx dengan Variasi Resistor

Grafik diatas menunjukkan hubungan antara frekuensi dan tegangan Rx untuk empat nilai resistor yang berbeda: 50 Ohm, 100 Ohm, 500 Ohm, dan

1000 Ohm. Pada frekuensi rendah (10 Hz), tegangan Rx bervariasi dengan nilai resistor, di mana resistor dengan nilai lebih kecil cenderung memiliki tegangan yang lebih tinggi. Namun, saat frekuensi meningkat, tegangan Rx mencapai puncaknya di sekitar 100 Hz hingga 1000 Hz, tergantung pada nilai resistornya, dan kemudian mulai menurun tajam pada frekuensi yang lebih tinggi, terutama pada 10000 Hz. Penurunan tegangan ini lebih drastis untuk resistor dengan nilai lebih rendah, sementara resistor dengan nilai lebih tinggi, seperti 1000 Ohm, menunjukkan penurunan tegangan yang lebih moderat. Grafik ini mengilustrasikan bagaimana tegangan Rx berubah seiring dengan variasi frekuensi dan nilai resistor, yang penting dalam aplikasi elektronik dan sensor yang memerlukan pemilihan resistor yang tepat untuk menjaga stabilitas tegangan pada frekuensi tertentu. Resistor dengan nilai yang lebih besar cenderung memiliki tegangan yang lebih stabil pada frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan resistor yang lebih kecil, yang mengalami penurunan tegangan yang lebih drastis. Hasil ini dapat digunakan untuk memilih nilai resistor yang tepat dalam aplikasi yang melibatkan variasi frekuensi, terutama dalam konteks rangkaian elektronik atau sensor yang perlu mempertahankan tegangan stabil di berbagai frekuensi.

4.3 Analisis Pengaruh VTx terhadap Coil Voltage Rx

Untuk mengetahui pengaruh tegangan input (VTx) terhadap coil voltage penerima (VRx) yaitu dengan mensimulasikan melalui software simulasi *Multiphysi*. Simulasi dilakukan dengan mengatur *parametric sweep* yaitu memvariasikan tegangan input (VTx) yang akan disimulasikan pada sensor MIT. Pada gambar 4.6 menunjukkan hubungan antara frekuensi (kHz) dengan tegangan yang diterima (VRx) dan memvariasikan tegangan yang dikirim (VTx). Grafik ini menggambarkan bagaimana perubahan frekuensi mempengaruhi VRx dengan voltage input yang berbeda mulai dari 10 volt, 20 volt, 30 volt, 40 volt dan 50 volt. Berdasarkan gambar 4.6 dapat diketahui bahwa Voltage Tx sangat berpengaruh terhadap hasil voltage Rx yang diterima. Dalam hal ini voltage yang besar akan membuat hasil dari voltage Rx semakin besar dan baik saat menggunakan resistor tertentu.



Gambar 4.6 Grafik Variasi Voltage Tx dengan Voltage Rx dan Frekuensi

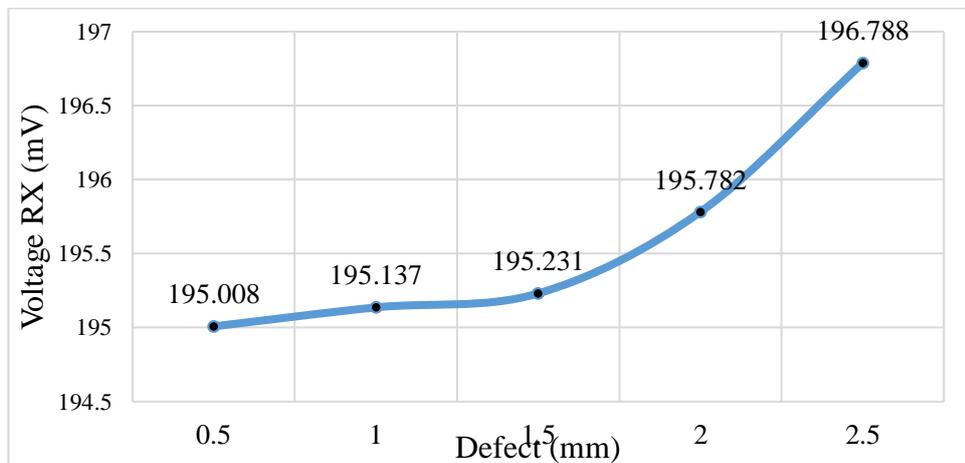
Grafik diatas tersebut menggambarkan hubungan antara tegangan keluaran (Voltage Rx) dan frekuensi pada berbagai tingkatan tegangan masukan (10 Volt, 20 Volt, 30 Volt, 40 Volt, dan 50 Volt). Secara umum, terlihat bahwa pada setiap tingkat tegangan masukan, tegangan keluaran (Voltage Rx) awalnya meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi, mencapai puncak pada frekuensi sekitar 10² kHz. Setelah mencapai titik puncak ini, tegangan keluaran mulai menurun drastis seiring dengan peningkatan frekuensi lebih lanjut hingga mencapai 10⁴ kHz. Misalnya, pada tegangan masukan 50 Volt, tegangan keluaran meningkat dari 0,911 Volt pada frekuensi 10 kHz menjadi 0,975 Volt pada 10² kHz, kemudian menurun tajam menjadi 0,019 Volt pada 10⁴ kHz. Pola yang sama juga terlihat pada tingkat tegangan masukan lainnya, di mana tegangan keluaran meningkat hingga puncak tertentu sebelum mengalami penurunan yang signifikan. Penurunan tajam setelah frekuensi mencapai titik tertentu menunjukkan adanya karakteristik resonansi dalam rangkaian atau sistem yang diuji, di mana terdapat frekuensi optimal sebelum efisiensi berkurang secara drastis pada frekuensi yang lebih tinggi. Ini menunjukkan bahwa sistem hanya dapat mempertahankan tegangan keluaran yang tinggi hingga frekuensi tertentu sebelum terjadi penurunan yang signifikan.

