

**KARAKTERISASI DESAIN SENSOR *MAGNETIC INDUCTION*  
*TOMOGRAPHY* UNTUK INSPEKSI JENIS CACAT LAS PADA  
PELAT BAJA**

**SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan  
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh :

Aldy Yana Saputra  
3334190018

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA  
CILEGON - BANTEN  
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

**KARAKTERISASI DESAIN SENSOR *MAGNETIC INDUCTION*  
*TOMOGRAPHY* UNTUK INSPEKSI JENIS CACAT LAS PADA  
PELAT BAJA**

**SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan  
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



**Dr. Didied Haryono, S.T., M.T.**  
NIP. 196705302002121001

Pembimbing II



**Imamul Muttakin, S.T., M.Eng., Ph.D.**  
NIP. 198705262014041001

LEMBAR PERSETUJUAN

**KARAKTERISASI DESAIN SENSOR *MAGNETIC INDUCTION*  
*TOMOGRAPHY* UNTUK INSPEKSI JENIS CACAT LAS PADA  
PELAT BAJA**

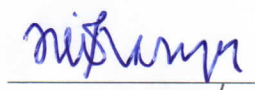
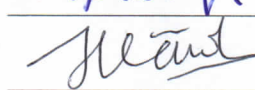
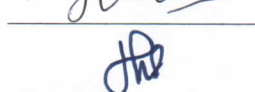
**SKRIPSI**

Disusun dan diajukan oleh:

**Aldy Yana Saputra**

**3334190018**

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 06 Februari 2024

	Susunan Dewan Penguji	Tanda Tangan
Penguji I	: Dr. Didied Haryono, S.T., M.T.	
Penguji II	: Imamul Muttakin, S.T., M.Eng., Ph.D.	
Penguji III	: Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si.	

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



**Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.**

NIP. 198003072005011002

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Karakterisasi Desain Sensor *Magnetic Induction Tomography* Untuk Inspeksi Jenis Cacat Las Pada Pelat Baja

Nama Mahasiswa : Aldy Yana Saputra

NIM : 3334190018

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 06 Februari 2024



**Aldy Yana Saputra**  
NIM. 3334190018

## ABSTRAK

Salah satu proses fabrikasi yang saat ini banyak digunakan di industri adalah proses pengelasan. Pengelasan merupakan proses penyambungan dua buah logam dengan mencairkan sebagian logam induk dan pengisi dengan atau tanpa logam tambahan dan menghasilkan sambungan kontinu. Pasca pengelasan pengendalian kualitas produk hasil lasan menjadi salah satu langkah penting dan perlu dilakukan, karena sering ditemukan kegagalan atau cacat lasan pada produk sehingga perlu dilakukan pengujian. Pengujian yang umum digunakan untuk mengetahui adanya cacat lasan atau kegagalan pada produk adalah pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Test*). Salah satu metode NDT yang saat ini sedang dikembangkan adalah metode *Magnetic Induction Tomography* (MIT). Metode MIT ini mempunyai kelebihan seperti bersifat *non-intrusive*, *contactless*, aman dari radiasi dan relatif murah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa efektif desain sensor yang dikembangkan dalam menginspeksi cacat las serta menganalisis pola sinyal hasil inspeksi. Penelitian ini menggunakan jenis desain sensor tipe I, II, dan III serta sampel uji yang digunakan adalah pelat baja SS400 dengan ukuran 10 cm x 10 cm. Eksperimen dilakukan dengan meletakkan sensor di atas cacat las dan sensor akan menginspeksi selama frekuensi 100 kHz – 500 kHz. Cacat yang diinspeksi berupa cacat retak dan cacat porositas diameter 5 mm dengan kedalaman 3, 7, serta 11 mm. Pada penelitian ini besaran yang terukur adalah nilai impedansi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor tipe I menjadi sensor dengan karakteristik yang paling optimal dilihat berdasarkan nilai gap impedansi baja dengan udara yang paling jauh dan sensitivitas dalam inspeksi baja cacat. Kemudian hasil pengukuran baja cacat menunjukkan nilai impedansi baja cacat berada di antara nilai impedansi baja normal dan udara. Pada frekuensi 172 kHz nilai impedansi cacat porositas kedalaman 11 mm sebesar 34.587 m $\Omega$ , nilai impedansi cacat porositas kedalaman 7 mm sebesar 34.556 m $\Omega$ , dan nilai impedansi cacat porositas kedalaman 3 mm sebesar 34.518 m $\Omega$ . Hal tersebut menunjukkan pengukuran dengan sensor tipe I sudah dapat membedakan cacat porositas dengan variasi kedalaman dengan pengukuran optimum pada kedalaman 3 mm. Selain itu, sensor tipe I juga sudah sensitif untuk melihat perbedaan bentuk cacat yaitu cacat retak dan cacat porositas yang ditunjukkan dengan hasil nilai relatif impedansi pada frekuensi 172 kHz cacat retak menjadi nilai yang paling kecil dibandingkan dengan nilai relatif impedansi cacat porositas sebesar 0.222 m $\Omega$ . Sedangkan pada nilai relatif impedansi cacat porositas variasi kedalaman, nilai dari yang paling tinggi ke rendah adalah 0.356 m $\Omega$  pada kedalaman 11 mm, 0.325 m $\Omega$  pada kedalaman 7 mm, dan 0.287 m $\Omega$  pada kedalaman 3 mm.

Kata kunci: Cacat las, desain sensor, impedansi, medan magnet, MIT

## ABSTRACT

One fabrication process that is currently widely used in industry is the welding process. Welding is the process of joining two metals by melting some of the parent metal and filler with or without additional metal and producing a continuous connection. After welding, controlling the quality of the welded product is one of the important steps and needs to be done, because there are often failures or weld defects in the product so that testing is needed. Tests that are commonly used to determine the presence of weld defects or failures in products are non-destructive tests (NDT). One of the NDT methods currently being developed is the Magnetic Induction Tomography (MIT) method. This MIT method has advantages such as being non-intrusive, contactless, safe from radiation and relatively cheap. This study aims to determine how effective the developed sensor design is in inspecting weld defects and analyzing the signal pattern of the inspection results. This research uses type I, II, and III sensor designs and the test sample used is SS400 steel plate with a size of 10 cm x 10 cm. Experiments were conducted by placing the sensor over the weld defect and the sensor will inspect during the frequency of 100 kHz - 500 kHz. The defects inspected were crack defects and porosity defects of 5 mm diameter with depths of 3, 7, and 11 mm. In this study, the measured quantity is the impedance value. The results showed that the type I sensor is the sensor with the most optimal characterization based on the value of the impedance gap between steel and air and sensitivity in the inspection of defective steel. Then the measurement results of defective steel show that the impedance value of defective steel is between the impedance value of normal steel and air. At a frequency of 172 kHz, the impedance value of 11 mm depth porosity defect is 34.587 m $\Omega$ , the impedance value of 7 mm depth porosity defect is 34.556 m $\Omega$ , and the impedance value of 3 mm depth porosity defect is 34.518 m $\Omega$ . This shows that measurements with type I sensors can distinguish porosity defects with depth variations with optimum measurements at a depth of 3 mm. In addition, type I sensors have also been sensitive to see the difference in the form of defects, namely cracks and porosity defects, which are indicated by the results of the relative value of impedance at a frequency of 172 kHz, cracking defects being the smallest value compared to the relative value of impedance of porosity defects of 0.222 m $\Omega$ . While the relative impedance value of porosity defects varies in depth, the values from highest to lowest are 0.356 m $\Omega$  at a depth of 11 mm, 0.325 m $\Omega$  at a depth of 7 mm, and 0.287 m $\Omega$  at a depth of 3 mm.

Keywords: Weld defects, sensor design, impedance, magnetic fields, MIT

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan karunia, nikmat kesehatan, serta kesempatan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **Karakterisasi Desain Sensor *Magnetic Induction Tomography* Untuk Inspeksi Jenis Cacat Las Pada Pelat Baja**. Skripsi ini dipersembahkan khusus oleh penulis tidak hanya untuk CTECH Labs Edwar Technology maupun Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, melainkan untuk semua pihak yang tertarik dengan topik riset ini. Sehingga dengan demikian segala harapan penulis yang tersirat untuk kemajuan bangsa Indonesia dapat terus berkembang tidak hanya sekedar gagasan tertulis, melainkan bentuk yang realistik. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak rasa terimakasih kepada

1. Bapak Dr. Eng. Abdul Aziz, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa;
2. Bapak Dr. Didied Haryono, S.T., M.T. sebagai Pembimbing I pada Seminar Proposal Skripsi.
3. Bapak Imamul Muttakin, S.T., M.Eng., PhD. selaku pembimbing II skripsi atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
4. Keluarga penulis serta teman-teman yang senantiasa mendoakan dan memberi dukungan selama proses penyusunan proposal skripsi penulis.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kesalahan serta kekurangan. Karenanya, penulis mengharapkan kritik serta saran dari pembaca agar proposal ini

menjadi lebih baik. Penulis berharap semoga proposal skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca atau sebagai bahan kajian serta studi sebagai sumber referensi. Atas perhatiannya, penulis mengucapkan terima kasih.

Cilegon, 06 Februari 2024

Aldy Yana Saputra



## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL.</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>LEMBAR PERSETUJUAN.</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERNYATAAN.</b> .....	iv
<b>ABSTRAK.</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR GAMBAR.</b> .....	xiii
<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 Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Pengelasan.....	5
2.2 Jenis Cacat Lasan .....	7
2.2.1 Cacat Retak.....	8
2.2.2 Cacat Porositas. ....	9
2.3 <i>Eddy Current Testing</i> .....	10

2.3.1	Kemagnetan.....	11
2.3.2	Induksi Elektromagnetik.....	14
2.3.3	Karakteristik <i>Eddy Current</i> .....	16
2.3.4	Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi. ....	19
2.4	Frekuensi Resonansi.....	20
2.5	<i>Magnetic Induction Tomography</i> .....	21
2.6	Sensor <i>Magnetic Induction Tomography</i> (MIT). ....	23
2.6.1	Sifat-Sifat Listrik pada Sensor MIT .....	27

### **BAB III METODE PENELITIAN**

3.1	Diagram Alir .....	30
3.2	Alat dan Bahan.....	31
3.2.1	Alat yang Digunakan .....	31
3.2.2	Bahan yang Digunakan.....	31
3.3	Prosedur Percobaan.....	32
3.3.1	Preparasi Pelat Baja.....	32
3.3.2	Pengujian Sensor MIT.....	34

### **BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN**

4.1	Karakterisasi Sinyal <i>Output</i> pada Sensor Tipe I, II, dan III. ....	39
4.2	Analisis Hasil Eksperimen Inspeksi Cacat dengan Sensor Optimal.....	46
4.3	Analisis Nilai Relatif Impedansi pada Variasi Kedalaman dan Bentuk Cacat .....	50

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan. ....	54
5.2 Saran.....	55
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>56</b>
<b>LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN.....</b>	<b>59</b>
<b>LAMPIRAN B DATA HASIL PENELITIAN. ....</b>	<b>60</b>
<b>LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN. ....</b>	<b>85</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
Tabel 3.1 Parameter Sensor.....	34
Tabel B.1 Data Rata-Rata Impedansi Pengukuran Sensor Tipe II.....	66
Tabel B.2 Data Nilai Relatif Impedansi Sensor II. ....	68
Tabel B.3 Data Rata-Rata Impedansi Pengukuran Sensor Tipe I. ....	71
Tabel B.4 Data Nilai Relatif Impedansi Sensor I.....	74
Tabel B.5 Data Rata-Rata Impedansi Pengukuran Sensor Tipe III. ....	76
Tabel B.6 Data Nilai Relatif Impedansi Sensor III. ....	79
Tabel B.7 Data Selisih Impedansi Baja Normal dengan Udara. ....	82

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>Halaman</b>
Gambar 2.1 Jenis cacat <i>cracks</i> . .....	9
Gambar 2.2 Cacat porositas. ....	10
Gambar 2.3 Arah medan magnet. ....	12
Gambar 2.4 Distribusi kerapatan fluks.....	12
Gambar 2.5 Proses induktansi diri .....	15
Gambar 2.6 Cacat pada aliran <i>eddy current</i> (a) cacat sejajar dengan aliran arus (b) cacat tegak lurus dengan aliran arus.....	17
Gambar 2.7 Efek batasan material (a) <i>eddy current</i> tidak terganggu batasan material dan (b) <i>eddy current</i> memadat karena batasan material. ....	17
Gambar 2.8 <i>Eddy current testing</i> . ....	18
Gambar 2.9 Prinsip kerja MIT. ....	23
Gambar 2.10 Representasi vektor medan magnet eksitasi, $B$ , dan medan magnet gangguan, $\Delta B$ , .....	23
Gambar 2.11 Arah medan magnet pada selenoida.....	25
Gambar 2.12 Hubungan frekuensi, konduktivitas dan permeabilitas. ....	26
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	31
Gambar 3.2 Sampel pelat baja. ....	33
Gambar 3.3 Kondisi cacat retak. ....	33
Gambar 3.4 Rangkaian sistem MIT. ....	35
Gambar 3.5 Tampilan <i>software</i> LibreVNA. ....	36
Gambar 3.6 <i>Setting</i> LibreVNA pada <i>software spyder</i> . ....	36

Gambar 3.7 Ilustrasi kondisi pengukuran sensor; (a) tipe I dan (b) tipe II. ....	37
Gambar 3.8 Ilustrasi kondisi pengukuran sensor tipe III. ....	38
Gambar 4.1 Sinyal output sensor tipe I pada objek udara dan baja normal. ....	42
Gambar 4.2 Sinyal output sensor tipe II pada objek udara dan baja normal. ....	42
Gambar 4.3 Sinyal output sensor tipe III pada objek udara dan baja normal. ....	43
Gambar 4.4 Selisih nilai impedansi normalisasi baja normal dengan udara. ....	44
Gambar 4.5 Hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara pada sensor II. ....	46
Gambar 4.6 Hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara. ....	47
Gambar 4.7 <i>Zoom out</i> hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara. .....	48
Gambar 4.8 <i>Zoom out</i> hasil inspeksi pada variasi kedalaman cacat porositas. ....	49
Gambar 4.9 Grafik variasi kedalaman cacat porositas pada frekuensi 172 kHz. ....	50
Gambar 4.10 Nilai relatif impedansi pada variasi kedalaman dan bentuk cacat. ..	50
Gambar 4.11 Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat pada frekuensi 172 kHz. ....	51
Gambar 4.12 Ilustrasi perubahan arus eddy akibat diskontinuitas. ....	53
Gambar B.1 Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat sensor tipe II. ....	85
Gambar B.2 Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat sensor tipe III. ....	85
Gambar C.1 <i>Masking tape</i> . ....	86
Gambar C.2 Mesin bor duduk. ....	86
Gambar C.3 Sampel pelat baja. ....	86
Gambar C.4 Sensor MIT. ....	86

Gambar C.5 Sensor tipe I.....	86
Gambar C.6 Sensor tipe II.....	86
Gambar C.7 Sensor tipe III. ....	87
Gambar C.8 Sistem MIT.....	87

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pengelasan adalah salah satu metode penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa logam tambahan dan menghasilkan sambungan yang kontinu. Pengelasan termasuk salah satu teknik fabrikasi yang banyak digunakan dalam industri manufaktur saat ini, mulai dari bidang konstruksi baja, bidang konstruksi perkapalan, instalasi pemipaan, konstruksi otomotif, hingga alat berat. Dalam industri manufaktur, pengendalian kualitas produk hasil lasan merupakan salah satu hal penting yang perlu diperhatikan. Hal ini dilakukan untuk menghindari cacat produk hasil lasan yang dapat merugikan konsumen.

Kualitas hasil las yang sempurna ditinjau dari memenuhi atau tidaknya hasil las tersebut terhadap kualifikasi atau spesifikasi las yang ada. Hasil las yang memiliki cacat dan tidak memenuhi spesifikasi, maka dianggap tidak sempurna. Pada hasil las pipa baja, cacat atau kegagalan biasa terjadi, terutama cacat inklusi, retak, porositas, dan cacat lainnya. Berdasarkan hal tersebut, perlu dilakukan evaluasi untuk memastikan apakah hasil las telah memenuhi standar dan spesifikasi yang telah ditentukan. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk evaluasi adalah pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Testing*). Pengujian ini dapat menginspeksi dan menganalisis kegagalan tanpa harus merusak material uji serta dapat digunakan sebagai perawatan terhadap sarana atau peralatan yang terdapat



dalam industri. Salah satu pengaplikasian proses inspeksi cacat las menggunakan metode NDT adalah inspeksi pada sambungan las pipa baja yang sudah terpasang. Saat ini metode yang sering digunakan untuk pemeriksaan saluran pipa baja adalah *radiography testing*. Namun pada penggunaan metode tersebut terdapat beberapa kekurangan yang mengakibatkan keefektivitasnya kurang seperti waktu operasi yang lama, alat relatif cukup mahal terutama pada sumber sinar-x, serta untuk mengoperasikan harus memiliki keahlian khusus. Oleh karena itu diperlukan metode lain yang memiliki kemampuan hampir sama dengan biaya yang dikeluarkan lebih sedikit.

Saat ini, salah satu metode alat inspeksi cacat las yang sedang dikembangkan adalah *Magnetic Induction Tomography* (MIT). MIT mampu menghasilkan citra pada objek-objek yang memiliki nilai konduktivitas yang tinggi seperti objek-objek logam sehingga sangat potensial untuk dimanfaatkan pada dunia industri terutama pada industri manufaktur. Penggunaan metode MIT sebagai pengujian tidak merusak dengan teknik pencitraan memiliki keunggulan seperti tidak memerlukan kontak langsung dengan sampel, objek atau material yang akan diinspeksi, bersifat non-destruktif, tidak ada radiasi dan biaya yang dikeluarkan untuk pemeriksaan cacat relatif rendah serta sistem MIT ini dapat dilakukan secara *real time* (Sutisna *et al.*, 2014). Berdasarkan keunggulan dan kemampuan MIT maka metode ini sesuai untuk dijadikan alat inspeksi cacat las dan perlu dilakukan pengembangan lanjutan.

Terdapat penelitian menggunakan MIT untuk menginspeksi cacat lasan (Hilzaviani, 2021). Penelitian tersebut menggunakan desain sensor dua kumparan

dua sumbu dan berhasil menunjukkan bahwa sensor tersebut sensitif dalam mendeteksi cacat pada variasi kedalaman 2, 6, dan 7 mm dengan nilai relatif magnitude yang ditunjukkan bernilai maksimum pada kedalaman cacat 2 mm. Akan tetapi, desain sensor tersebut belum mampu menginspeksi cacat yang lebih dalam dan belum menunjukkan perbedaan yang signifikan antar kedalaman cacat. Untuk itu perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai MIT dengan menggunakan desain sensor yang berbeda agar bisa mendeteksi cacat yang lebih dalam dan dapat mendeteksi bentuk cacat yang berbeda. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa efektif alat prototipe sistem inspeksi dan mengetahui jenis desain sensor yang optimal dalam menginspeksi cacat las dengan kedalaman cacat porositas dan bentuk cacat yang berbeda. Sehingga diharapkan dari penelitian yang dilakukan ini dapat menjadi salah satu upaya optimalisasi dari alat prototipe sistem inspeksi cacat las yang dikembangkan agar dapat diaplikasikan sebagai alat inspeksi cacat las dalam skala industri.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan uraian latar belakang, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakterisasi pola sinyal standar baja normal dan udara yang terbentuk berdasarkan desain sensor?
2. Bagaimana menentukan desain sensor yang paling optimal?
3. Bagaimana mendeteksi cacat porositas kedalaman 3, 7, dan 11 mm serta cacat retak menggunakan sensor optimal?
4. Bagaimana pola sinyal hasil inspeksi cacat las yang diperoleh?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mencari desain sensor paling optimal untuk inspeksi cacat lasan.
2. Mengetahui fenomena tren yang terbentuk hasil inspeksi cacat las pada pelat baja.
3. Menganalisis pola sinyal hasil inspeksi cacat las menggunakan desain sensor optimal.

### **1.4 Ruang Lingkup Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material Maju dan Tomografi FT UNTIRTA, dan PT. C-Tech Lab Edwar Teknologi. Bahan yang digunakan untuk eksperimen inspeksi ini adalah pelat baja SS400 dengan dimensi 10 cm x 10 cm. Variabel yang terdapat pada penelitian ini meliputi variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas untuk penelitian ini adalah cacat artifisial (buatan) dengan diameter 5 mm, dan juga dengan variasi kedalaman cacat pada 3 mm, 7 mm dan 11 mm serta variasi bentuk cacat berupa cacat porositas dan cacat retak. Sedangkan variabel terikat pada penelitian ini adalah data pengukuran sinyal yang didapatkan.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

Penulisan penelitian ini terdiri dari lima bab, daftar pustaka dan lampiran. Bab I pendahuluan membahas mengenai latar belakang yang melandasi perlunya dilakukan penelitian mengenai deteksi cacat, identifikasi masalah penelitian yang dilakukan, tujuan penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan laporan.

Bab II tinjauan pustaka berisi mengenai literatur serta teori pendukung dilakukannya suatu penelitian. Bab III metode penelitian berisi tentang metodologi penelitian yang berisi tentang diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian serta prosedur penelitian yang bersangkutan. Bab IV hasil dan pembahasan menjelaskan hasil dari penelitian yang dilakukan mengenai eksperimen yang telah dilakukan beserta analisis pembahasannya. Bab V kesimpulan dan saran mencakup kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan secara keseluruhan. Daftar pustaka menyebutkan beberapa literatur yang digunakan sebagai dasar dan penunjang penelitian. Lampiran menjelaskan beberapa contoh perhitungan, data hasil penelitian, dan gambar alat serta bahan yang digunakan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pengelasan**

Saat ini pengelasan menjadi hal yang sangat dibutuhkan pada dunia keteknikan atau industri. Oleh karena itu dalam perkembangan ilmu pengelasan beberapa ahli menemukan metode-metode pengelasan untuk meningkatkan hasil lasan, berikut definisi pengelasan. Menurut *Deutsche Industrie Normen (DIN)*, pengelasan merupakan suatu penyatuan logam melalui ikatan metalurgi paduan yang dilakukan dalam keadaan cair. Dengan kata lain, pengelasan merupakan teknik untuk menyambung logam secara permanen di area tertentu dengan menggunakan energi panas untuk melelehkan logam yang akan disambung, dan dapat dilakukan dengan atau tanpa tekanan dan kawat las. Sedangkan menurut *American Welding Society (AWS)*, pengelasan ialah teknik penggabungan material, baik logam maupun non-logam, yang dilakukan dengan cara memanaskan kedua material hingga mencapai temperatur tertentu, umumnya hingga mencapai titik cair dengan atau tanpa menggunakan tekanan diikuti dengan penambahan atau tanpa penambahan logam pengisi (*filler metal*).

Aplikasi teknik pengelasan digunakan dalam berbagai bidang konstruksi yang cukup luas meliputi konstruksi pipa saluran minyak, gas dan air, jembatan, transportasi, rangka baja serta pada perkapalan dan banyak lainnya. Selain fungsi utama pengelasan sebagai proses penyambungan, pengelasan juga digunakan dalam proses pemotongan dan proses reparasi. Penggunaan teknik pengelasan

untuk proses penyambungan logam dinilai paling ekonomis dibandingkan dengan metode penyambungan logam lain. Pada proses pengerjaan suatu fabrikasi teknik pengelasan memberikan keuntungan dari aspek teknologi maupun aspek ekonomisnya. Secara umum proses pengelasan dapat diklasifikasikan berdasarkan cara kerja ataupun berdasarkan sumber energi yang terlibat didalamnya. Adapun proses pengelasan berdasarkan cara kerja dapat dibagi menjadi tiga bagian; pengelasan cair (*fusion welding*) merupakan pengelasan dengan memanaskan sambungan hingga pada titik leburnya dengan menggunakan sumber panas dari busur listrik ataupun dari semburan api gas yang terbakar. Pengelasan tekan (*diffusion bonding*) ialah pengelasan dengan menyambungkan dengan cara sambungan dipanaskan lalu ditekan hingga tersambung. Terakhir, pematريان (*soldering*) merupakan teknik pengelasan yang tidak menyebabkan logam induk cair karena cara pengelasan pada teknik ini dengan mengikat sambungan dengan menggunakan paduan logam yang memiliki titik cair rendah. Pengelasan berdasarkan sumber energi dapat terbagi menjadi beberapa jenis yaitu *Gas Welding*, *Arc Welding*, *Resistance Welding*, *Solid State Welding*, *Thermo-chemical Welding*, dan *Radiant Energy Welding*.

