

**KARAKTERISASI SISTEM INSPEKSI BERBASIS *MAGNETIC
INDUCTION TOMOGRAPHY (MIT)* UNTUK DETEKSI CACAT
POROSITAS PADA LOGAM LASAN**

SKRIPSI

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



Oleh :

Rakanita Anggun Pramesti Dioni
3334170018

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON – BANTEN
2021**

LEMBAR PENGESAHAN

**KARAKTERISASI SISTEM INSPEKSI BERBASIS *MAGNETIC
INDUCTION TOMOGRAPHY* (MIT) UNTUK DETEKSI CACAT
POROSITAS PADA LOGAM LASAN**

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

Pembimbing II



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



Harisma Nugraha, S.T., M.T.
NIP. 12190290

LEMBAR PERSETUJUAN

**KARAKTERISASI SISTEM INSPEKSI BERBASIS *MAGNETIC
INDUCTION TOMOGRAPHY (MIT)* UNTUK DETEKSI CACAT
POROSITAS PADA LOGAM LASAN**

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh :

Rakanita Anggun Pramesti Dioni

3334170018

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal :

28 Desember 2021

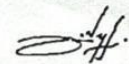
Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

Penguji I : Dr. Didied Haryono, S.T., M.T



Penguji II : Harisma Nugraha, S.T., M.T



Penguji III : Rahman Faiz Suwandana, S.T., M.S.



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

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc.

NIP. 197804102003121001

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Karakterisasi Sistem Inspeksi Berbasis *Magnetic Induction Tomography* (MIT) untuk Deteksi Cacat Porositas pada Logam Lasan

Nama Mahasiswa : Rakanita Anggun Pramesti Dioni

NIM : 3334170018

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, 29 Desember 2021

A handwritten signature in black ink is written over a pink 10,000 Rupiah Indonesian postage stamp. The stamp features a Garuda Pancasila emblem and the word 'METERA'.

Rakanita Anggun Pramesti Dioni

NIM. 3334170018

ABSTRAK

PT KHI *Pipe Industries* saat ini menggunakan *ultrasonic testing* untuk menginspeksi dan memonitor produk pipa baja, namun *ultrasonic testing* memiliki kelemahan yaitu harus dilakukan pada temperatur kamar, sedangkan pipa setelah dilakukan pengelasan dan dilakukan *quenching*, temperatur daerah las sekitar 80 °C, sehingga *ultrasonic testing* tidak mampu menginspeksi produk pipa tersebut. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, dipasang alat inspeksi dan *monitoring* kualitas pipa baja dengan menggunakan sensor *magnetic induction tomography* (MIT) yang mampu mendeteksi cacat lasan pada temperatur 80 °C. Cacat pada produk pipa yang dihasilkan oleh PT KHI *Pipe Industries* rata-rata berdiameter sekitar 1,8 mm. Penelitian ini dilakukan untuk memperbaiki sistem sensor MIT, sehingga dapat mendeteksi cacat las yang diakibatkan oleh porositas berdiameter 1 mm pada temperatur kamar sebelum dilakukan pada temperatur 80 °C sesuai dengan operasi yang ada di PT KHI *Pipe Industries*. Sensor MIT dibuat menggunakan kawat tembaga dengan kemurnian 99,9% dengan tujuh desain koil yang berbeda. Sensor yang digunakan yaitu jenis solenoida dan planar. Percobaan dilakukan pada plat baja dengan diameter cacat porositas artifisial sebesar 1 dan 3 mm, serta pipa baja berdiameter cacat sebesar 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 mm, tegangan yang diinputkan pada koil pemancar sebesar 1, 5, 10, 15 dan 20 volt, posisi inspeksi di antara koil pemancar dan penerima, di bawah koil pemancar, dan penerima. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain sensor solenoida dengan jumlah lilitan koil penerima lebih kecil dibandingkan koil pemancar menghasilkan perbedaan tegangan terukur yang lebih tinggi dibandingkan desain sensor lainnya. Semakin besar volume porositas maka selisih tegangan terukur antara baja cacat dengan baja normal semakin besar pula. Selisih baja cacat 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 mm dengan baja normal pada frekuensi 340 kHz secara berturut turut yaitu 128, 208, 328, 376, 432, 480, dan 544 mV. Sensor MIT pada penelitian ini dapat membedakan cacat artifisial sampai berukuran 1 mm dengan baja normal dan optimal menggunakan desain 2 sensor solenoida, pada rentang frekuensi karakterisasi 330–340 kHz, tegangan input 20 V dengan posisi cacat di bawah koil penerima. Sehingga diharapkan sensor MIT dengan desain dan parameter optimal dari penelitian ini dapat digunakan pada *line* produksi PT KHI *Pipe Industries*.

Kata Kunci : Induktansi, Pengelasan, Sensor MIT, Tegangan Terukur.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT atas berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian dan laporan Skripsi ini yang merupakan salah satu syarat kelulusan sebagai sarjana Teknik Metalurgi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu terlaksananya penelitian ini, terutama kepada:

1. Bapak Didied Haryono, ST., MT selaku pembimbing I yang membimbing, memotivasi dan memberikan kritik serta saran bagi penulis.
2. Bapak Harisma Nugraha, ST., MT selaku pembimbing II atas saran dan bimbingannya.
3. Annisa Nur Fitriani, ST yang telah membantu, membimbing dan membagi ilmunya selama proses penelitian ini.
4. Bapak Dr. Mahfudz Al Huda, selaku Kepala Lab CNDTPI PT. Edwar Technology atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
5. Bapak Rohmadi yang telah memberikan arahan serta masukan pada proses penelitian.
6. Ibu Dr. Amalia Sholehah selaku kepala Lab Material Maju dan Tomografi UNTIRTA yang memotivasi dan memberikan kritik serta saran bagi penulis.
7. Bapak Rahman Faiz Suwandana, M.S dan Bapak Imamul Muttakin, M.Eng selaku dosen Teknik Metalurgi UNTIRTA atas kritik, saran dan masukannya.
8. Kedua Orang Tua atas dukungan moril maupun materil.
9. Teknik Metalurgi angkatan 2017, anggota Lab AMT, rekan sejawat BEM FT UNTIRTA dan BOSTA FT UNTIRTA yang telah memberikan doa, semangat dan inspirasi.

Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan. Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penyusunan laporan skripsi ini. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik serta saran yang membangun. Semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya.

Cilegon, 29 Desember 2021

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'R' followed by a vertical line and a horizontal stroke at the bottom.

Rakanita Anggun Pramesti Dioni

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pengelasan	5
2.1.1 <i>High Frequency Resistance Welding</i> (HFRW).....	6
2.1.2 Cacat Porositas pada Logam Lasan	7
2.2 Tomografi	8
2.3 <i>Magnetic Induction Tomography</i> (MIT)	10
2.3.1 Prinsip Kerja	11
2.3.2 Sifat Magnetik.....	14
2.3.3 Koil Sebagai Sensor Induksi.....	16
2.4 Induktansi	21
2.5 <i>Signal-To-Noise Ratio</i> (SNR).....	23

2.6	Frekuensi Resonansi	25
2.7	Osiloskop	28
2.6.1	Prinsip Kerja Osiloskop	29
2.6.2	Konsep Fisika Osiloskop	30
2.8	Pipa <i>Electric Resistance Welded</i> (ERW)	32
 BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir Penelitian Secara Umum	33
3.1.1.	Diagram Alir Pembuatan Sensor	34
3.1.2.	Diagram Alir Karakterisasi Sensor	34
3.2	Alat dan Bahan	35
3.2.1	Alat–Alat	35
3.2.2	Bahan-Bahan	36
3.3	Prosedur Percobaan	38
 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Hasil Karakterisasi Koil Planar dan Solenoida	43
4.2	Hasil Karakterisasi Koil Solenoida menggunakan Plat Baja	45
4.3	Hasil Karakterisasi Koil Solenoida menggunakan Pipa Baja	56
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1.	Kesimpulan	58
5.2.	Saran	59
DAFTAR PUSTAKA		60
LAMPIRAN A. CONTOH PERHITUNGAN		65
LAMPIRAN B. DATA KARAKTERISASI SENSOR		68
LAMPIRAN C. FOTO ALAT		136

DAFTAR TABEL

Nomor	Judul Tabel	Halaman
2.1	Perbandingan Tomografi Listrik	9
2.2	Jenis – Jenis Tomografi Listrik	10
3.1	Parameter Sensor Solenoida	38
3.2	Parameter Sensor Planar	39
B.1	Data Tegangan Terukur Sensor Jenis Solenoida Desain 1 Karakterisasi Planar-Solenoida.....	66
B.2	Data Tegangan Terukur Sensor Jenis Planar Karakterisasi Planar-Solenoida	66
B.3	Data Tegangan Terukur Baja Normal (Plat Baja Cacat 3 mm) Sensor Solenoida Variasi Posisi Koil	70
B.4	Data Tegangan Terukur Sensor Jenis Solenoida Variasi Sensor.....	71
B.5	Data Tegangan Terukur Rata-Rata Sensor Solenoida Desain 2 Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx	72
B.6	Data Tegangan Terukur Sensor Solenoida Desain 2 Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx Percobaan 3.....	74
B.7	Data Tegangan Terukur Rata-Rata Sensor Solenoida Desain 5 Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx	77
B.8	Data Tegangan Terukur Sensor Solenoida Desain 5 Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx Percobaan 3.....	80
B.9	Data Tegangan Terukur Rata-Rata Sensor Solenoida Desain 2 pada Pipa Baja Variasi Diameter Cacat	82
B.10	Data Tegangan Terukur Sensor Solenoida Desain 2 pada Pipa Baja Variasi Diameter Cacat Percobaan 3.....	83

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Judul Gambar	Halaman
2.1	Skematik Diagram Sistem Pengelasan HFRW	6
2.2	Cacat Porositas	7
2.3	Porositas di Pipa ERW	8
2.4	Skematik Inspeksi dari Sensor MIT pada Logam Lasan	11
2.5	Prinsip Kerja Sensor MIT.	12
2.6	Representasi vektor medan magnet eksitasi, B , dan medan magnet gangguan, ΔB	13
2.7	Skema Koil Solenoida.....	17
2.8	Garis – Garis Medan Magnet Koil Selenoid	18
2.9	Skema Koil Planar.....	19
2.10	Medan Magnet Koil Planar	20
2.11	Skema <i>Signal To Noise Ratio</i>	24
2.12	Grafik Reaktansi Induktif terhadap Frekuensi	25
2.13	Grafik Reaktansi Kapasitif terhadap Frekuensi	26
2.14	Grafik Frekuensi Resonansi terhadap Frekuensi	28
2.15	Skema Prinsip Kerja Osiloskop Digital	30
2.16	Pipa <i>Electric Resistance Welded</i> (ERW)	32
3.1	Diagram Alir Penelitian Secara Umum	33
3.2	Diagram Alir Pembuatan Sensor.....	34
3.3	Diagram Alir Karakterisasi Sensor	35
3.4	Sampel Pelat Baja 1 dan 3 mm	37

3.5 Sampel Pipa Baja	38
3.6 Foto 6 Sensor Solenoida.....	39
3.7 Foto Sensor Planar	40
3.8 Rangkaian Sensor MIT	40
3.9 Posisi Cacat dengan Koil	41
3.10 Posisi Cacat di Sekitar Koil Rx.....	42
4.1 Rasio Tegangan Terukur terhadap Tegangan Input Sensor Solenoida dan Sensor Planar	43
4.2 Tegangan Terukur Sensor 1 Solenoida terhadap Posisi Cacat.....	45
4.3 Rasio Tegangan Terukur terhadap Tegangan Input pada masing – masing Desain Sensor.....	47
4.4 Grafik Rata – Rata Tegangan Terukur terhadap Frekuensi Pada Sensor 2 dan 5 pada objek Baja Normal dan Tanpa Objek (Udara).....	48
4.5 Grafik Frekuensi Resonansi terhadap Frekuensi.....	49
4.6 Grafik <i>Signal-to-Noise Ratio</i> (SNR) Frekuensi 340 kHz pada; (a) Sensor 2 dan (b) Sensor 5	50
4.7 Grafik Persentase Selisih Tegangan Terukur Baja Cacat dengan Udara Sensor 2 dan 5.....	51
4.8 Grafik Selisih Tegangan Terukur Baja Normal dengan Baja Cacat Sensor 2 dan 5.....	52
4.9 Grafik Selisih Tegangan Terukur Baja Normal terhadap Baja Cacat Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx pada; (a) Sensor 2 dan (b) Sensor 5	54
4.10 Grafik Selisih Tegangan Terukur Baja Normal – Baja Cacat pada Setiap Frekuensi	56
B.1 Jangka Sorong	85
B.2 L-C-R Meter	85
B.3 Penggaris	85

B.4 <i>Signal Generator</i>	85
B.5 <i>Osiloskop Digital</i>	85

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya zaman, banyak sekali negara yang sedang bersaing untuk membangun infrastruktur terutama dalam bidang minyak dan gas bumi, air minum, pembangunan gedung dan lain sebagainya. Pada sektor hulu, industri baja disebut juga *mother of industries* karena berperan penting untuk memasok kebutuhan bahan baku dalam mendukung proyek infrastruktur dan menopang kegiatan sektor industri yang membutuhkan pipa baja sehingga permintaan akan pipa baja meningkat. PT KHI *Pipe Industries* merupakan salah satu anak perusahaan PT Krakatau Steel Tbk dalam bidang manufaktur yang memproduksi pipa baja. PT KHI *Pipe Industries* memasok kebutuhan pipa baja di Indonesia sebanyak 15% atau sebanyak 150.000 ton/tahun (PT KHI *Pipe Industries*, 2018).

Untuk menjaga kualitas dari produk pipa baja yang dihasilkan, maka dilakukan inspeksi dan *monitoring*. Saat ini PT KHI *Pipe Industries* masih menggunakan *ultrasonic testing* sebagai alat inspeksi dan *monitoring* pada produk pipa yang dihasilkan. Namun *ultrasonic testing* masih memiliki kelemahan yaitu harus dilakukan pada temperatur kamar. *Ultrasonic testing* ditempatkan pada akhir proses produksi pipa baja. Ketika pipa baja yang diproduksi mencapai temperatur kamar, pipa baja sudah mencapai 100 m panjangnya sehingga ketika ditemukan cacat kondisi pipa tersebut telah mencapai 100 m.

Untuk mengoptimalkan inspeksi dan *monitoring* pada produksi di PT KHI *Pipe Industries*, dipasang alat inspeksi dan *monitoring* kualitas pipa baja dengan menggunakan sensor alat berupa *magnetic induction tomography* (MIT) yang mampu mendeteksi cacat pada temperatur 80 °C dan secara *real time* yang ditempatkan setelah pipa dilakukan *quenching* atau pipa masih kurang lebih 6 meter panjangnya. Pada logam lasan, MIT mendeteksi cacat berdasarkan pada perbedaan konduktivitas listrik yang mempengaruhi medan magnet yang dihasilkan oleh *eddy current* dan disebabkan permeabilitas serta permeativitas magnetiknya. Model sensor MIT terdiri dari 2 koil, yaitu koil pemancar dan koil penerima.

Prototipe MIT telah dikembangkan oleh Untirta dan PT CTech Lab Edwar Teknologi. Prototipe alat ini juga memungkinkan dipasang pada *line* produksi PT KHI *Pipe Industries* sehingga diharapkan mampu melakukan inspeksi dan *monitoring* secara *online* pada temperatur operasional PT KHI *Pipe Industries*. Penelitian sebelumnya belum didapatkan perbedaan sinyal yang berhubungan langsung dengan produk pipa yang dihasilkan oleh PT KHI *Pipe Industries*, dikarenakan cacat pada produk pipa baja berdiameter rata-rata 1,8 mm, sedangkan perolehan MIT hanya mampu mendeteksi cacat lasan dengan diameter sekitar 3 mm. Penelitian ini dilakukan dengan mengkarakterisasi desain sensor planar dan solenoida sehingga didapatkan desain sensor dan parameter optimal agar sensor MIT dapat mendeteksi cacat porositas berdiameter 1 mm.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini meliputi:

- a. Bagaimana pengaruh tegangan input terhadap tegangan terukur?
- b. Jenis koil apa yang optimal untuk mendeteksi cacat porositas 1 mm?
- c. Bagaimana pengaruh posisi inspeksi terhadap hasil pendeteksian cacat porositas artifisial?
- d. Bagaimana desain koil solenoida yang optimal untuk mendeteksi cacat porositas berdiameter 1 mm?
- e. Apakah sensor MIT yang dibuat mampu mendeteksi cacat porositas dengan diameter 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 mm pada sampel pipa baja?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini yaitu:

- a. Membuat sistem sensor untuk mendeteksi cacat las porositas dengan rentang ukuran diameter cacat sebesar 1,0 – 3,0 mm menggunakan sensor *magnetic induction tomography* (MIT) pada temperatur kamar.
- b. Menentukan posisi pengukuran, tegangan input dan rentang frekuensi inspeksi optimal.
- c. Sensor dapat membedakan diameter cacat porositas dengan adanya perbedaan tegangan terukur antara baja normal dengan baja cacat.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material Maju dan Tomografi FT

Untirta dan PT CTech Lab Edwar Teknologi. Bahan yang di gunakan yaitu plat baja dengan cacat artifisial (buatan) sebagai benda yang akan di uji serta kawat tembaga dengan kemurnian 99,9% yang digunakan untuk membuat koil. Variabel pada penelitian ini meliputi dua variabel, yaitu variabel bebas dan variabel terikat.