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 divariasasi 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 mewakilkan kejadian ini yaitu persamaan dari Hukum Faraday berikut.

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

Dalam persamaan Hukum Faraday di atas 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 4.7 menunjukkan hubungan antara ukuran cacat dengan voltage Rx yang diterima pada frekuensi optimal yaitu 100 kHz. Grafik 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:

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

Dimana k adalah konstanta yang mencakup faktor-faktor seperti sensitivitas coil. ΔB_{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 (σ). Sehingga dapat ditulis persamaan ΔB_{cacat} sebagai berikut:

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

Sehingga dapat dituliskan persamaan dari coil voltage Rx sebagai:

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

Persamaan yang dituliskan dalam konteks ini adalah persamaan yang mencoba menggambarkan hubungan antara ukuran cacat (d), konduktivitas (σ), 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. Secara spesifik, ketika ukuran cacat pada spesimen uji semakin besar, area yang dilalui medan magnet menjadi lebih luas, yang mengakibatkan perubahan lebih besar dalam fluks magnetik. Hal ini menyebabkan tegangan yang diinduksi pada coil penerima meningkat. Grafik pada gambar 4.7 dengan jelas mendemonstrasikan bahwa terdapat korelasi positif antara ukuran cacat dan tegangan (V_{Rx}), yang berarti bahwa sensor MIT efektif dalam mendeteksi dan membedakan ukuran cacat pada spesimen uji berdasarkan perubahan tegangan yang terukur.

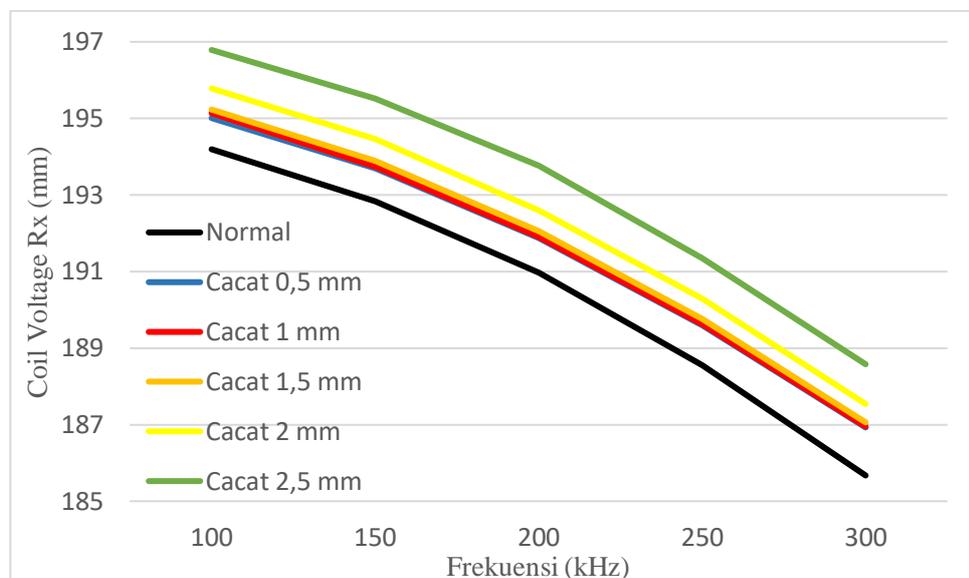
4.5 Analisis Kemampuan Sensor MIT untuk Mendeteksi Cacat di Sumbu Z

Berdasarkan beberapa hal di atas, 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 di atas spesimen uji yang di bawahnya 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.

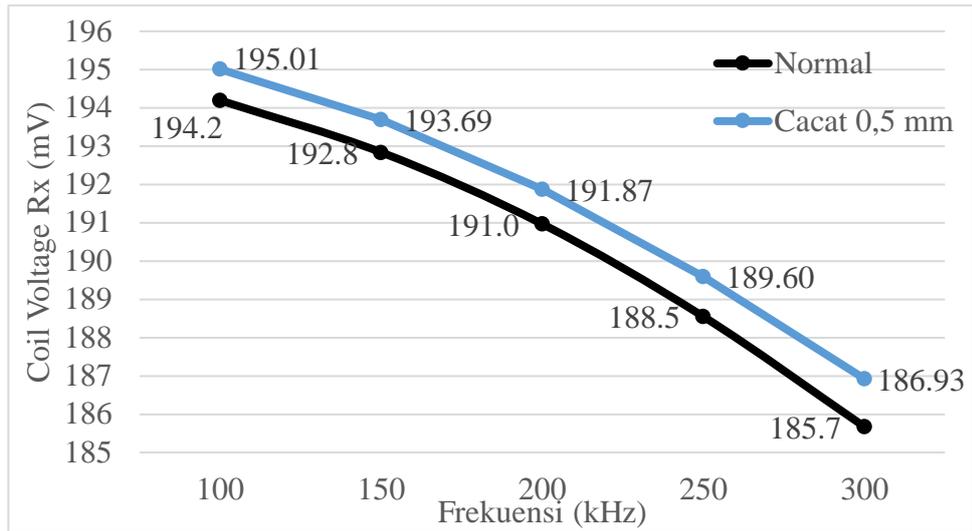
Adanya cacat pada spesimen uji diartikan sebagai adanya tambahan hambatan pada material spesimen uji. Menurut Hukum Ohm, besar tegangan (*voltage*) yang dihasilkan berbanding lurus dengan hambatan ketika arusnya konstan. Dapat diartikan semakin besar cacat maka akan semakin besar juga *voltage* yang 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.