## **2.2 Jenis Cacat Las**

Cacat pada hasil lasan dapat ditimbulkan oleh suatu keadaan seperti keadaan selama proses pengelasan dan keadaan parameter pengelasan yang tidak tepat. Cacat atau *defect* merupakan suatu ketidakraturan atau diskontinuitas yang timbul selama proses pengelasan logam yang sudah di luar batas standar yang diterima serta karena hal tersebut pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan pada kualitas

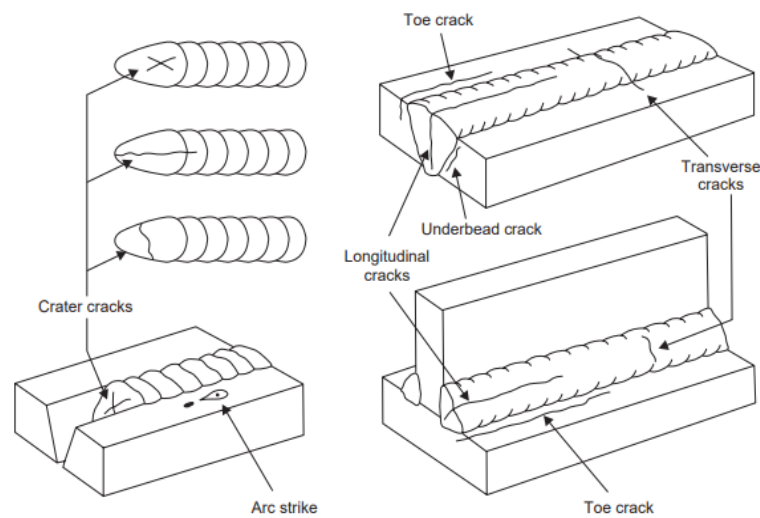
logam (Singh, 2018). Ada beberapa faktor umum yang dapat menimbulkan cacat pada hasil lasan sebagai berikut:

- a. Kondisi lingkungan yang buruk
- b. Parameter atau pengaplikasian pengelasan ada yang salah
- c. Kombinasi yang salah antara logam pengisi (*filler metal*) dengan logam induk (*base metal*)

### **2.2.1 Cacat Retak**

Retak merupakan cacat yang terjadi di bagian dalam las ataupun di bagian permukaan serta retak ini muncul juga pada area yang bertemperatur tinggi ataupun berada di bawah tegangan. Cacat retak terjadi ketika *weld bead* pada tahap akhir pematatan tidak memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan tekanan kontraksi yang dihasilkan saat kolam las memadat. Selain itu, faktor-faktor yang meningkatkan risikonya adalah ukuran atau bentuk manik las yang tidak memadai, pengelasan di bawah tekanan tinggi, sifat material seperti kandungan pengotor yang tinggi atau penyusutan yang relatif besar pada pematatan. Langkah pencegahan untuk meminimalisir terjadi cacat retak adalah dengan mengontrol kesesuaian sambungan untuk mengurangi gap, membersihkan semua pengotor dari material, memilih parameter dan teknik pengelasan untuk menghasilkan *weld bead* dengan rasio kedalaman dan lebar yang memadai, memastikan *weld bead* memiliki ketahanan yang cukup terhadap tekanan pematatan, dan menghindari kecepatan pengelasan yang tinggi (pada tingkat arus yang tinggi) yang meningkatkan jumlah segregasi dan tingkat tegangan pada *weld bead*. Pada Gambar 2.1 menunjukkan jenis-jenis retak pada proses pengelasan. Jenis

pertama retak *underbead* ialah retak yang terjadi akibat adanya hidrogen yang terjebak dan biasanya terjadi pada material baja. Retak *Toe* terjadi diakibatkan *hot cracks* pada garis atau batas fusi. Retak *Crater* ialah retak penyusutan akibat penghentian busur yang tiba-tiba. Pada jenis cacat retak terdapat tiga kelas utama *cracks* yaitu *hot cracks*, *cold cracks* dan *microfissures*.



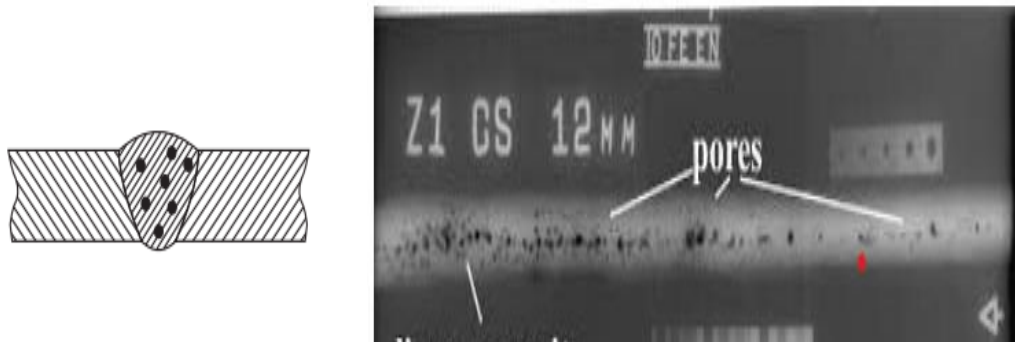
**Gambar 2.1** Jenis cacat retak (Khan, 2007)

### 2.2.2 Cacat Porositas

Porositas merupakan jenis cacat dimana pada area yang dilas terdapat sekumpulan *void* atau gelembung gas akibat terperangkap pada saat proses pembekuan terjadi terlalu cepat dan tampak seperti bentuk bulat seperti terlihat pada Gambar 2.2. Porositas dalam pengelasan disebabkan karena perubahan metalurgi yang terjadi selama pengelasan dalam logam las (D. Hadzihafizovic, 2022). Adapun beberapa penyebab dari timbulnya porositas adalah deoksidan yang kurang, kandungan sulfur yang tinggi pada logam induk, pada *fluks* terdapat kandungan air yang tinggi, terlalu



minimnya gas pelindung, *travel speed* pengelasan yang terlalu tinggi, dan arus pengelasan yang terlalu rendah membuat logam cair mengalami pembekuan cepat. Adapun pencegahan yang dapat dilakukan adalah elektroda yang digunakan tidak lembab agar bebas uap air, membersihkan permukaan benda yang akan disambung, dan arus pengelasan menggunakan prosedur dari produsen elektroda. Secara umum, porositas pengelasan terbagi empat jenis yaitu porositas yang tersebar, porositas linier, porositas seragam, dan porositas lokal (D. Hadzihafizovic, 2022).



**Gambar 2.2** Cacat porositas (D. Hadzihafizovic, 2022)

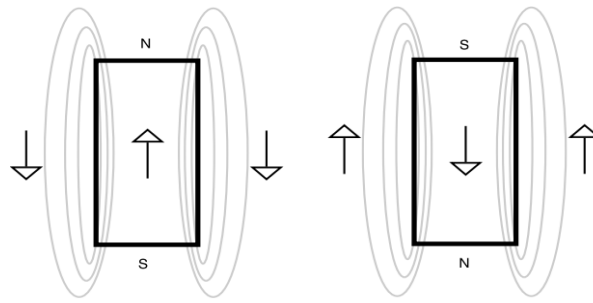
### 2.3 *Eddy Current Testing*

*Eddy current testing* merupakan salah satu teknik nondestructive (NDT) yang banyak digunakan untuk inspeksi material konduktif listrik pada kecepatan sangat tinggi tanpa memerlukan kontak antara benda uji dengan sensor (García-Martín, 2011). Prinsip kerja pengujian arus eddy berlandaskan pada interaksi antara arus listrik dan medan magnet. Metode arus eddy ini merupakan teknik inspeksi tanpa merusak berbasis elektromagnetik untuk menemukan retak di permukaan maupun kerusakan internal pada berbagai material konduktif, baik material

feromagnetik maupun non-feromagnetik. Uji arus eddy tidak hanya digunakan untuk mendeteksi retak, tetapi dapat digunakan juga diberbagai macam inspeksi lainnya seperti mendeteksi cacat permukaan (*surface*) maupun cacat dalam (*sub-surface*), mengukur ketebalan *non-conductive coating*, serta dapat mengukur konduktivitas. Konduktivitas suatu material bergantung pada komposisi dan perlakuan panas yang diterimanya. Oleh karena itu, metode arus eddy juga dapat dimanfaatkan untuk membedakan antara material murni dan komposisi paduan, Menentukan kekerasan spesimen setelah perlakuan panas. (Ghoni *et al.*, 2014).

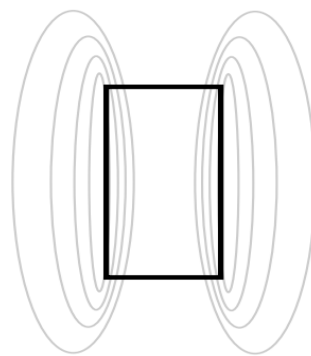
### **2.3.1 Kemagnetan**

Kemagnetan merupakan suatu gaya mekanis tarik-menarik atau tolak-menolak. Pada kemagnetan terdapat istilah polaritas yaitu kedua ujung material memiliki sifat yang bertolak belakang. Dari hal tersebut maka ujung-ujung magnet disebut kutub, ada kutub utara (N) dan kutub selatan (S). Magnet memiliki medan gaya yang dapat divisualisasikan sebagai sejumlah *loop* tertutup yang mengalir melalui magnet, mengelilingi di sekitar bagian luar magnet, dan kemudian masuk kembali ke magnet di ujung yang lain yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. *Loop* pada magnetik disebut garis gaya atau garis fluks. Kata "fluks" memiliki arti "mengalir" dan berkaitan dengan fakta bahwa garis gaya mengalir dari utara ke kutub selatan di sekitar bagian luar magnet, dan dari selatan ke kutub utara di dalam magnet.



**Gambar 2.3** Arah medan magnet (Helier, 2003)

Sifat yang dimiliki oleh medan magnet adalah kerapatan fluks magnet, intensitas medan magnet, fluks total, dan magnetisasi (Mansor, et al., 2015). Medan magnet adalah area di sekitar magnet yang masih memiliki pengaruh kekuatan magnetnya. Semakin jauh jarak dari magnet, semakin lemah gaya magnet tersebut. Intensitas medan tergantung pada kerapatan fluks. Densitas atau kerapatan fluks paling tinggi berada pada inti magnet dan di kutub. Berdasarkan hukum kuadrat terbalik kerapatan akan berkurang dengan jarak dari magnet yaitu kerapatan fluks berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari kutub magnet, seperti pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Distribusi kerapatan fluks (Helier, 2003)

Medan magnet adalah besaran yang memiliki arah dan besar. Besarnya medan magnet dipengaruhi oleh dua hal, yaitu intensitas magnetik

dan induksi magnetik. Intensitas magnetik ( $H^{\rightarrow}$ ) adalah besaran yang menunjukkan gaya magnet yang bekerja pada muatan listrik bergerak. Semakin besar intensitas magnetik, semakin besar gaya magnet yang bekerja pada muatan listrik bergerak tersebut. Induksi magnetik ( $B^{\rightarrow}$ ) adalah besaran yang menunjukkan arah dan besar medan magnet. Semakin besar induksi magnetik, semakin besar medan magnet tersebut. Hubungan antara intensitas magnetik dan induksi magnetik adalah sebagai berikut:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

$B^{\rightarrow}$  = Induksi magnetik (weber/m<sup>2</sup> atau Tesla)

$H^{\rightarrow}$  = Intensitas magnetik (Watt/m<sup>2</sup>)

$\mu_0$  = Permeabilitas ruang kosong ( $4\pi \times 10^{-7}$  Wb/A.m)

Medan magnet pada konduktor merupakan aliran listrik yang melewati sebuah konduktor yang akan menghasilkan medan magnet yang berbentuk lingkaran dengan garis-garis magnet yang membentuk *loop* dan tidak melewati sepanjang konduktor tersebut. Arah dari rotasi medan magnet bergantung pada arah aliran listrik yang melewati konduktor dengan menghasilkan medan magnet yang tegak lurus yang akan semakin kuat mendekati pusat dari konduktor yang menghasilkan aliran listrik. Hal tersebut dikarenakan garis fluks yang melewati *loop* menjadi lebih lemah ketika jarak *loop* dari konduktor semakin jauh. Induksi magnet, induksi terjadi ketika fluks magnetik yang bergerak membuat garis-garis magnetik yang memotong, konduktor mendorong elektron bebas dalam konduktor

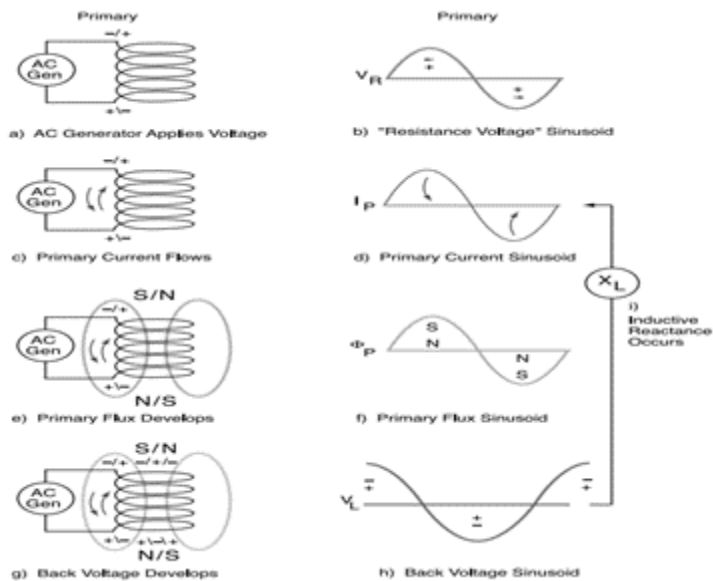
untuk mengalir, sehingga menghasilkan arus. Generator menghasilkan arus listrik melalui gerakan mekanis. Ketika konduktor bergerak di dalam medan magnet, konduktor tersebut akan menghasilkan tegangan dan energi listrik. Hal ini disebabkan oleh perubahan fluks magnetik yang menginduksi tegangan pada konduktor. Kemudian, tanpa adanya gerakan mekanis, arus tidak akan muncul. Gerakan tersebut penting untuk memastikan garis-garis medan magnet memotong konduktor secara tegak lurus. Pemotongan ini dapat terjadi melalui pergerakan medan magnet ataupun konduktor itu sendiri (Bowler, 1999).

### **2.3.2 Induksi Elektromagnetik**

Jenis arus bolak-balik (AC) digunakan pada metode *magnetic induction tomography* (MIT) dimana arus mengalir secara terus-menerus. Ilustrasi dari sifat arus AC digambarkan dengan kurva sinus, arus akan memulai siklusnya pada posisi amplitudo sebesar nol, dan akan naik hingga puncak lalu akan kembali ke titik nol lagi. Terjadi kenaikan lagi hingga puncak dengan arah berbeda dan akan ke titik nol lagi untuk menyempurnakan siklus.

Tegangan bolak-balik pada koil terbentuk adanya pembangkit arus bolak-balik (Gambar 2.5-a). Tegangan ini disebut dengan tegangan resistansi,  $V_R$  merupakan gaya untuk menggerakkan arus agar bisa melalui resistan kawat koil (Gambar 2.5-b).  $V_R$  menyebabkan arus  $I_p$ , mengalir sepanjang koil dan ada pada fasa dengan  $V_R$  (Gambar 2.5-d). Arus bolak-balik (AC) yang mengalir pada koil menimbulkan medan magnet primer  $\Phi_p$ ,

di sekitar koil dan dalam satu fasa dengan  $V_R$  dan  $I_P$  (Gambar 2.5-f). Adanya induktansi diri disebabkan karena koil berada pada medan magnet yang dihasilkannya sendiri, dimana  $\Phi_P$  menginduksi tegangan induksi  $V_L$  yang disebut dengan tegangan balik pada koil (Gambar 2.5-g).



**Gambar 2.5** Proses induktansi diri (Helier, 2003)

Secara sederhana induktansi diri dapat diartikan sebagai efek dimana sebuah koil menginduksikan tegangan pada dirinya sendiri. Berdasarkan bunyi Hukum Faraday, besarnya tegangan induksi sebanding dengan laju fluks. Tegangan balik diinduksikan berbeda  $90^\circ$  dengan arus dan fluks (Gambar 2.5-h). Jika tegangan balik berbeda  $90^\circ$  dengan arus koil, maka tegangan balik akan menghambat perubahan aliran arus bolak-balik (Gambar 2.5-i), sehingga terjadilah reaktansi induktif. Reaktansi induktif bergantung pada desain koil dan frekuensi. Variabel yang mempengaruhi reaktansi induktif dapat digambarkan dengan persamaan:

$$X_L = 2 \pi f L \dots \dots \dots (2.2)$$

$$L = \mu_r \frac{N^2 x A}{l} x 1,26 x 10^{-6} \dots\dots\dots(2.3)$$

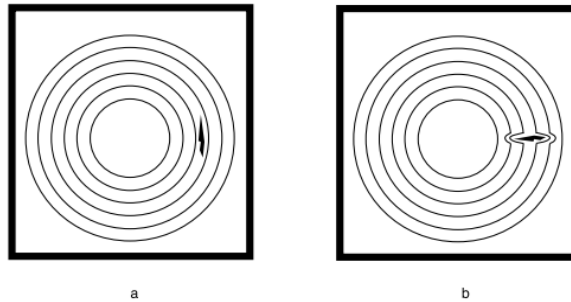
Dengan  $X_L$  adalah reaktansi induktif,  $f$  adalah frekuensi,  $L$  adalah induktansi koil,  $\mu_r$  adalah permeabilitas relatif inti koil,  $N$  adalah jumlah lilitan,  $A$  adalah luas penampang koil, dan  $l$  adalah panjang koil.

Induktansi bersama atau *mutual inductance* merupakan fenomena dua kumparan yang berdekatan dapat saling memengaruhi. Ketika arus mengalir pada kumparan primer, fluks magnetik yang dihasilkan akan merambat ke kumparan sekunder. Fluks magnetik ini kemudian akan menginduksi medan magnet pada kumparan sekunder, dan menghasilkan tegangan serta arus pada kumparan tersebut. Fluks medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan primer akan menginduksi GGL pada kumparan sekunder. Sedangkan tegangan pada induktansi bersama muncul ketika arus yang mengalir di satu kumparan menghasilkan fluks magnetik yang menginduksi GGL pada kumparan lain.

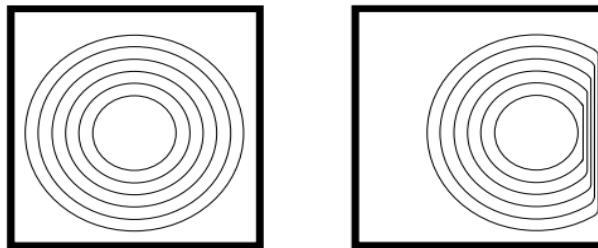
### 2.3.3 Karakteristik *Eddy Current*

*Eddy current* memiliki sifat aliran yang dipengaruhi oleh performa ujinya. Sifat *eddy current* saling ketergantungan dengan sifat fluks dan material uji sendiri. Ketika aliran *eddy current* tidak terganggu oleh keberadaan suatu cacat alirannya berbentuk melingkar. Bentuk arah pada *eddy current* ditentukan oleh arah koil, dengan memilih konfigurasi koil arah koil dapat dikontrol dan divariasikan untuk mendapatkan hasil optimum. Pendeteksian suatu cacat dengan metode *eddy current* berdasar pada seberapa besar aliran *eddy current* terdistribusi oleh cacat. Arah pada

cacat bisa mempengaruhi pada bisa tidaknya suatu cacat dideteksi, apabila arah cacat sejajar dengan *eddy current* maka kurang untuk bisa dideteksi (Gambar 2.6-a). Sedangkan jika arah cacat tegak lurus dengan *eddy current* untuk mendeteksi cenderung lebih mudah (Gambar 2.6-b).



**Gambar 2.6** Cacat pada aliran *eddy current* (Helier, 2003)

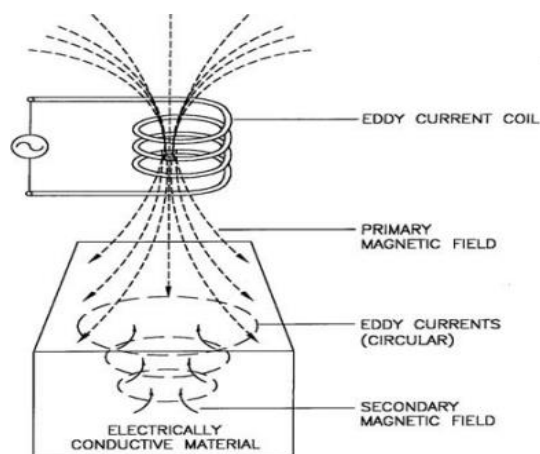


**Gambar 2.7** Efek batasan material (a) *eddy current* tidak terganggu batasan material dan (b) *eddy current* memadat karena batasan material (Helier, 2003)

Jalur aliran *eddy current* melingkar apabila tidak terganggu oleh batasan-batasan cacat maupun material nonkonduktor (Gambar 2.7-a), jalur aliran *eddy current* akan berubah dan memampat menyesuaikan gangguan yang mengintrusi ke dalam alirannya (Gambar 2.7-b). Aliran *eddy current* akan berubah-ubah searah jarum jam maupun berlawanan jarum jam, hal itu dikarenakan *eddy current* terbentuk dari fluks medan magnet AC dan frekuensi perubahan fluks medan magnet akan merubah frekuensi arah *eddy*



*current*. Kerapatan *eddy current* bervariasi dalam material uji yaitu pertama, *eddy current* memiliki *skin effect*. Kerapatan arus maksimum pada permukaan material dan menurun secara eksponen dengan kedalaman. Kedua, fluks medan magnet bervariasi tergantung dengan diameter koil, sehingga penetrasi efektif *eddy current* terbatas pada diameter koil. Jika koil terlalu kecil, kerapatan arus pada suatu kedalaman akan lebih kecil dari persamaan *skin depth* yang telah diindikasikan. Ketiga, *eddy current* menunjukkan *phase lag* yang linear dengan kedalaman. Semakin dalam, aktivitas *eddy current* akan tertinggal (*delay*). Sinyal *phase lag* mengindikasikan kedalaman cacat dan ketebalan material. *Eddy current* memiliki keunikan dan *properties* yang menarik yaitu *eddy current* ialah arus induksi yang hanya ada dalam material penghantar listrik. *Eddy current* selalu dalam *loop* tertutup dan biasanya sejajar dengan gulungan koil seperti pada Gambar 2.8. Intensitas *Eddy current* tergantung pada sifat material, elektromagnetik *coupling* (*lift-off/fill-factor*) dan frekuensi eksitasi, namun maksimum pada permukaan.



**Gambar 2.8** Eddy current testing (Chandra and Bhagi, 2014)

### 2.3.4 Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi

Prinsip terbentuknya gaya gerak listrik disebabkan karena adanya gaya listrik yang bekerja untuk menggerakkan elektron dalam konduktor. Apabila terjadi perubahan fluks dalam suatu loop maka dihasilkan gaya gerak listrik berupa tegangan induksi yang berbanding lurus dengan laju perubahan fluks (MIT, 2012). Ketika suatu konduktor bergerak dalam medan magnet, dan memotong garis-garis gaya magnet, maka akan muncul GGL induksi pada konduktor tersebut. Semakin cepat konduktor bergerak, semakin besar GGL induksi yang dihasilkan. Menurut Faraday bahwa GGL induksi yang dihasilkan pada kumparan berbanding lurus dengan kecepatan perubahan fluks magnetik yang menembus kumparan tersebut. Rumus fluks magnet untuk medan magnet yang tegak lurus dengan bidang adalah sebagai berikut:

$$\Phi = B \times A \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana  $\Phi$  adalah fluks magnetik satuan Weber (Wb), B adalah induksi magnet satuan Tesla (T), dan A adalah luas bidang ( $m^2$ ). Semakin cepat perubahan garis gaya magnet, maka semakin besar fluks magnetik yang dihasilkan. Hal ini juga berarti kekuatan magnetnya (diwakili oleh induksi magnetik) semakin besar. Pernyataan Michael Faraday atau hukum Faraday dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$E_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \dots\dots\dots (2.5)$$

$E_i = GGL$  induksi dengan satuan volt (V),  $N =$  banyak lilitan,  $\Delta\Phi =$  perubahan garis gaya magnet dengan satuan weber (Wb), dan  $\Delta t =$  selang waktu dengan satuan sekon (s).