Variabel bebas dari penelitian ini terdiri dari:

- a. Tegangan Input untuk Karakterisasi Koil Solenoida dan Koil Planar :
1, 4, 8, 16 dan 20 Volt.
- b. Tegangan Input untuk Karakterisasi Koil Solenoida : 1, 5, 10, 15 dan 20 Volt.
- c. Diameter Cacat Artifisial pada Pelat Baja : 1 dan 3 mm.
- d. Diameter Cacat Artifisial pada Pipa Baja : 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 mm.
- e. Posisi Cacat : di bawah koil pemancar, di bawah koil penerima, dan diantara koil penerima – koil pemancar.

dan untuk variabel terikat pada penelitian ini adalah nilai tegangan terukur yang terdeteksi oleh sensor pada hasil lasan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan

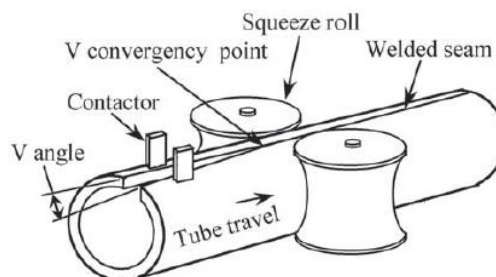
Pengelasan menurut definisi dari *Deutsche Industrie Normen* (DIN) yaitu ikatan metalurgi pada sambungan logam atau paduan yang dilakukan dalam keadaan leleh atau cair. Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas (Wiryosumarto & Okumura, 2000). Menurut *Welding Handbook* tentang proses dasar dari pengelasan adalah suatu proses penyambungan bahan (logam) yang dapat menghasilkan peleburan bahan dengan cara memanaskannya hingga suhu yang tepat dengan atau tanpa pemberian tekanan maupun bahan pengisi. Secara umum pengelasan adalah suatu cara untuk menyambung logam padat dengan cara mencairkannya melalui pemanasan.

Proses pengelasan yang sering digunakan untuk penyambungan baja ialah pengelasan yang menggunakan energi listrik sebagai sumber panasnya. Pada saat ini teknik las tekan telah digunakan secara luas dalam penyambungan kedua sisi plat pada pembuatan pipa baja. Luasnya penggunaan teknologi ini disebabkan karena pipa baja yang dibuat dengan menggunakan teknik penyambungan ini mampu untuk aplikasi produksi yang tinggi dan proses pembuatannya juga lebih cepat sehingga biaya secara keseluruhan menjadi lebih murah. Pengelasan tekan adalah proses penyambungan material yang dilakukan dengan memanaskan material kemudian ditekan hingga kedua bagian material tersambung menjadi satu.

Salah satu jenis pengelasan yang digunakan pada pembuatan pipa baja yaitu pengelasan *high frequency resistance welding* (HFRW).

2.1.1 *High Frequency Resistance Welding (HFRW)*

Metode pembuatan pipa *electric resistance welding* (ERW) dengan produktifitas dan efisiensi yang tinggi disebut sebagai *high frequency resistance welding* (HFRW) (American Petroleum Institute, 2007). Proses pengelasan dilakukan pada bagian tepi (ujung) dengan diberikan temperatur dan tekanan yang tinggi agar bagian ujung pipa dapat menempel dengan kuat sehingga membentuk *inner bead* dan *outer bead*. Lasan yang dihasilkan akan berbentuk lurus (longitudinal) dan mesin ini bekerja dengan kecepatan konstan dengan temperatur sekitar 1100-1300 °C. Proses pengelasan *seam welding* yaitu menggunakan *roller*, hanya saja yang membedakan yaitu pada HFRW menggunakan frekuensi yang sangat tinggi yaitu 10-500 KHz. HFRW biasanya digunakan dalam proses pengelasan untuk produksi pipa longitudinal (ERW) (Naryono, 2007). Pengelasan HFRW memiliki tingkat produktifitas dan efisiensi yang tinggi dalam melakukan proses penyambungan logam. Skematik diagram sistem pengelasan HFRW yang dapat dilihat pada Gambar 2.1.



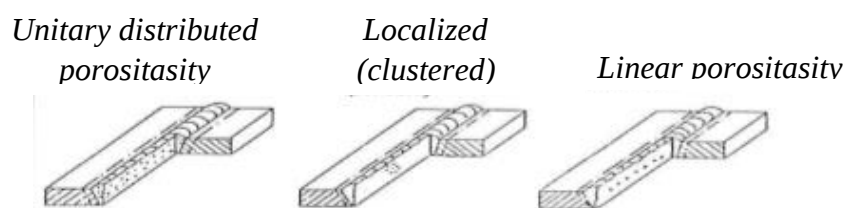
Gambar 2.1 Skematik Diagram Sistem Pengelasan HFRW (Kim, et al., 2007).

2.1.2 Cacat Porositas pada Logam Lasan

Pada proses pengelasan terdapat jenis-jenis cacat yang biasanya dijumpai antara lain retak (*cracks*), inklusi, kurangnya fusi atau penetrasi (*lack of fusion or penetration*) dan bentuk yang tak sempurna (*imperfect shape*) yang di akibatkan oleh kesalahan teknis pada saat pada proses pengelasan. Porositas merupakan cacat las berupa lubang-lubang halus atau pori-pori yang biasanya terbentuk di dalam logam las akibat terperangkapnya gas yang terjadi ketika proses pengelasan. Disamping itu, porositas dapat pula terbentuk akibat kekurangan logam cair karena penyusutan ketika logam membeku (*shrinkage porositasity*). Jenis porositas dapat dibedakan menurut pori-pori yang terjadi yaitu (Daryus, 2002):

- a. Porositas terdistribusi merata.
- b. Porositas terlokalisasi.
- c. Porositas linier.

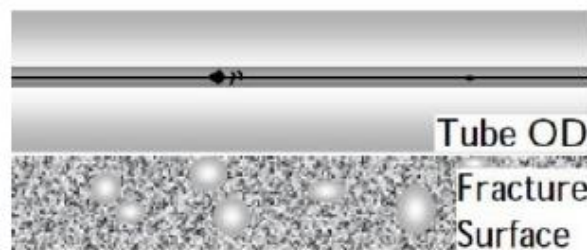
Cacat porositas dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.2 Cacat Porositas (Daryus, 2002).

Cacat porositas pada pengelasan HFRW berada di *bond plane* yang merupakan hasil dari *high welding temperature* dan *insufficient squeeze out*. Permukaan patahan memperlihatkan patah ulet (*fibrous*), *random spherical*

voids yang terdistribusi secara acak di *edge*. Posisi *voids* yang berada pada pipa akan tampak berwarna hitam gelap akibat proses oksidasi. *Pinhole* dengan ukuran kecil akan terlihat sebelum dilakukan *scarfing*, setelah *scarfing* akan terlihat di bagian *bond line*, hal tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Porositas di Pipa ERW (Robert, 2013).

2.2 Tomografi

Tomografi berasal dari kata dalam Bahasa Yunani, yaitu *Tomos* yang berarti bagian, irisan, atau potongan dan *Graphia* yang berarti gambar atau penggambaran. Secara istilah tomografi berarti penggambaran (pencitraan) yang berasal dari beberapa potongan (*slice*) atau sayatan melintang suatu obyek. Jadi, tomografi adalah proses eksplorasi karakteristik internal suatu daerah tertentu melalui integral pengukuran yang berhubungan dengan karakteristik internal dari domain tertentu (Beck & Williams, 1996). Terinspirasi oleh kesuksesan teknologi tomografi di bidang kedokteran, berbagai moda tomografi dikembangkan untuk aplikasinya dalam proses industri dengan menggabungkan teknologi sensor dan metoda rekonstruksi matematis. Metoda rekonstruksi yang dipakai pada umumnya hampir mirip untuk mode yang satu dengan yang lain, akan tetapi pemilihan mode sensor

sangat tergantung pada media aplikasinya. Berdasarkan sudut pandang, teknik tomografi saat ini yang sedang dikembangkan dan dapat diterima adalah teknik tomografi yang bersifat *non invasive* dan *non destructive* (Beck & Williams, 1996). *Non invasive* merupakan proses dimana tidak terdapat kontak langsung antara sensor dengan obyek atau domain, sedangkan *non destructive* merupakan proses tidak mengubah atau merusak sifat alami dari objek yang sedang diamati.

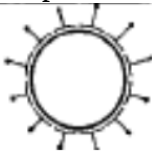
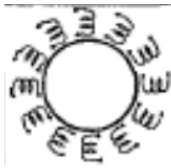
Perkembangan *Electromagnetic Tomography* (EMT) bersamaan dengan *Electrical Capacitance Tomography* (ECT) dan *Electrical Resistance Tomography* (ERT). Tiga teknik dasar tomografi listrik tersebut berdasarkan pengukuran resistansi, kapasitansi, dan induktansi. Teknik tomografi listrik ini dapat mencitrakan tiga sifat elektromagnetik material, yaitu konduktivitas listrik, permitivitas, dan permeabilitas magnetik. ECT digunakan untuk menggambarkan sifat-sifat dielektrik, sedangkan ERT diterapkan untuk menggambarkan konduktifitas suatu media multifase. Perbandingan dari teknik ECT, ERT, dan EMT dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan jenis – jenis tomografi listrik dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Perbandingan Tomografi Listrik (Beck & Williams, 1996).

Jenis Tomografi	Prinsip	Objek Aplikasi	Catatan
EIT	Elektroda memindai resistivitas dengan invasif tetapi <i>nondestructive</i>	Sistem konduktivitas elektrik-cairan/ padatan, gas/ cairan	Elektroda yang sangat kecil dapat digunakan
ECT	Elektroda memindai kapasitansi dengan noninvasif	Sistem elektrik terisolasi-gas atau cairan/ padatan/ gas/ cairan	Elektroda mungkin membutuhkan (kira-kira) 10 cm ² area untuk memberikan

			perubahan kapasitans yang cukup
MIT	Sensor induksi magnet dengan noninvasif	Pendeteksian komponen dalam suatu proses yang mempengaruhi medan yang dihasilkan oleh <i>eddy current</i> . Pendeteksian komponen yang mempengaruhi medan disebabkan permeabilitas magnetiknya.	Frekuensi eksitasi dipilih sesuai dengan dimensi domain <i>eddy current</i>

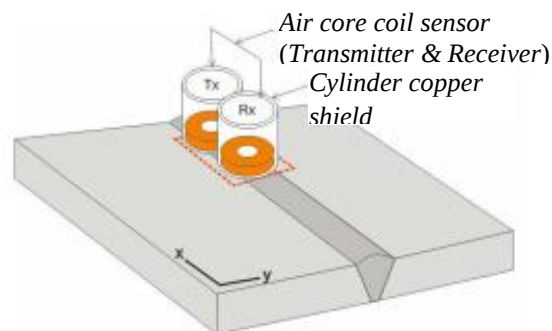
Tabel 2.2 Jenis – Jenis Tomografi Listrik (Peyton, et al., 1999).

Teknik Tomografi	Kapasitansi	Resistansi	Elektromagnetik
Tipe Susunan Sensor	Pelat Kapasitans 	Elektroda 	Koil 
Nilai yang diukur	Kapasitansi	Resistansi (Impedansi)	Induksi Mutual/ Tunggal
Range Sifat Fisika Terukur	Konduktivitas Rendah (10^{-1} S/m) Permitivitas Relatif 10^0 s/d 10^2	Konduktivitas Sedang (10^{-1} s/d 10^7 S/m) Permitivitas Relatif (10^0 s/d 10^2)	Konduktivitas Tinggi (10^2 s/d 10^7 S/m) Permitivitas Relatif (10^0 s/d 10^4)
Tipe Material	Minyak dan <i>saline</i>	Air dan <i>saline</i>	Logam, mineral, dan air.

2.3 *Magnetic Induction Tomography (MIT)*

Perkembangan teknologi las tentunya harus di dukung dengan kendali mutu produk yang dihasilkan. Pengujian tidak merusak (*non-destructive test*) dijadikan sebagai salah satu bagian dari kendali mutu komponen dalam prosuksi terutama

untuk industri fabrikasi (Ulum, et al., 2012). Pengujian tidak merusak dilakukan dengan tidak merusak bagian konstruksi benda ujinya. Pengujian yang termasuk dalam kelompok pengujian ini yaitu bertujuan untuk mengetahui cacat, baik cacat luar maupun cacat dalam (Wiryosumarto, 2000). Salah satu metode pengujian tidak merusak yaitu menggunakan induksi magnet atau disebut *magnetic induction tomography* (MIT). MIT merupakan sensor dengan prinsip induksi magnet non-invasif. MIT telah digunakan pada aplikasi biomedikal dan pengujian tidak merusak pada logam lasan. Pada logam lasan, MIT mendeteksi medan magnet yang dihasilkan oleh *eddy current* dan disebabkan permeabilitas dan permitivitas magnetiknya. Model sensor MIT terdiri dari 2 koil, yaitu koil pertama yang bertindak sebagai pemancar (*exciter*) dan koil lainnya sebagai penerima (*sensing/penginderaan*) sehingga citra dari cacat yang terdeteksi dapat muncul pada layar komputer) (Sutisna, et al., 2014). Berikut merupakan skematik inspeksi dari sensor MIT pada logam lasan yang dapat dilihat pada Gambar 2.4.

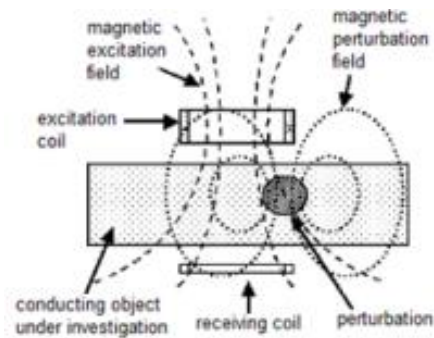


Gambar 2.4 Skematik Inspeksi dari Sensor MIT pada Logam Lasan (Sutisna, et al., 2014).

2.3.1 Prinsip Kerja

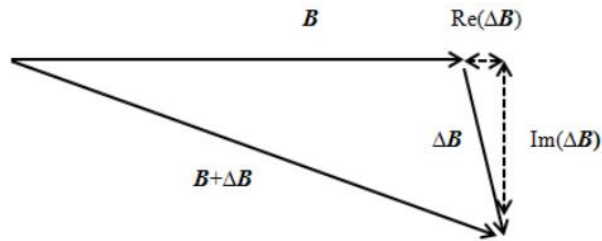
MIT menerapkan medan magnet dari koil eksitasi untuk menginduksi *eddy current* pada material. Distribusi medan magnet eksitasi

diubah oleh *eddy current*, dan medan magnet yang dihasilkan dari ini kemudian dideteksi oleh kumparan penginderaan (Ziolkowski & Gratkowski, 2009). Gambar 2.5 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 (Zinan, et al., 2008).



Gambar 2.5 Prinsip Kerja Sensor MIT (Igney, et al., 2005).

Prinsip induksi *eddy current* dari koil tereksitasi di MIT dapat diwakilkan oleh diagram vektor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Ketika porositas terkena medan magnet eksitasi, B , porositas menghasilkan *eddy current* karena elektromagnetik induksi. *Eddy current* juga akan menyebabkan gangguan medan magnet, ΔB , yang akan mengubah kekuatan dan distribusi spasial medan magnet eksitasi asli. $\Delta B + B$ dapat dideteksi menggunakan kumparan deteksi (Griffiths, 2001).



Gambar 2.6 Representasi vektor medan magnet eksitasi, B , dan medan magnet gangguan, ΔB (Griffiths, 2001).

Hubungan ini memiliki penurunan matematis yang diwakilkan oleh persamaan 2.1.

$$\Delta B/B \propto \omega(\omega\epsilon_0\epsilon_r - j\sigma) \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana, ω adalah frekuensi sudut dari kumparan eksitasi, ϵ_0 adalah permitivitas vakum, ϵ_r adalah permitivitas relatifnya, $j = \sqrt{-1}$ dan σ adalah konduktivitas jaringan. Derivasi menunjukkan bahwa total bidang yang terdeteksi $\Delta B + B$ tertinggal dari bidang utama B dengan suatu sudut ϕ . Medan magnet gangguan ΔB berisi bagian nyata dan sebuah bagian imajiner. Bagian nyata dari ΔB disebabkan oleh perpindahan arus, dan mewakili hubungan linier dengan permitivitas konduktor. Bagian imajiner disebabkan oleh impedansi. Hal tersebut menunjukkan bahwa deteksi *phase-sensitive* diperlukan untuk mendapatkan distribusi konduktivitas jaringan, yang dapat digunakan untuk merekonstruksi gambar (Griffiths, 2001).

MIT telah banyak diterapkan untuk memetakan suatu objek di bawah investigasi berdasarkan tiga sifat listrik pasif bahan yaitu (σ); permeabilitas (μ) dan permitivitas (ϵ). Sifat listrik pasif juga dikenal

sebagai sifat dielektrik. Dari beberapa literatur, telah diamati bahwa pada penelitian suatu objek lebih banyak fokus pada profil kelistrikan yaitu konduktivitas. Hal tersebut karena nilainya yang relatif lebih tinggi dibandingkan parameter lainnya (Mansor, et al., 2015). Konduktivitas adalah kemampuan bahan untuk menginduksi suatu arus listrik (Gabriel, et al., 1996). Fenomena yang terjadi saat pengukuran konduktivitas logam untuk proses industri menggunakan MIT, hampir semua logam menunjukkan konduktivitas listrik yang tinggi dan kriteria ini memungkinkan MIT untuk membedakan objek logam dalam proses industri. Peyton bersama rekan – rekannya pada tahun 1996 telah mengembangkan sistem MIT yang beroperasi pada frekuensi lebih tinggi dari 100 kHz untuk memisahkan logam benda (konduktivitas tinggi, permeabilitas rendah) dari benda ferit (konduktivitas rendah, permeabilitas tinggi) dengan perbedaan tanda sinyalnya.