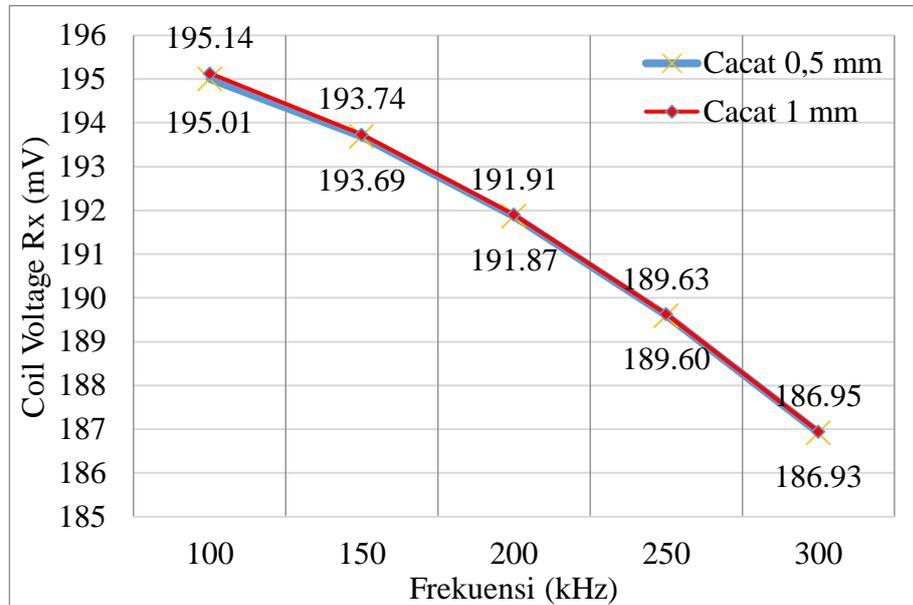
Berdasarkan gambar 4.8 menunjukkan bahwa sensor MIT yang dilakukan simulasi mendapatkan data coil voltage Rx yang berbeda-beda dari berbagai cacat yang dimodelkan. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa sensor MIT dapat digunakan untuk mendeteksi cacat yang berada dibagian bawah permukaan, selain itu juga sensor dapat membedakan berbagai ukuran cacat. Gambar 4.8 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 specimen cacat.



Gambar 4.8 Grafik Spesimen Normal vs Cacat



Gambar 4.9 Grafik Spesimen Normal vs Cacat 0,5 mm



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

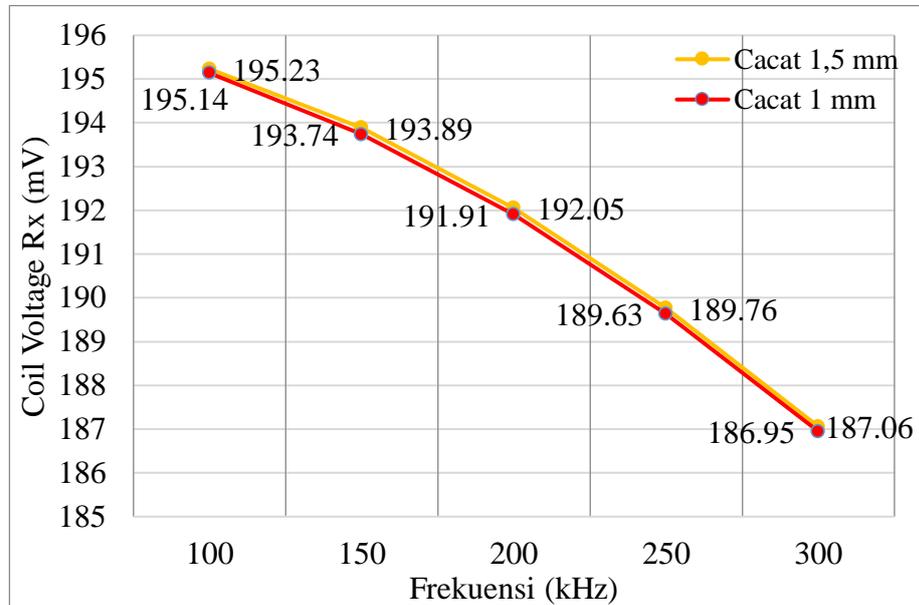
Berdasarkan gambar 4.9 di atas menjelaskan bahwa sensor MIT dapat membedakan spesimen uji yang normal dengan spesimen uji yang terdapat cacat pada bagian dalam permukaan sebesar 0,5 mm. Hal itu ditandai dengan perbedaan garis yang terbentuk dari nilai coil voltage Rx yang diterima pada spesimen normal 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.

Dari gambar 4.10 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 karena nilai yang diperoleh memiliki selisih yang sangat kecil yaitu di bawah 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.

Grafik 4.11 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 voltage Rx secara konsisten, terlepas dari ukuran cacat.



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

Penurunan coil voltage 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 di bawah 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