## 2.4 Frekuensi Resonansi

Dalam satu rangkaian seri R-L-C, arus yang terdapat dalam rangkaian bergantung pada nilai hambatan resistansi (R), induktansi (L) dan kapasitansi (C), sedangkan nilai impedansinya (Z) ditentukan oleh nilai resistansi dan kapasitansi. Tegangan sumber rangkaian seri RLC adalah suplai sinusoidal dalam keadaan steady state pada frekuensi tetap. Rangkaian seri RLC memiliki dua atau lebih sinyal sinusoidal yang dapat digabungkan menggunakan fasor dengan syarat memiliki frekuensi input yang sama. Ketika induktor dilalui arus bolak-balik (AC), induktor akan menghasilkan perlawanan yang disebut reaktansi induktif ( $X_L$ ). Besarnya reaktansi ini bergantung pada dua faktor: nilai induktansi induktor itu sendiri dan frekuensi arus yang melewatinya. Dimana dari pengertian tersebut diperoleh persamaan (2.6) sebagai berikut.

$$X_L = 2\pi frL \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana,  $X_L$  adalah reaktansi induktif ( $\Omega$ ),  $fr$  adalah frekuensi resonansi (Hz),  $L$  adalah induktansi (H). Sementara itu, pada saat kapasitor dialiri arus AC, maka akan muncul reaktansi kapasitif ( $X_C$ ) yang nilainya tergantung pada nilai kapasitansi dan frekuensi. Dimana dari pengertian tersebut diperoleh persamaan (2.7) sebagai berikut.

$$X_C = \frac{1}{2\pi frC} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan keterangan  $X_c$  adalah reaktansi kapasitif dan  $C$  adalah kapasitansi koil. Frekuensi resonansi adalah titik temu di mana reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif memiliki nilai yang sama. Penerapan resonansi ini bertujuan untuk memperkuat gelombang medan elektromagnetik dengan menyamakan frekuensi sinyal pengirim dan sinyal penerima, sehingga meningkatkan efisiensi transfer daya. Secara matematis besarnya frekuensi resonansi bisa dicari dengan persamaan berikut.

$$X_l = X_c \dots \dots \dots (2.8)$$

$$2\pi f r L = \frac{1}{2\pi f r C} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dari persamaan (2.9) dapat diturunkan lagi untuk mencari nilai induktansi suatu induktor, kapasitansi suatu kapasitor, dan juga frekuensi resonansi, maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f r^2 C} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f r^2 L} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$f r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (2.12)$$

## 2.5 *Magnetic Induction Tomography*

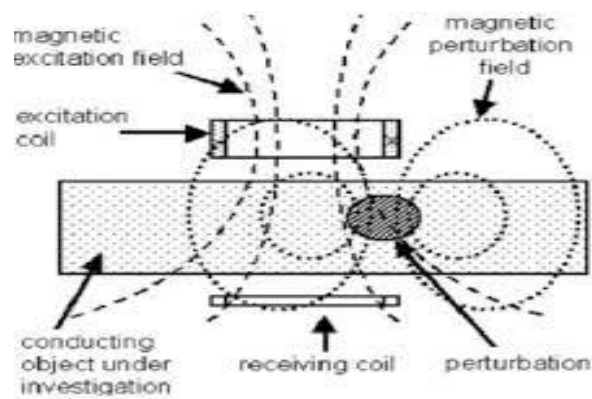
*Magnetic induction tomography* merupakan teknik *non-contacting* baru untuk visualisasi impedansi listrik. MIT menerapkan interaksi medan magnet yang beresilasi dengan media konduktif, yang disertai dengan eksitasi arus *eddy* (Griffiths, 2001). MIT memiliki pencitraan tomografi dengan frekuensi rendah dengan memetakan distribusi spasial ketiga parameter pasif elektrik objek yaitu

konduktivitas, permitivitas, dan permeabilitas. Keunggulan MIT dibandingkan dengan teknik tomografi yang lainnya adalah MIT dapat mencitrakan suatu objek tanpa bersentuhan dan tidak merusak objek itu sendiri. Pengaplikasian dari metode MIT digunakan pada bidang proses industri, geofisika, biomedis dan pengujian tidak merusak.

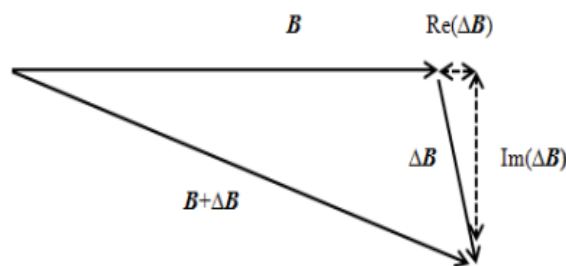
Prinsip-prinsip dasar MIT dapat dijelaskan dengan menggunakan induktansi timbal balik dasar dan teori arus *eddy*. Singkatnya, dengan melewati arus bolak-balik melalui satu atau lebih kumparan eksitasi, medan magnet primer dihasilkan yang menginduksi medan listrik yang dapat dideteksi oleh satu atau lebih kumparan pengukur. Dari medan listrik ini tegangan induksi kemudian dapat diukur. Jika benda konduktif ditempatkan dalam medan ini, arus *eddy* muncul, yang juga dapat menghasilkan medan magnet dikenal sebagai medan sekunder. Akibatnya, medan listrik pada kumparan pengukur diinduksi sebagian oleh medan primer dan sekunder. Oleh karena itu, tegangan induksi pada kumparan pengukur akan berbeda tergantung pada apakah ada objek konduktif di dalam medan. Jika tidak ada objek seperti itu, tegangan induksi muncul sepenuhnya karena medan primer, sedangkan jika ada objek, tegangan induksi muncul karena medan primer dan sekunder. Dengan menganalisis perbedaan tegangan induksi, berbagai sifat benda konduktif dapat direkonstruksi (Ma and Soleimani, 2017).

Pada Gambar 2.9 menunjukkan *eddy current* yang dihasilkan dari objek yang sedang diamati. Dalam aplikasi pengujian logam lasan, medan arus pusar akan berubah ketika konduktivitas jaringan diubah oleh cacat pada hasil lasan. Akibatnya sinyal pengukuran juga akan berubah yang dapat direfleksikan dengan

menganalisis sinyal ini. Prinsip induksi *eddy current* dari kumparan yang tereksitasi di MIT dapat digambarkan dengan diagram vektor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Ketika cacat porositas terpapar medan magnet eksitasi,  $B$ , jaringan menghasilkan arus eddy karena induksi elektromagnetik. *Eddy current* juga akan menginduksi gangguan medan magnet,  $\Delta B$ , yang akan mengubah kekuatan dan distribusi spasial medan magnet eksitasi asli.  $\Delta B + B$  dapat dideteksi menggunakan kumparan deteksi (Griffiths, 2001).



**Gambar 2.9** Prinsip kerja MIT (Igney *et al.*, 2005)



**Gambar 2.10** Representasi vektor medan magnet eksitasi,  $B$ , dan medan magnet gangguan,  $\Delta B$ , (Griffiths, 2001).

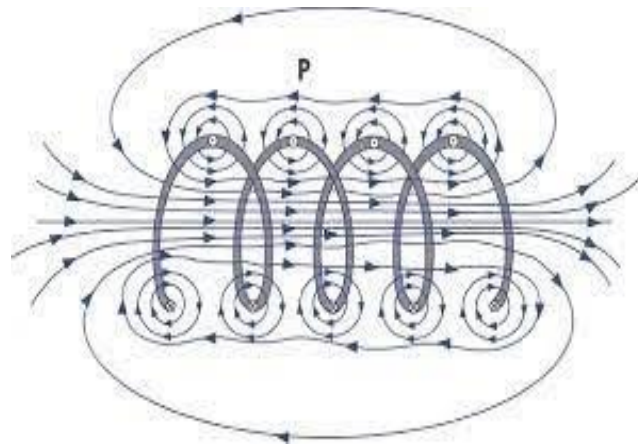
## 2.6 Sensor *Magnetic Induction Tomography* (MIT)

Sensor MIT merupakan alat yang digunakan untuk mengukur konduktivitas listrik, permeabilitas magnetik, dan konstanta dielektrik di dalam suatu objek.

Sensor MIT memiliki empat komponen utama, yaitu kumparan pemancar (*transmitter*), kumparan penerima (*receiver*), konektor arus kumparan, dan pelindung elektromagnetik (*electromagnetic screen*). Koil *transmitter* digunakan untuk membangkitkan medan magnet di area objek yang sedang diperiksa. Medan magnet ini dihasilkan oleh arus bolak-balik yang dihasilkan oleh pembangkit tegangan dan rangkaian LC. Arus bolak-balik ini kemudian diteruskan ke rangkaian penerima. Medan magnet yang dihasilkan oleh koil pemancar disebut medan magnet primer. Sedangkan koil *receiver* bertugas menangkap induksi resonansi magnetik dari koil *transmitter*. Secara umum, nilai yang dimiliki medan magnet primer lebih besar dari medan magnet sekunder. Medan magnet sekunder timbul karena adanya interaksi antara medan magnet primer dengan objek pengganggu. Medan magnet yang ditangkap oleh koil *receiver* berupa medan magnet primer dan sekunder dan ketika objek yang dipenetrasi berbeda maka nilai yang ditangkap akan berbeda pula. Hal tersebutlah yang membuat MIT bisa mendeteksi adanya anomali.

Salah satu jenis sensor MIT yang sering digunakan adalah sensor selenoida. Sensor selenoida merupakan sensor yang terdiri dari satu atau lebih kumparan kawat yang dililitkan dalam bentuk spiral atau silinder dan kawat tersebut dapat dialiri arus listrik. Dalam ilmu fisika, arus listrik yang dialirkan melalui kawat konduktor akan menimbulkan medan magnet di sekitar kawat tersebut. Hal yang sama juga terjadi pada solenoida, yaitu medan magnet dihasilkan dari kumparan kawat yang dialiri arus Listrik dan arah medan magnet yang ditimbulkan oleh solenoida tergantung pada arah arus yang mengalir. Medan magnet di dalam solenoida dihasilkan dari penjumlahan vektor medan magnet yang dihasilkan oleh

setiap lilitan. Semakin banyak jumlah lilitan, semakin besar resultan medan magnet yang dihasilkan. Arah medan magnet pada solenoida bergantung pada arah aliran arus listriknya. Untuk menentukan arah medan magnet tersebut, dapat menggunakan kaidah tangan kanan..



**Gambar 2.11** Arah medan magnet pada solenoida (Giawa, et al., 2013)

Kinerja sensor MIT dalam menginspeksi terutama sensitivitas sensor dipengaruhi oleh beberapa parameter sebagai berikut:

a. Desain Koil

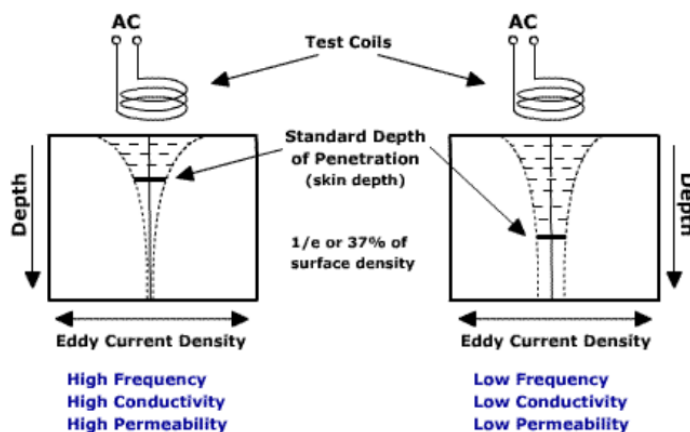
Kemampuan penetrasi dan sensitivitas pengukuran arus eddy bergantung pada bentuk koil. Sedangkan diameter koil yang lebih besar menghasilkan penetrasi arus eddy yang lebih dalam dan pengukuran yang lebih sensitive. Untuk mendapatkan sensitivitas yang baik, diameter koil harus lebih kecil daripada panjang atau besar diskontinuitas yang akan diuji. Hal ini berarti ukuran koil tidak boleh lebih besar dari cacat atau diskontinuitas, karena semakin besar diameter koil semakin kecil sensitivitas sensor yang dimilikinya. (Yang, 2018).



b. *Skin Effect*

Arus eddy adalah arus induksi yang bersirkulasi pada bidang yang tegak lurus terhadap fluks magnetik. Arus ini biasanya bergerak sejajar dengan lilitan kumparan dan alirannya terbatas pada area medan magnet yang menginduksi. Arus eddy terkonsentrasi di dekat permukaan yang berdekatan dengan kumparan eksitasi dan kekuatannya berkurang dengan jarak dari kumparan. Kepadatan arus eddy menurun secara eksponensial dengan kedalaman, fenomena tersebut dikenal sebagai *skin effect* (ASNT, 2007). *Skin effect* muncul ketika arus eddy yang mengalir dalam benda uji pada kedalaman berapa pun menghasilkan medan magnet yang berlawanan dengan medan primer, sehingga mengurangi fluks magnet dan menyebabkan penurunan aliran arus seiring dengan bertambahnya kedalaman.

c. Frekuensi



**Gambar 2.12** Hubungan frekuensi, konduktivitas dan permeabilitas (ASNT, 2007)

Respon arus eddy sangat berpengaruh dari frekuensi objek yang akan

diuji, karena ketika frekuensi berubah maka impedansi koil akan menyesuaikan terhadap perubahan frekuensi tersebut, dimana semakin besar nilai frekuensi yang diberikan maka nilai impedansi koil akan semakin besar. Semakin tinggi frekuensi maka semakin sensitif pembacaan, namun kemampuan penetrasi arus eddy terhadap material berkurang. Sebaliknya, semakin rendah frekuensi, maka semakin lemah sensitivitas pembacaan, namun kemampuan penetrasi arus eddy meningkat. Sehingga frekuensi optimal dapat ditentukan melalui percobaan.

### 2.6.1 Sifat-Sifat Listrik pada Sensor MIT

Pada sensor magnetik induksi terdapat sifat-sifat listrik yang berhubungan langsung dengan medan magnet adalah sebagai berikut:

#### a. Impedansi

Impedansi merupakan besaran yang menampilkan besarnya hambatan listrik yang dialirkan oleh suatu rangkaian pada arus listrik. Secara umum impedansi listrik dapat didefinisikan dengan hambatan total dari komponen-komponen yang ada pada suatu rangkaian listrik arus bolak-balik (AC) (Maulandari, 2018). Selain itu impedansi dapat dirumuskan dengan formula sebagai berikut:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana Z sebagai impedansi ( $\Omega$ ), R sebagai hambatan ( $\Omega$ ),  $X_L$  sebagai reaktansi induktif ( $\Omega$ ), dan  $X_C$  sebagai reaktansi kapasitif ( $\Omega$ ).

b. Resistivitas

Resistivitas adalah besaran yang menunjukkan seberapa besar hambatan listrik yang diberikan suatu bahan terhadap arus listrik (Wahyuningrum, 2013). Resistivitas juga bisa didefinisikan dengan rasio tegangan yang diberikan pada suatu material atau bahan dengan arus yang mengalir pada material tersebut. Resistivitas suatu material diartikan sebagai resistansi (hambatan material). Adapun secara matematis resistivitas dapat dirumuskan sebagai:

$$\rho = \frac{R \times L}{A} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana  $\rho$  adalah resistivitas bahan ( $\Omega m$ ), R adalah hambatan bahan ( $\Omega$ ), L adalah panjang bahan (m), dan A adalah luas penampang bahan ( $m^2$ ).

c. Permeabilitas magnetik

Permeabilitas merupakan kemampuan suatu material dalam memusatkan garis gaya magnet atau fluks magnet. Menurut satuan internasional, permeabilitas hampa udara (vakum) mempunyai nilai  $4\pi \times 10^{-7}$  TmA. Besaran permeabilitas sebuah magnet bukan nilai yang pasti, melainkan berubah-ubah sesuai dengan kekuatan magnetisasi yang dikenakan (Lusyana, 2014). Persamaan permeabilitas dirumuskan sebagai berikut:

$$B = \mu H \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana  $\mu$  = permeabilitas magnetik, B = induksi magnet, H = medan

magnet,  $\mu_0 =$  permeabilitas ruang hampa ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>), dan  $\mu_r =$  permeabilitas relatif. Ditinjau dari permeabilitas relatifnya, bahan dapat dikelompokkan dalam ferromagnetik, diamagnetik dan paramagnetik. Adapun nilai permeabilitas relatif dari material seperti baja adalah sebesar  $1.26 \times 10^{-4}$  H/m (Slodicka, 2021).

d. Konduktivitas Listrik

Suatu material yang memiliki kemampuan untuk mengalirkan arus listrik, dan kemampuan ini disebut konduktivitas atau daya hantar. Konduktivitas memiliki hubungan berbanding terbalik dengan hambatan. Material dengan hambatan tinggi memiliki konduktivitas rendah, dan material dengan hambatan rendah memiliki konduktivitas tinggi (Rais, 2015). Seperti udara memiliki nilai konduktivitas sebesar  $3 \times 10^{-15}$  S/m dan material seperti baja memiliki nilai konduktivitas sebesar  $6.9 \times 10^6$  S/m. Konduktivitas dapat dihitung dengan persamaan berikut;

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana  $\sigma$  adalah konduktivitas (S/m) dan  $\rho$  adalah resistivitas ( $\Omega$ m).

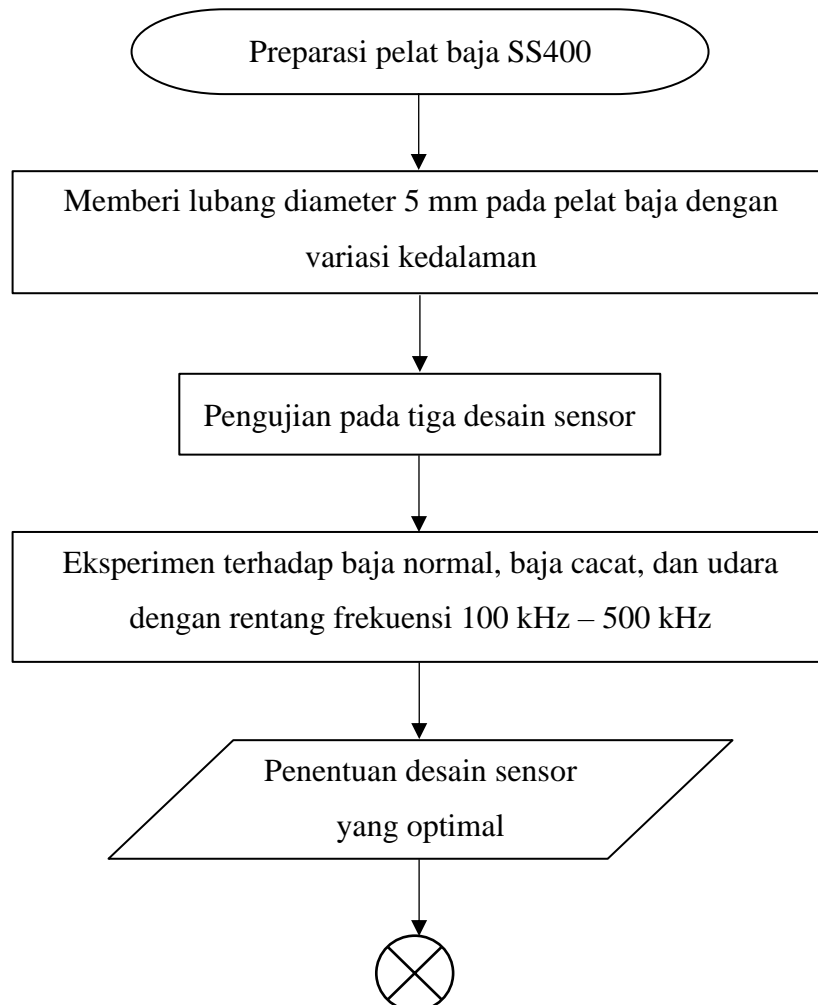
## BAB III

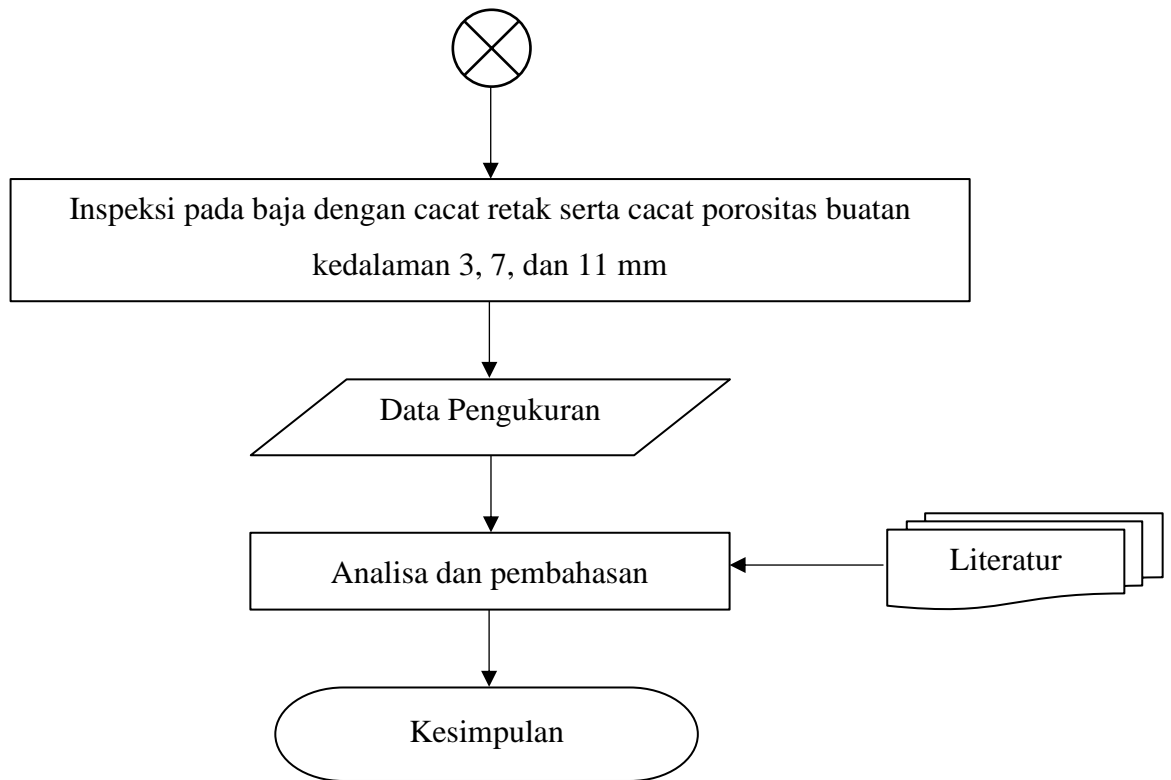
### METODE PENELITIAN

Pada bab 3 ini menjelaskan metode, alat-alat, dan sampel yang digunakan pada penelitian pengujian prototipe sistem inspeksi cacat las berbasis *magnetic induction tomography* (MIT). Mekanisme penelitian akan dijelaskan melalui diagram alir penelitian dan prosedur percobaan.

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir percobaan untuk penelitian digambarkan pada diagram alir pada Gambar 3.1.





**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Alat yang Digunakan

Adapun alat-alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi:

- a. Mesin Bor Duduk;
- b. Laptop;
- c. Sensor MIT;
- d. Sistem MIT.

### 3.2.2 Bahan yang Digunakan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

a. *Masking Tape*

Digunakan untuk membuat batas pengukuran dan membantu untuk memastikan bahwa pengukuran dilakukan dengan akurat.

b. Pelat Baja SS400 (*Structural Steel*)

Pelat baja karbon yang digunakan ukuran 10 cm x 10 cm yang diberikan cacat artifisial berbentuk porositas dengan diameter 5 mm dan kedalaman 3, 7, dan 11 mm.

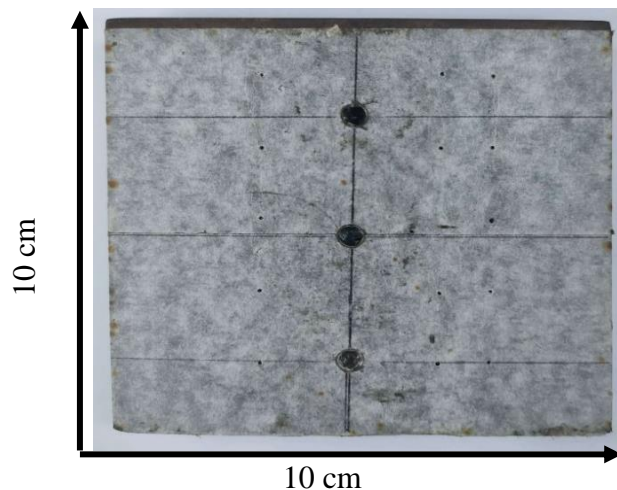
### **3.3 Prosedur Percobaan**

Prosedur dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yang dilakukan, meliputi:

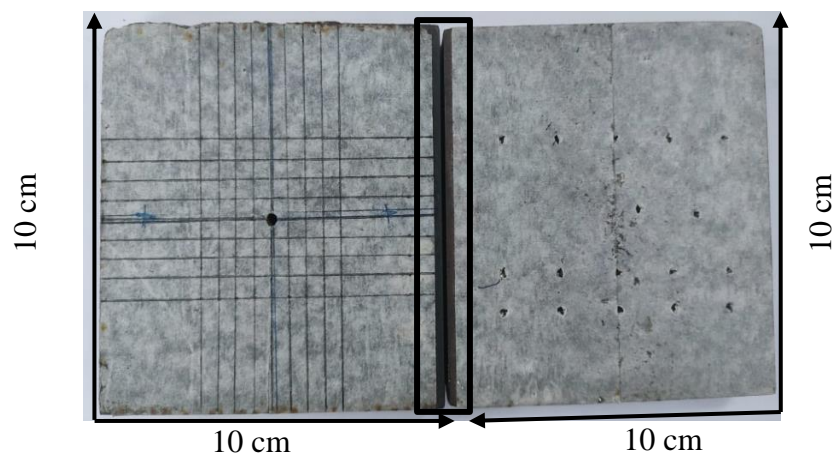
#### **3.3.1 Preparasi Pelat Baja**

Tahapan awal pada prosedur penelitian yang dilakukan adalah melakukan preparasi pada sampel pelat baja. Sampel pelat baja pada penelitian ini menggunakan dua buah pelat baja dengan ukuran yang sama yaitu 10 cm x 10 cm. Preparasi sampel pelat baja dilakukan dengan membersihkan permukaan pelat baja terlebih dahulu. Sebelum dibuat cacat, sampel pelat baja terlebih dahulu dilekatkan *masking tape* pada permukaan pelat baja untuk membuat batas pengukuran dan memastikan agar pengukuran lebih akurat. Kemudian pelat baja diberikan cacat artifisial dengan menggunakan mesin bor duduk berupa cacat porositas dengan kedalaman cacat yang berbeda-beda yaitu 3, 7, dan 11 mm dengan diameter porositas yang sama sebesar 5 mm. Adapun kondisi pelat baja setelah

diberikan cacat porositas terlihat pada Gambar 3.2. Adapun untuk cacat buatan berupa cacat retak dibuat dengan mendekatkan ujung dua buah pelat baja dengan terdapat celah diantara ujung pelat tersebut dengan lebar celah 1.5 mm dan panjang celah 10 cm seperti yang terlihat pada Gambar 3.3 berikut. Pembuatan cacat retak dengan mendekatkan dua pelat baja tidak mempengaruhi arus eddy saat melewati daerah celah tersebut arus eddy tidak akan terputus karena celah yang dibuat cukup rapat sehingga arus yang melewati akan terus tersambung.