2.3.2 Sifat Magnetik

Medan magnet memiliki beberapa sifat yang meliputi kerapatan fluks magnet, intensitas medan magnet, fluks total dan magnetisasi (Mansor, et al., 2015).

a. Densitas Fluks Magnetik

Kepadatan fluks magnet pada MIT dikenal sebagai induksi magnet. Pada ruang hampa, secara teoritis didefinisikan sebagai berikut (Mansor, et al., 2015):

$$B = \mu_0 H \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana B diukur dalam Weber per meter persegi (Wb/m^2) atau dalam satuan internasional yaitu Tesla (T). Satuan lama yang sering digunakan untuk fluks magnet kepadatan adalah Gauss (G) dimana 1T atau 1 Wb/m^2 setara dengan 10.000 G . Konstanta permeabilitas dalam ruang hampa tidak berdimensi dan memiliki nilai yang ditentukan dalam Henry per meter (H/m), dari (Mansor, et al., 2015):

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \dots \dots \dots (2.3)$$

Permeabilitas relatif ruang hampa menjadi hal yang penting, karena bahan yang berbeda menunjukkan permeabilitas relatifnya. Medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan eksitasi dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini (Mansor, et al., 2015):

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{4R^2 + L^2}} \dots \dots \dots (2.4)$$

b. Intesnitas Medan Magnet

Intensitas medan magnet dapat digambarkan dengan menggunakan hukum sirkuit Ampere. Integral garis H tentang setiap lintasan tertutup sama persis dengan arus searah yang dilingkupi oleh lintasan tersebut. Hal ini dapat diwakilkan dalam persamaan 2.5. Hukum ini berasal dari hukum Biot Savart (Mansor, et al., 2015).

$$\oint H \cdot dl = I \dots \dots \dots (2.5)$$

dimana H adalah kekukatan medan magnet yang dihasilkan oleh arus I , dan dl adalah elemen diferensial dengan panjang di sepanjang jalur integrasi. Dalam satuan SI, I dapat diukur dalam Ampere (A) dan H diukur dalam Ampere per meter (A/m). Medan membawa informasi penting tentang kekuatan bidang resultan (Mansor, et al., 2015).

c. Total Fluks

Fluks total merupakan kerapatan fluks yang diterapkan pada suatu area. Fluks memiliki satuan Weber atau sederhananya Tesla^2 (Mansor, et al., 2015).

d. Magnetisasi

Magnetisasi adalah ukuran sejauh mana suatu benda berada yang termagnetisasi. Hal ini adalah ukuran momen dipol magnet per satuan volume benda. Magnetisasi memiliki satuan yang sama dengan medan magnet yaitu Ampere per meter (A/m) (Mansor, et al., 2015).

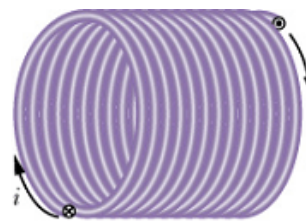
2.3.3 Koil Sebagai Sensor Induksi

Kumparan adalah salah satu jenis tertua dan paling terkenal dari sensor magnetik, dan juga dikenal sebagai sensor koil pencarian, sensor *pickup* dan antena magnetik (Mansor, et al., 2015). Sensor koil hanya sensitif terhadap fluks yang tegak lurus dengan sumbu utamanya. Studi sebelumnya menjelaskan pengoperasian berbagai jenis sensor induksi, seperti gulungan Rogowski, sensor gradiometer, sensor kumparan getar,

sensor medan tangensial, dan probe jarum (Tumanski, 2007). Terdapat dua jenis koil yang digunakan pada Sistem MIT, yaitu koil planar dan solenoida.

a. Koil Solenoida

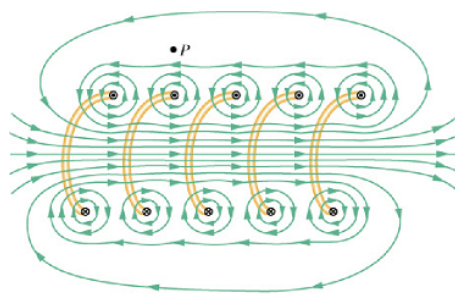
Solenoida merupakan kawat berbahan konduktor yang disusun sehingga membentuk kumparan (koil) dan dapat dialiri arus listrik. Kuat medan magnet di dalam (sumbu) solenoida jauh lebih besar bila dibandingkan di luar solenoida. Solenoida disebut ideal apabila medan magnet didalam solenoida bersifat homogen dan diluarnya nol. Medan magnet berbentuk solenoid ialah medan magnet yang dihasilkan oleh arus dalam kumparan kawat berbentuk heliks yang panjang, tergulung rapat, seperti Gambar 2.7 berikut ini.



Gambar 2.7 Skema Koil Solenoida (Kapoor, Unknown).

Medan magnet solenoid adalah penjumlahan vektor dari medan yang dihasilkan oleh masing-masing individu putaran kawat (lilitan) yang membentuk solenoid. Untuk titik yang sangat dekat dengan putaran kawat, kawat secara magnetis berperilaku hampir seperti kawat lurus panjang, dan garis-garis medan B disana hampir berbentuk lingkaran konsentris. Pada gambar 2.7 dapat dilihat bahwa medan magnet cenderung untuk

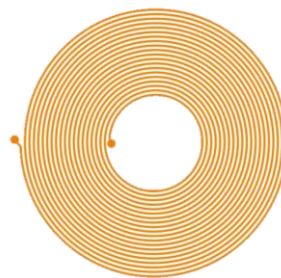
menghilangkan diantara putaran kawat yang berdekatan. Gambar 2.8 menunjukkan bahwa, pada titik-titik didalam solenoid yang letaknya cukup dari kawat, B dapat diaproksimasikan sejajar dengan sumbu pusat solenoid. Untuk kasus terbatas kepada sebuah solenoid ideal, yang panjangnya tak terhingga dan terdiri dari putaran kawat persegi yang sangat rapat, medan magnet dalam kumparan adalah seragam dan sejajar dengan sumbu solenoid. Pada Gambar 2.8 dapat dilihat bahwa medan magnet yang dibangkitkan oleh bagian atas putaran kawat solenoid putaran kawat bagian atas adalah mengarah ke kiri dan cenderung untuk menghilangkan medan yang dibentuk oleh putaran kawat bagian bawah putaran kawat bagian bawah yang diarahkan ke kanan. Dalam membatasi kasus kepada sebuah solenoid ideal, mean magnet diluar solenoid adalah nol (Halliday, et al., 2010). Gambar 2.8 berikut menunjukkan penampang vertikal melalui sumbu pusat dari solenoida yang diregangkan. Garis-garis medan magnet dari solenoida yang direntangkan.



Gambar 2.8 Garis – Garis Medan Magnet Koil Selenoid (Kapoor, Unknown).

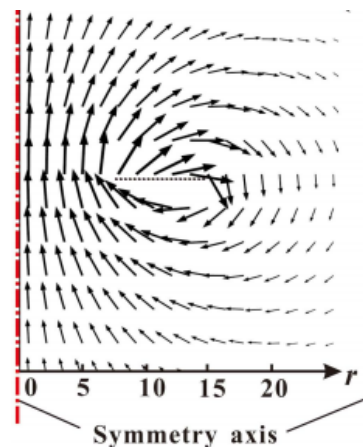
b. Koil Planar

Koil planar merupakan koil yang memiliki bidang yang sama (hampir rata). Koil planar lebih menghemat tempat daripada induktor lain maka dari itu cocok untuk aplikasi apa pun dengan batasan ukuran, seperti MEMS atau perangkat medis implan (seperti pompa jantung). Kumparan ini dapat dibuat pada permukaan kaku dan tidak kaku, yang berarti dapat diintegrasikan ke *printed circuit board* (PCB) serta sirkuit fleksibel. Kumparan planar juga dapat dibuat secara *batch*, yang menghasilkan proses manufaktur yang lebih hemat biaya. Karena kualitas ini, kumparan planar memiliki banyak kasus penggunaan yang berbeda, sebagian besar dalam rentang frekuensi tinggi. Contohnya pemantauan kesehatan jarak jauh (misalnya, sensor tekanan darah), transfer daya nirkabel (misalnya, perangkat medis yang dapat dipakai/ditancapkan), identifikasi RF (misalnya, kartu uang elektronik) dan pemanas induksi (misalnya, kompor induksi) (Paulus, 2019). Skema koil planar dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Skema Koil Planar. (Wang, et al., 2015)

kumparan sensor hanya dapat direpresentasikan sebagai serangkaian LR sirkuit dan kapasitansi parasitif. Kedua induktansi L dan resistansi R berubah dengan jarak target x , secara umum, sensitivitas dan stabilitas termal meningkat bersama dengan frekuensi kerja dan konduktivitas target. Bahan target terbaik adalah tembaga atau aluminium. Perak adalah pilihan yang sedikit lebih baik, tapi jauh lebih mahal dari yang lain. Bekerja frekuensi dibatasi oleh SRF di mana L adalah induktansi dari koil yang tidak dibebani (koil tanpa target), yang tergantung pada belokan dan geometri kumparan, dan C adalah kapasitansi parasit, termasuk kapasitansi kabel sensor dan interwinding kapasitansi kumparan. Sensitivitas tergantung pada medan magnet distribusi kumparannya. Menurut hukum Biot-Savart, medan magnet pada sumbu kumparan *ring loop* yang dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Medan Magnet Koil Planar. (Wang, et al., 2015)

Model sensor MIT terdiri dari 2 koil, yaitu koil pemancar (exciter) dan koil penerima (sensing/penginderaan). Pengukuran tegangan pada koil penerima dapat dijelaskan oleh persamaan berikut dengan memperhatikan tiga elemen induktif, yaitu sumber (1), detektor (2), dan objek (3).

$$V_{rx} = [\omega \cdot M_{13}M_{23} (1/R + j\omega C) + jM_{12}] \omega \cdot I_i \dots \dots \dots (2.6)$$

dimana V_{rx} adalah tegangan yang terukur pada koil penerima, M_{13} adalah nilai pasangan bersama antara sumber dan objek, M_{23} adalah nilai pasangan bersama antara detektor dan objek, M_{12} adalah nilai pasangan bersama antara sumber dan detektor, R adalah elemen resistif, I_i adalah arus yang mengalir pada sumber.

2.4 Induktansi

Induktansi adalah sifat dari rangkaian elektronika yang menyebabkan timbulnya potensial listrik secara proporsional terhadap arus yang mengalir pada rangkaian tersebut, sifat ini disebut sebagai induktansi sendiri. Sedangkan apabila potensial listrik dalam suatu rangkaian ditimbulkan oleh perubahan arus dari rangkaian lain, maka disebut sebagai induktansi bersama. Satuan induktansi dalam satuan internasional adalah weber per ampere atau dikenal pula sebagai Henry (H). Induktansi muncul karena adanya medan magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik (dijelaskan oleh hukum ampere). Supaya suatu rangkaian elektronika mempunyai nilai induktansi, sebuah komponen bernama induktor digunakan di dalam rangkaian tersebut, induktor umumnya berupa kumparan kabel, biasanya terbuat dari tembaga, untuk memusatkan medan magnet dan memanfaatkan hays gerak listrik

yang dihasilkannya. Induktansi dapat menghasilkan dan menyimpan energi medan magnet. Satuan ampere/lilitan (weber).

Emf yang terjadi akan menghasilkan arus yang menentang setiap perubahan fluks magnetik. Penentangan ini disebut dengan induktansi diri (*self inductance*). Pernyataan ini sesuai hukum Lenz yang ditemukan oleh Heinrich Friedrich Lenz (1804 - 1865). Besaran induktansi dinyatakan dalam Henry (*H*). Sebuah induktor dikatakan memiliki nilai induktansi sebesar 1H, jika perubahan arus yang mengalir pada rangkaian 1 ampere/detik menginduksi tegangan 1volt di dalamnya. Definisi ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$L = 1.H = 1.V.(di/dt) = 1.V \text{ (ampere/detik)}$$

$$V = L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana V adalah tegangan terukur pada induktor; L adalah konduktansi koil; dan $\frac{di}{dt}$ adalah laju perubahan arus (Huda, et al., 2020). Semakin banyak jumlah lilitan dalam sebuah induktor maka semakin bertambah juga nilai induktansinya. Besarnya nilai induktansi terhadap jumlah lilitan pada suatu induktor dapat dihitung dengan rumus:

$$L = N \times (\phi/I) \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana L = induktansi (H), N = jumlah lilitan, ϕ = fluks magnetik (Weber,Wb), I = arus (A). Koefesien induktansi diri sebuah induktor tergantung dari konstruksinya, seperti jumlah lilitan kawat, jarak antar lilitan, besar inti pusat dan sebagainya. Oleh karena untuk mendapatkan induktor dengan koefesien induksi diri yang sangat tinggi bisa dengan menggunakan *core* (pusat inti) dengan permeabilitas tinggi, dan

merubah jumlah lilitan, sehingga fluks magnetik yang dihasilkan dapat dihitung dengan rumus :

$$\Phi = B \times A \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana : Φ = besar magnetik fluks (Wb), B = kerapatan fluks, A = luas area (m²).

Jika sebuah induktor dapat diketahui jumlah lilitan (N), maka induksi magnetik/kerapatan fluks (B) dalam inti, dapat diketahui dengan rumus :

$$B = \mu_0 \times H = N \times (I/l) \dots \dots \dots (2.10)$$

dari pernyataan di atas, maka nilai induktansi dari sebuah induktor dapat disederhanakan dengan rumus persamaan akhir sebagai berikut:

$$L = \frac{\mu_0 \times N^2}{l} \dots \dots \dots (2.11)$$

dimana L = induktansi (H), N = jumlah lilitan, μ_0 = panjang permeabilitas (4.π.10⁻⁷), l – panjang koil (m). Atau juga dapat dituliskan:

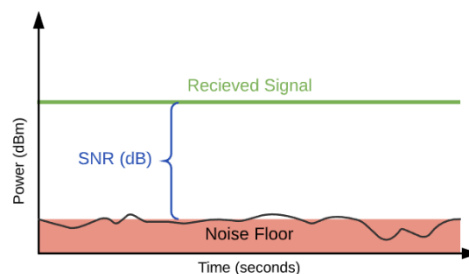
$$L = \mu_r \frac{N^2 \times A}{l} \times 1.26 \times 10^{-6} \dots \dots \dots (2.12)$$

L adalah induktansi koil (H), μ_r adalah permeabilitas relaif koil, N adalah jumlah lilitan; l adalah panjang kawat (m), dan A adalah luas penampang koil (mm²).

2.5 **Signal-To-Noise Ratio (SNR)**

Signal to Noise Ratio atau SNR adalah ukuran yang digunakan dalam mengukur kualitas sinyal atau kualitas transmisi yang diterima pada sisi penerima dalam transmisi analog. SNR merupakan perbandingan antara daya sinyal terhadap daya *noise* pada suatu titik yang sama. SNR dapat menentukan kinerja atau performansi jaringan serat optik. Semakin besar nilai SNR, maka semakin tinggi

kualitas jalur transmisi tersebut. Artinya, makin besar pula kemungkinan jalur transmisi tersebut dipakai untuk lalu lintas komunikasi data dan sinyal dalam kecepatan tinggi. Dalam menentukan kualitas transmisi digunakan parameter SNR atau *Bit Error Rate* (BER). Untuk mendapatkan kualitas sinyal yang baik, jarak merupakan faktor utama yang mempengaruhi kualitas sinyal dan semakin tinggi SNR maka semakin baik sensor MIT dapat bekerja. (Vionita & Setyowati, 2018). Skema SNR dapat dilihat pada Gambar 2.11.



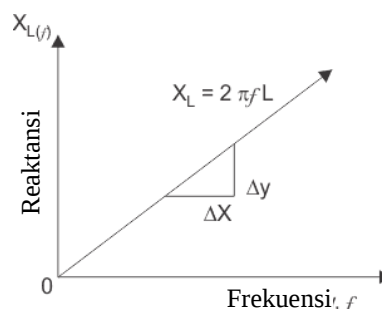
Gambar 2.11 Skema *Signal To Noise Ratio* (Cisco Meraki, 2020).

Berikut ini adalah persyaratan SNR versus nilai SNR: 5 dB hingga 10 dB yaitu di bawah tingkat minimum untuk membuat sambungan, karena tingkat *noise* hampir tidak dapat dibedakan dari sinyal yang diinginkan (informasi yang berguna). 10 dB hingga 15 dB adalah minimum yang diterima untuk membuat koneksi yang tidak dapat diandalkan. 15 dB hingga 25 dB biasanya dianggap sebagai tingkat minimal yang dapat diterima untuk membangun konektivitas yang buruk. 25 dB sampai 40 dB dianggap baik. 41 dB atau lebih tinggi dianggap sangat baik (Cadence PCB Solutions, 2020). Dengan demikian, sensor MIT yang dikarakterisasi diharapkan memiliki SNR di atas 40 dB agar dapat dikatakan mampu mendeteksi cacat dengan diameter kecil.

2.6 Frekuensi Resonansi

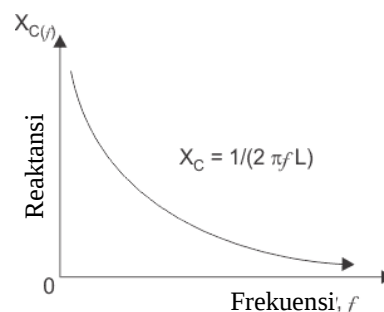
Dalam satu rangkaian seri R-L-C, arus yang terdapat dalam rangkaian bergantung pada nilai hambatan resistansi (R), induktansi (L) dan kapasitansi (C), sedangkan nilai impedansinya (Z) ditentukan oleh nilai resistansi dan kapasitansi. Tegangan sumber rangkaian seri RLC adalah suplai sinusoidal dalam keadaan *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. Terdapat beberapa kemungkinan yang ada, yaitu sebagai berikut:

- a. Hambatan induktif lebih besar daripada hambatan kapasitif. Dalam hal ini $X_L > X_C$. Rangkaian seri ini bersifat induktif dan $\tan \theta$ bernilai positif. Hal ini menunjukkan bahwa arus yang ada dalam rangkaian mendahului tegangan, dengan beda fase sebesar θ . Grafik reaktansi induktif terhadap frekuensi adalah kurva linier garis lurus (Subagya, 2006). Nilai reaktansi induktif dari sebuah induktor meningkat secara linier dengan meningkatnya frekuensi. Oleh karena itu, reaktansi induktif positif dan berbanding lurus dengan frekuensi ($X_L \propto f$). Grafik reaktansi induktif terhadap frekuensi dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Grafik Reaktansi Induktif terhadap Frekuensi. (Higgins, 1983)

- b. Hambatan induktif lebih kecil daripada hambatan kapasitif. Dalam hal ini $X_L < X_C$. Rangkaian seri ini bersifat kapasitif dan $\tan \theta$ bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan yang ada dalam rangkaian mendahului arus, dengan beda fase sebesar θ (Subagya, 2006). Grafik reaktansi kapasitif terhadap frekuensi adalah kurva hiperbolik. Nilai Reaktansi kapasitor memiliki nilai yang sangat tinggi pada frekuensi rendah tetapi dengan cepat menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi. Oleh karena itu, reaktansi kapasitif adalah negatif dan berbanding terbalik dengan frekuensi ($X_C \propto f^{-1}$). Grafik reaktansi kapasitif terhadap frekuensi dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Grafik Reaktansi Kapasitif terhadap Frekuensi (Higgins, 1983).