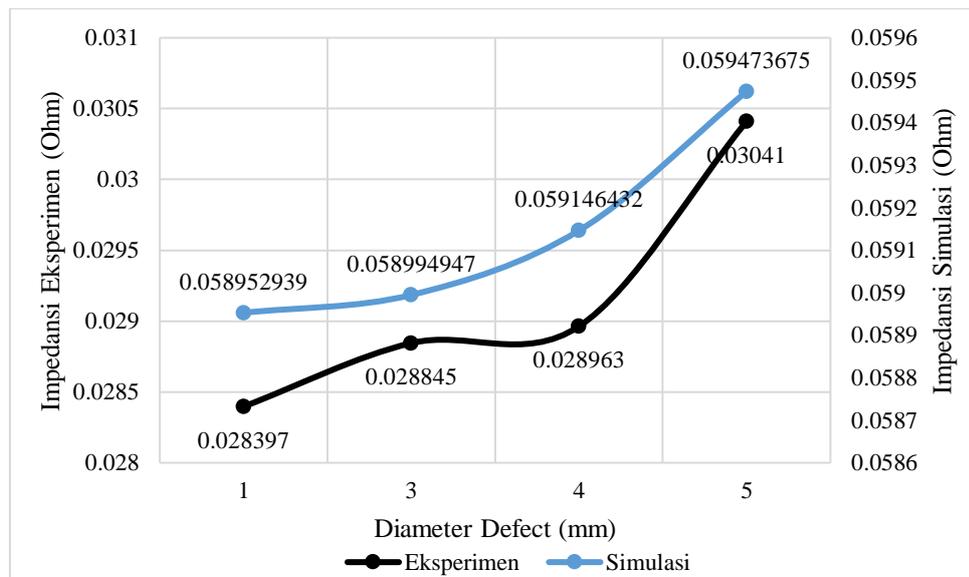
Validasi hasil deteksi cacat yang diperoleh dari simulasi dengan menggunakan data eksperimen. Proses ini sangat penting dilakukan untuk memastikan bahwa model simulasi yang digunakan mampu menggantikan kondisi sebenarnya secara akurat. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil deteksi cacat dari 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.

Spesimen 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

Gambar di atas menunjukkan perbandingan antara impedansi yang diukur dari eksperimen dan simulasi terhadap diameter defect pada material. Pada sumbu x, tertera ukuran diameter defect dalam milimeter (mm), sedangkan sumbu y kiri menampilkan impedansi eksperimen dalam satuan Ohm, dan sumbu y kanan menampilkan impedansi hasil simulasi juga dalam satuan Ohm. 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.

Terlihat bahwa impedansi baik dari hasil eksperimen maupun simulasi menunjukkan tren peningkatan seiring dengan bertambahnya diameter defect. Pada diameter defect terkecil (1 mm), impedansi eksperimen adalah sekitar 0.028397 Ohm, sementara impedansi hasil simulasi adalah sekitar 0.058952939 Ohm. Kedua nilai ini menunjukkan sedikit perbedaan yang cukup signifikan, dimana hasil simulasi memberikan nilai yang lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen. Ketika diameter defect meningkat menjadi 2 mm, nilai impedansi eksperimen sedikit meningkat menjadi sekitar 0.028845 Ohm, dan impedansi hasil simulasi juga mengalami peningkatan menjadi sekitar 0.058994947 Ohm. Tren ini terus berlanjut hingga diameter defect 5 mm, dimana nilai impedansi eksperimen mencapai sekitar 0.03041 Ohm dan hasil simulasi mencapai sekitar 0.059473675 Ohm.

Dapat disimpulkan bahwa terdapat konsistensi dalam peningkatan impedansi seiring dengan bertambahnya diameter defect pada kedua metode, meskipun hasil simulasi selalu menunjukkan nilai impedansi yang lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti ketidaksempurnaan dalam model simulasi atau kondisi eksperimental yang tidak sepenuhnya dapat direplikasi dalam simulasi. Namun, secara keseluruhan, baik eksperimen maupun simulasi menunjukkan tren yang serupa dalam respons impedansi terhadap peningkatan diameter defect. Hal ini mengindikasikan bahwa cacat yang lebih besar dalam material cenderung menghasilkan peningkatan nilai impedansi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian yang telah dilakukan merupakan simulasi sensor MIT untuk mendeteksi cacat menggunakan software simulasi *Multiphysics* (Comsol 6.2). Data yang dihasilkan dapat digunakan untuk membuktikan sensor MIT mempunyai kemampuan untuk mendeteksi cacat pada specimen uji di 3 sumbu (X, Y, Z), sehingga deteksi lokasi cacat lebih akurat. Salah satunya dibuktikan pada penelitian ini untuk mendeteksi cacat pada sumbu z (aksial) yaitu pada bagian dalam spesimen uji. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam mengidentifikasi berbagai ukuran cacat pada permukaan dan di bawah permukaan pelat baja. Validasi hasil simulasi dengan eksperimental yang telah dilakukan menunjukkan tren yang sama sehingga simulasi dapat dinyatakan valid.
2. Sensor MIT terbukti mampu mendeteksi cacat pada arah aksial (sumbu z) 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 untuk parameter sensor yang digunakan (jumlah lilitan Tx 115 lilitan, lilitan Rx 1150 lilitan, diameter luar Tx 5 mm, diameter dalam Tx 3 mm, diameter luar Rx 15 mm, diameter dalam 6 mm dan tinggi koil 10 mm). Semakin besar ukuran cacat yang terdeteksi maka voltage Rx yang diterima akan semakin besar, hal tersebut sesuai dengan hukum faraday tentang induksi magnet, dimana fluks magnet sama dengan medan magnet dikalikan luas area. Data yang dihasilkan pada deteksi arah sumbu z tersebut merupakan suatu keunggulan sensor MIT dalam deteksi cacat di bawah permukaan, sehingga lokasi cacat dapat diketahui lebih akurat.