**Gambar 3.2** Cacat Porositas



**Gambar 3.3** Cacat retak dengan mendekatkan dua pelat baja



### 3.3.2 Pengujian Jenis Desain Sensor

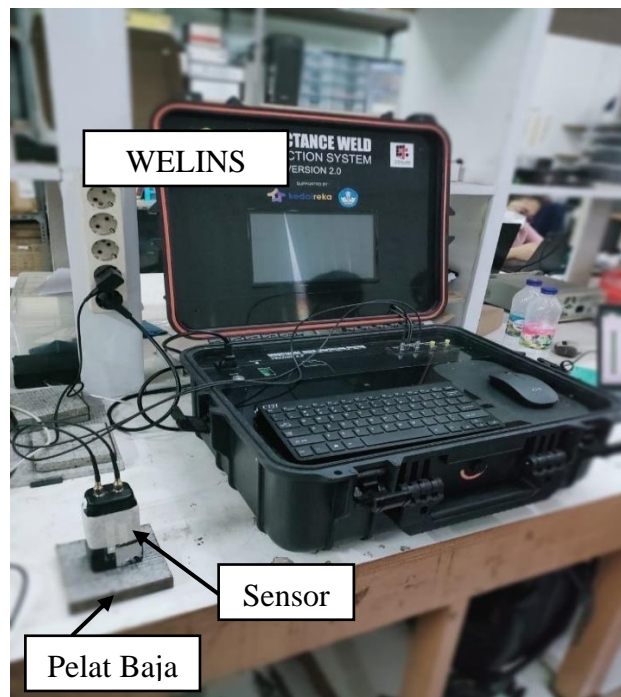
Pada tahapan ini, eksperimen dilakukan dengan menggunakan sistem MIT yang terdiri dari LibreVNA, komputer kecil dan sensor berbasis MIT. Sensor MIT yang digunakan sebanyak tiga sensor dengan desain yang berbeda dan ketiga sensor tersebut merupakan sensor tipe selenoida. Adapun tipe sensor tersebut adalah sensor tipe I (sensor 2 kumparan 1 sumbu diameter lubang 3 mm), sensor tipe II (sensor 2 kumparan 1 sumbu diameter lubang 1 mm), dan sensor tipe III (sensor 2 kumparan 2 sumbu). Adapun parameter ketiga sensor tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Parameter Sensor

Parameter	Tipe I	Tipe II	Tipe III
Jumlah lilitan Tx (Lilitan)	115	115	750
Jumlah lilitan Rx (Lilitan)	1150	1150	1500
Diameter Tx (mm)	5	5	7
Diameter Rx (mm)	15	15	10
Diameter lubang Tx (mm)	3	1	1
Diameter lubang Rx (mm)	3	1	1

Setelah sampel pelat baja dan sensor MIT sudah disiapkan, kemudian melakukan persiapan pada sistem MIT atau disebut juga *welding inspection system* (WELINS) yaitu dengan menyalakan alat WELINS dan juga komputer kecil yang sudah terhubung sebelumnya. Rangkaian sistem MIT

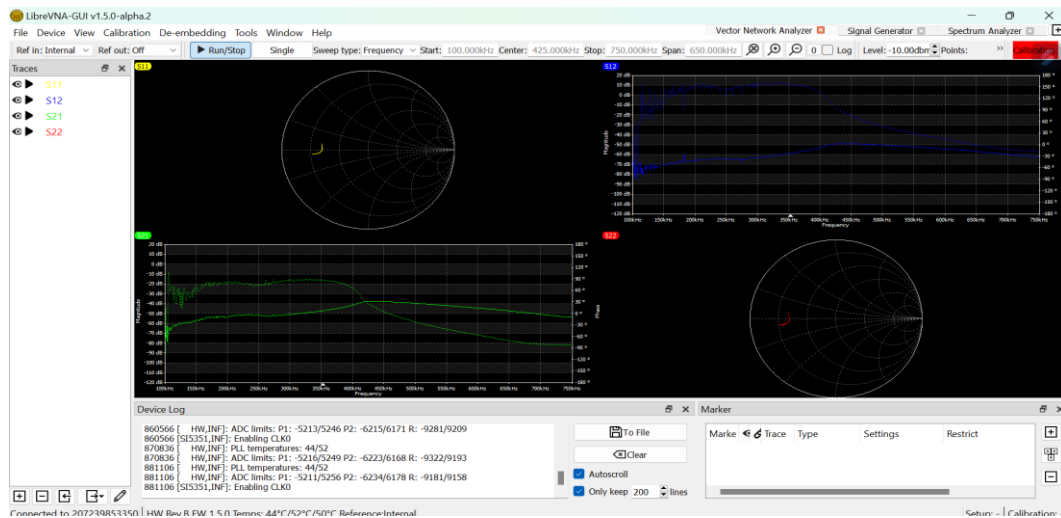
atau WELINS yang terdiri dari sensor, sampel pelat baja, termasuk di dalamnya terdapat LibreVNA dan komputer kecil dapat dilihat pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.4** Rangkaian sistem MIT

Setelah itu, jalankan *software* LibreVNA yang sudah terpasang pada WELINS tersebut maka akan muncul tampilan seperti Gambar 3.6. Selain *software* LibreVNA, jalankan juga *software* *Spyder* yang mana kedua *software* tersebut sudah saling terhubung. LibreVNA merupakan jenis VNA yang berperan sebagai pengatur rentang frekuensi kerja yang diinginkan dan sebagai keluaran hasil pantulan yang berupa Sparameter dua *port*. Sedangkan *software* *Spyder* berperan untuk menulis skrip Python yang dapat digunakan untuk mengendalikan LibreVNA seperti mengatur *range* frekuensi yang akan digunakan pada LibreVNA. Selain itu, skrip tersebut

dapat digunakan untuk mengatur parameter pengukuran, memulai dan menghentikan pengukuran yang sedang. Frekuensi kerja pada penelitian yang dilakukan adalah dengan frekuensi mulai 100 kHz dan frekuensi akhirnya 500 kHz (*point*: 101), mengatur IFBW sebesar 1 kHz, level sebesar -1, dan *average* sebesar 8, seperti yang terlihat pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.5** Tampilan *software* LibreVNA

```

27 # switch to VNA mode, setup the sweep parameters
28 print("Setting up the sweep..")
29 vna.cmd(":DEV:MODE VNA")
30 vna.cmd(":VNA:SWEEP FREQUENCY")
31 vna.cmd(":VNA:STIM:LVL -1")
32 vna.cmd(":VNA:ACQ:IFBW 1000")
33 vna.cmd(":VNA:ACQ:AVG 8")
34 vna.cmd(":VNA:ACQ:POINTS 101")
35 vna.cmd(":VNA:FREQUENCY:START 100000")
36 vna.cmd(":VNA:FREQUENCY:STOP 500000")
37 #vna.cmd(":VNA:CALibration:LOAD D:\Edwar\2022\MIT\SOFTWARE\Rumah Rohmadi\GU
38 #print(vna.query(":VNA:CALibration:LOAD? SOLT 100k-1.00M 501pt.cal"))
39 #directory = os.getcwd()
40 #print(directory)

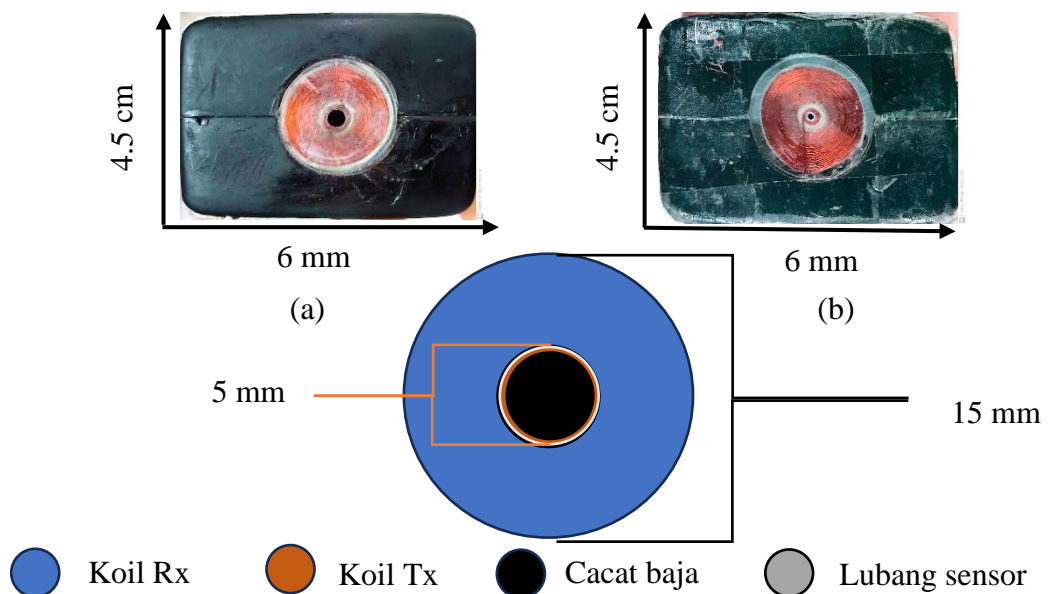
```

**Gambar 3.6** *Setting* LibreVNA pada *software* spyder

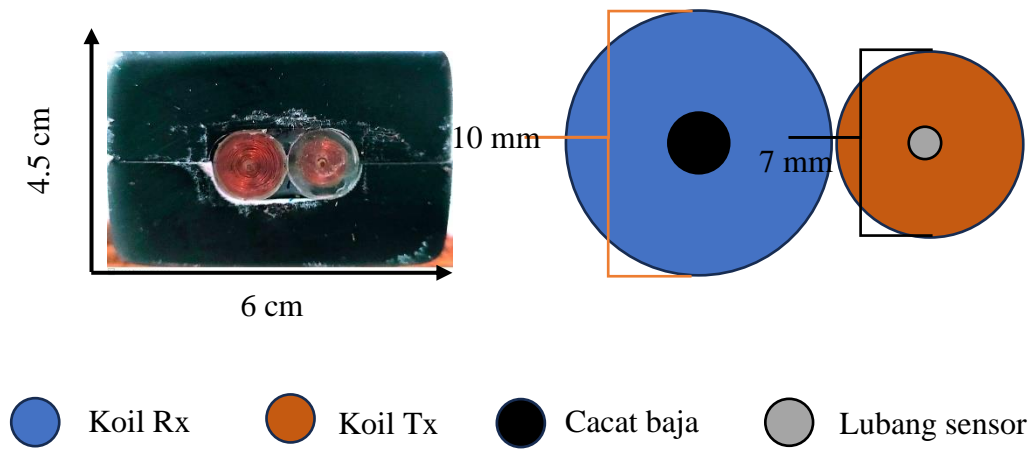
Proses selanjutnya dilakukan kalibrasi LibreVNA pada *port* 1 maupun *port* 2 secara bergantian dengan menggunakan kit kalibrasi *load*, *open*, *short*, dan *through*. Kalibrasi dilakukan untuk mengembalikan pengaturan ke posisi awal tanpa ada pengaturan lain dan untuk mengoreksi kesalahan

pengukuran yang disebabkan oleh faktor-faktor internal dan eksternal. Dilanjutkan dengan menghubungkan WELINS dengan kabel *transmitter* (Tx) sensor ke *port* 1 dan kabel *receiver* (Rx) sensor ke *port* 2.

Eksperimen pengujian sensor yaitu menginspeksi objek uji udara, baja normal serta cacat porositas maupun cacat retak. Dimana pengujian dimulai dengan sensor tipe I dan dilanjutkan sensor tipe II maupun sensor tipe III dengan *range* frekuensi kerja adalah 100 kHz - 500 kHz dan eksperimen dilakukan dengan kondisi pengukuran posisi cacat berada di bawah koil Rx dan Tx langsung. Berbeda dengan tipe I dan II kondisi pengukuran posisi cacat pada sensor tipe III berada di bawah koil Rx sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan bahwa pengukuran di bawah Rx langsung lebih sensitif. Adapun sensor MIT yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.7 dan ilustrasi kondisi pengukuran cacat dapat dilihat pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.7** Ilustrasi kondisi pengukuran sensor; (a) tipe I dan (b) tipe II



**Gambar 3.8** Ilustrasi kondisi pengukuran sensor tipe III

Setelah mendapatkan hasil pengukuran menggunakan ketiga sensor, hasil yang didapatkan dibandingkan diantara sensor-sensor tersebut dengan melihat perbandingan hasil pengukuran objek baja cacat, objek udara dan objek baja normal untuk menentukan sensor yang optimum dalam mendeteksi objek udara dengan baja maupun objek baja cacat. Setelah mengetahui sensor tipe mana yang paling optimum maka selanjutnya dilakukan inspeksi kembali pada objek udara, baja normal, dan baja cacat dengan *setting* LibreVNA pada *software* *Spyder* yang sama seperti pengaturan pada Gambar 3.6. Setelah seluruh eksperimen dilakukan, dilanjutkan dengan pengolahan hasil sehingga dapat dianalisa dan dibahas serta dapat ditarik kesimpulan.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil dari eksperimen yang telah dilakukan dengan sensor MIT diperoleh data penelitian yang perlu dianalisa. Data yang diperoleh dari eksperimen adalah data impedansi dari objek uji baja normal, udara (tanpa objek), dan baja cacat (cacat porositas dan cacat retak). Pada bab ini akan dilakukan pembahasan data-data hasil inspeksi menggunakan tiga tipe sensor MIT pada baja normal, udara, dan baja cacat.

#### **4.1 Karakterisasi Sinyal *Output* pada Jenis Desain Sensor**

Hasil sinyal *output* dari pengukuran pada objek uji baja normal dan udara menggunakan sensor tipe I, tipe II, dan tipe III dapat dilihat pada Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3. Dari semua sensor tersebut hasil sinyal yang ditunjukkan oleh objek baja normal dan udara terlihat nilai impedansi udara lebih kecil dibandingkan dengan nilai impedansi baja normal. Dimana sinyal *output* dalam hal ini nilai impedansi objek uji udara dan baja normal dijadikan sinyal dasar untuk mendeteksi sinyal cacat-cacat yang dideteksi. Sinyal baja normal dengan udara menjadi batas atas dan bawah untuk mendeteksi sinyal cacat, dikarenakan di dalam cacat terdapat objek baja maupun objek udara yang terukur. Oleh karena itu, hasil dari plotting sinyal baja normal dengan udara dicari nilai impedansi dengan gap terjauh dan konsisten dari ketiga sensor yang digunakan. Nilai impedansi udara lebih kecil dibandingkan dengan nilai impedansi baja terjadi pada ketiga sensor yang digunakan, seperti

ditunjukkan oleh Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 di bawah yang diplot pada frekuensi 100 kHz – 500 kHz. Pada gambar-gambar tersebut objek udara menggunakan garis biru sedangkan objek baja menggunakan garis oranye. Berbeda dengan hasil yang diperoleh, apabila nilai impedansi dihubungkan dengan resistivitas, karena resistivitas udara memiliki nilai lebih besar dibandingkan dengan resistivitas baja. Resistivitas merupakan suatu ukuran dari hambatan listrik yang diberikan terhadap arus listrik. Berdasarkan hubungan resistivitas dengan impedansi yang dapat dirumuskan dengan persamaan (4.1) (Maulandari, 2018). Nilai impedansi udara akan berbanding lurus dengan resistivitas udara maka impedansi udara juga lebih besar dibandingkan dengan impedansi baja.

$$Z = \sqrt{\left(\rho \frac{L}{A}\right)^2 + (X_L - X_C)^2} \dots\dots\dots(4.1)$$

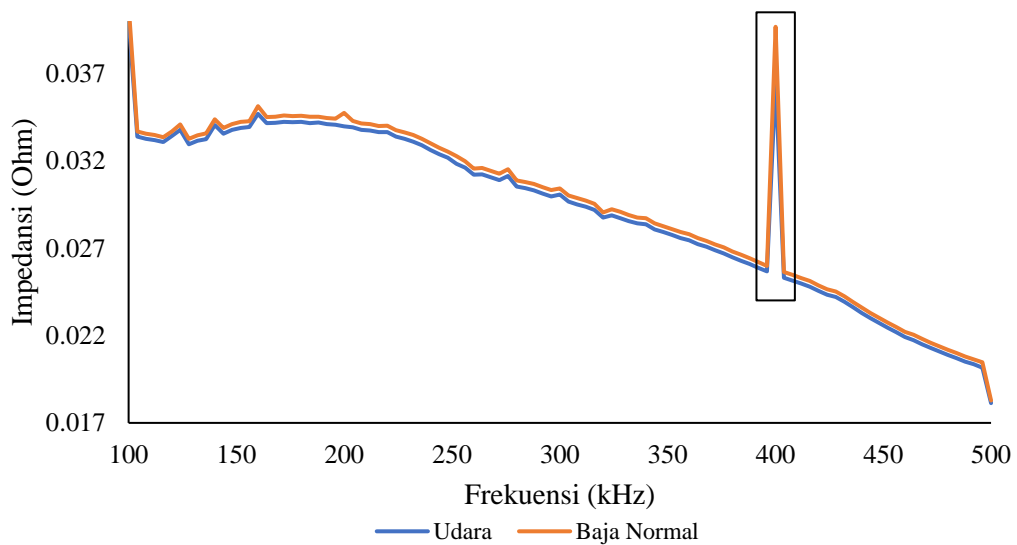
Dimana Z adalah impedansi (Ohm), R adalah resistansi (Ohm), ρ adalah resistivitas (Ohm), L adalah panjang dari bahan (m), A adalah luas penampang melintang bahan (m<sup>2</sup>), X<sub>L</sub> adalah reactance induktif dan X<sub>C</sub> adalah reactance kapasitif. Namun nilai impedansi pada sensor magnetik induksi tidak hanya dipengaruhi oleh resistivitas saja terutama pada penggunaan sensor magnetik induktansi ini. Pada sensor magnetik induktansi salah satu hal yang harus diperhatikan atau faktor yang dapat mempengaruhi nilai impedansi adalah sifat permeabilitas. Permeabilitas adalah kemampuan dari suatu material untuk memusatkan garis gaya magnet (*magnetic lines*). Dimana baja memiliki nilai permeabilitas lebih besar dibandingkan dengan permeabilitas udara. Udara memiliki nilai permeabilitas sebesar 1.2566 x 10<sup>-6</sup> H/m, sedangkan baja sebesar 1.26 x 10<sup>-4</sup> H/m. Sehingga ketika sensor magnetik induksi diinduksi pada baja maka

induksi magnetik yang dihasilkan lebih besar. Berdasarkan hal tersebut, maka hubungan permeabilitas dengan impedansi adalah berbanding lurus semakin besar suatu material uji mempunyai permeabilitas tinggi maka akan semakin besar juga nilai impedansi yang terukur. Perbedaan nilai impedansi udara yang lebih kecil dibandingkan udara pada penelitian ini disebabkan karena udara memiliki permeabilitas yang lebih kecil daripada baja. Hal itu disebabkan oleh adanya perbedaan sifat-sifat material antara udara dan baja. Udara terdiri dari molekul-molekul gas yang tidak memiliki muatan listrik, sementara baja terdiri dari atom-atom besi yang memiliki muatan. Pernyataan di atas dibuktikan dengan hasil pengukuran yang telah dilakukan dengan melihat hasil plotting antara baja normal dengan udara yang terdapat pada Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 yang menunjukkan baja secara konsisten memiliki nilai impedansi lebih besar dibandingkan nilai impedansi udara. Sehingga dengan melalui perbandingan antara pengaruh resistivitas dan pengaruh permeabilitas, dapat disimpulkan bahwa pengaruh permeabilitas lah yang memiliki korelasi dengan sensor magnetik induksi tersebut.

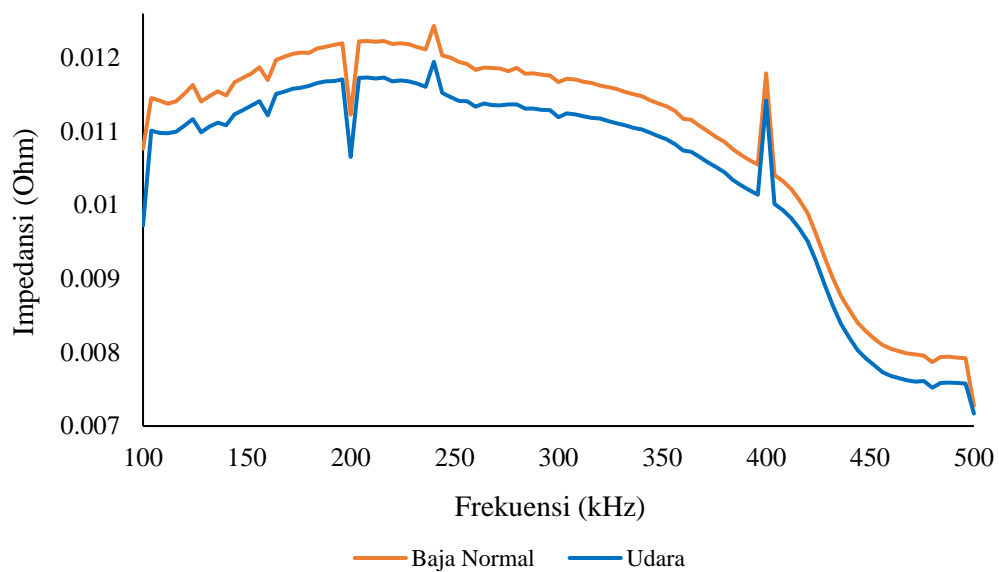
Selain itu, pada sinyal hasil *output* dari ketiga sensor terdapat nilai impedansi pada beberapa frekuensi yang mengalami kenaikan maupun penurunan secara signifikan, seperti pada Gambar 4.1 yang diberikan tanda kotak pada grafik. Hal tersebut terjadi pada sinyal pengukuran udara maupun pada sinyal baja normal, fenomena tersebut dianggap pola sinyal yang terbentuk dari sensor yang digunakan dan tidak bisa dikatakan *noise*. Pada sebuah sinyal terdapat istilah sinyal harmonik. Keberadaan sinyal harmonik dalam sistem distribusi tenaga listrik merupakan konsekuensi dari distorsi gelombang arus dan tegangan yang terjadi pada sensor.