- c. Hambatan induktif sama dengan daripada hambatan kapasitif. Dalam hal ini $X_L = X_C$. Rangkaian seri ini bersifat resonansi tegangan atau dikenal dengan istilah frekuensi resonansi. Tegangan yang ada pada kapasitor (C) sama dengan tegangan yang ada pada induktor (L) dan saling meniadakan. Dengan demikian, tegangan pada seluruh rangkaian

sama dengan tegangan sumbernya. Arus yang ada dalam rangkaian adalah arus minimum, disebabkan harga dari impedansinya (Z) = R .

Nilai $\tan \theta = \frac{X_L - X_C}{R} = 0$, yang berarti tidak ada beda fase antara arus

dengan tegangan (Subagya, 2006). Besarnya frekuensi resonansi dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

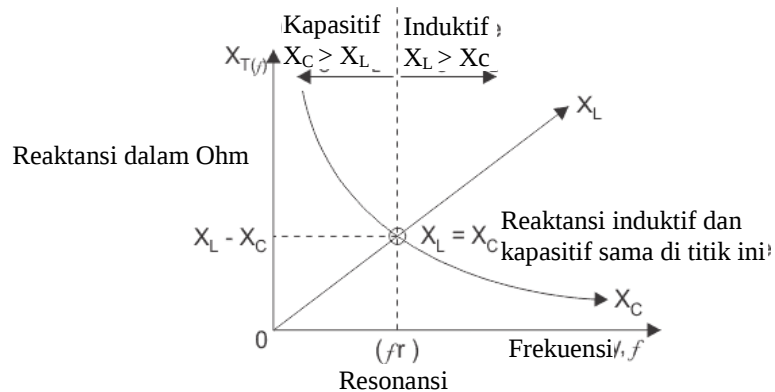
$$X_L = X_C$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(2.13)$$

dimana f_r adalah frekuensi resonansi; C adalah kapasitansi koil; dan L adalah induktansi koil. Pada sensor induktif, daerah sebelum titik resonansi adalah area daerah. Saat kondisi resonansi tercapai maka impedansi total dari rangkaian bersifat resistif murni dan amplitude tegangan maksimum dapat tercapai. Karena tegangan dan arus sumber berada pada fasa yang sama maka faktor daya dari rangkaian akan bernilai 1, maka dari itu daerah sesudah titik resonansi adalah daerah kapasitif (Sahay & Pathak, 2006). Grafik frekuensi resonansi terhadap frekuensi dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Grafik Frekuensi Resonansi terhadap Frekuensi (Higgins, 1983).

2.7 Osiloskop

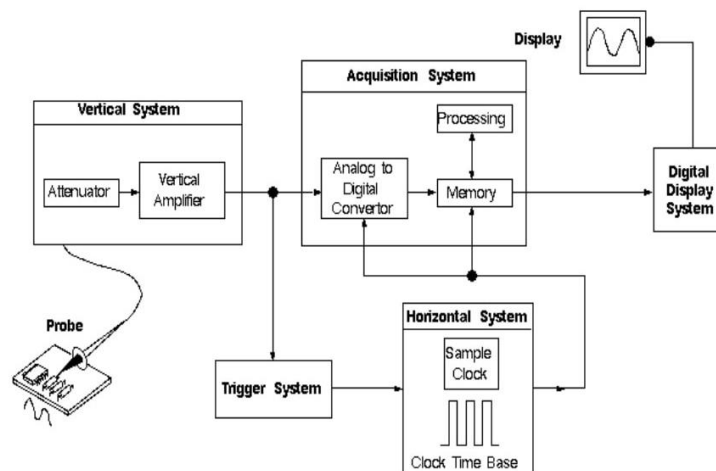
Kata “osiloskop” berasal dari gabungan dua kata dari bahasa yang berbeda, yaitu “*oscillare*” yang berasal dari bahasa Latin yang berarti mengayun kebelakang dan kedepan, dan “*skopein*” yang berasal dari bahasa Yunani yang berarti untuk mengamati, bidik, memeriksa, terutama pada pengamatan yang menggunakan penglihatan dan pendengaran. Osiloskop adalah alat ukur besaran listrik yang dapat memetakan sinyal listrik. Dengan menggunakan osiloskop kita dapat mengetahui besaran-besaran pada sinyal listrik seperti tegangan, frekuensi, periode dan bentuk sinyal dari objek yang diukur. Dengan osiloskop, dapat membedakan gelombang *alternative current* (AC) dan gelombang *direct current* (DC) (Chusni, 2018). Osiloskop merupakan alat elektronik, yang digunakan untuk melihat bentuk gelombang, menganalisis gelombang dan fenomena lain dalam rangkaian elektronika. Dengan osiloskop dapat melihat amplitudo tegangan dan gelombang kotak. Oleh karena itu harga rata – rata, puncak, RMS (*Root Mean Square*), maupun harga puncak kepuncak dari tegangan dapat terukur (V_{pp}). Selain itu juga

hubungan frekuensi dan fase antara dua gelombang juga dapat dibandingkan (Waluyanti, 2008)

2.6.1 Prinsip Kerja Osiloskop

Prinsip kerja osiloskop yaitu menggunakan layar katoda. Dalam osiloskop terdapat tabung panjang yang disebut tabung sinar katode atau *Cathode Ray Tube* (CRT). Secara prinsip kerjanya ada dua tipe osiloskop, yakni tipe analog (ART - *analog real time oscilloscope*) dan tipe digital (DSO-*digital storage oscilloscope*), masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasan. Osiloskop digital mencuplik bentuk gelombang yang diukur dan dengan menggunakan ADC (*Analog to Digital Converter*) untuk mengubah besaran tegangan yang dicuplik menjadi besaran digital. Dalam osiloskop digital, gelombang yang akan ditampilkan lebih dulu disampling (dicuplik) dan didigitalisasikan. Osiloskop kemudian menyimpan nilai-nilai tegangan ini bersama sama dengan skala waktu gelombangnya di memori. Pada prinsipnya, osiloskop digital hanya mencuplik dan menyimpan demikian banyak nilai dan kemudian berhenti. Ia mengulang proses ini lagi dan lagi sampai dihentikan. Beberapa DSO memungkinkan untuk memilih jumlah cuplikan yang disimpan dalam memori per akuisisi (pengambilan) gelombang yang akan diukur. Osiloskop digital memberikan kemampuan ekstensif, kemudahan tugas-tugas akuisisi gelombang dan pengukurannya. Penyimpanan gelombang membantu para insinyur dan teknisi dapat menangkap dan menganalisa aktivitas sinyal yang penting. Jika kemampuan teknik pemicuannya tinggi secara efisien dapat menemukan adanya

keanehan atau kondisi-kondisi khusus dari gelombang yang sedang diukur (Chusni, 2018). Skema prinsip kerja osiloskop dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Skema Prinsip Kerja Osiloskop Digital.

2.6.2 Konsep Fisika Osiloskop

Konsep fisika tumbukan dari osiloskop tidak bisa dilepaskan dari fisika modern. Pada prinsipnya berkas elektron terdapat pada tabung katoda yang sangat vakum. Ketika elektron-elektron dipanaskan secara tidak langsung dan elektron-elektron menguap dari permukaannya. Penguapan elektron tersebut disebut sinar-sinar katoda. Sinar-sinar katoda mengalami percepatan yang dikendalikan oleh medan magnet pada saat melewati sepasang pelat defleksi yang diberi tegangan listrik (Zemansky, 1986). Setelah itu elektron-elektron tersebut menumbuk bagian belakang layar yang telah terfosforisasi. Sangat jelas dari peristiwa tersebut terdapat konsep

tumbukan. Tumbukan yang terjadi adalah antara elektron dan bagian belakang layar.

Ketika bagian belakang layar yang dilapisi fosfor ditumbuk oleh elektron, maka senyawa fosfor akan berpendar. Tumbukan yang terjadi pada peristiwa tersebut adalah tumbukan lentingan sebagian dapat dilihat dalam persamaan (2.1):

$$p_e + p_f = p'_e + p'_f \dots \dots \dots (2.14)$$

$$m_e v_e + m_f v_f = m'_e v'_e + m'_f v'_f \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana v_f memiliki nilai nol karena pada posisi diam dan p'_f memiliki nilai negatif karena arahnya berlawanan dengan v'_e . Tumbukan lenting sebagian terjadi pada dua benda yang memiliki nilai restitusi $0 < e < 1$. Pada tumbukan lenting sebagian berlaku hukum kekekalan momentum namun tidak berlaku hukum kekekalan energi kinetik (Nuryantini, 2017).

Konsep gelombang osiloskop dapat digunakan untuk mengamati bentuk gelombang dari tegangan listrik yang terdapat pada suatu rangkaian. Dengan begitu osiloskop pun dapat menentukan besar dari frekuensi, periode, maupun amplitudo dari tegangan yang dipetakan dalam bentuk gelombang. Terdapat dua jenis gelombang yang digambarkan oleh osiloskop yaitu gelombang sinus dan gelombang pulsa (Kularatna, 2003). Pada gelombang dapat diketahui beberapa besaran seperti frekuensi periode. Dimana frekuensi adalah waktu yang diperlukan untuk satu gelombang berlangsung dan periode adalah banyaknya gelombang yang terjadi pada satu satuan waktu.

2.8 Pipa *Electric Resistance Welded* (ERW)

Pipa *Electric Resistance Welding* (ERW) merupakan salah satu jenis pipa baja yang diproduksi dengan cara mengalirkan arus listrik berfrekuensi tinggi sehingga pada bagian kedua sisi plat akan mengalami pans dan dengan proses penekanan sehingga terjadi penyambungan pada kedua sisi pipa tersebut dengan pengelasan. Spesifikasi baja yang digunakan untuk membuat pipa ERW bermacam – macam tergantung pada fungsinya. Misalnya, untuk aplikasi pipa minyak dan gas digunakan spesifikasi pipa jenis API 5L *grade* A hingga API 5L X 80, kemudian untuk aplikasi *general and structural purpose* (pipa pancang) digunakan spesifikasi pipa jenis AWWA C200, AS 1163, AS 1396, BS 1387, JIS G3444, JIS G3101, dan sebagainya (Prasetyo, 2019). Bentuk dari pipa ERW dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Pipa *Electric Resistance Welded* (ERW) (PT KHI Pipe Industries, 2020)

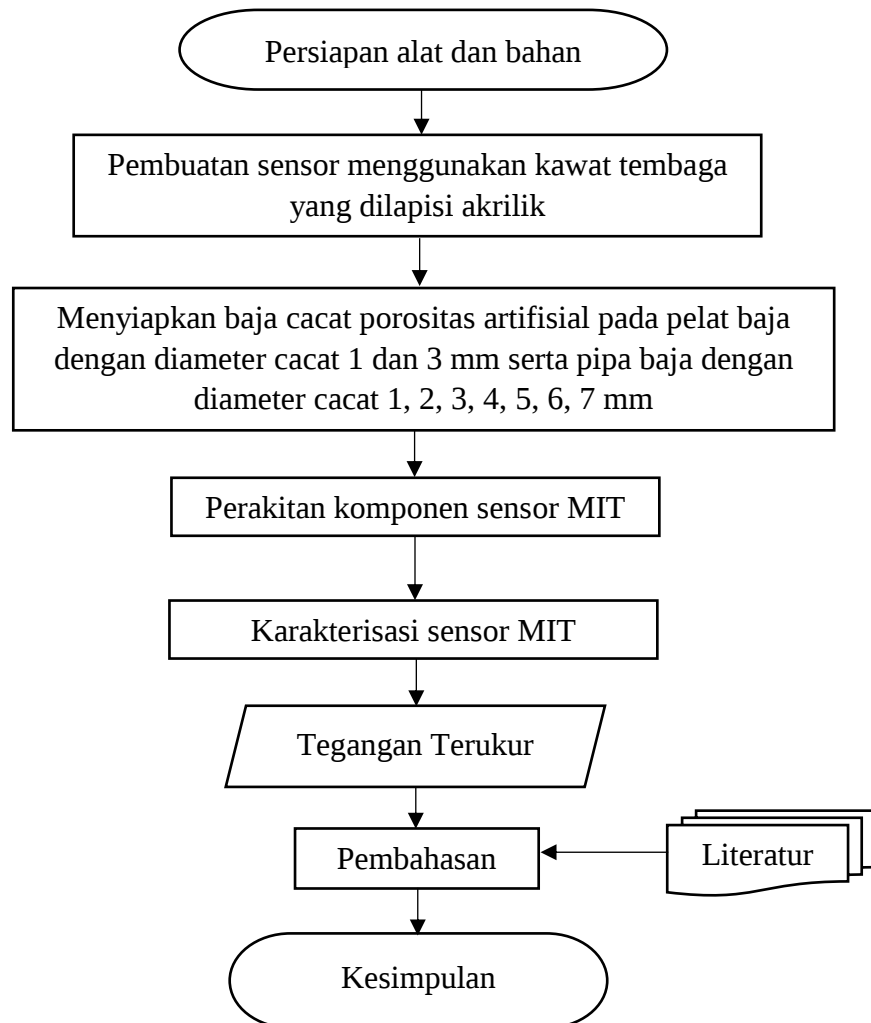
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab 3 menjelaskan metodologi penelitian yang dilakukan, alat – alat dan sampel yang digunakann pada tugas akhir ini. Mekanismenya yaitu menggunakan diagram alir dan uraian.

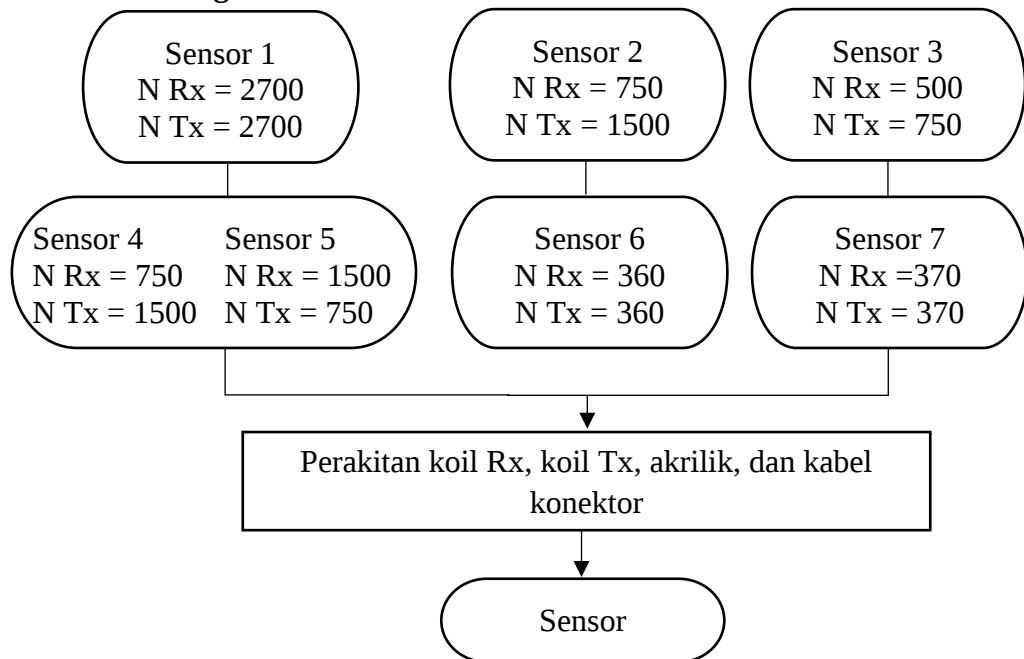
3.1 Diagram Alir Penelitian Secara Umum

Diagram alir dari keseluruhan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



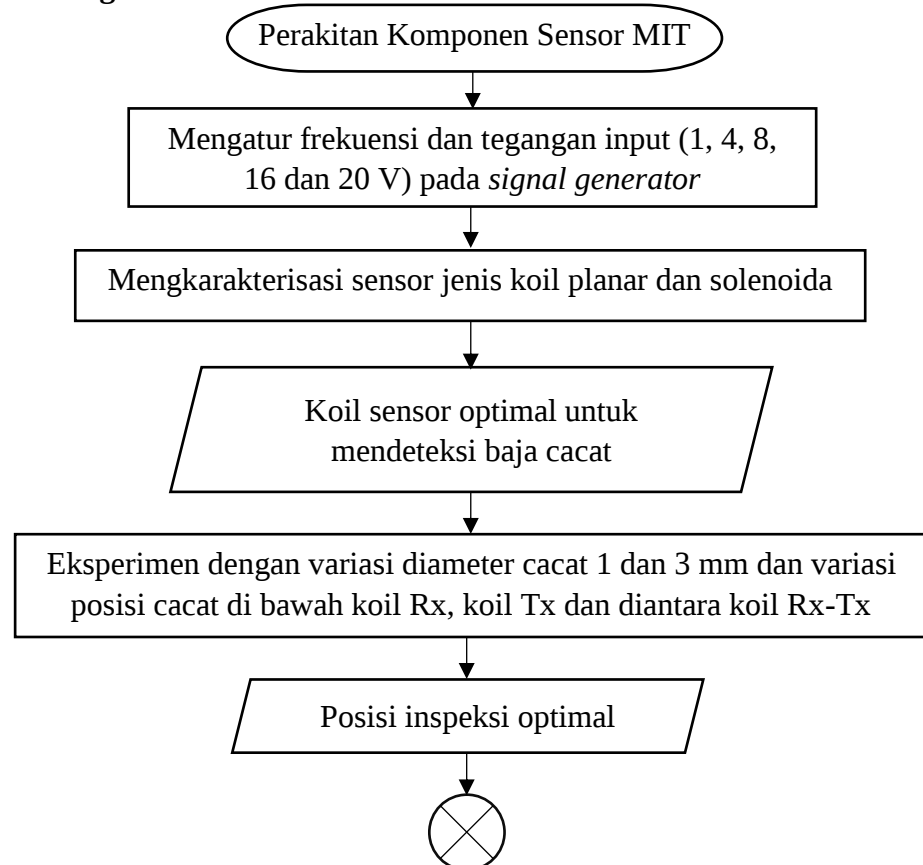
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Secara Umum.