5.2 Saran

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

1. Untuk deteksi cacat sesungguhnya pada material diperlukan pengaturan ulang parameter sensor MIT agar dapat mendeteksi cacat yang halus dan dapat membedakan ukuran cacat dengan perbedaan secara signifikan dan untuk penelitian lebih lanjut dapat dilakukan variasi ukuran cacat dengan perbedaan kedalaman pada benda uji.
2. Penggunaan sensor MIT dalam simulasi ini menunjukkan potensi untuk diterapkan pada tahap eksperimen dan implementasi pemeriksaan non-destruktif dalam industri manufaktur dan konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. N. Fitriani, *INSPEKSI CACAT PADA SAMBUNGAN LAS PELAT BAJA KARBON RENDAH MENGGUNAKAN MAGNETIC INDUCTION TOMOGRAPHY DENGAN SENSOR PLANAR 2 CHANNEL*. Cilegon, 2016.
- [2] A. Y. Saputra, *KARAKTERISASI DESAIN SENSOR MAGNETIC INDUCTION TOMOGRAPHY UNTUK INSPEKSI JENIS CACAT LAS PADA UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA CILEGON - BANTEN*. Cilegon, 2024.
- [3] Mulyadi, Iswanto, Jamaluddin, M. Nashrullah, and A. Y. Prajati, *Buku Ajar Teknologi Pengelasan*. 2015.
- [4] T. Endramawan, E. Haris, F. Dionisius, and Y. Prika, “Analisa Hasil Pengelasan SMAW 3G Butt Joint Menggunakan Non Destructive Test Penetrant Testing (NDT-PT) Berdasarkan Standar ASME,” *Politeknik Negeri Indramayu*, pp. 8–12, 2017.
- [5] S. P. P. Warman, “ANALISIS FAKTOR PENYEBAB CACAT PENGELASAN PADA PIPA (Study Kasus Pada Pipa Distribusi PDAM Kabupaten Kutai Barat),” *Jurnal Mekanikal*, vol. 8, no. 2, pp. 730–736, 2017.
- [6] S. Sahlan, “Analisis Cacat Las Incomplete Fusion Dan Retak Memanjang Pada Waterwall Tube Boiler PLTU Paiton Unit 1,” *Semesta Teknika*, vol. 18, no. 1, pp. 10–20, 2016, doi: 10.18196/st.v18i1.701.
- [7] S. A. Rizvia and W. Alib, “Welding defects , Causes and their Remedies : A Review,” vol. 2, no. 2, pp. 39–47, 2019.
- [8] F. Kurniadi, F. Handoko, and T. Priyasmanu, “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*, vol. 5, no. 1, pp. 15–24, 2022.
- [9] S. Sulaiman, B. Utomo, and I. P. A. Ardi Wijana, “Analisis Uji Tidak Merusak Pada Sambungan Las Lambung Frame 103 Bagian Kamar Mesin

- Kapal Patroli 73 Dengan Metode Radiography Test,” *Gema Teknologi*, vol. 20, no. 4, pp. 146–152, 2020, doi: 10.14710/gt.v20i4.28516.
- [10] F. Widyawati and L. Marano, “Identifikasi Cacat Lasan Fcaw Pada Fondasi Mesin Kapal Menggunakan Metode Ultrasonic Testing,” *Jurnal TAMBORA*, vol. 5, no. 2, pp. 53–58, 2021, doi: 10.36761/jt.v5i2.1124.
- [11] A. A. Supriyanto and Syafrizal, “Penentuan Cacat Dengan Metode Ultrasonic Testing,” *Jurnal Ramatekno*, vol. 2, no. 1, pp. 7–13, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.pei.ac.id/index.php/JRT1/article/view/33>
- [12] D. Bina, S. Kompetensi, and D. A. N. Pelatihan, “BUKU INFORMASI MELAKUKAN ULTRASONIC TEST (UT),” 2018.
- [13] R. Rais, “STUDI PERBANDINGAN KECEPATAN DAN KETELITIAN PENGUJIAN MAGNETIC PARTICLE TESTING (MT) DAN EDDY CURRENT TESTING (ECT) PADA MATERIAL BAJA KARBON,” *TUGAS AKHIR – MN 141581*, pp. 1–69, 2015.
- [14] A. Alexandri and T. Sugandika, “Magnetic Particle Inspection (Mpi) Sebagai Salah Satu Metode Inspeksi Menara Pengeboran,” *Forum Teknologi*, vol. 07, no. 1, pp. 76–91, 2017.
- [15] B. Yuniyanto, P. Wicaksana, J. Sudharto, K. UNDIP Tembalang, and J. Tengah, “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*, vol. 25, no. 2, pp. 54–60, 2023.
- [16] L. Pardede, W. Hendroprasetyo, and A. Putra, “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*, vol. 4, no. 1, pp. 103–111, 2015.
- [17] T. Endramawan, E. Haris, F. Dionisius, and Y. Prika, “APLIKASI NON DESTRUCTIVE TEST PENETRANT TESTING (NDT-PT) UNTUK ANALISIS HASIL PENGELASAN SMAW 3G BUTT JOINT,” *Jurnal*

Teknologi Terapan, vol. 3, no. September, pp. 44–48, 2017.

- [18] I. Suharyadi, “METODE HIGH FREQUENCY ELECTRICAL RESISTANCE WELDING PADA PROSES PEMBUATAN PIPA BAJA STKM 13B,” pp. 12–22.
- [19] Y. G. Wicaksono, H. F. Rahmatullah, R. Artika, S. Ismarwanti, and R. Sigit, “SIMULASI UJI TAK MERUSAK PELAT ELEMEN BAKAR PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE PENETRANT TEST,” *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 28, no. 3, pp. 143–152, 2022.
- [20] S. R. Sulistiyanti, S. Purwiyanti, and G. A. Pauzi, *Sensor dan Prinsip Kerjanya*, vol. 6, no. 1. 2017. [Online]. Available: <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf><http://fiskal.kemenkeu.go.id/ejournal><http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006><https://doi.org/10.1>
- [21] E. . Kriezis, T. Tsiboukis, S. M. Panas, and A. Tegopoulos, “Eddy Currents : Theory and Applications,” no. June, 2013, doi: 10.1109/5.168666.
- [22] A. Suseno, T. Prayuda, and H. Akbar, “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*, vol. 10, no. 2, pp. 14–21, 2021.
- [23] D. U. Suwarno, “Alat Peraga Efek Arus Eddy Dengan Menggunakan Piringan Magnet Berputar,” *PROSIDING SNIPS 2016*, pp. 268–274, 2016.
- [24] P. Chandra and R. Bhagi, “Basics Eddy Current Testing : Basics,” no. May, 2014.
- [25] S. Johanes, W. Hendroprasetyo, and A. Putra, “Analisis Kemampuan Pendeteksian Pengujian Eddy Current Testing (ECT) terhadap Crack pada Bollard dengan Bahan Casting,” vol. 10, no. 1, pp. 36–43, 2021.
- [26] H. Y. Wei and A. J. Wilkinson, “Design of a sensor coil and measurement electronics for magnetic induction tomography,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 12, pp. 3853–3859, 2011, doi: 10.1109/TIM.2011.2147590.