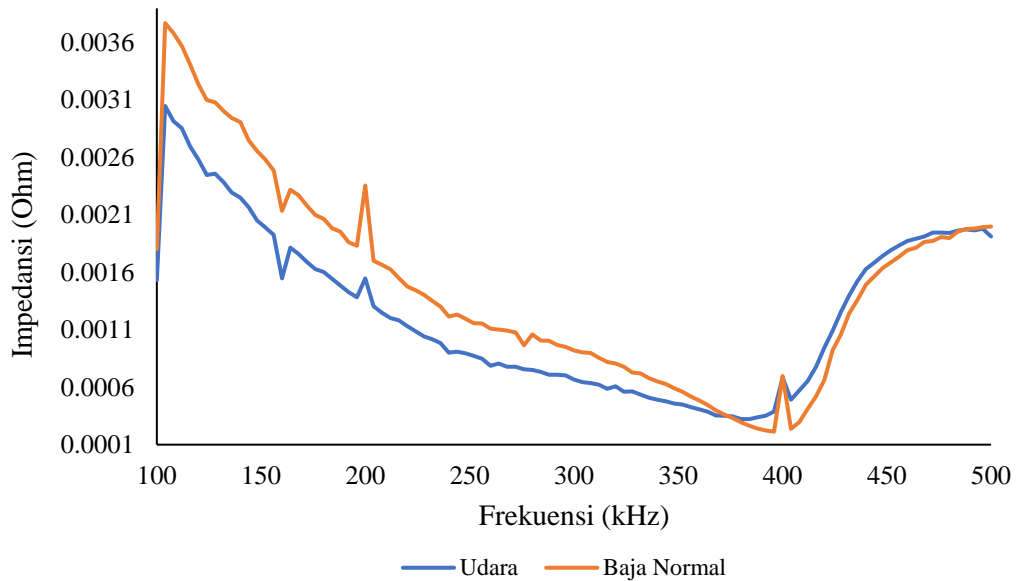
Dalam sistem tenaga listrik dikenal dengan beban linier. Beban linier memiliki karakteristik unik, yaitu arus yang dialirkannya sepenuhnya mengikuti perubahan tegangan dan impedansi. Fenomena yang paling umum dari harmonisa ini adalah bentuk gelombang arus dan tegangan terdistorsi, serta menciptakan resonansi (J. C. Das, 2015).



**Gambar 4.1** Sinyal *output* sensor tipe I pada objek udara dan baja normal

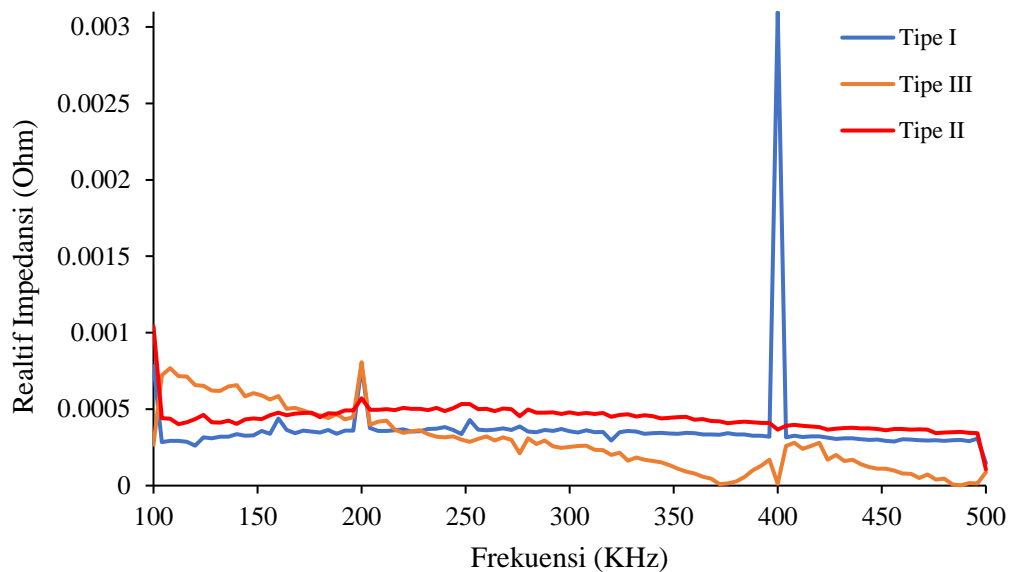


**Gambar 4.2** Sinyal *output* sensor tipe II pada objek udara dan baja normal



**Gambar 4.3** Sinyal *output* sensor tipe III pada objek udara dan baja normal

Perbandingan nilai impedansi dengan gap terjauh antara baja normal dan udara dapat dilihat pada Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3. Hasil yang ditunjukkan oleh ketiga tipe sensor tersebut terlihat bahwa sensor tipe I dan sensor tipe II memiliki gap impedansi baja normal dan udara yang konsisten walaupun sensor tipe I gap impedansi yang terlihat tidak cukup jauh. Hasil yang sama bahwa sinyal yang terukur pada baja normal lebih tinggi dibandingkan dengan sinyal terukur pada udara (Huda, 2020). Sedangkan sensor tipe III menunjukkan gap impedansi yang jauh juga terutama pada frekuensi 100 kHz - 300 kHz. Namun sensor tipe ini menunjukkan tidak terlalu konsisten terlihat setelah nilai impedansi baja normal dan udara berpotongan pada frekuensi 370 kHz nilai impedansi baja normal berada di bawah impedansi udara. Untuk melihat sensor tipe mana yang memiliki nilai gap impedansi paling besar dan konsisten, maka diplotting grafik selisih impedansi baja normal dengan impedansi udara. Berikut ini hasil selisih impedansi baja normal dan impedansi udara bisa dilihat pada Gambar 4.4.



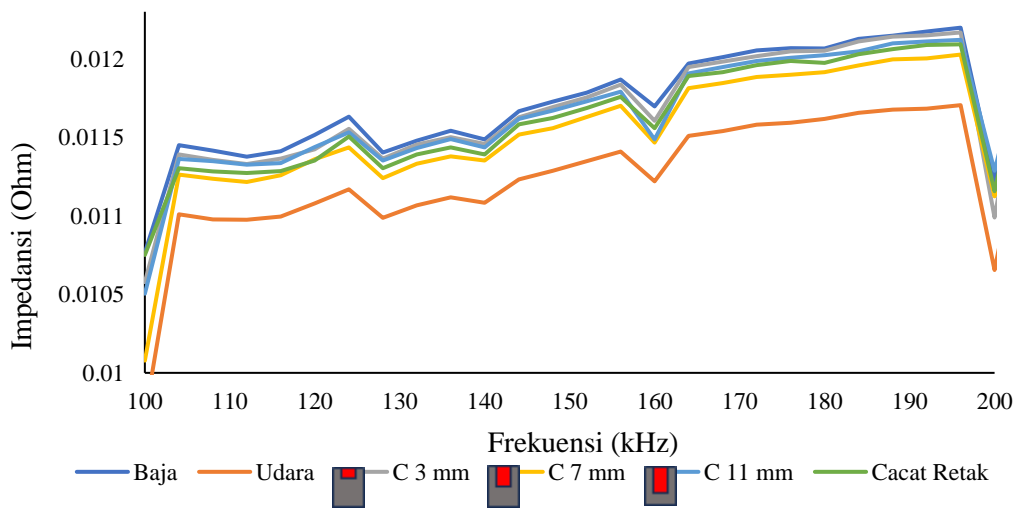
**Gambar 4.4** Selisih nilai impedansi normalisasi baja normal dengan udara

Berdasarkan Gambar 4.4 dapat dilihat sensor tipe III yang ditunjukkan dengan garis berwarna oranye terlihat pada rentang frekuensi 100 kHz – 170 kHz memiliki nilai gap impedansi paling besar dibandingkan dengan kedua sensor yang lain. Namun setelah frekuensi 232 kHz hingga frekuensi 500 kHz nilai gap impedansi sensor tipe ini menjadi nilai gap impedansi yang paling kecil dibandingkan dengan nilai gap impedansi sensor yang lain. Berdasarkan hasil tersebut sensor tipe III dapat dikatakan belum optimal. Kemudian pada sensor tipe II dengan garis berwarna merah menunjukkan nilai gap impedansi yang konsisten dari frekuensi 100 kHz – 500 kHz. Selain itu dari frekuensi 200 kHz – 500 kHz nilai gap impedansi pada sensor tipe ini memiliki nilai paling besar dibandingkan dengan sensor dua lainnya, dari hasil tersebut sensor tipe ini dapat dikatakan optimal. Kemudian, untuk hasil sensor tipe I dengan garis berwarna biru menunjukkan secara keseluruhan dari rentang frekuensi 100 kHz – 500 kHz nilai

gap impedansi terlihat konsisten sehingga sensor tipe I juga dianggap optimal. Dari hasil yang diperoleh dapat ditentukan sensor tipe I yang menjadi sensor optimum digunakan untuk mendeteksi baja cacat. Sensor dapat dikatakan optimal tidak hanya ditinjau dari seberapa besar nilai gap impedansi baja normal dan udara, namun ditinjau juga dari sensitivitas sensor dalam menginspeksi cacat ditandai dengan posisi sinyal nilai impedansi baja cacat berada di antara nilai impedansi baja dan udara serta nilai impedansi cacat yang diinspeksi berurutan. Berdasarkan pertimbangan tersebut, sensor yang paling optimal adalah sensor tipe I dibandingkan dengan sensor tipe II. Hal tersebut bisa dilihat dari grafik hasil inspeksi pada baja cacat menggunakan sensor tipe II yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Hasil yang ditunjukkan semua nilai impedansi baja cacat berada diantara nilai impedansi baja normal dan udara. Namun, urutan nilai impedansi cacat porositas dengan variasi kedalaman dan cacat retak tidak berurutan, yang mana seharusnya nilai impedansi cacat retak berada paling bawah. Kemudian untuk nilai impedansi cacat porositas seharusnya berurutan sesuai dengan masing-masing kedalaman cacat. Berbeda dengan hasil inspeksi pada baja cacat pada sensor I yang dapat dilihat pada Gambar 4.7. Hasil yang ditunjukkan adalah nilai impedansi baja cacat berada diantara nilai impedansi baja normal dan udara, dan juga nilai impedansi cacat-cacat yang didapatkan sudah berurutan.

Selain itu, hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4 juga terlihat bahwa sensor dengan tipe III (dua kumparan dua sumbu) memiliki sinyal yang kurang stabil artinya sinyal yang dihasilkan sensor tipe III ini kurang sensitif dan sinyal yang kurang kuat. Berbeda dengan hasil yang diperoleh oleh sensor tipe I dan II.

Sinyal yang dihasilkan oleh kedua sensor tersebut tidak mengalami penurunan dan cenderung konsisten artinya kedua sensor tersebut memiliki sinyal yang kuat dan lebih sensitif. Perbedaan yang terjadi diantara sensor-sensor tersebut disebabkan oleh adanya jarak antara koil *transmitter* dan koil *receiver*. Pada sensor tipe III terdapat jarak sekitar 2 mm, namun pada sensor tipe I dan II tidak ada jarak antara koil *transmitter* dan koil *receiver*. Oleh karena itu dapat berpengaruh pada kuat atau tidak sinyal yang ditangkap koil *receiver*. Hal ini disebabkan jarak antar koil semakin kecil, akan memiliki medan magnet lebih besar.

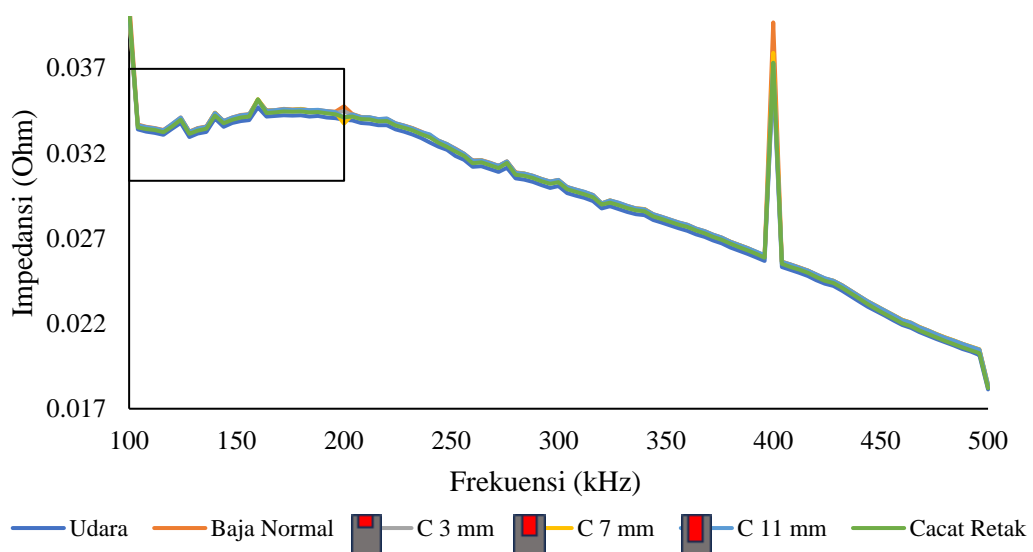


**Gambar 4.5** Hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara pada sensor II

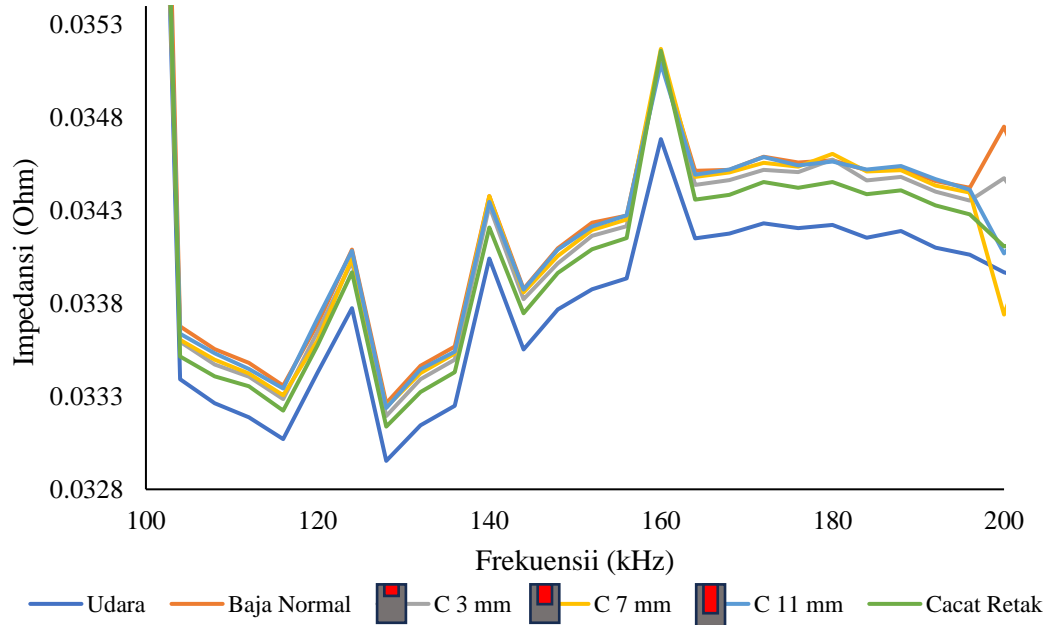
#### 4.2 Analisis Hasil Eksperimen Inspeksi Cacat dengan Sensor Optimal

Hasil eksperimen inspeksi cacat dengan sensor optimal yaitu sensor tipe I pada frekuensi 100 kHz - 500 kHz yang terlihat pada Gambar 4.6. Namun pada rentang frekuensi 100 kHz - 500 kHz perbedaan antara objek uji baja normal, baja cacat dan udara tidak terlalu nampak sehingga perlu *zoom out* pada bagian nilai yang optimum dari grafik tersebut. Berdasarkan Gambar 4.7 menunjukkan pola

yang terbentuk antara objek uji baja normal, udara, dan cacat porositas kedalaman 3, 7, 11 mm, dan cacat retak memiliki pola yang sama. Sehingga dari hasil pengukuran tersebut yang dapat dianalisis adalah nilai impedansi dari objek-objek yang terdeteksi. Pemilihan *range* frekuensi 100 kHz - 200 kHz pada *zoom out* dikarenakan pada *range* frekuensi tersebut optimum untuk melihat perbedaan nilai impedansi baja normal, udara, dan baja cacat. Hasil inspeksi dari sensor optimum terlihat pada Gambar 4.7 yang menunjukkan secara keseluruhan nilai impedansi baja normal merupakan nilai yang tertinggi dan hal itu sesuai dengan nilai impedansi baja normal dijadikan nilai batas atas. Hal yang sama pada nilai impedansi udara menjadi nilai batas bawah yang terbukti pada hasil grafik tersebut nilai impedansi udara menjadi yang paling kecil. Kemudian pada Gambar 4.7 juga menunjukkan nilai impedansi cacat retak berada lebih dekat dengan sinyal nilai impedansi udara hal tersebut disebabkan karena pada saat inspeksi persentase objek udara pada cacat retak lebih banyak dibandingkan dengan persentase udara pada cacat porositas.



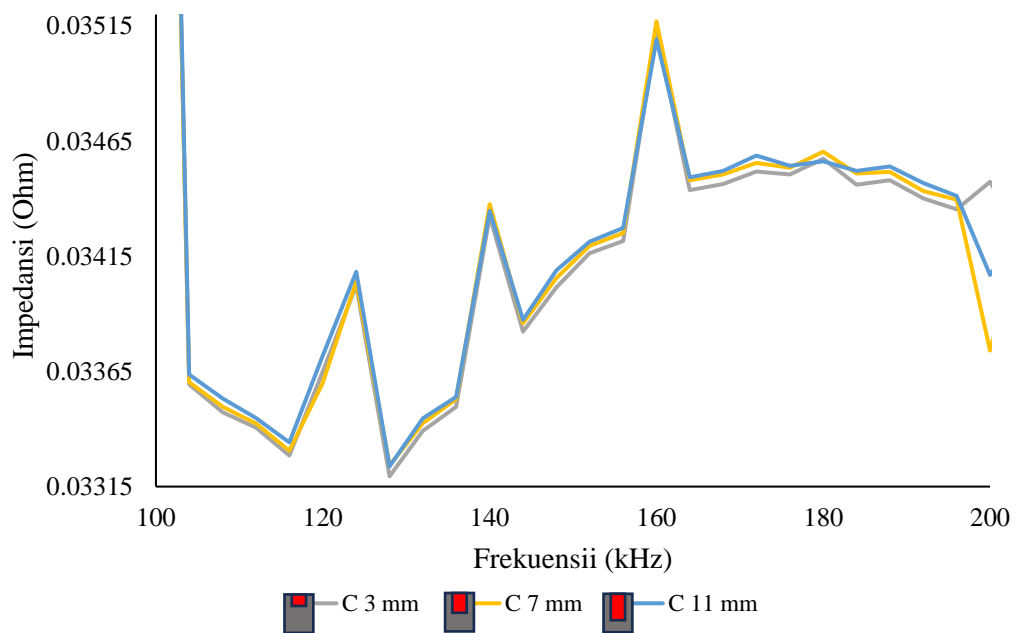
**Gambar 4.6** Hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara



**Gambar 4.7** Zoom out hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara

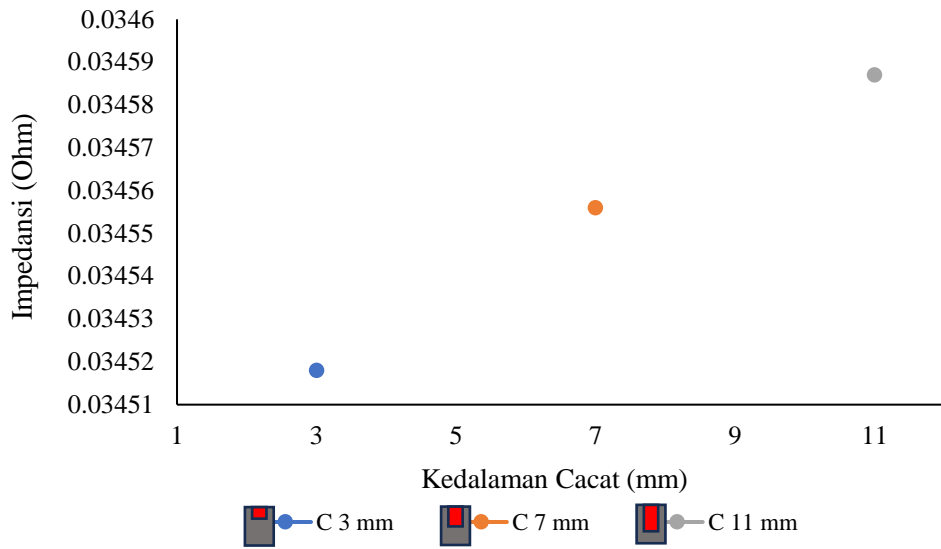
Gambar 4.8 merupakan hasil inspeksi pada variasi kedalaman cacat porositas menggunakan sensor optimal. Hasil menunjukkan bahwa nilai impedansi cacat porositas kedalaman 11 mm secara keseluruhan menjadi yang paling tinggi dibandingkan cacat porositas kedalaman lainnya. Nilai impedansi cacat kedalaman 7 mm berada diantara kedalaman cacat porositas lain, serta untuk nilai impedansi cacat porositas kedalaman 3 mm menjadi paling kecil. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 yang merupakan grafik variasi kedalaman cacat porositas pada frekuensi 172 kHz. Pada gambar tersebut di frekuensi 172 kHz, nilai impedansi cacat porositas kedalaman 11 mm sebesar  $34.587 \text{ m}\Omega$ , nilai impedansi cacat porositas kedalaman 7 mm sebesar  $34.556 \text{ m}\Omega$ , dan nilai impedansi cacat porositas kedalaman 3 mm sebesar  $34.518 \text{ m}\Omega$ . Hasil tersebut menunjukkan pengukuran cacat porositas kedalaman 11 mm memiliki nilai impedansi mendekati nilai

impedansi baja normal dan pengukuran cacat porositas kedalaman 3 mm mempunyai nilai impedansi yang paling jauh dengan nilai impedansi baja. Serta dapat disimpulkan bahwa pengukuran dengan sensor tipe I sudah dapat membedakan cacat porositas dengan variasi kedalaman dengan pengukuran optimum pada kedalaman 3 mm artinya sensor tipe I sudah sensitif. Akan tetapi, belum maksimal dalam menginspeksi cacat kedalaman 11 mm, karena arus eddy yang menginspeksi kedalaman tersebut kurang maksimal. Salah satu penyebab hal tersebut terjadi adalah geometri sensor, karena dikatakan jika semakin kecil geometri koil, maka semakin tinggi sensitivitas yang diperoleh. Dengan kata lain, agar dapat mendeteksi cacat kecil, ukuran koil juga harus diperkecil (Helier, 2003). Berbeda dengan ukuran koil pada sensor tipe I ini yang memiliki diameter koil 15 mm yang ukuran koil melebihi ukuran cacat yang diinspeksi yaitu ukuran cacat 5 mm.



**Gambar 4.8** *Zoom out* hasil inspeksi pada variasi kedalaman cacat porositas

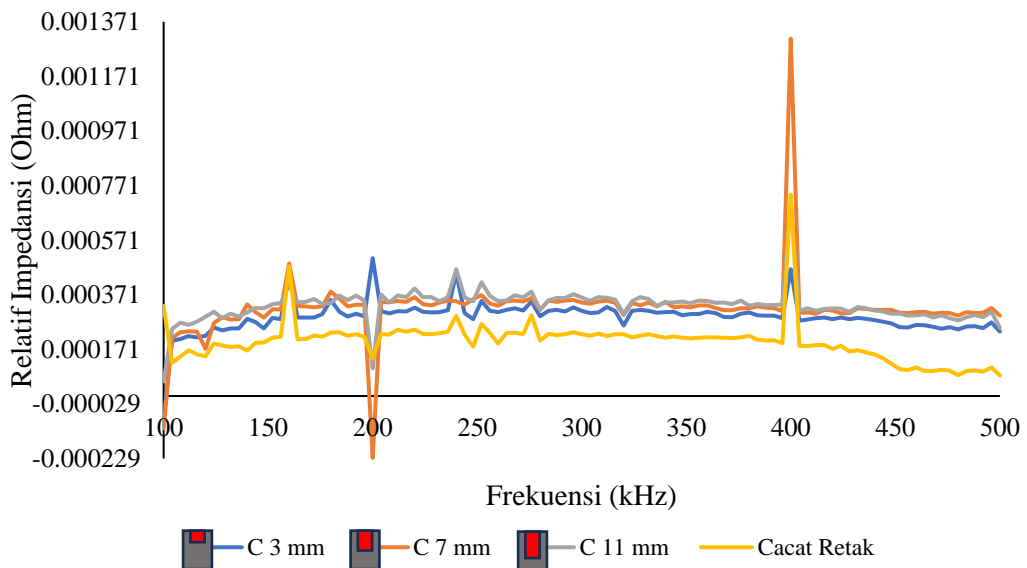




**Gambar 4.9** Grafik variasi kedalaman cacat porositas pada frekuensi 172 kHz

### 4.3 Analisis Nilai Relatif Impedansi pada Variasi Kedalaman dan Bentuk

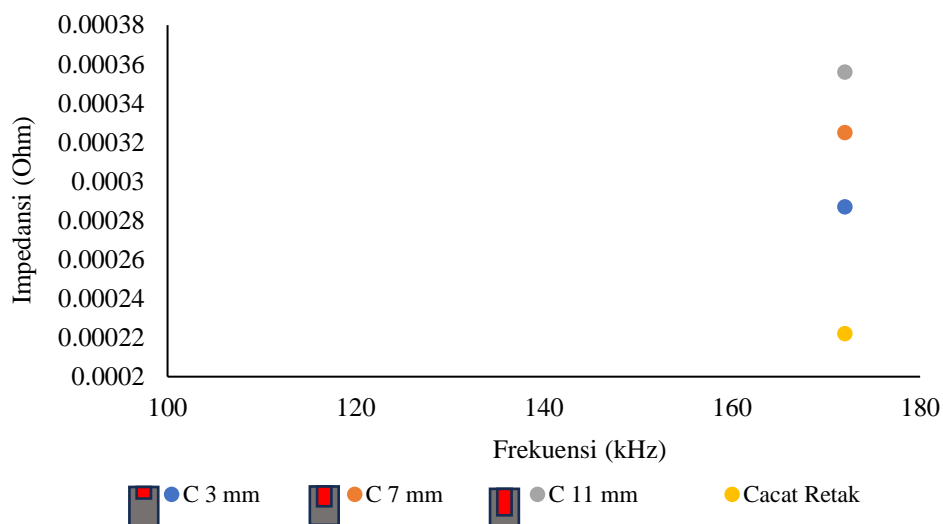
#### Cacat



**Gambar 4.10** Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat

Dalam sensor MIT nilai konduktivitas listrik menjadi salah satu parameter penting. Konduktivitas akan mempengaruhi sensitivitas sensor MIT karena perbedaan konduktivitas menyebabkan perbedaan sinyal yang terdeteksi. Disekitar

area inspeksi, tegangan atau nilai yang terdeteksi proporsional dengan perubahan konduktivitas dalam area inspeksi (Jing, 2010). Untuk mengetahui apakah sensor sensitif terhadap cacat porositas dengan kedalaman yang berbeda dan pada cacat retak, maka dilakukan pendekatan dengan menggunakan selisih relatif impedansi kondisi udara dan cacat. Gambar 4.10 merupakan grafik relatif impedansi objek uji cacat porositas dengan kedalaman yang berbeda dan cacat retak. Secara keseluruhan nilai impedansi semua kondisi baja cacat dari frekuensi 100 kHz hingga 500 kHz menunjukkan nilai impedansi yang berurutan. Untuk lebih jelas melihat perbedaan nilai impedansi yang diperoleh maka dapat dilihat Gambar 4.11.