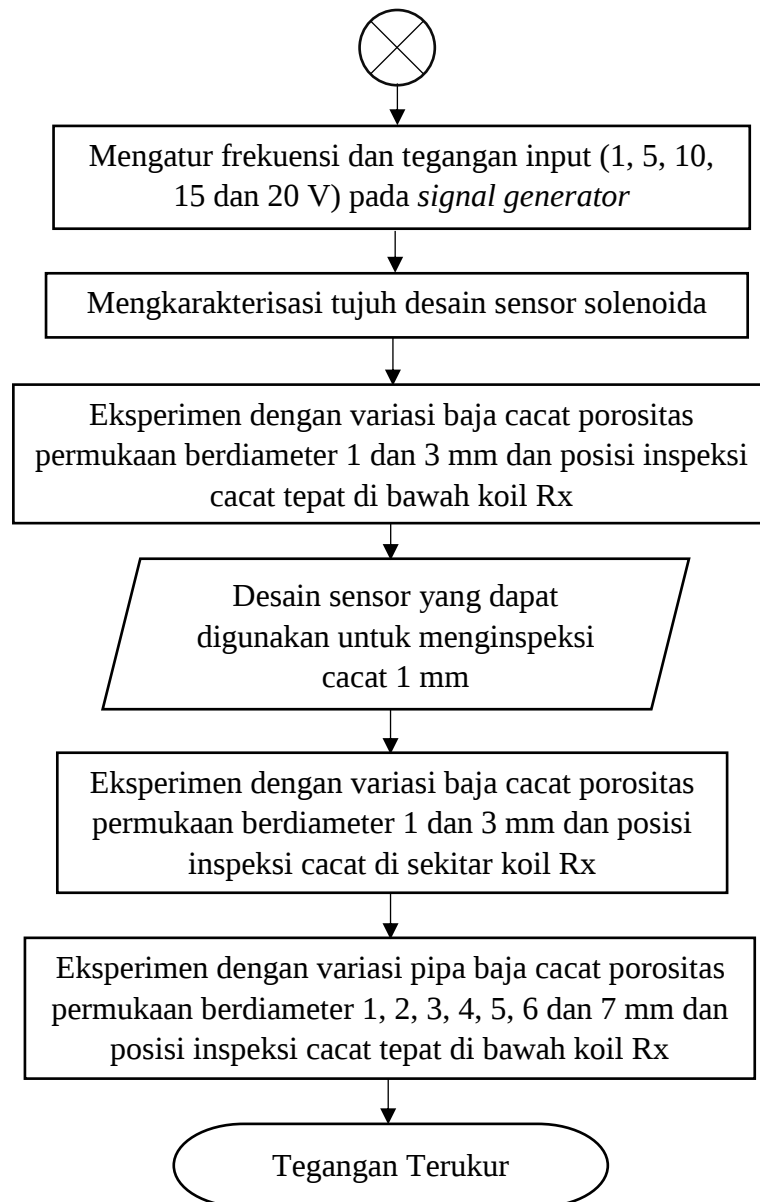
3.1.1. Diagram Alir Pembuatan Sensor



Gambar 3.2 Diagram Alir Pembuatan Sensor.

3.1.2. Diagram Alir Karakterisasi Sensor





Gambar 3.3 Diagram Alir Karakterisasi Sensor.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-Alat

Alat – alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi:

a. Penggaris

Digunakan untuk mengukur geometri cacat porositas artifisial.

b. Komputer

Digunakan untuk mendapatkan tegangan terukur koil melalui simulasi.

c. L-C-R Meter

Digunakan untuk mengukur reaktansi, induktansi dan kapasitansi koil sensor.

d. Penggaris

Digunakan untuk mengukur geometri pelat baja dan sensor.

e. Sensor MIT

Alat yang digunakan untuk mendeteksi cacat lasan pada benda uji menggunakan prinsip induktansi. Sensor MIT terdiri dari 2 koil sensor yang bertindak sebagai koil pemancar (Tx) dan koil penerima (Rx).

f. *Signal Generator* (Sig Gen)

Sig Gen adalah bagian yang berperan untuk menghasilkan sinyal sinus dengan frekuensi dan tegangan input yang dapat diatur.

g. Osiloskop

Osiloskop digunakan untuk mengetahui tegangan terukur pada koil Rx.

3.2.2 Bahan-Bahan

a. Kawat Tembaga

Sifat lunak tembaga dapat dijelaskan oleh konduktivitas listriknya yang tinggi ($59,6 \times 10^6$ S/m) dan oleh karena itu juga mempunyai konduktivitas termal yang tinggi (kedua tertinggi)

di antara semua logam murni pada suhu kamar. Tembaga merupakan konduktor panas dan listrik yang baik sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan pembuat koil sensor. Banyak alat listrik menggunakan kawat tembaga karena memiliki konduktivitas listrik tinggi, tahan korosi, ekspansi termal rendah, konduktivitas termal tinggi, dapat disolder, dan mudah dipasang. Kawat tembaga dengan kemurnian 99,9% dengan diameter 1 mm digunakan untuk membuat koil pada sensor MIT.

b. Pelat Baja

Sensor MIT akan diujikan pada pelat baja SS400 (*structural steel*) dengan cacat porositas artifisial. SS400 atau JIS G3101 atau ASTM A36 adalah baja umum (*mild steel*) karbon rendah (maksimal 0,17 % karbon) dengan komposisi kimia yang meliputi karbon, mangan, silikon, sulfur dan posfor yang digunakan untuk aplikasi struktur atau konstruksi umum (*general purpose structural steel*) salah satunya untuk pembuatan pipa ERW. Foto dari sampel pelat baja yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Sampel Pelat Baja 1 dan 3 mm.

Sampel lainnya yang digunakan yaitu pipa baja dengan cacat di permukaan pipa dengan diameter cacat 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 mm. Sampel pipa baja dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Sampel Pipa Baja.

Pipa baja yang digunakan memiliki cacat porositas artifisial dengan diameter dari kiri ke kanan sebesar 6, 5, 4, 7, 3, 2 dan 1 mm.

3.3 Prosedur Percobaan

Koil sensor solenoida dengan perbedaan jumlah lilitan pada koil Tx dan Rx dirakit dengan menempatkan koil Rx dan Tx ke dalam *shield* akrilik kemudian disambungkan dengan kabel konektor. Parameter sensor solenoida dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Sensor Solenoida.

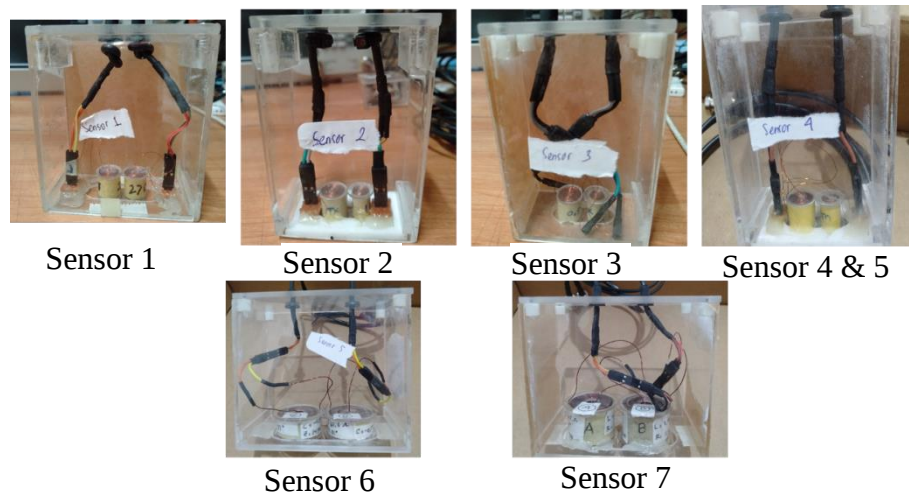
Parameter Sensor	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
Jenis Koil	Solenoida		
Jumlah Lilitan Tx (mm)	2700	1500	1000
Jumlah Lilitan Rx (mm)	2700	750	500
D Koil Tx (mm)	10	10	10
D Koil Rx (mm)	10	7	6
D Koil Dalam (mm)	1	1	1
D Kawat Tx (mm)	0,25	0,5	0,5
D Kawat Rx (mm)	0,25	0,25	0,5
Ketinggian Koil (mm)	10	10	10
Jarak Antar Koil (mm)	2	3	2
	38		

Nilai Induktansi Koil Tx (H)	$6,552 \times 10^{-4}$
Nilai Kapasitansi Koil Tx (F)	$3,865 \times 10^{-7}$
Nilai Resistansi Koil Tx (Ohm)	6,834
Nilai Induktansi Koil Rx (H)	$16,424 \times 10^{-4}$
Nilai Kapasitansi Koil Rx (F)	$1,542 \times 10^{-7}$
Nilai Resistansi Koil Rx (Ohm)	40,730

Tabel 3.1 (Lanjutan).

Parameter Sensor	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7
Jenis Koil	Solenoida			
Jumlah Lilitan Tx (mm)	750	1500	360	720
Jumlah Lilitan Rx (mm)	1500	750	360	720
D Koil Tx (mm)	7	10	30	30
D Koil Rx (mm)	10	7	30	30
D Koil Dalam (mm)	1	1	10	10
D Kawat Tx (mm)	0,25	0,5	1	1
D Kawat Rx (mm)	0,5	0,25	1	1
Ketinggian Koil (mm)	10	10	10	20
Jarak Antar Koil (mm)	2	3	5	5

Gambar untuk sensor solenoida yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Foto 6 Sensor Solenoida.

Parameter sensor planar dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter Sensor Planar.

Parameter Sensor	Sensor
Jenis Koil	Planar
Jumlah Lilitan Tx (mm)	-
Jumlah Lilitan Rx (mm)	-
D Koil Tx (mm)	18

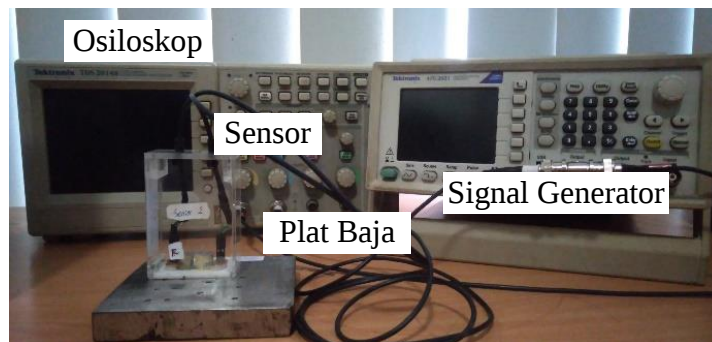
D Koil Rx (mm)	18
D Koil Dalam (mm)	4
D Kawat Tx (mm)	1
D Kawat Rx (mm)	1
Ketinggian Koil (mm)	1
Jarak Antar Koil (mm)	5

Untuk sensor dengan koil planar dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Foto Sensor Planar.

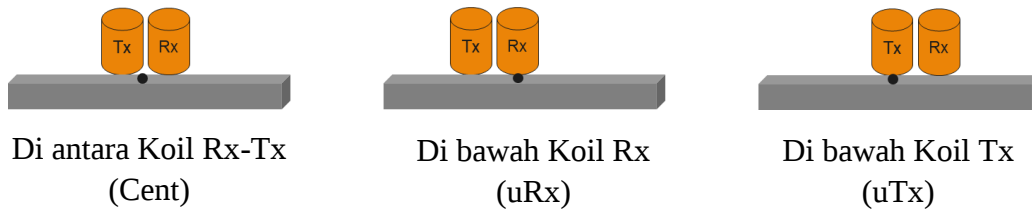
Setelah sensor dan pelat sudah disiapkan, kemudian merakit komponen karakterisasi sensor MIT yang terdiri dari sensor, osiloskop, *signal generator* dan sampel pelat baja. Rangkaian sensor MIT dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Rangkaian Sensor MIT.

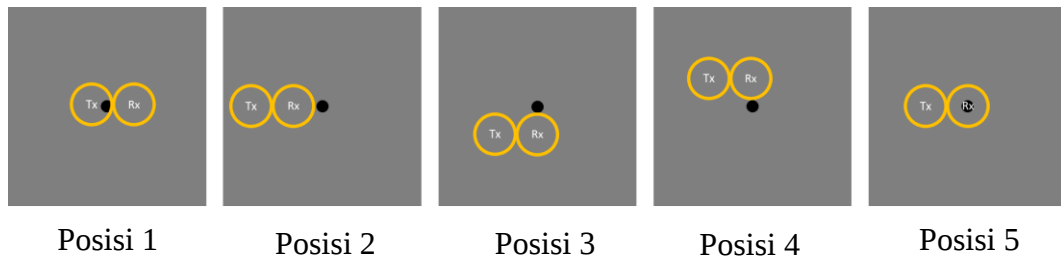
Sensor yang pertama akan dikarakterisasi yaitu sensor 1 solenoida dan sensor planar. Rentang frekuensi yang digunakan untuk karakterisasi pada sensor solenoida dan planar yaitu 500 – 2000 kHz dengan step 50 kHz dan tegangan yang diinputkan pada kedua sensor tersebut sama yaitu 1, 4, 8, 16 dan 20 V. Eksperimen sensor solenoida dan planar dilakukan dengan memvariasikan diameter cacat yaitu

1 dan 3 mm dan memvariasikan posisi cacat yaitu di bawah koil Rx, dibawah koil Tx dan diantara Koil Tx-Rx seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Posisi Cacat dengan Koil.

Setelah didapatkan sensor dengan jenis koil yang optimal untuk mendeteksi cacat porositas yaitu sensor solenoida, selanjutnya eksperimen dilanjutkan dengan memvariasikan desain sensor solenoida. Desain sensor solenoida 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 dilakukan karakterisasi menggunakan osiloskop dengan tegangan input 1, 5, 10, 15 dan 20 V dan frekuensi yang berbeda pada setiap sensornya dikarenakan oleh perbedaan sensitivitas sensor. Rentang frekuensi untuk sensor 1 yaitu 100 – 160 kHz, sensor 2 yaitu 320 – 380 kHz, sensor 3 yaitu 360 – 420 kHz, sensor 4A yaitu 510 – 570 kHz, sensor 4B yaitu 320 – 380 kHz, sensor 5 yaitu 390 – 450 kHz dan sensor 6 yaitu 210 – 270 kHz dengan step 10 kHz pada setiap sensor. Setelah didapatkan sensor solenoida yang dapat menginspeksi cacat berdiameter 1 mm. Sensor solenoida yang dapat menginspeksi cacat berdiameter 1 mm kemudian dikarakterisasi dengan variasi baja cacat porositas permukaan berdiameter 1 dan 3 mm dan posisi inspeksi cacat di sekitar koil Rx. Ilustrasi posisi inspeksi dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Posisi Cacat di Sekitar Koil Rx.

Setelah seluruh eksperimen dilakukan, kemudian hasilnya diolah sehingga dapat dianalisa dan ditarik kesimpulan yang menjawab tujuan penelitian.

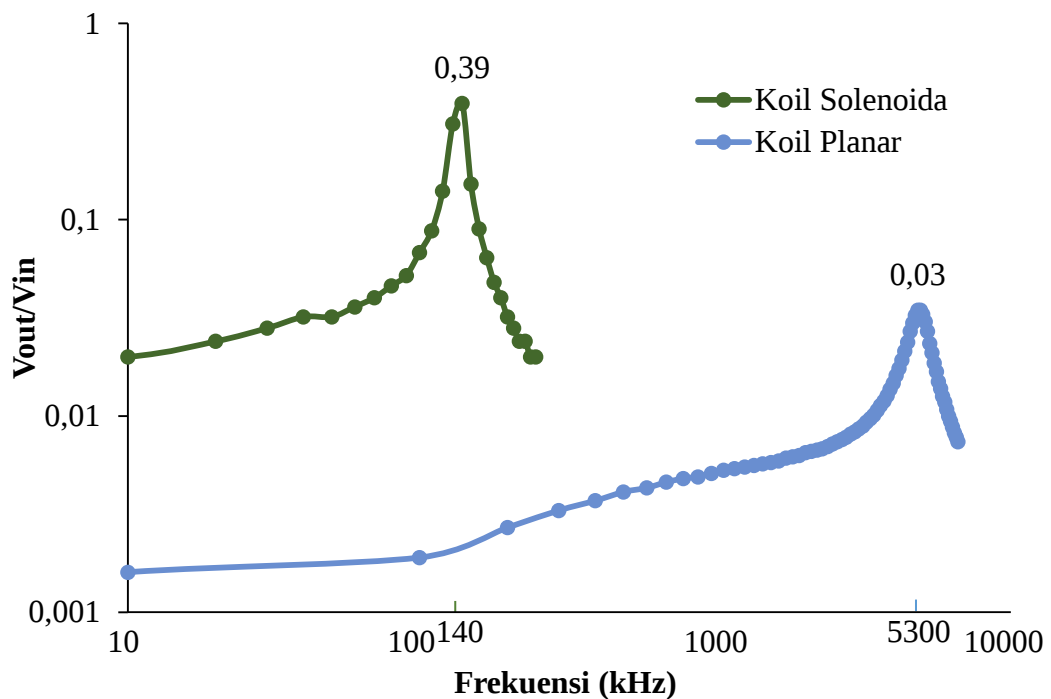
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari karakterisasi sensor MIT yang telah dilakukan, diperoleh data berupa tegangan terukur pada koil Rx dari baja normal, baja cacat dan udara (tanpa objek) sebagai berikut.