- [27] H. Wei and M. Soleimani, "A Magnetic Induction Tomography System for Prospective Industrial Processing Applications," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 406–410, 2012, doi: 10.1016/S1004-9541(12)60404-2.
- [28] M. Saiful, B. Mansor, Z. Zakaria, and S. Sahlan, "Magnetic Induction Tomography: A Brief Review Jurnal Teknologi Magnetic Induction Tomography: A Brief Review," no. November, 2015, doi: 10.11113/jt.v73.4252.
- [29] M. Al Huda, D. Haryono, H. Nugraha, A. N. Fitriani, and W. Purwo Taruno, "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*, no. 2, pp. 2–6, 2020, doi: 10.1109/ICoSTA48221.2020.1570610828.
- [30] A. J. Peyton, Z. Z. Yu, G. Lyon, and J. Ferreira, "An overview of electromagnetic inductance tomography: description of three different systems," no. March, 1996, doi: 10.1088/0957-0233/7/3/006.
- [31] Z. Cao, B. Ye, H. Cao, Y. Zou, Z. Zhu, and H. Xing, "Biplane Enhancement Coil for Magnetic Induction Tomography of Cerebral Hemorrhage," *Biosensors*, vol. 14, no. 5, 2024, doi: 10.3390/bios14050217.
- [32] C. *Multiphysics*, *The COMSOL Multiphysics Reference Manual*. 2015. [Online]. Available: www.comsol.com/blogs
- [33] Comsol, *Comsol Multiphysics User's Guides*, Version 4. United State, 2012.

LAMPIRAN

Lampiran 1. 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

Lampiran 2. Data Hasil Eksperimen Spesimen Cacat

Frekuensi (Hz)	1	3	4	5
100000	0,017665	0,047462	0,028064	0,039129
100800	0,030903	0,032277	0,031112	0,033934
101600	0,030784	0,032247	0,03107	0,033782
102400	0,030839	0,03216	0,030952	0,033811
103200	0,030763	0,032069	0,030946	0,033712
104000	0,030704	0,032398	0,03094	0,033654
104800	0,03071	0,032049	0,030896	0,033537
105600	0,030746	0,032036	0,030854	0,033535
106400	0,030698	0,032106	0,03087	0,033514
107200	0,030681	0,032014	0,030923	0,033393
108000	0,03065	0,032005	0,030786	0,033453
108800	0,030571	0,032052	0,030798	0,033366
109600	0,030617	0,031982	0,030772	0,033327
110400	0,030595	0,031969	0,030679	0,033349
111200	0,030589	0,031875	0,030708	0,033284
112000	0,030222	0,032052	0,030758	0,033056
112800	0,030548	0,031923	0,030688	0,033278
113600	0,030523	0,031861	0,030647	0,033337
114400	0,030553	0,031868	0,03072	0,033383
115200	0,030504	0,031852	0,030669	0,033419
116000	0,030563	0,031763	0,030644	0,033491
116800	0,030611	0,031852	0,03083	0,033516
117600	0,030601	0,031852	0,030885	0,033573
118400	0,030652	0,031845	0,030917	0,033637
119200	0,030768	0,031902	0,030969	0,033686
120000	0,032127	0,033033	0,03084	0,03325
120800	0,030912	0,032036	0,031048	0,033711
121600	0,030967	0,032053	0,031221	0,033736
122400	0,031141	0,032185	0,031324	0,033941
123200	0,031246	0,03225	0,031474	0,034018
124000	0,031327	0,032469	0,031716	0,034431
124800	0,03135	0,032381	0,031626	0,034342
125600	0,030741	0,031949	0,03091	0,033649
126400	0,030464	0,031581	0,030607	0,033249
127200	0,030561	0,031634	0,030552	0,033216

Frekuensi (Hz)	1	3	4	5
128000	0,030643	0,031558	0,030673	0,033233
128800	0,030668	0,031753	0,030704	0,033248
129600	0,030824	0,031789	0,03077	0,033314
130400	0,030774	0,031872	0,030921	0,033349
131200	0,030907	0,031804	0,030906	0,033352
132000	0,031099	0,031843	0,030863	0,03347
132800	0,03103	0,031896	0,031032	0,033421
133600	0,031071	0,03201	0,031031	0,033433
134400	0,031162	0,032047	0,031136	0,033452
135200	0,031153	0,032101	0,031146	0,033472
136000	0,031182	0,03201	0,031254	0,033443
136800	0,031242	0,032096	0,031162	0,033537
137600	0,031224	0,03224	0,031246	0,033576
138400	0,031389	0,032193	0,031382	0,03364
139200	0,031372	0,03225	0,031354	0,033649
140000	0,030453	0,031103	0,03333	0,033344
140800	0,031426	0,032294	0,031478	0,033673
141600	0,031517	0,032317	0,031522	0,033757
142400	0,031499	0,032346	0,031594	0,033802
143200	0,031591	0,032454	0,03162	0,033779
144000	0,03172	0,032426	0,031691	0,033853
144800	0,031737	0,032459	0,031688	0,033863
145600	0,031662	0,032555	0,031693	0,033955
146400	0,031768	0,032566	0,031767	0,033929
147200	0,031873	0,032592	0,031802	0,033953
148000	0,03194	0,032647	0,031811	0,03404
148800	0,03186	0,03263	0,031929	0,03406
149600	0,031915	0,032668	0,031885	0,034066
150400	0,032002	0,032706	0,031973	0,034158
151200	0,032011	0,032777	0,032039	0,034123
152000	0,032035	0,032873	0,03205	0,034131
152800	0,032113	0,032846	0,032169	0,034199
153600	0,032117	0,032906	0,032171	0,034239
154400	0,032228	0,03285	0,032272	0,034301
155200	0,032243	0,032984	0,032248	0,034317
156000	0,032303	0,032958	0,032267	0,034344

