

**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

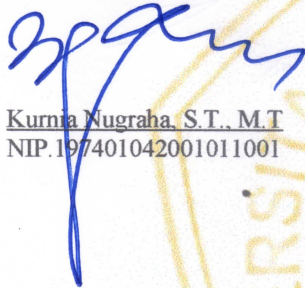
### Simulasi Deteksi Cacat pada Pelat Baja Menggunakan Pemodelan Sensor Magnetic Induction Tomography (MIT) dengan Software Simulasi Multiphysics

Dipersiapkan dan disusun Oleh :

**Radhi Ramadhan**  
3331200026

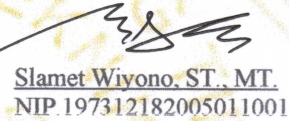
telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
pada tanggal, 16 Agustus 2024

Pembimbing Utama

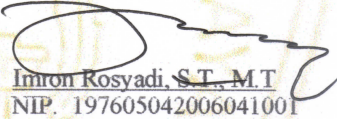


Kurnia Nugraha, S.T., M.T  
NIP.197401042001011001

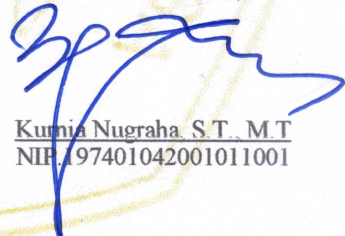
Anggota Dewan Penguji



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

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>PERSETUJUAN</b> .....	iii
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b> .....	iv
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....	4
1.5 Metodologi Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
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
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	

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 $\Omega$ (Ohm).....	36
Tabel 4.2 Hasil Simulasi dengan Resistor 100 $\Omega$ (Ohm).....	38
Tabel 4.3 Hasil Simulasi dengan Resistor 1000 $\Omega$ (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  $\gamma$  yang berbahaya bagi kesehatan manusia, instrumen yang digunakan memiliki harga yang cukup mahal, proses pelaksanaan pengujian dilakukan pada lingkungan steril yang tidak

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

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

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

koil spiral, penelitian ini berhasil menunjukkan adanya indikasi cacat pada hasil lasan baja dengan cara merekonstruksi citra dari data hasil pengujian MIT yang telah dilakukan. Namun hasil dari rekonstruksinya masih terdapat kekurangan, yaitu citra yang diperoleh tidak dapat menunjukkan lokasi cacat secara pasti dan tidak menunjukkan bentuk cacat seperti kondisi nyata [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.

## 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](http://www.comsol.com/blogs)
- [33] Comsol, *Comsol Multiphysics User's Guides*, Version 4. United State, 2012.