4.1 Hasil Karakterisasi Koil Planar dan Solenoida

Hasil karakterisasi koil planar dan solenoida dengan rasio tegangan terukur (V_{out}) terhadap tegangan input (V_{in}) sebesar 20 V dengan posisi cacat tepat di bawah koil Rx dapat dilihat pada grafik Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Rasio Tegangan Terukur terhadap Tegangan Input Sensor Solenoida dan Sensor Planar.

Gambar 4.1 menunjukkan karakteristik pengukuran rasio tegangan terukur terhadap tegangan input sebagai fungsi frekuensi dari koil induksi magnetik sensor solenoida dan planar. V_{out}/V_{in} pada koil solenoida mencapai 0,39 pada frekuensi 140 kHz sedangkan koil planar sebesar 0,03 pada frekuensi 5300 kHz. Frekuensi yang digunakan pada MIT untuk aplikasi NDT berada di sekitar 5 – 500 kHz (Huda, et al., 2020), maka dari itu koil solenoida lebih baik digunakan untuk menginspeksi cacat porositas pada plat baja karena memiliki koil yang berukuran kecil dan frekuensi resonansi <500 kHz.

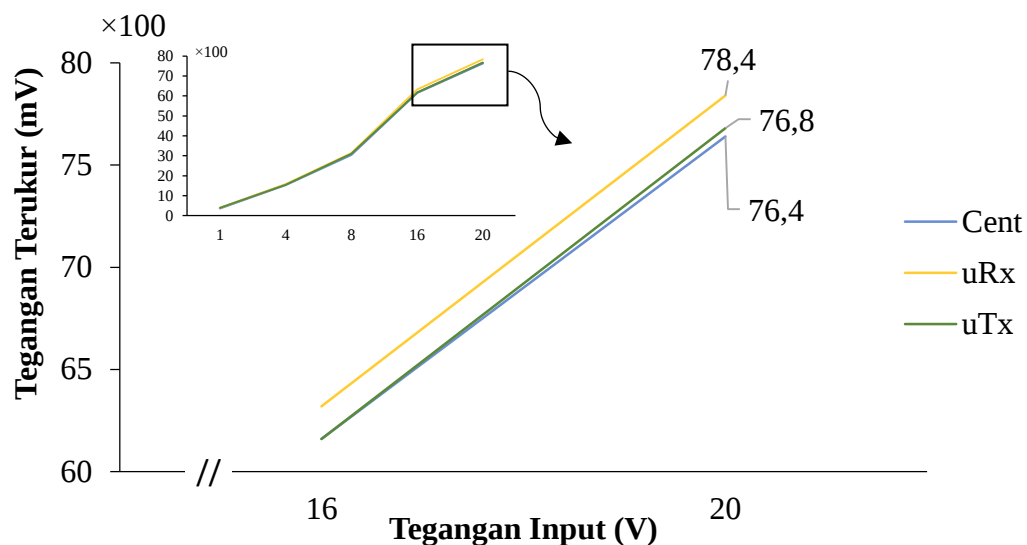
V_{out}/V_{in} pada sensor solenoida lebih tinggi dibandingkan koil planar. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan pada luas penampang koil, dimana luas penampang koil planar (352 mm^2) lebih kecil dibandingkan luas penampang koil solenoida (410 mm^2). Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil luas penampang koil maka semakin besar orde frekuensi resonansinya yang dapat dijelaskan pada persamaan (2.13). Dari persamaan (2.12) diketahui jika semakin kecil luas penampang koil maka semakin kecil pula nilai induktansi koil tersebut. Dengan demikian koil planar akan memiliki nilai konduktivitas lebih rendah, sehingga jika melihat persamaan (2.13) frekuensi resonansinya akan lebih tinggi.

Dari hasil yang diperoleh, koil solenoida memiliki selisih tegangan terukur antara baja normal dengan baja cacat sebesar 640 mV pada frekuensi 130 kHz, sedangkan sensor planar memiliki selisih tegangan terukur sebesar 52 mV pada frekuensi 5100 kHz. Perbedaan nilai induktansi mempengaruhi perbedaan nilai tegangan induksi terukur pada kedua koil tersebut. Koil solenoida memiliki nilai tegangan terukur lebih besar karena nilai induktansinya jauh lebih besar dari koil

planar. Hubungan berbanding lurus antara tegangan terukur dan konduktivitas dapat dijelaskan oleh persamaan (2.7).

4.2 Hasil Karakterisasi Koil Solenoida menggunakan Plat Baja

Hasil pada 4.1 menunjukkan bahwa koil solenoida lebih baik untuk menginspeksi cacat porositas pada plat baja. Sensor solenoida selanjutnya dikarakterisasi lebih lanjut agar diketahui parameter optimal untuk mendeteksi cacat porositas. Hasil karakterisasi koil solenoida untuk menginspeksi cacat 3 mm dengan variasi posisi cacat pada Gambar 3.9 dapat dilihat pada grafik pengaruh posisi cacat terhadap tegangan terukur pada Gambar 4.2.

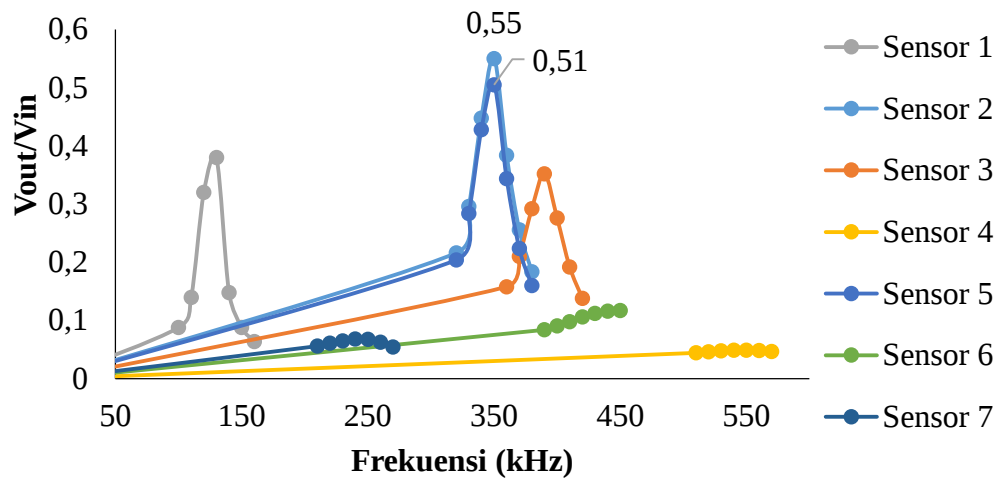


Gambar 4.2 Tegangan Terukur Sensor 1 Solenoida terhadap Posisi Cacat.

Gambar 4.2 menjelaskan bahwa tegangan terukur semakin besar jika posisi cacat pada saat inspeksi berada tepat di bawah koil penerima (Rx). Tegangan terukur pada posisi cacat di bawah koil Rx sebesar 78,4 mV, di bawah koil Tx sebesar 76,8 mV dan di antara koil Rx-Tx sebesar 76,4 mV. Dalam hal ini, sensor

solenoida optimal untuk menginspeksi baja cacat di bawah koil Rx. Daerah di bawah koil Rx lebih sensitif karena koil penerima menyimpan data tegangan induksi dari medan magnet primer dan medan magnet sekunder. Besar medan magnet sekunder relatif lebih kecil dari besar medan magnet primer, sehingga jangkauan daerah medan magnet sekunder juga tidak besar. Ketika cacat berada di bawah koil Tx atau di antara koil Rx-Tx, maka posisi inspeksi tidak berada di daerah medan magnet terkuat yang timbul akibat terganggunya aliran *eddy current* (Syauqi, et al., 2020). Dengan demikian besar tegangan terukur pada koil Rx dari medan magnet yang dihasilkan oleh gangguan aliran *eddy current*, lebih tinggi dibandingkan dengan posisi inspeksi selain di bawah koil Rx.

Sensitivitas sensor terhadap cacat dengan diameter kecil dilakukan pendekatan eksperimen menggunakan plat baja dengan cacat pada permukaan. Tujuh desain sensor dikarakterisasi dengan selisih frekuensi 10 kHz. Frekuensi optimum ditentukan dengan melihat rasio tegangan terukur terhadap tegangan input pada setiap desain sensor. Grafik pengaruh frekuensi terhadap rasio tegangan terukur terhadap tegangan input variasi desain sensor dapat dilihat pada grafik Gambar 4.3.

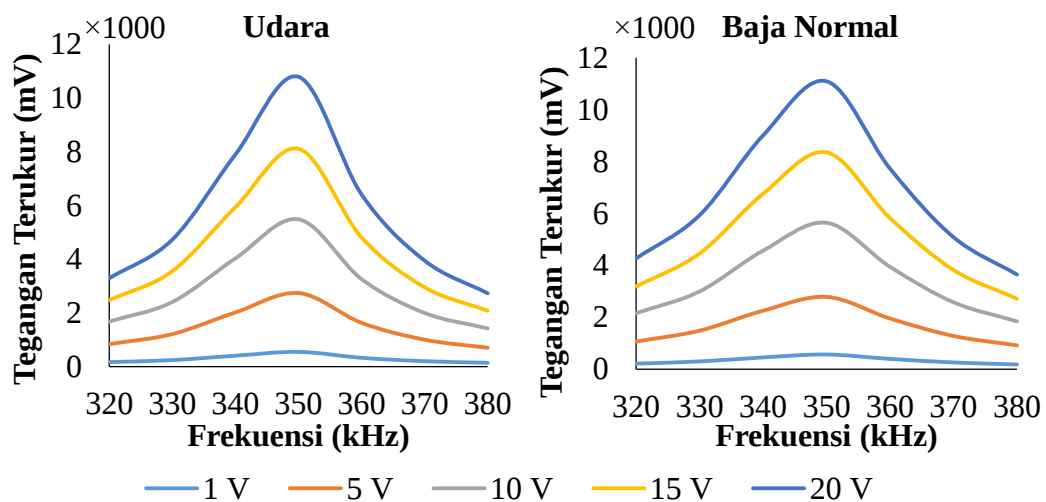


Gambar 4.3 Rasio Tegangan Terukur terhadap Tegangan Input pada masing – masing Desain Sensor.

Gambar 4.3 menunjukkan grafik rasio tegangan terukur terhadap tegangan input. Rasio tegangan terukur pada sensor 2 dan 5 menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan sensor lainnya. Sensor 2 memiliki rasio tegangan sebesar 0,55 dan sensor 5 sebesar 0,51. Sensor 3, 4, 6, dan 7 memiliki nilai induktansi yang lebih rendah dikarenakan memiliki jumlah lilitan koil lebih sedikit dibandingkan sensor 1, 2 dan 4. Dari persamaan (2.12), jumlah lilitan koil merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi induktansi. Sensor 1 memiliki jumlah lilitan yang lebih banyak dibandingkan sensor 2 dan 5, perbedaan desain mempengaruhi induktansi dari sensor 1 sehingga selisih tegangan terukur pada sensor 1 antara baja cacat dengan baja normal sangat kecil dan masuk ke rentang *noise* serta memiliki rasio yang lebih kecil dari sensor 2 dan 5. Sensor 2 dan 5 memiliki lilitan koil Tx lebih banyak dibandingkan koil Rx sehingga semakin banyak jumlah lilitan koil Tx maka semakin tinggi medan magnet yang dihasilkan dari koil Tx yang menyebabkan perubahan kekuatan medan magnet total lebih

tinggi dan memiliki sinyal yang lebih stabil (Tavakkoli, et al., 2019). Maka dari itu sensor yang optimal untuk mendeteksi cacat dengan diameter 1 mm yaitu sensor 2 dan 5.

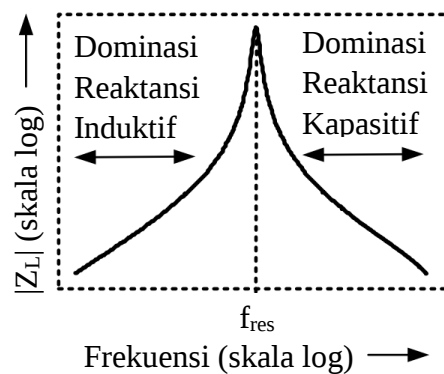
Setelah dilakukan pengulangan percobaan sebanyak 10 kali menggunakan sensor 2 dan 5 dengan parameter optimal, frekuensi resonansi baik pada tanpa objek (udara) maupun baja normal, dapat dilihat dari rata - rata tegangan terukur tertinggi. Pengukuran dilakukan pada objek udara dan baja normal dengan variasi tegangan input 1, 5, 10, 15 dan 20 V. Grafik rata – rata tegangan terukur terhadap frekuensi pada Sensor 2 dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik Rata – Rata Tegangan Terukur terhadap Frekuensi Pada Sensor 2 dan 5 pada objek Baja Normal dan Tanpa Objek (Udara).

Berdasarkan pada Gambar 4.4 keduanya menunjukkan *trend* yang sama. Frekuensi resonansi pada sensor 2 dan 5 terjadi pada frekuensi 350 kHz, sehingga untuk melakukan karakterisasi selanjutnya menggunakan frekuensi di bawah frekuensi 350 kHz, dimana pada frekuensi tersebut menunjukkan reaktansi induktansi yang dominan (Zhang, et al., 2020). Grafik dari frekuensi 320 sampai

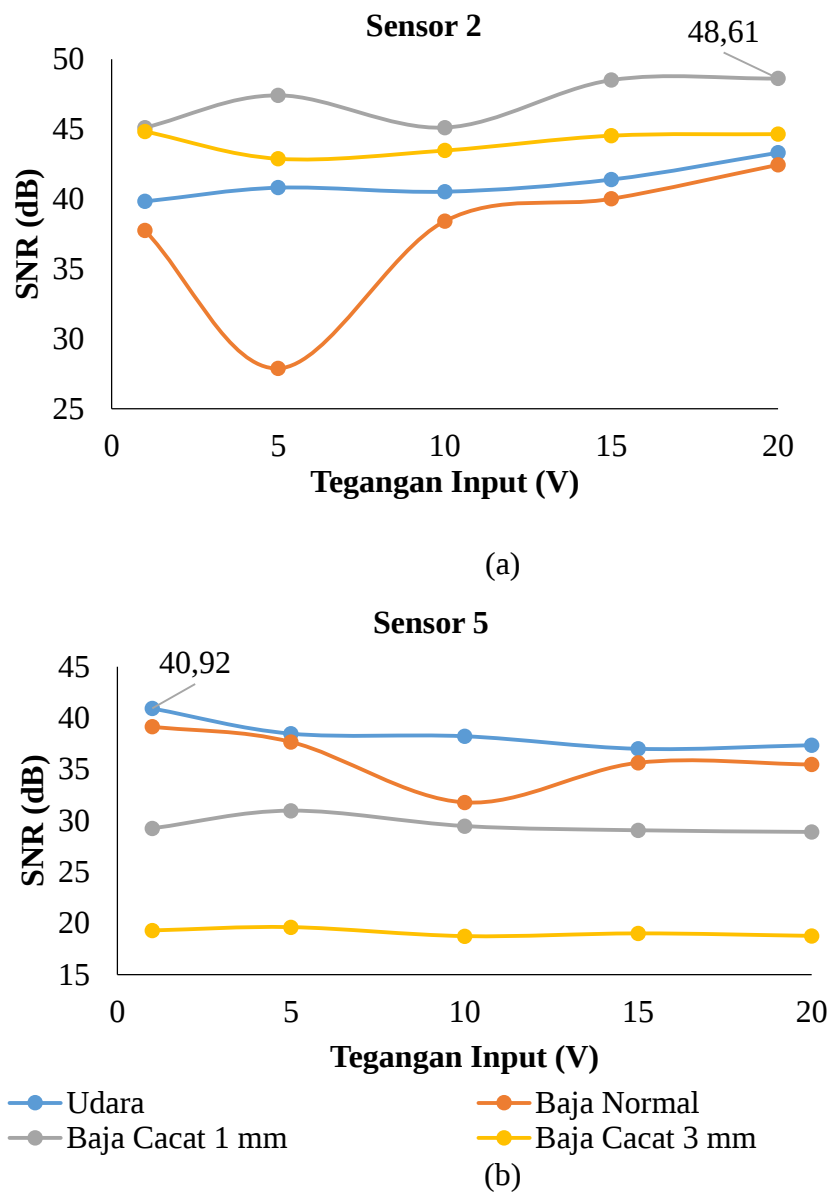
350 kHz merupakan reaktansi induktif bernilai positif dan berbanding lurus dengan frekuensi. Grafik dari frekuensi 350 sampai 380 kHz merupakan reaktansi kapasitif bernilai negatif dan berbanding terbalik dengan frekuensi. Frekuensi 350 kHz merupakan perpotongan kurva reaktansi induktif dengan kurva reaktansi kapasitif dimana nilai X_L sama dengan nilai X_C (Lizelwati, 2011). Skema titik frekuensi resonansi dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik Frekuensi Resonansi terhadap Frekuensi (Asmanis, et al., 2019).