Frekuensi (Hz)	1	3	4	5
156800	0,03228	0,032983	0,032332	0,034335
157600	0,032305	0,032953	0,032387	0,034258
158400	0,032313	0,033049	0,032392	0,034309
159200	0,032368	0,033069	0,032419	0,034379
160000	0,029607	0,033764	0,032089	0,039033
160800	0,032512	0,033086	0,032486	0,034426
161600	0,032538	0,033065	0,032475	0,034495
162400	0,032491	0,033152	0,032582	0,034397
163200	0,032563	0,033127	0,032553	0,034494
164000	0,03253	0,033045	0,032592	0,034474
164800	0,032644	0,033141	0,032652	0,034481
165600	0,032595	0,033201	0,032603	0,034522
166400	0,032666	0,03322	0,032658	0,034482
167200	0,032674	0,033186	0,032684	0,034504
168000	0,03263	0,033168	0,032647	0,034608
168800	0,032661	0,033197	0,032656	0,034555
169600	0,032746	0,0332	0,032674	0,03454
170400	0,032696	0,03318	0,032778	0,034538
171200	0,032698	0,033212	0,032715	0,03454
172000	0,032634	0,033259	0,032856	0,034566
172800	0,032742	0,033167	0,032749	0,034511
173600	0,032756	0,03319	0,032738	0,034557
174400	0,032707	0,033149	0,032822	0,034555
175200	0,032811	0,033221	0,032817	0,03454
176000	0,032719	0,033263	0,03286	0,034415
176800	0,03281	0,033208	0,032803	0,034493
177600	0,032793	0,033226	0,032815	0,034537
178400	0,032756	0,033246	0,032811	0,034566
179200	0,032701	0,033196	0,032872	0,034469
180000	0,03179	0,033026	0,032143	0,035047
180800	0,032769	0,033173	0,032861	0,034529
181600	0,032821	0,033127	0,03286	0,034501
182400	0,032857	0,033172	0,032827	0,034509
183200	0,032848	0,033128	0,032818	0,034504
184000	0,032854	0,033135	0,032867	0,0345
184800	0,032829	0,033112	0,032845	0,034481

Frekuensi (Hz)	1	3	4	5
185600	0,032815	0,033183	0,032909	0,034495
186400	0,032856	0,033147	0,032813	0,034419
187200	0,032794	0,033105	0,032884	0,034482
188000	0,032866	0,033218	0,032855	0,0345
188800	0,032937	0,03317	0,032895	0,034483
189600	0,032842	0,033132	0,032849	0,034434
190400	0,032841	0,033136	0,03284	0,034414
191200	0,032821	0,033122	0,032819	0,034444
192000	0,032839	0,033107	0,032838	0,034354
192800	0,032775	0,033046	0,032803	0,034361
193600	0,032817	0,033059	0,032872	0,034329
194400	0,032767	0,033057	0,032882	0,034315
195200	0,032817	0,033074	0,032874	0,034311
196000	0,032794	0,033066	0,032812	0,034321
196800	0,032728	0,033082	0,032844	0,034285
197600	0,032766	0,033011	0,032886	0,034259
198400	0,032796	0,03301	0,032886	0,034242
199200	0,032805	0,033039	0,032888	0,034209
200000	0,028946	0,0385	0,041577	0,040768
200800	0,032771	0,033013	0,032849	0,034196
201600	0,03271	0,033007	0,032923	0,034195
202400	0,032702	0,032989	0,032782	0,034175
203200	0,032757	0,03298	0,032871	0,034187
204000	0,032725	0,032944	0,032886	0,034182
204800	0,032686	0,032887	0,032765	0,03419
205600	0,032667	0,032833	0,032792	0,034178
206400	0,032618	0,032868	0,032836	0,03415
207200	0,032628	0,032821	0,032727	0,034144
208000	0,032624	0,032863	0,032779	0,033956
208800	0,032573	0,032855	0,032733	0,034058
209600	0,032604	0,032782	0,032748	0,03401
210400	0,03255	0,032771	0,032689	0,03406
211200	0,032532	0,032786	0,032744	0,034015
212000	0,032489	0,032818	0,032684	0,034025
212800	0,032551	0,032757	0,032641	0,033993
213600	0,032517	0,032748	0,032701	0,03391