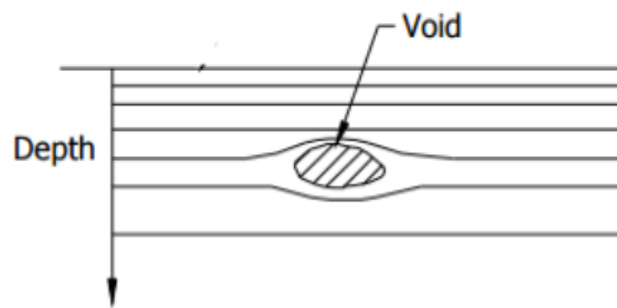


**Gambar 4.11** Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat pada frekuensi 172 kHz

Gambar 4.11 menunjukkan grafik pada frekuensi 172 kHz cacat retak memiliki nilai relatif impedansi yang paling kecil sebesar 0.222 mΩ dibandingkan dengan nilai relatif impedansi cacat porositas. Sedangkan pada nilai relatif impedansi cacat porositas variasi kedalaman, cacat porositas kedalaman 3 mm

memiliki nilai relatif impedansi paling kecil diantara cacat porositas kedalaman lainnya yaitu sebesar  $0.287 \text{ m}\Omega$ . Sedangkan cacat porositas kedalaman 7 mm berada diantara kedalaman 3 mm dengan 11 mm dengan nilai relatif impedansi  $0.325 \text{ m}\Omega$ , dan cacat porositas kedalaman 11 mm memiliki nilai relatif impedansi yang paling tinggi dengan nilai sebesar  $0.356 \text{ m}\Omega$ . Berdasarkan hal itu, pengukuran pada cacat porositas kedalaman 3 mm terukur memiliki nilai impedansi udara yang lebih besar dibuktikan dengan nilai relatif impedansi menjadi paling kecil artinya pengukuran maksimal terjadi pada kedalaman tersebut. Selain itu terdapat hubungan juga dengan distribusi dan intensitas arus eddy pada material dengan konduktivitas yang relatif tinggi, arus eddy yang kuat dihasilkan di permukaan. Arus eddy yang kuat membentuk medan elektromagnetik sekunder yang kuat yang berlawanan dengan yang diterapkan bidang utama. Pada material yang sangat konduktif, arus eddy yang kuat terbentuk di dekat permukaan, tetapi kekuatan berkurang dengan cepat dengan kedalaman (Prayuda, 2021). Nilai relatif impedansi cacat retak pada sensor tipe I menunjukkan yang paling bawah dari nilai relatif impedansi cacat lain. Hal tersebut dapat dikatakan bahwa sensor tipe I dapat membedakan cacat retak. Hal tersebut disebabkan pada saat inspeksi cacat retak, udara yang terukur lebih banyak dibandingkan dengan cacat porositas sehingga nilai impedansi cacat retak paling kecil. Sensor ini juga sudah dapat membedakan cacat porositas dengan kedalaman 3 mm, 7 mm dan 11 mm walaupun sedikit berimpit. Harus ada perbedaan nilai relatif impedansi pada pengukuran cacat porositas maupun cacat retak dengan objek uji baja normal sebagai material dasar disebabkan ketika sensor melewati area pelat baja yang terdapat diskontinuitas, arus

eddy mengalami perubahan aliran atau terganggu, sehingga besar medan magnet sekunder yang dihasilkan arus eddy juga mengalami perubahan. Adanya rongga pada baja dapat mengubah nilai konduktivitas dan permeabilitas baja. Hal ini menyebabkan medan magnet pada koil *receiver* ketika melewati area diskontinuitas mengalami perubahan dan menyebabkan terjadinya perbedaan pada besaran yang terukur. Ilustrasi perubahan arus eddy akibat adanya diskontinuitas ditunjukkan pada Gambar 4.12 sebagai berikut.



**Gambar 4.12** Ilustrasi perubahan arus eddy akibat diskontinuitas (Rahim, 2012)

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan yang dapat diperoleh setelah dilakukan penelitian dan diketahui hasilnya adalah sebagai berikut:

1. Baja normal memiliki nilai impedansi lebih besar dibandingkan dengan nilai impedansi udara. Dari ketiga tipe sensor yang digunakan sensor tipe I menjadi sensor yang optimal untuk digunakan. Dilihat berdasarkan nilai gap impedansi baja dengan udara yang paling jauh dan sensitivitas dalam inspeksi baja cacat.
2. Nilai impedansi baja cacat berada di antara nilai impedansi baja normal dan udara. Hasil pengukuran juga menunjukkan bahwa sensor tipe I sudah dapat membedakan cacat porositas dengan variasi kedalaman dengan pengukuran optimum pada kedalaman 3 mm.
3. Sensor tipe I juga sudah sensitif dalam membedakan bentuk cacat yaitu cacat retak dan cacat porositas yang ditunjukkan dengan hasil nilai relatif impedansi pada frekuensi 172 kHz cacat retak menjadi nilai yang paling kecil dibandingkan dengan nilai relatif impedansi cacat porositas sebesar 0.222 m $\Omega$ . Sedangkan pada nilai relatif impedansi cacat porositas variasi kedalaman, nilai dari yang paling tinggi ke rendah adalah 0.356 m $\Omega$  pada kedalaman 11 mm, 0.325 m $\Omega$  pada kedalaman 7 mm, dan 0.287 m $\Omega$  pada kedalaman 3 mm.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian ini lebih lanjut adalah sebagai berikut:

1. Memperhatikan parameter pada sensor yang dapat mempengaruhi performa sensor seperti jumlah lilitan koil, dimensi koil sensor, diameter kawat dan lain-lain. Sehingga sensor yang diperoleh maksimal artinya sensor dapat mendeteksi cacat dan mampu menjangkau cacat las yang berukuran kecil serta lebih dalam.
2. Melakukan proses kalibrasi alat dengan benar sesuai panduan yang ada dan mencari frekuensi kerja yang optimal untuk sensor magnetik induksi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al Huda, Mahfudz, et al., 2020. "Characterization of Magnetic Induction Coil Sensor for VOID Detection in Steel Plate." 2020 International Conference on Smart Technology and Applications (ICoSTA). IEEE.
- A. Rahim, 2012. "Single Phase Measurement of Magnetic Induction Tomography," Thesis. Diterbitkan. Malaysia: Teknik Listrik dan Instrumen, Universiti Teknologi Malaysia.
- ASNT. 2007. "Depth of Penetration and Current Density". <https://www.nde-ed.org/Physics/Electricity/depthcurrentdensity.xhtml>. [Diakses pada 29 Februari 2024]
- Bowler, N. (1999) Eddy Current Nondestructive Evaluation, Springer Series in Measurement Science and Technology Series.
- Chandra, P. and Bhagi, R. (2014) 'Basics Eddy Current Testing : Basics', (March 2011).
- D. Hadzihafizovic. (2022) 'Porosity in Welding Causes Remedies. Journal Article. 1-14.
- Das, J. C. (2015). Power system harmonics and passive filter designs. John Wiley & Sons.
- García-Martín, J., Gómez-Gil, J. and Vázquez-Sánchez, E. (2011) 'Non-destructive techniques based on eddy current testing', Sensors, 11(3), pp. 2525–2565.
- Ghoni, R. et al. (2014) 'Defect Characterization Based on Eddy Current Technique: Technical Review', Advances in Mechanical Engineering, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1155/2014/182496>.
- Giawa, I.R.F., Hutagaol, K. and Saragih, H., 2013. Penggunaan Model Pembelajaran Auditori Intellectually Repetition (AIR) untuk Meningkatkan Kemampuan Komunikasi Matematis Siswa SMP. In Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2013 (SKF 2013) (pp. 175-180).

- Griffiths, H. (2001) 'Magnetic induction tomography', *Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications*, 1126, pp. 309–337. Available at: <https://doi.org/10.1201/9780429399886-16>.
- Helier, C. (2003) *Handbook Of Nondestructive Evaluation*. Second Edi. USA: McGraw-Hill Companies.
- Hilzaviani, N. 2021. *Deteksi Cacat Las Pori Menggunakan Metode Machine Learning Sistem Magnetic Induction Tomography (MIT)*. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- Igney, C.H. et al. (2005) 'Design and performance of a planar-array MIT system with normal sensor alignment', *Physiological Measurement*, 26(2). Available at: <https://doi.org/10.1088/0967-3334/26/2/025>.
- Jing, S., Fuqun, S. and Yafei, S., 2010. 'Analysis of sensor field in electromagnetic 85 tomography', 2010 6th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2010. doi: 10.1109/WICOM.2010.5600860.
- Kadir, 1984. *Pengantar Teknik Tenaga Listrik*. Jakarta: LP3ES.
- Khan, I. (2007) *Welding Science And Technology*. New Delhi: New Age International Publisher.
- Lusiyana, A., Toifur, M. and Rohman, F., 2014. Uji sifat magnetik pasir pantai melalui penentuan permeabilitas relatif menggunakan Logger Pro. *Jurnal Fisika*, 4(2).
- Ma, L. and Soleimani, M. (2017) 'Magnetic induction tomography methods and applications: A review', *Measurement Science and Technology*, 28(7). Available at: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa7107>.
- Mansor, M.S.B. et al. (2015) 'Magnetic induction tomography: A brief review', *Jurnal Teknologi*, 73(3), pp. 91–95. Available at: <https://doi.org/10.11113/jt.v73.4252>.
- Maulandari, E.Z., 2018. *Analisis Hasil Pengukuran Impedansi Listrik Dengan Menggunakan Metode Injeksi Arus Tipe Floating Dan Howland*. Skripsi UB. Malang.



- MIT. (2012). "Chapter 11. Inductance and Magnetic Energy". [Online] Available at : <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide11.pdf> [diakses 15 Februari 2024].
- Prayuda, A.S.T. and Putra, W.H.A., 2021. Analisis Kemampuan Pendeteksian Pengujian Eddy Current terhadap Crack Toe pada Sambungan Tee Material Aluminium 5083 yang Dilapisi Non-Conductive Coating dengan Variasi Kedalaman dan Panjang Crack. *Jurnal Teknik ITS*, 10(1), ppG14-G21.
- A. Rahim, "Single Phase Measurement of Magnetic Induction Tomography," Thesis. Diterbitkan. Malaysia: Teknik Listrik dan Instrumen, Universiti Teknologi Malaysia. 2012
- Rais, R. and Putra, W.H.A., 2015. Studi Perbandingan Kecepatan dan Ketelitian Pengujian Magnetic Particle Testing (MT) dan Eddy Current Testing (ECT) pada Material Baja Karbon.
- Singh, S. (2018) 'Analysis of various defects involved in Welding metallurgy Renewable Energy View project Production View project Analysis of various defects involved in Welding metallurgy', (August). Available at: <https://www.researchgate.net/publication/335172629>.
- Slodička, M., & Van Bockstal, K. (2021). A time discrete scheme for an electromagnetic contact problem with moving conductor. *Applied Mathematics and Computation*, 404, 125997.
- Society, A.W. (2015) *Welding Inspection Handbook*. Fourth. USA: American Welding Society.
- Sutisna, D. et al. (2014) 'Flaw detection in welded metal using magnetic induction tomography', *Advanced Materials Research*, 896, pp. 722–725. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.896.722>.
- Tondok, Y.P., Patras, L.S. and Lisi, F., 2019. Perencanaan Transformator Distribusi 125 kVA. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 8(2), pp.83-92.
- Wahyuningrum, R.R. and Budi Legowo, D., 2013. Aplikasi Software 3 Dimensi Inversi Dalam Interpretasi Sebaran Air Tanah. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 1(2).
- Yang, X., Feng, Y. and Li, S., 2018, December. Influence of Measuring Coil Geometry on Detection Performance of Eddy Current Sensor. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 452, No. 4, p. 042045). IOP Publishing.

## LAMPIRAN A

### CONTOH PERHITUNGAN

#### A.1 Perhitungan Impedansi

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_l - X_c)^2} \dots \dots \dots A.1$$

Pada data yang dihasilkan oleh WELINS berupa data numerik yang terdiri dari frekuensi, Dut.Real, dan Dut.Imag. Maka perhitungan untuk mencari impedansi di excel adalah dengan rumus:

$$Z = \text{SQRT}(\text{dut. real}^2 + \text{dut. imag}^2) \dots \dots \dots A.2$$

Dimana dut. real sebagai R (resistansi), dan dut. imag sebagai  $(X_l - X_c)$ .

Pada frekuensi 100 kHz nilai dut.real = 0,00074, dan dut.imag = 0.003176

$$Z = \text{SQRT}(0.00074^2 + 0.003176^2) = 0.00326 \text{ Ohm}$$

#### A.2 Perhitungan Relatif Impedansi

$$\text{Relatif Impedansi} = \text{Impedansi Baja cacat} - \text{Impedansi Udara} \dots \dots \dots A.3$$

Pada frekuensi 100 kHz impedansi baja cacat = 0.0042 Ohm, dan impedansi udara = 0.00342 Ohm

$$\text{Relatif impedansi} = 0.0042 - 0.00342 = 0.000819 \text{ Ohm}$$

## LAMPIRAN B

### DATA HASIL PENELITIAN

#### **Script Setting Frekuensi pada *Software Spyder***

```
#!/usr/bin/env python3

import time
from libreVNA import libreVNA
from tkinter.filedialog import askopenfilename
import os
import shutil
from os.path import exists

# Create the control instance
vna = libreVNA('localhost', 19542)

# Quick connection check (should print "LibreVNA-GUI")
print(vna.query("**IDN?"))

# Make sure we are connecting to a device (just to be sure, with default settings the
LibreVNA-GUI auto-connects)
vna.cmd(":DEV:CONN")
dev = vna.query(":DEV:CONN?")
if dev == "Not connected":
    print("Not connected to any device, aborting")
    exit(-1)
else:
    print("Connected to "+dev)

# Simple trace data extraction
```

```

# switch to VNA mode, setup the sweep parameters
print("Setting up the sweep...")
vna.cmd(":DEV:MODE VNA")
vna.cmd(":VNA:SWEEP FREQUENCY")
vna.cmd(":VNA:STIM:LVL -1")
vna.cmd(":VNA:ACQ:IFBW 1000")
vna.cmd(":VNA:ACQ:AVG 8")
vna.cmd(":VNA:ACQ:POINTS 101")
vna.cmd(":VNA:FREQUENCY:START 100000")
vna.cmd(":VNA:FREQUENCY:STOP 500000")
#vna.cmd(":VNA:CALibration:LOAD D:\Edwar\2022\MIT\SOFTWARE\Rumah
Rohmadi\GUI MIT\SOLT 100k-1.00M 501pt.cal")
#print(vna.query(":VNA:CALibration:LOAD? SOLT 100k-1.00M 501pt.cal"))
#directory = os.getcwd()
#print(directory)

isExist_dir_name = os.path.exists(os.getcwd()+'\\'+ 'DATA')
if not isExist_dir_name:
    #print('create dir')
    os.mkdir(os.getcwd()+'\\'+ 'DATA')

# wait for the sweep to finish
print("Waiting for the sweep to finish...")
while vna.query(":VNA:ACQ:FIN?") == "FALSE":
    time.sleep(0.1)

# grab the data of trace S11
print("Reading trace data..._11")
data = vna.query(":VNA:TRACE:DATA? S11")
#print(data)

# Returned data is just a string containing all the measurement points.

```

```

# Parsing the data returns a list containing frequency/complex tuples
S11 = vna.parse_trace_data(data)
file = "_11"
isExistdatVNA = os.path.exists(os.getcwd()+'\\'+ "datVNA.csv")
#print(isExistdatVNA)
src = os.getcwd()+'\\'+ "datVNA.csv"
dst = os.getcwd()+'\\'+ "DATA\datVNA" + file + ".csv"
if isExistdatVNA:
    shutil.copy(src, dst)
    #print("copy file success...")

#for x in S11:
#    print(x)

# grab the data of trace S11
print("Reading trace data..._12")
data = vna.query(":VNA:TRACE:DATA? S12")
#print(data)
S12 = vna.parse_trace_data(data)
file = "_12"
isExistdatVNA = os.path.exists(os.getcwd()+'\\'+ "datVNA.csv")
#print(isExistdatVNA)
src = os.getcwd()+'\\'+ "datVNA.csv"
dst = os.getcwd()+'\\'+ "DATA\datVNA" + file + ".csv"
if isExistdatVNA:
    shutil.copy(src, dst)
    #print("copy file success...")

# grab the data of trace S11
print("Reading trace data...21")
data = vna.query(":VNA:TRACE:DATA? S21")
#print(data)

```

```

S12 = vna.parse_trace_data(data)
file = "_21"
isExistdatVNA = os.path.exists(os.getcwd()+"\\"+"datVNA.csv")
#print(isExistdatVNA)
src = os.getcwd()+"\\"+"datVNA.csv"
dst = os.getcwd()+"\\"+"DATA\datVNA" + file + ".csv"
if isExistdatVNA:
    shutil.copy(src, dst)
    #print("copy file success...")

# grab the data of trace S11
print("Reading trace data..._22")
data = vna.query(":VNA:TRACE:DATA? S22")
#print(data)
S12 = vna.parse_trace_data(data)
file = "_22"
isExistdatVNA = os.path.exists(os.getcwd()+"\\"+"datVNA.csv")
#print(isExistdatVNA)
src = os.getcwd()+"\\"+"datVNA.csv"
dst = os.getcwd()+"\\"+"DATA\datVNA" + file + ".csv"
if isExistdatVNA:
    shutil.copy(src, dst)
    #print("copy file success...")

#for x in S21:
#    print(x)

```

### ***Script Looping Untuk Pengambilan Data***

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""

```

Created on Mon Jun 26 22:13:22 2023

@author: USER

“””

# -\*- coding: utf-8 -\*-

“””

Created on Wed Nov 16 21:00:29 2022

@author: Predator

“””

import os

from os.path import exists

import shutil

project\_name = 'c+F'

loop\_data = 1

isExist\_dir\_name = os.path.exists(os.getcwd()+'\'+ project\_name)

if not isExist\_dir\_name:

    print('getting the datas with the project name is: ' + project\_name + ' for  
    ' + str(loop\_data) + ' loop(s)')

    #os.mkdir(os.getcwd()+'\'+ project\_name)

    for xn in range(loop\_data):

        ..... isExist\_dir\_name = os.path.exists(os.getcwd()+'\'+ project\_name)

        ..... #print(isExist\_dir\_name)

        ..... if not isExist\_dir\_name:

        ..... #print('create dir')

        ..... os.mkdir(os.getcwd()+'\'+ project\_name)

        ..... else:

        ..... print('exist')

```

..... exec(open('retrieve_trace_data_all.py').read())
..... directory = os.getcwd()
..... #print(directory)
.....
..... #src = os.getcwd()+'\'+ "DATA\datVNA" + str(xn) + ".csv"
..... src_dir = os.getcwd()+'\'+ "DATA" + '\
..... dest_dir = os.getcwd()+'\'+ project_name + '\
..... #print(src_dir)
..... #print(dest_dir)
..... if len(os.listdir(src_dir)) == 0:
.....     print("Directory is empty")
..... else:
.....
..... #print("Directory is not empty")
.....
..... files = os.listdir(src_dir)
.....
..... #print(files)
.....
..... new_dir = dest_dir + '\'+ 'DATA_' + str(xn+1)
.....
..... shutil.move(src_dir, dest_dir)
.....
..... os.rename(dest_dir + '\'+ 'DATA', new_dir)
.....
..... os.mkdir(os.getcwd()+'\'+ 'DATA')
..... print('data ke-' + str(xn+1) + ' selesai')

else:

print('the directory of project name is exist')

```



Data Excel Sensor 2K1S Lubang 1 mm (Tipe II)

**Tabel B.1** Data Rata-Rata Impedansi Pengukuran Sensor Tipe II

Frekuensi	Baja	Udara	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
10000	0.010765	0.009724	0.010577	0.010079	0.010505	0.01075
10400	0.011451	0.01101	0.011391	0.011263	0.011362	0.011303
10800	0.011416	0.010978	0.011357	0.011236	0.011349	0.011283
11200	0.011376	0.010975	0.011331	0.011215	0.011327	0.011273
11600	0.011411	0.010996	0.011364	0.011259	0.011337	0.011286
12000	0.011515	0.011079	0.011423	0.011361	0.011439	0.011353
12400	0.011631	0.011168	0.011554	0.011437	0.011533	0.011506
12800	0.011403	0.010988	0.011365	0.01124	0.011353	0.011303
13200	0.011479	0.011067	0.011454	0.011332	0.011433	0.011391
13600	0.011543	0.011119	0.011502	0.011379	0.011489	0.011437
14000	0.011487	0.011084	0.011458	0.011352	0.011437	0.011392
14400	0.011666	0.011232	0.011627	0.011517	0.011617	0.011583
14800	0.011727	0.011287	0.011693	0.011558	0.011671	0.011624
15200	0.011784	0.011348	0.011755	0.01163	0.01173	0.011687
15600	0.011869	0.011409	0.011835	0.011702	0.01179	0.011758
16000	0.011697	0.01122	0.011606	0.011466	0.011488	0.011559
16400	0.011971	0.01151	0.011947	0.011814	0.011908	0.01189
16800	0.012012	0.011541	0.011982	0.011847	0.011947	0.011915
17200	0.012054	0.01158	0.012017	0.011885	0.011987	0.01196
17600	0.012069	0.011593	0.012047	0.0119	0.012008	0.011986
18000	0.012066	0.011618	0.012051	0.011916	0.012023	0.011975
18400	0.012128	0.011656	0.012111	0.011959	0.012047	0.01203
18800	0.012148	0.011677	0.012141	0.011997	0.012099	0.012062
19200	0.012175	0.011683	0.012149	0.012004	0.012111	0.012088
19600	0.012198	0.011706	0.012168	0.012028	0.012122	0.012092
20000	0.011227	0.010655	0.01099	0.011125	0.011288	0.011156
20400	0.012221	0.011726	0.012198	0.01206	0.012144	0.01213
20800	0.012227	0.011732	0.012205	0.012064	0.012157	0.012137
21200	0.012218	0.011717	0.012207	0.012056	0.012151	0.012129
21600	0.012226	0.011732	0.012205	0.012062	0.012166	0.012136
22000	0.012186	0.011678	0.01217	0.012022	0.012119	0.012089
22400	0.012194	0.011691	0.012178	0.012027	0.012126	0.012109
22800	0.012182	0.011679	0.012165	0.012014	0.012117	0.01209
23200	0.012143	0.01165	0.012136	0.011988	0.012089	0.01206
23600	0.012114	0.011605	0.012108	0.01195	0.01206	0.012041
24000	0.012432	0.011945	0.012467	0.012248	0.012323	0.012379

Tabel B.1 (Lanjutan)

Frekuensi	Baja	Udara	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
244000	0.012029	0.011523	0.01202	0.011868	0.011968	0.011951
248000	0.012001	0.011467	0.011971	0.011836	0.011924	0.011893
252000	0.011945	0.011412	0.011937	0.011788	0.011902	0.011871
256000	0.011912	0.011411	0.011905	0.01176	0.011865	0.01185
260000	0.011836	0.011334	0.011825	0.011686	0.011777	0.011764
264000	0.011866	0.011379	0.011868	0.011727	0.011816	0.011808
268000	0.011863	0.011359	0.011858	0.011712	0.011796	0.011781
272000	0.011851	0.011351	0.01184	0.011695	0.011781	0.011777
276000	0.011819	0.011366	0.01187	0.011596	0.011741	0.011729
280000	0.011861	0.011364	0.011873	0.011714	0.011812	0.011787
284000	0.011785	0.011308	0.011803	0.011649	0.011742	0.011726
288000	0.011786	0.01131	0.011794	0.011638	0.011725	0.011723
292000	0.011772	0.011292	0.011771	0.011626	0.011712	0.011702
296000	0.011755	0.011287	0.011772	0.011617	0.011712	0.011695
300000	0.01167	0.011191	0.011671	0.011531	0.011621	0.011606
304000	0.011712	0.011244	0.011722	0.011578	0.011671	0.011665
308000	0.011704	0.01123	0.011709	0.011566	0.011655	0.011641
312000	0.011675	0.011207	0.011694	0.011554	0.011638	0.011622
316000	0.011656	0.011182	0.01166	0.01151	0.011609	0.011597
320000	0.011622	0.011173	0.011626	0.011525	0.011599	0.011618
324000	0.011602	0.011139	0.011611	0.011475	0.011554	0.01156
328000	0.011576	0.01111	0.011582	0.011444	0.011531	0.011534
332000	0.011534	0.011082	0.011553	0.011405	0.011502	0.011503
336000	0.011507	0.011047	0.011516	0.011379	0.01147	0.01146
340000	0.011478	0.011025	0.011493	0.011348	0.011446	0.011434
344000	0.011422	0.010982	0.011444	0.011303	0.01139	0.011383
348000	0.011378	0.010934	0.011394	0.011262	0.011348	0.011342
352000	0.011338	0.01089	0.011353	0.011215	0.011302	0.011291
356000	0.011277	0.010828	0.011302	0.01116	0.011253	0.011239
360000	0.011172	0.010741	0.011209	0.01107	0.011151	0.011146
364000	0.011156	0.010721	0.011179	0.011047	0.011132	0.011127
368000	0.011075	0.010653	0.011105	0.010982	0.011066	0.011067
372000	0.011001	0.010581	0.011035	0.010905	0.010987	0.01099
376000	0.010922	0.010515	0.010962	0.010836	0.010918	0.010915
380000	0.010859	0.010445	0.010891	0.010756	0.010866	0.010844
384000	0.010758	0.010339	0.010791	0.010658	0.010745	0.010739
388000	0.010679	0.010265	0.010705	0.010582	0.010665	0.010663
392000	0.01061	0.010201	0.010642	0.01051	0.010592	0.01059
396000	0.010549	0.01014	0.010571	0.010452	0.010533	0.010509

Tabel B.1 (Lanjutan)

Frekuensi	Baja	Udara	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
40000	0.011786	0.011419	0.011916	0.011424	0.011587	0.011431
40400	0.010407	0.010016	0.010455	0.010321	0.010398	0.010395
40800	0.010327	0.00993	0.010367	0.010242	0.010333	0.01032
41200	0.010217	0.009825	0.010257	0.010143	0.010226	0.010226
41600	0.010065	0.009679	0.010116	0.010004	0.010098	0.010081
42000	0.00989	0.009508	0.009951	0.009834	0.009938	0.009934
42400	0.009601	0.009235	0.009651	0.009576	0.009637	0.009655
42800	0.009298	0.008926	0.009369	0.009264	0.009381	0.009366
43200	0.009012	0.008635	0.009056	0.008965	0.009077	0.009055
43600	0.008764	0.008385	0.008795	0.008702	0.008815	0.008785
44000	0.008575	0.0082	0.008604	0.008517	0.008606	0.008581
44400	0.008403	0.008029	0.008422	0.008343	0.008419	0.008389
44800	0.008285	0.007915	0.008294	0.008211	0.008293	0.008256
45200	0.008186	0.007824	0.008195	0.008114	0.00819	0.008148
45600	0.008104	0.007733	0.00812	0.008033	0.008107	0.008071
46000	0.008052	0.007682	0.008053	0.007974	0.008026	0.007998
46400	0.008016	0.007649	0.008015	0.007937	0.007998	0.007951
46800	0.007987	0.007619	0.007988	0.00791	0.007959	0.007914
47200	0.00797	0.007604	0.007972	0.007894	0.007955	0.007902
47600	0.007954	0.00761	0.007967	0.007889	0.007943	0.007902
48000	0.007868	0.007521	0.007885	0.007808	0.007879	0.007823
48400	0.007936	0.007586	0.007947	0.007875	0.007942	0.007888
48800	0.00794	0.007588	0.007948	0.007862	0.007922	0.007887
49200	0.00793	0.007584	0.007948	0.007865	0.007919	0.007878
49600	0.007921	0.007577	0.007941	0.007869	0.007914	0.007871
50000	0.007276	0.00717	0.00751	0.007539	0.00746	0.007454

Tabel B.2 Data Nilai Relatif Impedansi Sensor Tipe II

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
10000	0.000853	0.000355	0.000781	0.001026
10400	0.000381	0.000253	0.000352	0.000293
10800	0.000379	0.000258	0.000371	0.000305
11200	0.000356	0.00024	0.000352	0.000298
11600	0.000368	0.000263	0.000341	0.00029
12000	0.000344	0.000282	0.00036	0.000274
12400	0.000386	0.000269	0.000365	0.000338

Tabel B.2 (Lanjutan)

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
128000	0.000377	0.000252	0.000365	0.000315
132000	0.000387	0.000265	0.000366	0.000324
136000	0.000383	0.00026	0.00037	0.000318
140000	0.000374	0.000268	0.000353	0.000308
144000	0.000395	0.000285	0.000385	0.000351
148000	0.000406	0.000271	0.000384	0.000337
152000	0.000407	0.000282	0.000382	0.000339
156000	0.000426	0.000293	0.000381	0.000349
160000	0.000386	0.000246	0.000268	0.000339
164000	0.000437	0.000304	0.000398	0.00038
168000	0.000441	0.000306	0.000406	0.000374
172000	0.000437	0.000305	0.000407	0.00038
176000	0.000454	0.000307	0.000415	0.000393
180000	0.000433	0.000298	0.000405	0.000357
184000	0.000455	0.000303	0.000391	0.000374
188000	0.000464	0.00032	0.000422	0.000385
192000	0.000466	0.000321	0.000428	0.000405
196000	0.000462	0.000322	0.000416	0.000386
200000	0.000335	0.00047	0.000633	0.000501
204000	0.000472	0.000334	0.000418	0.000404
208000	0.000473	0.000332	0.000425	0.000405
212000	0.00049	0.000339	0.000434	0.000412
216000	0.000473	0.00033	0.000434	0.000404
220000	0.000492	0.000344	0.000441	0.000411
224000	0.000487	0.000336	0.000435	0.000418
228000	0.000486	0.000335	0.000438	0.000411
232000	0.000486	0.000338	0.000439	0.00041
236000	0.000503	0.000345	0.000455	0.000436
240000	0.000522	0.000303	0.000378	0.000434
244000	0.000497	0.000345	0.000445	0.000428
248000	0.000504	0.000369	0.000457	0.000426
252000	0.000525	0.000376	0.00049	0.000459
256000	0.000494	0.000349	0.000454	0.000439
260000	0.000491	0.000352	0.000443	0.00043
264000	0.000489	0.000348	0.000437	0.000429
268000	0.000499	0.000353	0.000437	0.000422
272000	0.000489	0.000344	0.00043	0.000426
276000	0.000504	0.00023	0.000375	0.000363
280000	0.000509	0.00035	0.000448	0.000423
284000	0.000495	0.000341	0.000434	0.000418

Tabel B.2 (Lanjutan)

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
288000	0.000484	0.000328	0.000415	0.000413
292000	0.000479	0.000334	0.00042	0.00041
296000	0.000485	0.00033	0.000425	0.000408
300000	0.00048	0.00034	0.00043	0.000415
304000	0.000478	0.000334	0.000427	0.000421
308000	0.000479	0.000336	0.000425	0.000411
312000	0.000487	0.000347	0.000431	0.000415
316000	0.000478	0.000328	0.000427	0.000415
320000	0.000453	0.000352	0.000426	0.000445
324000	0.000472	0.000336	0.000415	0.000421
328000	0.000472	0.000334	0.000421	0.000424
332000	0.000471	0.000323	0.00042	0.000421
336000	0.000469	0.000332	0.000423	0.000413
340000	0.000468	0.000323	0.000421	0.000409
344000	0.000462	0.000321	0.000408	0.000401
348000	0.00046	0.000328	0.000414	0.000408
352000	0.000463	0.000325	0.000412	0.000401
356000	0.000474	0.000332	0.000425	0.000411
360000	0.000468	0.000329	0.00041	0.000405
364000	0.000458	0.000326	0.000411	0.000406
368000	0.000452	0.000329	0.000413	0.000414
372000	0.000454	0.000324	0.000406	0.000409
376000	0.000447	0.000321	0.000403	0.0004
380000	0.000446	0.000311	0.000421	0.000399
384000	0.000452	0.000319	0.000406	0.0004
388000	0.00044	0.000317	0.0004	0.000398
392000	0.000441	0.000309	0.000391	0.000389
396000	0.000431	0.000312	0.000393	0.000369
400000	0.000497	5E-06	0.000168	1.2E-05
404000	0.000439	0.000305	0.000382	0.000379
408000	0.000437	0.000312	0.000403	0.00039
412000	0.000432	0.000318	0.000401	0.000401
416000	0.000437	0.000325	0.000419	0.000402
420000	0.000443	0.000326	0.00043	0.000426
424000	0.000416	0.000341	0.000402	0.00042
428000	0.000443	0.000338	0.000455	0.00044
432000	0.000421	0.00033	0.000442	0.00042
436000	0.00041	0.000317	0.00043	0.0004
440000	0.000404	0.000317	0.000406	0.000381
444000	0.000393	0.000314	0.00039	0.00036

Tabel B.2 (Lanjutan)

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
448000	0.000379	0.000296	0.000378	0.000341
452000	0.000371	0.00029	0.000366	0.000324
456000	0.000387	0.0003	0.000374	0.000338
460000	0.000371	0.000292	0.000344	0.000316
464000	0.000366	0.000288	0.000349	0.000302
468000	0.000369	0.000291	0.00034	0.000295
472000	0.000368	0.00029	0.000351	0.000298
476000	0.000357	0.000279	0.000333	0.000292
480000	0.000364	0.000287	0.000358	0.000302
484000	0.000361	0.000289	0.000356	0.000302
488000	0.00036	0.000274	0.000334	0.000299
492000	0.000364	0.000281	0.000335	0.000294
496000	0.000364	0.000292	0.000337	0.000294
500000	0.00034	0.000369	0.00029	0.000284

Data Excel Sensor 2K1S Lubang 3 mm (Tipe I)

Tabel B.3 Data Rata-Rata Impedansi Pengukuran Sensor Tipe I

Frekuensi	Udara	Baja	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
100000	0.040158	0.04094	0.040073	0.040039	0.04021	0.040488
104000	0.033392	0.03368	0.033594	0.033604	0.03364	0.033514
108000	0.033263	0.03356	0.033472	0.033497	0.03353	0.033407
112000	0.033187	0.03348	0.033406	0.033424	0.03345	0.033355
116000	0.03307	0.03336	0.033285	0.033306	0.03334	0.033223
120000	0.033427	0.03369	0.033648	0.033599	0.03372	0.033573
124000	0.033774	0.03409	0.034025	0.034041	0.03408	0.033967
128000	0.032953	0.03326	0.033194	0.033242	0.03324	0.033138
132000	0.033145	0.03347	0.033392	0.033425	0.03345	0.033324
136000	0.033249	0.03357	0.033497	0.03353	0.03354	0.033431
140000	0.034041	0.03438	0.034324	0.034377	0.03435	0.034208
144000	0.033552	0.03388	0.033823	0.033859	0.03388	0.033747
148000	0.033768	0.0341	0.034015	0.034055	0.03409	0.033964
152000	0.033877	0.03424	0.034163	0.034195	0.03421	0.034091
156000	0.033934	0.03427	0.034216	0.034251	0.03427	0.034151
160000	0.034684	0.03512	0.03513	0.03517	0.03509	0.035159
164000	0.03415	0.03451	0.034438	0.03448	0.03449	0.034358
168000	0.034176	0.03452	0.034464	0.034505	0.03452	0.034385

Tabel B.3 (Lanjutan)

Frekuensi	Udara	Baja	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
172000	0.034231	0.03459	0.034518	0.034556	0.03459	0.034453
176000	0.034206	0.03456	0.034506	0.034535	0.03454	0.034423
180000	0.034222	0.03457	0.034574	0.034605	0.03456	0.034454
184000	0.034153	0.03452	0.034461	0.03451	0.03452	0.034387
188000	0.034189	0.03453	0.03448	0.034517	0.03454	0.034409
192000	0.0341	0.03446	0.034402	0.034434	0.03447	0.034327
196000	0.034062	0.03442	0.034354	0.034396	0.03441	0.034279
200000	0.033968	0.03475	0.034473	0.033741	0.03407	0.034107
204000	0.033914	0.03429	0.034225	0.034258	0.03429	0.03414
208000	0.033773	0.03413	0.034076	0.034117	0.03412	0.033998
212000	0.033736	0.03409	0.034047	0.034084	0.0341	0.033979
216000	0.033635	0.034	0.033945	0.03398	0.034	0.033871
220000	0.033642	0.03401	0.033966	0.034004	0.03404	0.033885
224000	0.033392	0.03375	0.03337	0.033729	0.03376	0.03362
228000	0.033267	0.03362	0.033573	0.033599	0.03363	0.033493
232000	0.033101	0.03347	0.033408	0.033443	0.03345	0.033331
236000	0.032885	0.03326	0.033199	0.033235	0.03325	0.033121
240000	0.032623	0.03301	0.033072	0.03297	0.03309	0.032918
244000	0.032379	0.03274	0.032683	0.032713	0.03274	0.032604
248000	0.032184	0.03252	0.032465	0.03254	0.03253	0.032365
252000	0.031838	0.03227	0.032186	0.032207	0.03226	0.032102
256000	0.031605	0.03197	0.031917	0.031944	0.03197	0.031836
260000	0.031202	0.03156	0.031509	0.031533	0.03155	0.031395
264000	0.031232	0.0316	0.031547	0.031579	0.03158	0.031463
268000	0.031059	0.03143	0.03138	0.031409	0.03143	0.031291
272000	0.030898	0.03126	0.031211	0.031244	0.03126	0.031124
276000	0.031134	0.03152	0.03148	0.031493	0.03152	0.03143
280000	0.030528	0.03088	0.03082	0.030843	0.03084	0.030731
284000	0.030444	0.03079	0.030756	0.030794	0.0308	0.030672
288000	0.030311	0.03067	0.030626	0.030656	0.03067	0.030534
292000	0.030131	0.03049	0.030441	0.03048	0.03049	0.030358
296000	0.029966	0.03034	0.030291	0.030318	0.03034	0.0302
300000	0.03007	0.03043	0.030382	0.030413	0.03043	0.030297
304000	0.029665	0.03001	0.029969	0.030003	0.03001	0.029885
308000	0.029507	0.02987	0.029813	0.029853	0.02987	0.029736
312000	0.029368	0.02972	0.029694	0.029718	0.02973	0.029587
316000	0.029193	0.02955	0.029504	0.029534	0.02955	0.029419
320000	0.02875	0.02904	0.029008	0.029047	0.02905	0.028977
324000	0.02888	0.02923	0.029192	0.029221	0.02923	0.029095

Tabel B.3 (Lanjutan)

Frekuensi	Udara	Baja	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
328000	0.028721	0.02908	0.029036	0.029053	0.02908	0.028941
332000	0.028545	0.0289	0.028857	0.028887	0.0289	0.028772
336000	0.028418	0.02876	0.028723	0.028746	0.02875	0.028637
340000	0.028365	0.02871	0.028672	0.02871	0.02871	0.028579
344000	0.028071	0.02842	0.028379	0.028396	0.02841	0.028289
348000	0.027925	0.02827	0.028221	0.028253	0.02827	0.028138
352000	0.027754	0.02809	0.028054	0.028079	0.02809	0.027965
356000	0.027581	0.02793	0.027881	0.027913	0.02793	0.027795
360000	0.027446	0.02779	0.027754	0.027778	0.02779	0.027661
364000	0.027236	0.02757	0.02754	0.027559	0.02758	0.027451
368000	0.027082	0.02742	0.027372	0.027396	0.02743	0.027296
372000	0.026877	0.02721	0.027166	0.027191	0.02721	0.027089
376000	0.0267	0.02704	0.027002	0.027021	0.02705	0.026915
380000	0.026472	0.02681	0.026778	0.026793	0.0268	0.026693
384000	0.026283	0.02662	0.026579	0.026612	0.02662	0.02649
388000	0.026093	0.02642	0.026388	0.026417	0.02643	0.026296
392000	0.025879	0.02621	0.026174	0.0262	0.02621	0.026083
396000	0.025672	0.02599	0.025957	0.025983	0.02601	0.025866
400000	0.036572	0.03967	0.037037	0.037881	0.03728	0.03731
404000	0.025314	0.02563	0.02559	0.025619	0.02563	0.025498
408000	0.025143	0.02547	0.025423	0.025449	0.02546	0.025326
412000	0.024972	0.02529	0.025257	0.025273	0.02528	0.025158
416000	0.024797	0.02512	0.025085	0.025112	0.02512	0.024983
420000	0.024554	0.02488	0.024835	0.024867	0.02488	0.024726
424000	0.024331	0.02464	0.024618	0.024634	0.02465	0.024515
428000	0.024206	0.02451	0.024487	0.02451	0.02451	0.024369
432000	0.023927	0.02424	0.024213	0.024249	0.02425	0.024095
436000	0.023613	0.02392	0.023896	0.023932	0.02394	0.023773
440000	0.023296	0.0236	0.023574	0.023611	0.02361	0.023449
444000	0.022993	0.02329	0.023265	0.023308	0.0233	0.023131
448000	0.022724	0.02303	0.02299	0.023039	0.02303	0.022843
452000	0.022453	0.02275	0.022705	0.022758	0.02275	0.022552
456000	0.022188	0.02248	0.022439	0.022492	0.02248	0.022283
460000	0.02191	0.02221	0.02217	0.022217	0.02221	0.022015
464000	0.02174	0.02204	0.021999	0.022048	0.02204	0.021832
468000	0.021504	0.0218	0.021757	0.021805	0.02179	0.021596
472000	0.021296	0.02159	0.021542	0.021601	0.02159	0.021392
476000	0.021084	0.02138	0.021336	0.021388	0.02137	0.021177
480000	0.020896	0.02119	0.02114	0.02119	0.02117	0.020972



484000	0.020707	0.021	0.020962	0.021014	0.021	0.020798
488000	0.020505	0.02081	0.020761	0.020809	0.0208	0.020599
492000	0.020351	0.02064	0.0206	0.020656	0.02064	0.02044
496000	0.020156	0.02046	0.020426	0.020479	0.02046	0.02026
500000	0.018132	0.01828	0.018368	0.018427	0.01838	0.018207

**Tabel B.4** Data Nilai Relatif Impedansi Sensor Tipe I

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
100000	-8.5E-05	-0.00012	5.4E-05	0.00033
104000	0.000202	0.000212	0.000245	0.000122
108000	0.000209	0.000234	0.000269	0.000144
112000	0.000219	0.000237	0.00026	0.000168
116000	0.000215	0.000236	0.000272	0.000153
120000	0.000221	0.000172	0.000291	0.000146
124000	0.000251	0.000267	0.000309	0.000193
128000	0.000241	0.000289	0.000285	0.000185
132000	0.000247	0.00028	0.000301	0.000179
136000	0.000248	0.000281	0.000291	0.000182
140000	0.000283	0.000336	0.000306	0.000167
144000	0.000271	0.000307	0.000323	0.000195
148000	0.000247	0.000287	0.000321	0.000196
152000	0.000286	0.000318	0.000337	0.000214
156000	0.000282	0.000317	0.00034	0.000217
160000	0.000446	0.000486	0.000407	0.000475
164000	0.000288	0.00033	0.000343	0.000208
168000	0.000288	0.000329	0.000345	0.000209
172000	0.000287	0.000325	0.000356	0.000222
176000	0.0003	0.000329	0.000337	0.000217
180000	0.000352	0.000383	0.000341	0.000232
184000	0.000308	0.000357	0.000368	0.000234
188000	0.000291	0.000328	0.000351	0.00022
192000	0.000302	0.000334	0.000368	0.000227
196000	0.000292	0.000334	0.00035	0.000217
200000	0.000505	-0.00023	0.000101	0.000139
204000	0.000311	0.000344	0.000372	0.000226
208000	0.000303	0.000344	0.000342	0.000225
212000	0.000311	0.000348	0.000368	0.000243
216000	0.00031	0.000345	0.000362	0.000236
220000	0.000324	0.000362	0.000394	0.000243
224000	0.000308	0.000337	0.000363	0.000228
228000	0.000306	0.000332	0.000363	0.000226

Tabel B.4 (Lanjutan)

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
232000	0.000307	0.000342	0.000347	0.00023
236000	0.000314	0.00035	0.000363	0.000236