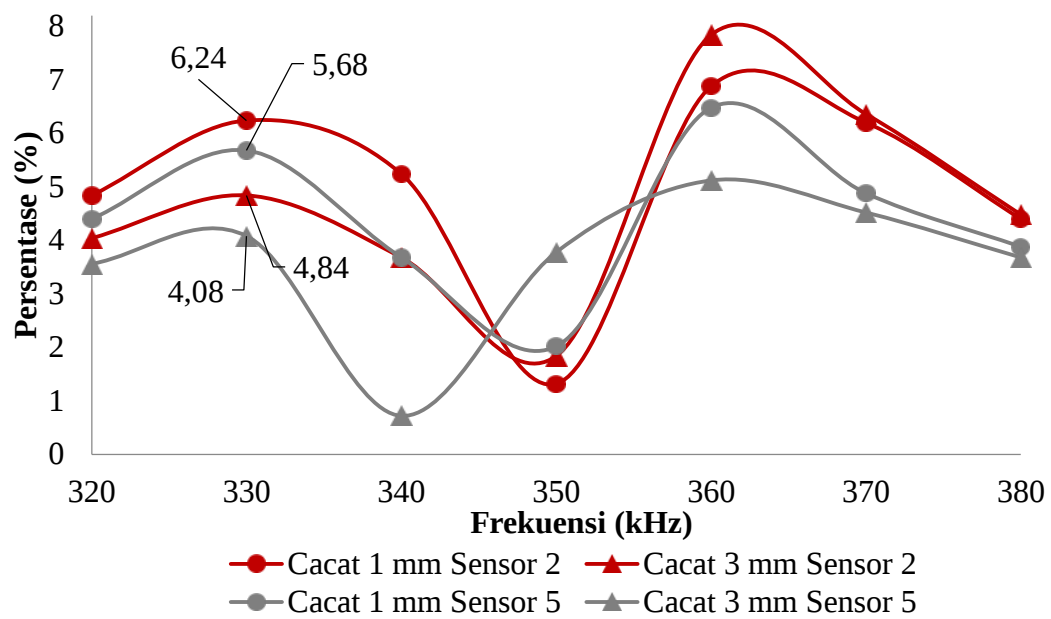
Sensor yang paling baik untuk mendeteksi cacat porositas dapat dilihat menggunakan rasio *signal-to-noise* (SNR). Sensor 2 memiliki SNR tertinggi sebesar 48,61 dB dan mayoritas SNR pada masing-masing kondisi pengukuran sebesar 40 dB. Sensor 5 memiliki SNR tertinggi sebesar 40,92 dB, SNR baja cacat 1 dan 3 mm mayoritas memiliki SNR di bawah 30 dB. Untuk meniadakan pengaruh tegangan input maka dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan B.7. Semakin besar nilai SNR maka sinyal & *noise* semakin mudah dibedakan dan kualitas sensor semakin baik karena *noise* pada sensor lebih mudah terdeteksi. Semakin besar nilai SNR, maka semakin tinggi kualitas jalur transmisi tersebut. Artinya, makin besar pula kemungkinan jalur transmisi tersebut dipakai untuk lalulintas komunikasi data

dan sinyal dalam kecepatan tinggi (Vionita & Setyowati, 2016). SNR yang lebih besar dari 40 dB, menandakan lebih banyak sinyal daripada *noise* (Cadence PCB Solutions, 2020). Dengan ini maka sensor yang lebih baik untuk mendeteksi cacat porositas yaitu sensor 2. Grafik SNR terhadap tegangan input dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) Frekuensi 340 kHz pada; (a) Sensor 2 dan (b) Sensor 5.

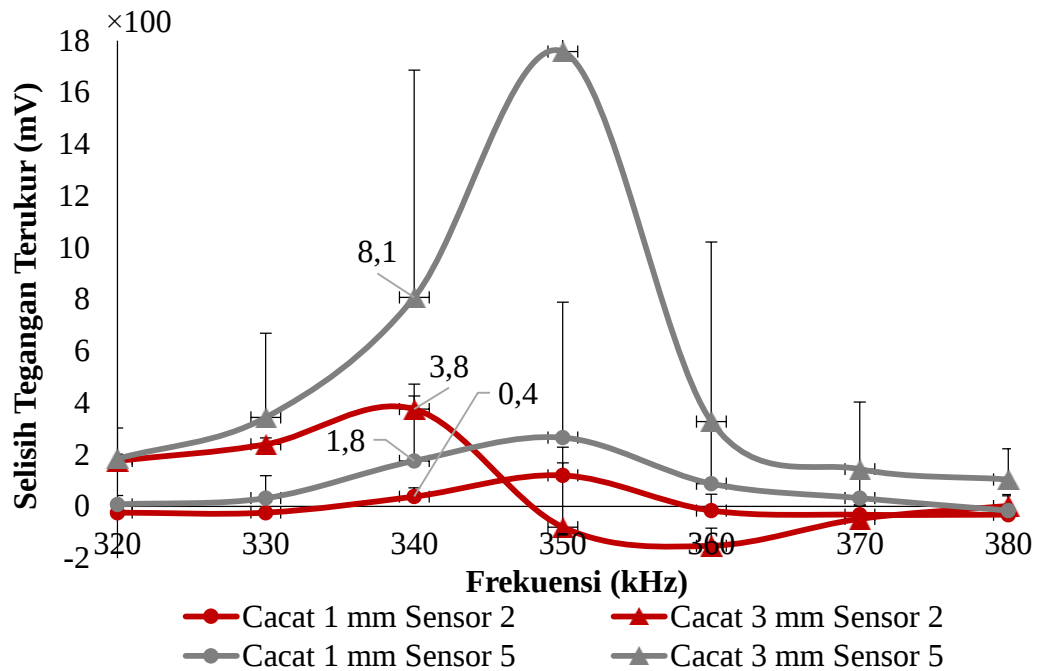
Grafik setiap tegangan input pada Gambar 4.6 menunjukkan SNR terhadap pengukuran sinyal pada masing – masing kondisi. Grafik persentase selisih tegangan terukur baja cacat dengan udara pada sensor 2 dan 5 dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Persentase Selisih Tegangan Terukur Baja Cacat dengan Udara Sensor 2 dan 5.

Grafik pada Gambar 4.7 menunjukkan *trend* yang sama. Persentase antara baja cacat dengan udara tertinggi sebelum frekuensi resonansi yaitu pada frekuensi 330 kHz dan tegangan input 10 V posisi 5. Persentase tertinggi pada sensor 2 untuk baja cacat 1 mm yaitu sebesar 6,24% dan pada baja cacat 3 mm sebesar 4,84%. Persentase tertinggi pada sensor 5 untuk baja cacat 1 mm yaitu sebesar 5,68% dan pada baja cacat 3 mm sebesar 4,08%. Sensor 2 lebih baik untuk membedakan antara baja cacat dengan udara karena memiliki persentase lebih besar dibandingkan sensor 5. Sensor yang baik mampu menghasilkan selisih tegangan terukur yang besar antara baja cacat dengan baja normal. Grafik selisih tegangan terukur antara

baja normal dengan baja cacat terhadap frekuensi pada Sensor 2 dan 5 dapat dilihat pada Gambar 4.8.



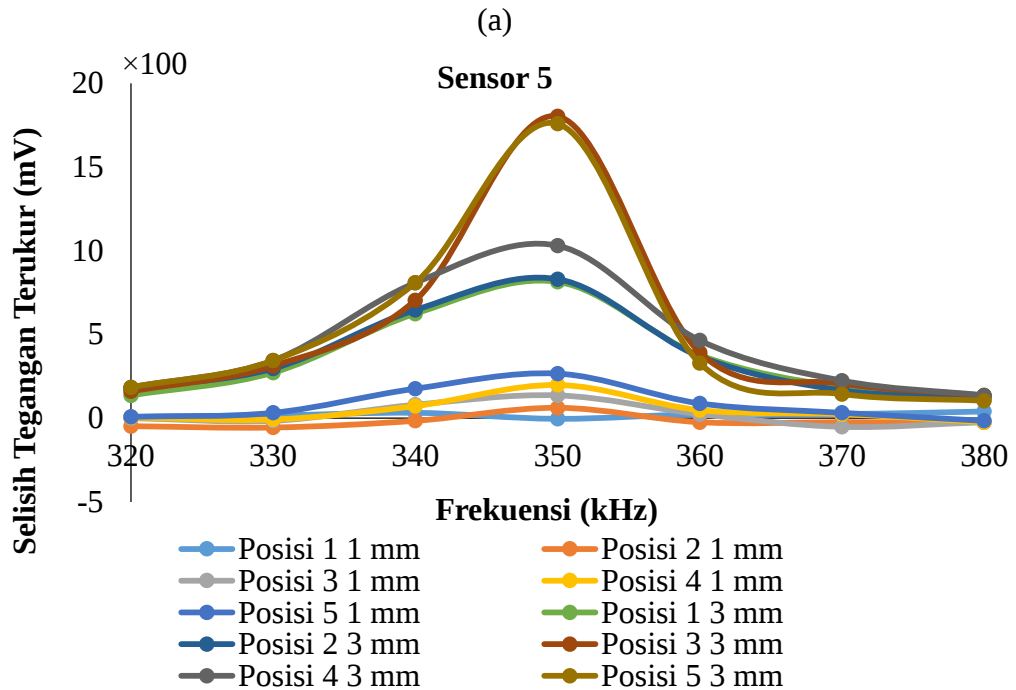
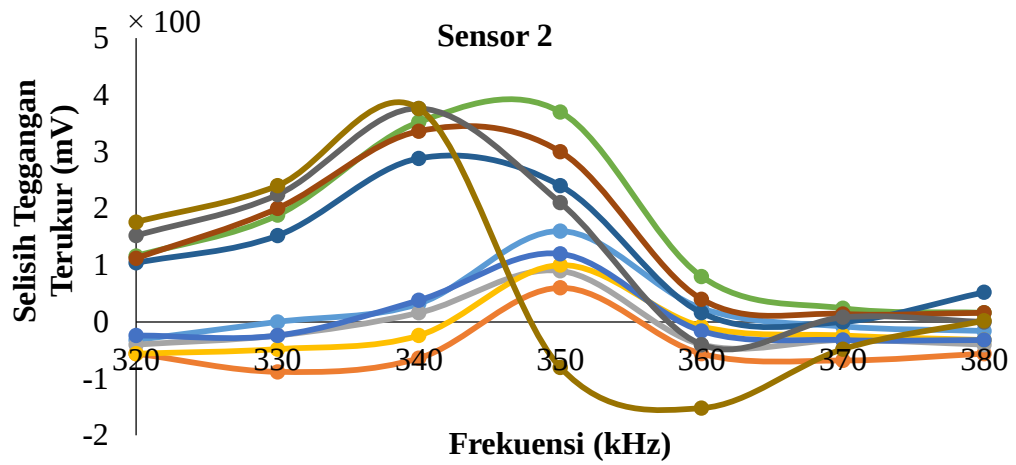
Gambar 4.8 Grafik Selisih Tegangan Terukur Baja Normal dengan Baja Cacat Sensor 2 dan 5.

Grafik pada Gambar 4.8 menunjukkan *trend* yang sama, namun terdapat anomali pada sensor 2 cacat 3 mm. Selisih tegangan terukur antara baja normal dengan baja cacat tertinggi sebelum frekuensi resonansi yaitu pada frekuensi 340 kHz dan tegangan input 20 V posisi 5. Selisih tegangan terukur tertinggi pada sensor 2 untuk baja cacat 1 mm yaitu sebesar 40 mV dan pada baja cacat 3 mm sebesar 180 mV. Selisih tegangan terukur tertinggi pada sensor 5 untuk baja cacat 1 mm yaitu sebesar 380 mV dan pada baja cacat 3 mm sebesar 810 mV. Pada sensor 5, tegangan terukur tertinggi yaitu sebesar 176 mV pada baja cacat 1 mm dan 808 mV pada baja cacat 3 mm. Medan magnet yang dideteksi oleh koil Rx terdiri dari medan

magnet primer dan sekunder, salah satunya dalam bentuk tegangan. Baja cacat 3 mm memiliki selisih tegangan terukur lebih besar dibandingkan baja cacat 1 mm. Hal tersebut dikarenakan perubahan *eddy current* pada baja cacat 3 mm lebih besar dan menyebabkan perubahan fase yang diperoleh semakin besar dibandingkan baja cacat 1 mm (Huda, et al., 2020).

Namun terdapat anomali nilai selisih tegangan terukur baja cacat 1 mm pada sensor 2 memiliki nilai selisih tegangan terukur negatif (-). Deteksi cacat terkait dengan besar *eddy current* yang diinduksi ke dalam sampel yang diinspeksi serta sejauh mana perubahan *eddy current* akibat adanya cacat. Cacat berdiameter kecil memungkinkan pecahnya *eddy current* dikarenakan kemampuan sensor yang belum efektif untuk memindai cacat berdiameter kecil (Jansen, 2012) terutama pada frekuensi 330 kHz.

Pada saat dilakukan inspeksi hasil lasan pipa di *line* produksi, posisi cacat tidak selalu tepat berada di bawah koil Rx. Maka dari itu, perlu dilakukan karakterisasi sensor berdasarkan variasi posisi di sekitar koil Rx. Grafik selisih tegangan terukur baja normal terhadap baja cacat pada sensor 2 dan sensor 5 dengan variasi posisi cacat di sekitar koil Rx dapat dilihat pada Gambar 4.9.



(b)

Gambar 4.9 Grafik Selisih Tegangan Terukur Baja Normal terhadap Baja Cacat Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx pada; (a) Sensor 2 dan (b) Sensor 5.

Grafik pada Gambar 4.9 menunjukkan bahwa sensor 2 dan 5 dapat mendeteksi cacat berdiameter 3 mm meskipun posisi koil Rx tidak tepat berada di bawah lokasi cacat yang ditandai dengan adanya selisih tegangan terukur antara baja normal dengan baja cacat. Frekuensi optimal karakterisasi Sensor 2 dan 5 pada

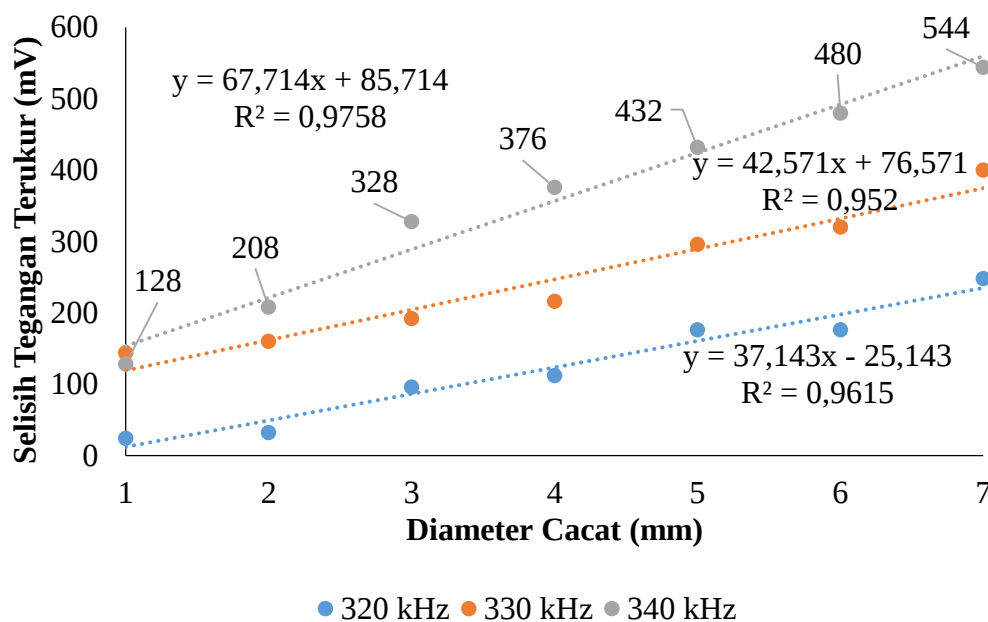
330 – 340 kHz karena memiliki selisih tegan terukur terbesar yang berada di bawah frekuensi resonansi.

Sensor 2 memiliki frekuensi resonansi 350 kHz dan dapat menginspeksi cacat porositas berdiameter 3 mm dengan posisi 1, 2, 3, 4 dan 5. Sensor 5 memiliki frekuensi resonansi 350 kHz dan dapat menginspeksi cacat porositas berdiameter 1 dan 3 mm dengan posisi 1, 2, 3, 4 dan 5. Namun terdapat anomali pada sensor 5 posisi 2 tegangan input 5 dan 10 V yang ditunjukkan oleh selisih tegangan terukur bernilai negatif. Dari keseluruhan nilai tegangan terukur dari sensor 2 dan 5, tegangan input mempengaruhi selisih tegangan terukur, semakin tinggi tegangan input maka semakin besar selisih tegangan terukur. Cacat porositas dapat terindikasi oleh sensor dengan tegangan input dan frekuensi yang optimal terutama pada cacat berdiameter kecil. Sensor 2 memiliki SNR lebih besar dibandingkan sensor 5 sehingga sensor 2 dapat dikatakan lebih baik mendeteksi cacat karena *noise* yang terdeteksi lebih sedikit dibandingkan sensor 5.

Sensor 2 dan 5 memilki parameter koil yang sama, namun memiliki karakteristik yang berbeda. Hal tersebut dikarenakan beberapa hal seperti; ketidaksempurnaan koil (rongga antar kawat), penurunan gravitasi, deformasi sentripetal, tumpuan koil pusat bergeser dari pusat putaran, getaran, variasi suhu, *noise* elektromagnetik eksternal, posisi kawat konduktor dalam koil, ukuran area kumparan, perubahan offset listrik dan *noise* listrik. Ketidaksempurnaan koil adalah sumber kesalahan yang paling signifikan, yang efeknya dapat menyembunyikan tegangan terukur yang sebenarnya. (Tosin, et al., 2006).

4.3 Hasil Karakterisasi Koil Solenoida menggunakan Pipa Baja

Sensor 2 dikarakterisasi lebih lanjut untuk mengetahui apakah sensor 2 dapat membedakan cacat porositas dengan diameter 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7. Pengaruh tegangan input terhadap selisih rata – rata tegangan terukur baja normal – udara pada sensor 2 dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik Selisih Tegangan Terukur Baja Normal – Baja Cacat pada Setiap Frekuensi.