Frekuensi (Hz)	1	3	4	5
214400	0,03254	0,032745	0,032684	0,033946
215200	0,032473	0,032717	0,032609	0,03393
216000	0,032473	0,032688	0,032605	0,033897
216800	0,032382	0,032691	0,032611	0,033851
217600	0,032425	0,032665	0,032636	0,03381
218400	0,032426	0,032652	0,032538	0,033765
219200	0,032429	0,032595	0,03255	0,033789
220000	0,032588	0,03251	0,032107	0,034373
220800	0,032323	0,032558	0,032465	0,033721
221600	0,032397	0,032519	0,032493	0,033669
222400	0,032288	0,032477	0,032454	0,033754
223200	0,032329	0,032477	0,032477	0,033699
224000	0,032317	0,032408	0,032445	0,033619
224800	0,032277	0,032444	0,032442	0,033651
225600	0,032183	0,032393	0,032417	0,033617
226400	0,032218	0,032364	0,032352	0,033621
227200	0,032076	0,032305	0,03234	0,033615
228000	0,032038	0,032256	0,032244	0,033526
228800	0,032049	0,032237	0,032219	0,033524
229600	0,031957	0,032192	0,032198	0,03346
230400	0,031991	0,032154	0,032176	0,033443
231200	0,031871	0,032131	0,032135	0,033465
232000	0,031748	0,032057	0,032074	0,033355
232800	0,03183	0,032034	0,031961	0,033343
233600	0,03171	0,03196	0,031958	0,033277
234400	0,031728	0,031931	0,031872	0,033246
235200	0,031606	0,031892	0,031872	0,033181
236000	0,031564	0,031795	0,031818	0,033117
236800	0,031573	0,031823	0,031787	0,033082
237600	0,03147	0,031752	0,031718	0,033023
238400	0,031357	0,031677	0,031581	0,032972
239200	0,031369	0,031646	0,031607	0,032958
240000	0,034198	0,032247	0,029889	0,032992
240800	0,031283	0,031559	0,031517	0,032853
241600	0,031283	0,031473	0,031423	0,032775
242400	0,031221	0,031431	0,031336	0,032751

Frekuensi (Hz)	1	3	4	5
243200	0,031164	0,03145	0,031356	0,03277
244000	0,031102	0,031372	0,031326	0,032621
244800	0,031084	0,031327	0,031262	0,032654
245600	0,031037	0,031288	0,031194	0,03256
246400	0,030972	0,031223	0,031176	0,032557
247200	0,030942	0,031189	0,031031	0,032465
248000	0,030896	0,03112	0,031022	0,032467
248800	0,030878	0,031069	0,030999	0,032348
249600	0,03083	0,031002	0,030993	0,032321
250400	0,030732	0,030983	0,030962	0,032331
251200	0,030735	0,030929	0,030892	0,03232
252000	0,030676	0,030921	0,030875	0,032231
252800	0,030657	0,0309	0,030783	0,03219
253600	0,03062	0,030801	0,030773	0,032213
254400	0,030603	0,030825	0,030768	0,032138
255200	0,030496	0,030774	0,030729	0,032092
256000	0,030495	0,030703	0,030752	0,032016
256800	0,030458	0,030687	0,030645	0,032061
257600	0,030429	0,030651	0,030692	0,031978
258400	0,030367	0,030593	0,03068	0,031952
259200	0,030311	0,030529	0,030586	0,031965
260000	0,030613	0,031686	0,030934	0,030797
260800	0,030208	0,030463	0,030529	0,031837
261600	0,030221	0,030473	0,030492	0,03176
262400	0,030166	0,03041	0,030464	0,031772
263200	0,030179	0,030349	0,030422	0,031713
264000	0,030206	0,030332	0,030392	0,031694
264800	0,030117	0,030336	0,030367	0,031655
265600	0,030029	0,030279	0,030368	0,031616
266400	0,030073	0,030266	0,030339	0,031614
267200	0,030096	0,030189	0,030322	0,031564
268000	0,029997	0,030277	0,030259	0,031465
268800	0,029999	0,030151	0,030207	0,031454
269600	0,029972	0,030178	0,03022	0,031407
270400	0,029986	0,030053	0,030175	0,03136
271200	0,029878	0,030078	0,030127	0,031316

Frekuensi (Hz)	1	3	4	5
272000	0,029956	0,030031	0,030149	0,031314
272800	0,02987	0,029998	0,030125	0,031302
273600	0,029825	0,029959	0,030063	0,031204
274400	0,029832	0,029936	0,030003	0,031191
275200	0,029778	0,02988	0,029995	0,031151
276000	0,029682	0,029885	0,029914	0,031089
276800	0,029647	0,029845	0,029899	0,031044
277600	0,029653	0,029838	0,029883	0,03107
278400	0,029629	0,029796	0,02988	0,030943
279200	0,029647	0,029744	0,029822	0,030934
280000	0,029492	0,030397	0,029738	0,03095
280800	0,029592	0,029701	0,029804	0,030918
281600	0,029542	0,029689	0,029702	0,030846
282400	0,029514	0,029626	0,029667	0,030788
283200	0,029471	0,029659	0,029673	0,03079
284000	0,029442	0,029587	0,029681	0,030771
284800	0,029384	0,029502	0,029655	0,030737
285600	0,029341	0,029532	0,029662	0,030687
286400	0,029385	0,029474	0,029583	0,030652
287200	0,029309	0,029464	0,029567	0,03061
288000	0,029309	0,029468	0,029599	0,030628
288800	0,029318	0,029391	0,02952	0,03057
289600	0,029258	0,029411	0,029523	0,030504
290400	0,029226	0,029344	0,029491	0,030514
291200	0,029215	0,029348	0,029421	0,030465
292000	0,029211	0,029316	0,029337	0,030445
292800	0,029187	0,029279	0,029387	0,030403
293600	0,02911	0,029215	0,029402	0,030394
294400	0,029111	0,029169	0,029333	0,030346
295200	0,029127	0,029191	0,029292	0,030325
296000	0,029088	0,02908	0,029255	0,030263
296800	0,029007	0,029158	0,029178	0,030245
297600	0,028935	0,029126	0,02915	0,03026
298400	0,029	0,02907	0,029155	0,03024
299200	0,02883	0,029102	0,02917	0,030186
300000	0,028397	0,028845	0,028963	0,03041