240000	0.000449	0.000347	0.000464	0.000295
244000	0.000304	0.000334	0.000361	0.000225
248000	0.000281	0.000356	0.000347	0.000181
252000	0.000348	0.000369	0.000417	0.000264
256000	0.000312	0.000339	0.000367	0.000231
260000	0.000307	0.000331	0.000347	0.000193
264000	0.000315	0.000347	0.00035	0.000231
268000	0.000321	0.00035	0.00037	0.000232
272000	0.000313	0.000346	0.000361	0.000226
276000	0.000346	0.000359	0.000383	0.000296
280000	0.000292	0.000315	0.000315	0.000203
284000	0.000312	0.00035	0.000351	0.000228
288000	0.000315	0.000345	0.000359	0.000223
292000	0.00031	0.000349	0.000359	0.000227
296000	0.000325	0.000352	0.000373	0.000234
300000	0.000312	0.000343	0.000361	0.000227
304000	0.000304	0.000338	0.000348	0.00022
308000	0.000306	0.000346	0.000363	0.000229
312000	0.000326	0.00035	0.00036	0.000219
316000	0.000311	0.000341	0.000353	0.000226
320000	0.000258	0.000297	0.000302	0.000227
324000	0.000312	0.000341	0.000347	0.000215
328000	0.000315	0.000332	0.000363	0.00022
332000	0.000312	0.000342	0.000356	0.000227
336000	0.000305	0.000328	0.00033	0.000219
340000	0.000307	0.000345	0.000343	0.000214
344000	0.000308	0.000325	0.000342	0.000218
348000	0.000296	0.000328	0.000346	0.000213
352000	0.0003	0.000325	0.00034	0.000211
356000	0.0003	0.000332	0.00035	0.000214
360000	0.000308	0.000332	0.000348	0.000215
364000	0.000304	0.000323	0.000341	0.000215
368000	0.00029	0.000314	0.000343	0.000214
372000	0.000289	0.000314	0.000337	0.000212
376000	0.000302	0.000321	0.00035	0.000215
380000	0.000306	0.000321	0.000331	0.000221
384000	0.000296	0.000329	0.000337	0.000207
388000	0.000295	0.000324	0.000333	0.000203

Tabel B.4 (Lanjutan)

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
392000	0.000295	0.000321	0.000333	0.000204
396000	0.000285	0.000311	0.000335	0.000194
400000	0.000465	0.001309	0.000709	0.000738
404000	0.000276	0.000305	0.000312	0.000184
408000	0.00028	0.000306	0.000321	0.000183
412000	0.000285	0.000301	0.000312	0.000186
416000	0.000288	0.000315	0.000319	0.000186
420000	0.000281	0.000313	0.000322	0.000172
424000	0.000287	0.000303	0.00032	0.000184
428000	0.000281	0.000304	0.000308	0.000163
432000	0.000286	0.000322	0.000326	0.000168
436000	0.000283	0.000319	0.000322	0.00016
440000	0.000278	0.000315	0.000313	0.000153
444000	0.000272	0.000315	0.00031	0.000138
448000	0.000266	0.000315	0.000301	0.000119
452000	0.000252	0.000305	0.000301	9.9E-05
456000	0.000251	0.000304	0.000295	9.5E-05
460000	0.00026	0.000307	0.000296	0.000105
464000	0.000259	0.000308	0.000299	9.2E-05
468000	0.000253	0.000301	0.000287	9.2E-05
472000	0.000246	0.000305	0.000296	9.6E-05
476000	0.000252	0.000304	0.000285	9.3E-05
480000	0.000244	0.000294	0.000277	7.6E-05
484000	0.000255	0.000307	0.000289	9.1E-05
488000	0.000256	0.000304	0.000297	9.4E-05
492000	0.000249	0.000305	0.000289	8.9E-05
496000	0.00027	0.000323	0.000308	0.000104
500000	0.000236	0.000295	0.00025	7.5E-05

Data Excel Sensor 2K2S (tipe III)

Tabel B.5 Data Rata-Rata Impedansi Pengukuran Sensor Tipe III

Frekuensi	Udara	Baja	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
100000	0.00342	0.00414	0.004239	0.004252	0.004051	0.003171
109000	0.002889	0.003569	0.003694	0.003799	0.003747	0.002788
118000	0.002713	0.003445	0.003501	0.00349	0.003434	0.002515
127000	0.002516	0.003193	0.003204	0.00321	0.003296	0.002446

Tabel B.5 (Lanjutan)

Frekuensi	Udara	Baja	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
136000	0.002371	0.002962	0.003085	0.003083	0.003077	0.002351
145000	0.002182	0.002787	0.00287	0.0029	0.002852	0.00215
154000	0.002045	0.002581	0.002698	0.002688	0.002667	0.00202
163000	0.001872	0.00235	0.002541	0.002485	0.0025	0.001895
172000	0.001686	0.002252	0.00238	0.002149	0.002342	0.001827
181000	0.001571	0.002088	0.002198	0.002154	0.002162	0.001505
190000	0.001491	0.001804	0.001961	0.002045	0.002043	0.001469
199000	0.001348	0.001773	0.001867	0.001824	0.001912	0.001519
208000	0.001266	0.001694	0.001781	0.001704	0.001781	0.001191
217000	0.001183	0.001604	0.001688	0.001716	0.001674	0.001359
226000	0.001128	0.001494	0.00158	0.001627	0.001549	0.001208
235000	0.001051	0.001377	0.001455	0.001522	0.001441	0.001167
244000	0.001039	0.001372	0.001391	0.001412	0.001429	0.001076
253000	0.001009	0.001354	0.001412	0.001452	0.001395	0.001053
262000	0.000959	0.001321	0.001355	0.001316	0.001393	0.001
271000	0.000927	0.001247	0.001289	0.001322	0.001351	0.001063
280000	0.000897	0.001239	0.001269	0.001297	0.001273	0.000952
289000	0.000842	0.001097	0.001168	0.001204	0.001207	0.000922
298000	0.000816	0.001155	0.001081	0.001155	0.001109	0.000761
307000	0.000756	0.001035	0.001074	0.001095	0.001142	0.000824
316000	0.000716	0.000996	0.000987	0.001038	0.001053	0.000811
325000	0.000781	0.001066	0.001087	0.001119	0.001194	0.000882
334000	0.000645	0.000903	0.000991	0.000818	0.000953	0.000718
343000	0.000633	0.000845	0.000879	0.000874	0.000893	0.000702
352000	0.000618	0.000841	0.000873	0.000943	0.000926	0.00073
361000	0.000635	0.000808	0.000871	0.00092	0.00087	0.000738
370000	0.000684	0.00081	0.000868	0.000894	0.000824	0.000785
379000	0.000799	0.00088	0.000904	0.000927	0.000909	0.000937
388000	0.000915	0.001027	0.00101	0.001033	0.001055	0.001026
397000	0.001067	0.001149	0.001169	0.001185	0.001133	0.001143
406000	0.001207	0.001231	0.0013	0.001308	0.001345	0.001278
415000	0.001396	0.001388	0.001401	0.001497	0.001446	0.001397
424000	0.001632	0.001769	0.001744	0.001747	0.001716	0.001758
433000	0.002049	0.002107	0.002154	0.002111	0.002056	0.002053
442000	0.002454	0.002569	0.002515	0.002539	0.002578	0.002551
451000	0.002704	0.002823	0.002916	0.002917	0.002839	0.002676
460000	0.002824	0.002926	0.002979	0.002935	0.002952	0.00286
469000	0.002874	0.002935	0.003021	0.002972	0.003002	0.002919
478000	0.002881	0.003016	0.002972	0.003	0.003017	0.002926

Tabel B.5 (Lanjutan)

Frekuensi	Udara	Baja	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
487000	0.002867	0.003033	0.003058	0.00303	0.003053	0.00291
496000	0.002818	0.00297	0.003052	0.002997	0.002977	0.002848
505000	0.002789	0.002962	0.002981	0.002981	0.002979	0.00286
514000	0.002718	0.002891	0.002836	0.002934	0.002914	0.002813
523000	0.002599	0.002809	0.002862	0.002755	0.002794	0.002653
532000	0.002578	0.002725	0.002797	0.002814	0.002761	0.002615
541000	0.002514	0.002612	0.002622	0.002677	0.002727	0.002517
550000	0.002262	0.002263	0.0022	0.002464	0.002389	0.002115
559000	0.002308	0.002428	0.002458	0.002482	0.002459	0.002334
568000	0.002221	0.002364	0.00237	0.002371	0.002399	0.002236
577000	0.002108	0.00228	0.002276	0.002312	0.002311	0.002141
586000	0.002043	0.00212	0.002176	0.002172	0.002129	0.001981
595000	0.001931	0.00213	0.002103	0.002059	0.002167	0.001939
604000	0.001846	0.001924	0.001974	0.001894	0.002024	0.001776
613000	0.001765	0.001778	0.001948	0.001899	0.001969	0.001836
622000	0.001662	0.001786	0.00187	0.001862	0.001863	0.00173
631000	0.001592	0.001774	0.001762	0.001754	0.001715	0.001576
640000	0.001535	0.001738	0.001724	0.001712	0.001688	0.001559
649000	0.001402	0.001569	0.001584	0.001582	0.001548	0.00143
658000	0.001393	0.001535	0.001605	0.001594	0.001562	0.001256
667000	0.001323	0.001478	0.001487	0.001488	0.001482	0.001319
676000	0.00122	0.001398	0.001391	0.001522	0.001421	0.001269
685000	0.001197	0.0013	0.001373	0.001466	0.001402	0.001192
694000	0.001165	0.001348	0.001318	0.001377	0.001339	0.001183
703000	0.001125	0.001265	0.001278	0.00134	0.001258	0.001121
712000	0.001086	0.001262	0.001253	0.001286	0.001278	0.001101
721000	0.001061	0.001154	0.001175	0.001251	0.001205	0.001043
730000	0.001013	0.001101	0.00119	0.001157	0.001145	0.001029
739000	0.001001	0.001167	0.001149	0.001164	0.001127	0.000986
748000	0.000982	0.001099	0.001122	0.001098	0.001118	0.000968
757000	0.000942	0.000968	0.001035	0.001188	0.00114	0.000913
766000	0.000933	0.001025	0.001047	0.001151	0.001074	0.000895
775000	0.000889	0.001082	0.001076	0.001054	0.001058	0.000984
784000	0.000878	0.000929	0.000996	0.001033	0.001086	0.000855
793000	0.000857	0.001033	0.001065	0.00104	0.00105	0.000896
802000	0.000878	0.00096	0.000956	0.001086	0.001056	0.000821
811000	0.000856	0.000957	0.000973	0.00101	0.001028	0.000873
820000	0.001111	0.001272	0.001264	0.001185	0.001294	0.001179
829000	0.001069	0.001187	0.001218	0.001275	0.001257	0.001034

Tabel B.5 (Lanjutan)

Frekuensi	Udara	Baja	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
838000	0.001066	0.001162	0.001215	0.001194	0.001161	0.001104
847000	0.001007	0.001174	0.001233	0.001111	0.001135	0.001141
856000	0.001013	0.001122	0.001093	0.001104	0.001224	0.001012
865000	0.000966	0.00109	0.001128	0.001095	0.00114	0.000916
874000	0.000974	0.001016	0.001098	0.001113	0.001127	0.000964
883000	0.000938	0.001058	0.00104	0.001086	0.001097	0.000944
892000	0.000899	0.00097	0.001056	0.001041	0.001004	0.000904
901000	0.000889	0.000977	0.001045	0.000962	0.001015	0.000948
910000	0.000866	0.00094	0.001023	0.000975	0.000994	0.000911
919000	0.000842	0.000924	0.000961	0.000937	0.001027	0.000811
928000	0.000803	0.000928	0.000964	0.000964	0.000927	0.000836
937000	0.000808	0.000869	0.00099	0.000929	0.000888	0.000791
946000	0.000803	0.000884	0.000948	0.000915	0.000945	0.000817
955000	0.000767	0.000844	0.000974	0.000955	0.000917	0.000783
964000	0.00076	0.000906	0.00091	0.000803	0.000894	0.000822
973000	0.000742	0.000886	0.000877	0.000875	0.000924	0.000767
982000	0.000776	0.00084	0.000944	0.00083	0.000882	0.00072
991000	0.00073	0.000799	0.000905	0.000915	0.000891	0.000804
1000000	0.000742	0.00087	0.000842	0.000847	0.000856	0.000761

Tabel B.6 Data Nilai Relatif Impedansi Sensor Tipe III

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
100000	0.000819	0.000832	0.000631	-0.000249
109000	0.000805	0.00091	0.000858	-0.000101
118000	0.000788	0.000777	0.000721	-0.000198
127000	0.000688	0.000694	0.00078	-7E-05
136000	0.000714	0.000712	0.000706	-2E-05
145000	0.000688	0.000718	0.00067	-3.2E-05
154000	0.000653	0.000643	0.000622	-2.5E-05
163000	0.000669	0.000613	0.000628	0.000023
172000	0.000694	0.000463	0.000656	0.000141
181000	0.000627	0.000583	0.000591	-6.6E-05
190000	0.00047	0.000554	0.000552	-2.2E-05
199000	0.000519	0.000476	0.000564	0.000171
208000	0.000515	0.000438	0.000515	-0.000075
217000	0.000505	0.000533	0.000491	0.000176

Tabel B.6 (Lanjutan)

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
226000	0.000452	0.000499	0.000421	0.00008
235000	0.000404	0.000471	0.00039	0.000116
244000	0.000352	0.000373	0.00039	3.7E-05
253000	0.000403	0.000443	0.000386	0.000044
262000	0.000396	0.000357	0.000434	0.000041
271000	0.000362	0.000395	0.000424	0.000136
280000	0.000372	0.0004	0.000376	0.000055
289000	0.000326	0.000362	0.000365	0.00008
298000	0.000265	0.000339	0.000293	-0.000055
307000	0.000318	0.000339	0.000386	6.8E-05
316000	0.000271	0.000322	0.000337	0.000095
325000	0.000306	0.000338	0.000413	0.000101
334000	0.000346	0.000173	0.000308	0.000073
343000	0.000246	0.000241	0.00026	6.9E-05
352000	0.000255	0.000325	0.000308	0.000112
361000	0.000236	0.000285	0.000235	0.000103
370000	0.000184	0.00021	0.00014	0.000101
379000	0.000105	0.000128	0.00011	0.000138
388000	0.000095	0.000118	0.00014	0.000111
397000	0.000102	0.000118	6.6E-05	7.6E-05
406000	0.000093	0.000101	0.000138	7.1E-05
415000	5E-06	0.000101	5E-05	1E-06
424000	0.000112	0.000115	8.4E-05	0.000126
433000	0.000105	0.000062	7E-06	4E-06
442000	6.1E-05	0.000085	0.000124	9.7E-05
451000	0.000212	0.000213	0.000135	-2.8E-05
460000	0.000155	0.000111	0.000128	0.000036
469000	0.000147	0.000098	0.000128	4.5E-05
478000	9.1E-05	0.000119	0.000136	4.5E-05
487000	0.000191	0.000163	0.000186	4.3E-05
496000	0.000234	0.000179	0.000159	3E-05
505000	0.000192	0.000192	0.00019	7.1E-05
514000	0.000118	0.000216	0.000196	0.000095
523000	0.000263	0.000156	0.000195	5.4E-05
532000	0.000219	0.000236	0.000183	3.7E-05
541000	0.000108	0.000163	0.000213	3E-06
550000	-0.000062	0.000202	0.000127	-0.000147
559000	0.00015	0.000174	0.000151	0.000026
568000	0.000149	0.00015	0.000178	1.5E-05

Tabel B.6 (Lanjutan)

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
577000	0.000168	0.000204	0.000203	0.000033
586000	0.000133	0.000129	8.6E-05	-0.000062
595000	0.000172	0.000128	0.000236	8E-06
604000	0.000128	4.8E-05	0.000178	-0.00007
613000	0.000183	0.000134	0.000204	7.1E-05
622000	0.000208	0.0002	0.000201	6.8E-05
631000	0.00017	0.000162	0.000123	-1.6E-05
640000	0.000189	0.000177	0.000153	2.4E-05
649000	0.000182	0.00018	0.000146	0.000028
658000	0.000212	0.000201	0.000169	-0.000137
667000	0.000164	0.000165	0.000159	-4E-06
676000	0.000171	0.000302	0.000201	0.000049
685000	0.000176	0.000269	0.000205	-5E-06
694000	0.000153	0.000212	0.000174	0.000018
703000	0.000153	0.000215	0.000133	-4E-06
712000	0.000167	0.0002	0.000192	0.000015
721000	0.000114	0.00019	0.000144	-0.000018
730000	0.000177	0.000144	0.000132	0.000016
739000	0.000148	0.000163	0.000126	-0.000015
748000	0.00014	0.000116	0.000136	-0.000014
757000	9.3E-05	0.000246	0.000198	-2.9E-05
766000	0.000114	0.000218	0.000141	-3.8E-05
775000	0.000187	0.000165	0.000169	0.000095
784000	0.000118	0.000155	0.000208	-0.000023
793000	0.000208	0.000183	0.000193	0.000039
802000	7.8E-05	0.000208	0.000178	-0.000057
811000	0.000117	0.000154	0.000172	0.000017
820000	0.000153	7.4E-05	0.000183	6.8E-05
829000	0.000149	0.000206	0.000188	-3.5E-05
838000	0.000149	0.000128	9.5E-05	3.8E-05
847000	0.000226	0.000103	0.000128	0.000134
856000	0.00008	9.1E-05	0.000211	-1E-06
865000	0.000162	0.000129	0.000174	-5E-05
874000	0.000124	0.000139	0.000153	-0.00001
883000	0.000102	0.000148	0.000159	6E-06
892000	0.000157	0.000142	0.000105	5E-06
901000	0.000156	7.3E-05	0.000126	5.9E-05
910000	0.000157	0.000109	0.000128	0.000045
919000	0.000119	0.000095	0.000185	-0.000031



Tabel B.6 (Lanjutan)

Frekuensi	C ked. 3 mm	C ked. 7 mm	C ked. 11 mm	Cacat Retak
928000	0.000161	0.000161	0.000124	0.000033
937000	0.000182	0.000121	0.00008	-0.000017
946000	0.000145	0.000112	0.000142	0.000014
955000	0.000207	0.000188	0.00015	0.000016
964000	0.00015	0.000043	0.000134	0.000062
973000	0.000135	0.000133	0.000182	0.000025
982000	0.000168	0.000054	0.000106	-0.000056
991000	0.000175	0.000185	0.000161	7.4E-05
1000000	1E-04	0.000105	0.000114	1.9E-05

Tabel B.7 Data Selisih Impedansi Baja Normal dengan Udara

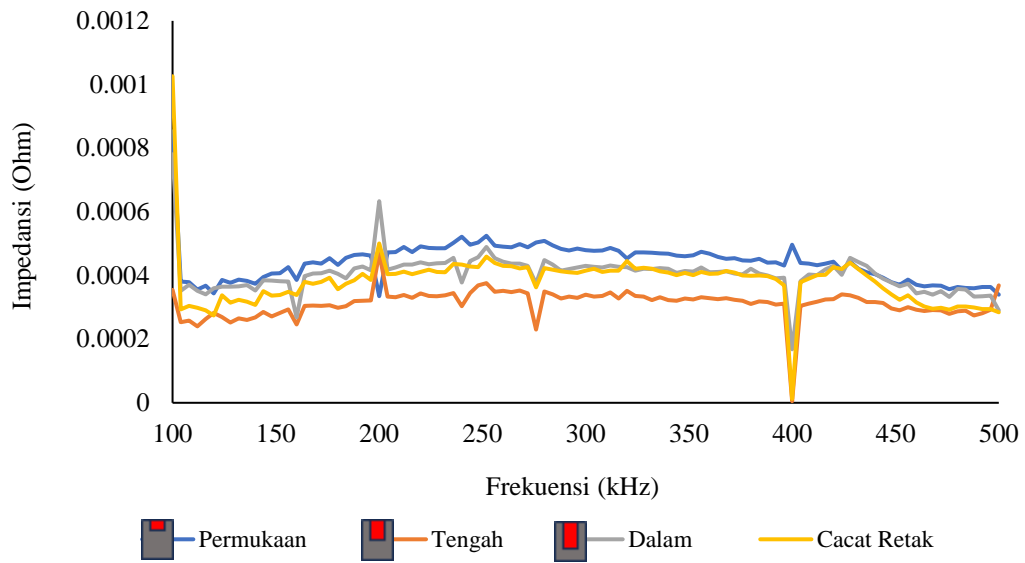
Frekuensi	2k1s 3mm	2k2s	2k1s 1mm	Abs 2k2s
100000	0.000781	0.000268	0.001041	0.000268
104000	0.000285	0.000722	0.000441	0.000722
108000	0.000292	0.000767	0.000438	0.000767
112000	0.000293	0.000715	0.000401	0.000715
116000	0.000287	0.000713	0.000415	0.000713
120000	0.000262	0.000656	0.000436	0.000656
124000	0.000315	0.000653	0.000463	0.000653
128000	0.00031	0.000622	0.000415	0.000622
132000	0.00032	0.00062	0.000412	0.00062
136000	0.000319	0.000649	0.000424	0.000649
140000	0.000337	0.000658	0.000403	0.000658
144000	0.000326	0.000583	0.000434	0.000583
148000	0.000328	0.000604	0.00044	0.000604
152000	0.000358	0.000591	0.000436	0.000591
156000	0.000339	0.000562	0.00046	0.000562
160000	0.000439	0.000586	0.000477	0.000586
164000	0.000363	0.000502	0.000461	0.000502
168000	0.000342	0.000508	0.000471	0.000508
172000	0.000359	0.000491	0.000474	0.000491
176000	0.000353	0.00047	0.000476	0.00047
180000	0.000348	0.000461	0.000448	0.000461
184000	0.000364	0.000441	0.000472	0.000441
188000	0.000339	0.000468	0.000471	0.000468
192000	0.000359	0.000434	0.000492	0.000434
196000	0.00036	0.000448	0.000492	0.000448

**Tabel B.7 (lanjutan)**

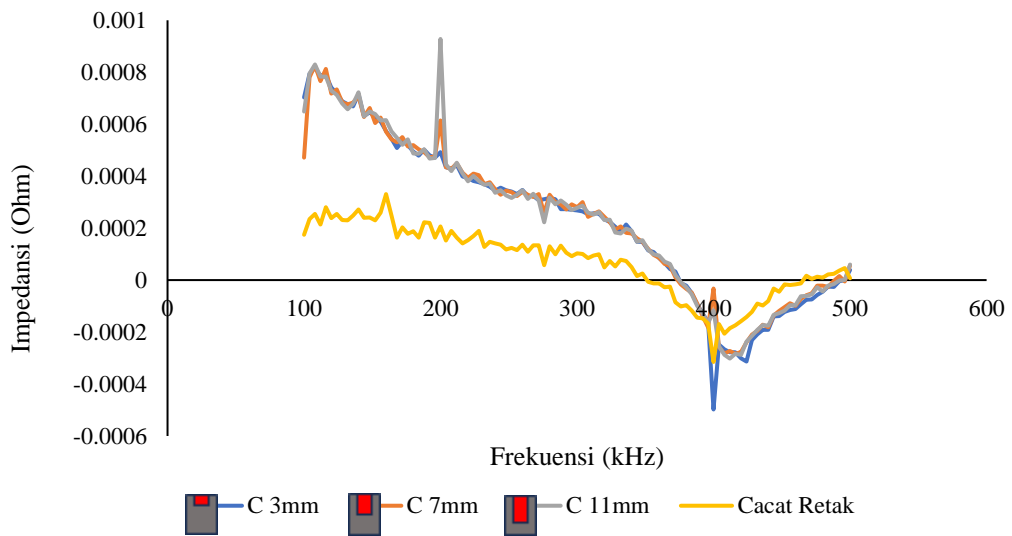
200000	0.000783	0.000807	0.000572	0.000807
204000	0.000377	0.000397	0.000495	0.000397
208000	0.000358	0.000418	0.000495	0.000418
212000	0.000357	0.000424	0.000501	0.000424
216000	0.000362	0.000367	0.000494	0.000367
220000	0.000369	0.000346	0.000508	0.000346
224000	0.000353	0.000355	0.000503	0.000355
228000	0.000355	0.000361	0.000503	0.000361
232000	0.000371	0.000337	0.000493	0.000337
236000	0.000372	0.000319	0.000509	0.000319
240000	0.000382	0.000316	0.000487	0.000316
244000	0.000364	0.000323	0.000506	0.000323
248000	0.000337	0.000302	0.000534	0.000302
252000	0.000429	0.000287	0.000533	0.000287
256000	0.000365	0.000306	0.000501	0.000306
260000	0.000362	0.000322	0.000502	0.000322
264000	0.000366	0.000294	0.000487	0.000294
268000	0.000375	0.000315	0.000504	0.000315
272000	0.000363	0.000298	0.0005	0.000298
276000	0.000386	0.000211	0.000453	0.000211
280000	0.000354	0.000309	0.000497	0.000309
284000	0.00035	0.000272	0.000477	0.000272
288000	0.000363	0.000295	0.000476	0.000295
292000	0.000358	0.000258	0.00048	0.000258
296000	0.00037	0.000247	0.000468	0.000247
300000	0.000355	0.000253	0.000479	0.000253
304000	0.000347	0.00026	0.000468	0.00026
308000	0.000361	0.000261	0.000474	0.000261
312000	0.00035	0.000235	0.000468	0.000235
316000	0.000352	0.000233	0.000474	0.000233
320000	0.000294	0.0002	0.000449	0.0002
324000	0.000349	0.000216	0.000463	0.000216
328000	0.000357	0.000163	0.000466	0.000163
332000	0.000353	0.000183	0.000452	0.000183
336000	0.000339	0.00017	0.00046	0.00017
340000	0.000344	0.00016	0.000453	0.00016
344000	0.000346	0.000152	0.00044	0.000152
348000	0.00034	0.000133	0.000444	0.000133
352000	0.000338	0.000111	0.000448	0.000111
356000	0.000346	0.000092	0.000449	0.000092

**Tabel B.7 (lanjutan)**

360000	0.000344	0.000079	0.000431	0.000079
364000	0.000334	0.000058	0.000435	0.000058
368000	0.000335	0.000045	0.000422	0.000045
372000	0.000332	0.00001	0.00042	0.00001
376000	0.000343	-0.000015	0.000407	0.000015
380000	0.000335	-0.000027	0.000414	0.000027
384000	0.000334	-0.000057	0.000419	0.000057
388000	0.000326	-0.0001	0.000414	0.0001
392000	0.000327	-0.00013	0.000409	0.00013
396000	0.000319	-0.00017	0.000409	0.00017
400000	0.003096	0.000013	0.000367	0.000013
404000	0.000316	-0.00026	0.000391	0.00026
408000	0.000326	-0.00028	0.000397	0.00028
412000	0.000318	-0.00024	0.000392	0.00024
416000	0.000321	-0.00026	0.000386	0.00026
420000	0.000322	-0.00028	0.000382	0.00028
424000	0.000313	-0.00017	0.000366	0.00017
428000	0.000305	-0.0002	0.000372	0.0002
432000	0.00031	-0.00016	0.000377	0.00016
436000	0.00031	-0.00017	0.000379	0.00017
440000	0.000303	-0.00014	0.000375	0.00014
444000	0.0003	-0.00012	0.000374	0.00012
448000	0.000301	-0.00011	0.00037	0.00011
452000	0.000292	-0.00011	0.000362	0.00011
456000	0.000289	-0.000097	0.000371	0.000097
460000	0.000303	-0.00008	0.00037	0.00008
464000	0.000302	-0.000078	0.000367	0.000078
468000	0.000296	-0.000049	0.000368	0.000049
472000	0.000295	-0.000072	0.000366	0.000072
476000	0.000296	-0.000039	0.000344	0.000039
480000	0.000293	-0.000046	0.000347	0.000046
484000	0.000297	-0.000008	0.00035	0.000008
488000	0.0003	0.000002	0.000352	0.000002
492000	0.000291	0.000017	0.000346	0.000017
496000	0.000307	0.000014	0.000344	0.000014
500000	0.000147	0.000087	0.000106	0.000087



**Gambar B.1** Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat sensor tipe II



**Gambar B.2** Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat sensor tipe III

## LAMPIRAN C

### GAMBAR ALAT DAN BAHAN



**Gambar C.1** *Masking tape*



**Gambar C.2** Mesin bor duduk



**Gambar C.3** Sampel pelat baja



**Gambar C.4** Sensor MIT



**Gambar C.5** Sensor tipe I



**Gambar C.6** Sensor tipe II



**Gambar C.7** Sensor tipe III



**Gambar C.8** Sistem MIT