Gambar 4.10 merupakan selisih rata-rata tegangan terukur antara baja normal – baja cacat pada Sensor 2 dengan tegangan input 20V. *Trend* pada setiap frekuensi sama, yaitu semakin besar diameter cacat maka semakin besar pula selisih tegangan terukur antara baja normal – baja cacat. Selisih baja cacat 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 mm pada frekuensi 340 kHz secara berturut turut yaitu 128, 208, 328, 376, 432, 480, dan 544 mV. Frekuensi 340 kHz memiliki nilai regresi dan gradien tertinggi yaitu sebesar 0,9758 dan 67,714 dibandingkan dengan frekuensi 320 dan 330 kHz, yang

berarti bahwa frekuensi 340 kHz dapat membedakan diameter cacat lebih signifikan dibandingkan frekuensi 320 dan 330 kHz. Untuk mendeteksi cacat berdiameter kecil yaitu menggunakan rentang frekuensi 330-340 kHz karena rentang frekuensi tersebut mampu membedakan antara baja normal dengan baja cacat berdiameter kecil dengan selisih tegangan terukur yang besar. Baja dengan cacat berdiameter lebih besar memiliki selisih tegangan terukur yang besar karena volume udara pada cacat berdiameter besar akan semakin besar dan perubahan aliran *eddy current* juga semakin besar pula. Dengan menerapkan prinsip superposisi pada permukaan lasan. Keberadaan cacat diindikasikan dengan adanya selisih tegangan terukur antara baja normal dengan baja cacat. Distribusi cacat porositas memiliki nilai konduktivitas lebih kecil dibandingkan baja. Nilai konduktivitas baja adalah $0,69 \times 10^7$ S/m. Sedangkan nilai konduktivitas untuk porositas adalah $3,0 \times 10^{-15}$ S/m. Konduktivitas merupakan parameter penting dalam MIT karena perbedaan konduktivitas menyebabkan perbedaan sinyal yang terdeteksi (Huda, et al., 2020).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini meliputi :

1. Sensor MIT jenis koil solenoida dengan jumlah lilitan koil Tx sebanyak 1500 dan Rx sebanyak 750 lilitan, jarak antar koil sebesar 3 mm, ketinggian koil masing-masing 10 mm, diameter koil Tx sebesar 10 mm dan Rx sebesar 7 mm, diameter koil dalam masing-masing 1 mm, diameter kawat koil Tx sebesar 0,5 mm dan Rx sebesar 0,25 mm optimal untuk membedakan antara baja normal dengan baja cacat sampai dengan diameter 1 mm.
2. Semakin besar diameter cacat maka semakin besar pula selisih tegangan terukur antara baja normal dengan baja cacat. Cacat artifisial berukuran 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 mm dapat dibedakan dan optimal pada rentang frekuensi 330 - 340 kHz dengan tegangan input 20 V posisi inspeksi cacat di bawah koil Rx.
3. Selisih tegangan terukur antara baja normal dengan baja cacat 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 mm pada frekuensi 340 kHz secara berturut turut yaitu 128, 208, 328, 376, 432, 480, dan 544 mV.

5.2. Saran

Saran – saran untuk penelitian selanjutnya meliputi :

1. Menambahkan jumlah lilitan koil sensor dengan jumlah lilitan koil penerima lebih kecil dibandingkan koil pemancar.
2. Menguji sensor dengan sampel lasan yang terdapat cacat porositas dan cacat lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- A, K. et al., 2007. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science Magazine*, 317(5834), pp. 83-86.
- American Petroleum Institute, 2007. Specification For Line Pipe. *Api Standard 5L 44th Edition*.
- Amran, M. et al., 2019. *Effect of Electromagnetic Induction Spectroscopy of Femur*. Perlis, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Ascheimer, U., 2015. *Welding Inspection Handbook*. 4 penyunt. USA: American Welding Society.
- Asmanis, G., Stepins, D. & Ribickis, L., 2019. Measuring Impedances of DC-biased Inductors by Using Vector Network Analyzers. *INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS*, 65(3), pp. 375-380.
- Beck, M. S. & Williams, R. A., 1996. Process Tomography : A European Innovation and its Applications. *Measurement Science Technology*, Volume 7, p. 215.
- Cadence PCB Solutions, 2020. *What is Signal to Noise Ratio and How to calculate it?*. [Online]
Available at: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-what-is-signal-to-noise-ratio-and-how-to-calculate-it>
[Diakses 23 September 2021].
- Chusni, M. M., 2018. *Pengenalan Alat Ukur*. Bandung: <http://digilib.uinsgd.ac.id/>.
- Cisco Meraki, 2020. *Signal-to-Noise Ratio (SNR) and Wireless Signal Strength*. [Online]
Available at: [https://documentation.meraki.com/MR/WiFi Basics and Best Practices/Signal-to-Noise Ratio \(SNR\) and Wireless Signal Strength](https://documentation.meraki.com/MR/WiFi_Basics_and_Best_Practices/Signal-to-Noise_Ratio_(SNR)_and_Wireless_Signal_Strength)
[Diakses 24 September 2021].
- Daryus, A., 2002. *Manajemen Pemeliharaan Mesin*. Jakarta: Universitas Darma Persada.
- Fitriani, A. N., 2016. *Inspeksi Cacat pada Sambungan Las Baja Karbon Rendah menggunakan Magnetic Induction Tomography dengan Sensor 2 Planar*, Cilegon: Tidak Dipublikasikan.
- Gabriel, C., Gabriel, S. & Corthout, E., 1996. The Dielectric Properties of Biological Tissues: I. Literature Survey. *Physics in Medicine and Biology*, p. 41:2231.

- Griffiths, H., 2001. Magnetic Induction Tomography. *Measurement Science and Technology*, p. 12: 1126.
- Halliday, et al., 2010. *Fisika Dasar*. 1 penyunt. Jakarta: Erlangga.
- Haryono, D., 2019. *Pengujian Prototipe Sistem Inspeksi Berbasis Magnetic Induction Tomography untuk Pengendalian dan Monitoring Kualitas Pipa Baja di PT KHI Pipe Industries*, Cilegon: Tidak Dipublikasikan.
- Higgins, R. J., 1983. *Electronic With Digital and Analog Integrated Circuits*. Dalam: s.l.:Prentice Hal PTR.
- Huda, M. A. et al., 2020. Characterization of Magnetic Induction Coil Sensor for Void Detection in Steel Plate. *International Conference on Smart Technology and Applications*, Volume 20, pp. 978-1-7281-3083-5.
- Igney, C. et al., 2005. Design and Performance of A Planar-Array MIT System With Normal Sensor Alignment. *Physiological Measurement*, p. 26(2): S263–S278.
- Integrated Publishing, Inc, t.thn. *chemical biological tpub*. [Online] Available at: https://chemical-biological.tpub.com/TM-1-1500-335-23/css/TM-1-1500-335-23_337.htm [Diakses 2021 September 2021].
- Jansen, H. R. V., 2012. *Eddy Current Testing: Profiled Eddy Current Probes for Complex Shape*. Durban, South Africa, 18th World Conference on Non destructive Testing.
- Kapoor, R., Unknown. *General Physics (calculus based) Class Notes*. [Online] Available at: <http://www.rakeshkapoor.us/ClassNotes/classnotes.php?notes=MagneticFieldduetoCurrent&index=2> [Diakses 13 Juli 2021].
- Kim, D. et al., 2007. Estimation of weld quality in high-frequency electric resistance welding with image processing. *Welding Journal (Miami, Fla)*, pp. 71-79.
- Kularatna, N., 2003. *"Fundamentals of Oscilloscopes", Digital and Analogue Instrumentation: Testing and Measurement*. United Kingdom: MPG Books Ltd.
- Lerner, R. et al., 2014. *Alternative Level Shifting Devices for 900V Gate Drivers*. Germany, Research Gate.
- Lizelwati, N., 2011. Resonansi pada Rangkaian RLC. *Jurnal Saintek*, III(1), pp. 90-96.

- Mansor, M. S., Yunus, Y. M. & Zakaria, Z., 2015. Magnetic Induction Tomography : A Brief Review. *Jurnal Teknologi*, p. 73:3 91–95.
- Naryono, I. S., 2007. *Analisa Pengelasan Dingin dengan Menggunakan Metode High Frequency Electrical Resistance Welding pada Proses Pembuatan Pipa Baja STKM 13B*. Jakarta: Universitas Muhammadiyah Jakarta.
- Nuryantini, A. Y., 2017. *Fisika Dasar 1*. 1 penyunt. Bandung: UIN Sunan Gunung Djati.
- Paulus, B., 2019. *Optimizing Planar Coils for PCBs with Electromagnetics Simulation*. [Online]
Available at: <https://www.comsol.com/blogs/optimizing-planar-coils-for-pcb-with-electromagnetics-simulation/>
[Diakses 13 Juli 2021].
- Peyton, A. J. et al., 1999. *Using Electromagnetic Methods to Monitor Phase Transformation in Steel Samples*. New York: Institute of Material Conference.
- Prasetyo, H. A., 2019. *Fabrikasi Pipa ERW dengan Sistem Pengelasan HFRW untuk Aplikasi Pipa Minyak dan Gas*. Jakarta: Universitas Pertamina.
- PT KHI Pipe Industries, 2018. *Laporan Tahunan Tahun 2018*. s.l.:s.n.
- PT KHI Pipe Industries, 2020. *PT KHI Pipe Industries*. [Online]
Available at: <https://khipipe.com/products-services/pipe-mill-facilities/>
- Robert, N. K., 2013. *Common HF Welding Defects*. USA: Thermatool Corp.
- Sahay, K. & Pathak, S., 2006. *Basic Concepts of Electrical Engineering*. New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- SNDE Iowa State University, 2020. *Depth of Penetration and Current Density*. [Online]
Available at: <https://www.nde-ed.org/Physics/Electricity/transformer.shtml>
[Diakses 24 September 2021].
- Subagya, H., 2006. *Sains Fisika*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Sutisna, D. et al., 2014. Flaw Detection in Welded Metal Using Magnetic Induction Tomography. *Advanced Materials Research Vol. 896*, pp. 722-725.
- Syauqi, F., Darmawan, D. & Fathona, I. W., 2020. Studi Eksperimental dan Analisis Tegangan Koil Receiver pada Bahan Ferromagnetik dan Non-Ferromagnetik dengan Sistem Induksi Magnet. *e-Proceeding of Engineering*, Volume 7, pp. 1390-1396.

- Tavakkoli, H. et al., 2019. Mutual Inductance Calculation between Two Coaxial Planar Spiral Coils with an Arbitrary. *Microelectronics J*, Volume 85, pp. 98-108.
- Tosin, G., Citadini, J. F., Basilio, R. & Potye, M., 2006. *Development of Insertion Device Magnetic Characterization System at LNLs*. Edinburgh, Reserach Gate.
- Tumanski, S., 2007. Induction Coil Sensors—A Review. *Measurement Science and Technology*, p. 18: R31.
- Ulum, S., Haryono, D. & Alfirano, 2012. Penentuan Ukuran Cacat Poros pada Logam Hasil Las Menggunakan Magnetic Induction Tomogrpahy (MIT).
- Vionita, Y. & Setyowati, A., 2018. Analisis Parameter - Parameter yang Mempengaruhi Kualitas Transmisi Signal To Noise Ratio (SNR) Serat Optik di PR.Telkom, Tbk STO Jatinegara Ruas Jatinegara-Cikupa. *Repository UNJ*, pp. 1-2.
- Waluyanti, S., 2008. *Alat Ukur dan Teknik Pengukuran*. Jakarta: Direktorat Pembinaan SMK.
- Wang, H., Li, W. & Feng, Z., 2015. A Compact and High-Performance Eddy-Current Sensor Based on Meander-Spiral Coil. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(9).
- Widodo, M. S., 2013. *Dasar dan Pengukuran Listrik*. Jakarta: Kemendikbud RI.
- Wiryosumarto, H. & Okumura, T., 2000. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Yodogawa, S. & Morishita, M., 2019. Influence of Winding Direction of Solenoid Coil or Spiral Coil on Power Transfer Efficiency in Wireless Power Transfer. *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 978-1-7281-3398-0.
- Zemansky, S., 1986. *Fisika Universitas 2 Listrik Magnet*. 2 penyunt. Bandung: Binacipta.
- Zhang, H. et al., 2020. *Spacecraft Electromagnetic Compability Technologies*. Peijian Ye penyunt. Beijing: Beijing Institute of Technology Press and Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Zinan, L., Zheng, S. & Haijun, L., 2008. *The Application of Magnetic sensor in MIT*. s.l., VDE VERLAG Conference Proceedings, pp. 1-4.
- Ziolkowski, M. & Gratkowski, S., 2009. Weighted Sum Method and Genetic Algorithm Based Multiobjective Optimization of an Exciter for Magnetic Induction Tomography. *Theoretical Engineering (ISTET)*, pp. 1-5.

LAMPIRAN A. CONTOH PERHITUNGAN

1. Selisih Tegangan Terukur Baja Cacat – Udara

$$\Delta V_{pp} \text{ (mV)} = V_{pp} \text{ Baja Cacat} - V_{pp} \text{ Udara} \dots \dots \dots (B.1)$$

$$\Delta V_{pp} \text{ (mV)} = (9920 - 9600) \text{ mV} = 320 \text{ mV}$$

2. Selisih Tegangan Terukur Baja Cacat – Baja Normal

$$\Delta V_{pp} \text{ (mV)} = V_{pp} \text{ Baja Normal} - \text{Baja Udara} \dots \dots \dots (B.2)$$

$$\Delta V_{pp} \text{ (mV)} = (9920 - 7680) \text{ mV} = 2240 \text{ mV}$$

3. Rata – Rata Tegangan Terukur

$$\overline{V}_{pp} \text{ (mV)} = \frac{\sum V_{pp}}{10} \dots \dots \dots (B.3)$$

$$\overline{V}_{pp} \text{ (mV)} = \frac{200+200+200+200+200+200+200+200+200+200}{10} \text{ mV}$$

$$\overline{V}_{pp} = 200 \text{ mV}$$

4. Selisih Tegangan Terukur Rata – Rata Baja Cacat – Udara

$$\overline{\Delta V}_{pp} \text{ (mV)} = \overline{V}_{pp} \text{ Baja Cacat} - \overline{V}_{pp} \text{ Udara} \dots \dots \dots (B.4)$$

$$\overline{\Delta V}_{pp} \text{ (mV)} = 268 - 200 \text{ mV} = 68 \text{ mV}$$

5. Selisih Tegangan Terukur Rata – Rata Baja Normal – Baja Cacat

$$\overline{\Delta V}_{pp} \text{ (mV)} = \overline{V}_{pp} \text{ Baja Normal} - \overline{V}_{pp} \text{ Baja Cacat} \dots \dots \dots (B.5)$$

$$\overline{\Delta V_{pp}}(\text{mV}) = 280 - 268 \text{ mV} = 28 \text{ mV}$$

6. *Signal-To-Noise Ratio (SNR)*

$$\text{SNR (dB)} = 20 \log 10 \frac{\overline{V_{pp}}}{\text{Std. Deviasi}} \dots\dots\dots (\text{B.6})$$

$$\text{SNR (dB)} = 20 \log 10 \frac{8962 \text{ mV}}{33,2666 \text{ mV}}$$

$$\text{SNR (dB)} = 48,6079 \text{ dB}$$

7. *Persentase Baja Cacat - Udara*

$$\% \text{ Bj. Cacat - Udara} = \left| \frac{\overline{V_{pp}} \text{Baja Cacat} - \overline{V_{pp}} \text{Udara}}{V_{in}} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

$$\% \text{ Bj. Cacat - Udara} = \left| \frac{2664 \text{ mV} - 256 \text{ mV}}{10 \text{ V}} \right| \times 100\% = 4,080\%$$

LAMPIRAN B. DATA KARAKTERISASI SENSOR

Tabel B.1 Data Tegangan Terukur Sensor Jenis Solenoida Desain 1 Karakterisasi Planar-Solenoida.

Kondisi Frekuensi (kHz)	Udara	Baja Normal	Baja Cacat
10	4800	5000	4800
20	5000	5600	5600
30	5200	6000	6400
40	5600	6400	6400
50	6000	7000	7200
60	6600	8000	8000
70	7400	9200	9200
80	8600	10800	10400
90	10600	13400	13600
100	14200	18000	17600
110	22200	28400	28000
120	54400	65200	61600
130	77600	72000	78400
140	24800	29200	30400
150	14400	17400	18000
160	10000	12100	12800
170	8000	9360	9600
180	6400	7600	8000
190	5600	6480	6400
200	4800	5520	5600
210	4000	4880	4800
220	4000	4320	4800
230	3200	3920	4000
240	3200	3600	4000
250	3200	3360	3200

Tabel B.2 Data Tegangan Terukur Sensor Jenis Planar Karakterisasi Planar-Solenoida.

Kondisi Frekuensi (kHz)	Udara	Baja Normal	Baja Cacat
100	400	400	380
200	800	580	540
300	1200	700	660
400	1600	780	740
500	1660	860	820

600	2000	900	860
700	2400	940	920
800	2400	960	960
900	2400	1000	980
1000	2400	1020	1020
1100	2400	1040	1060
1200	2400	1060	1080
1300	3200	1100	1100
1400	3200	1120	1120
1500	3200	1140	1140
1600	3200	1160	1160
1700	3200	1180	1180
1800	3200	1200	1220
1900	3200	1220	1240
2000	3200	1240	1260
2100	4000	1280	1300
2200	4000	1320	1320
2300	4000	1340	1340
2400	4000	1380	1360
2500	4000	1420	1400
2600	4000	1460	1440
2700	4800	1480	1480
2800	4800	1500	1520
2900	4800	1580	1560
3000	4800	1620	1620
3100	5600	1700	1660
3200	5600	1740	1720
3300	6400	1820	1780
3400	7200	1900	1860
3500	7600	1980	1940
3600	8000	2060	2020
3700	9600	2180	2140
3800	11200	2300	2260
3900	13600	2420	2380
4000	16800	2580	2540
4100	23200	2780	2740
4200	34400	3020	2940
4300	57600	3220	3220
4400	48400	3500	3500
4500	28200	3780	3860

4600	19200	4140	4280
4700	14000	4560	4760
4800	11200	5080	5400
4900	8800	5560	5960
5000	8000	6040	6520
5100	6400	6400	6920
5200	5600	6640	6920
5300	4800	6600	6600
5400	4800	6440	6040
5500	4000	6040	5400
5600	4000	5640	4680
5700	3200	5080	4200
5800	3200	4600	3720
5900	3200	4200	3360
6000	3200	3880	3000
6100	2400	3560	2760
6200	2400	3280	2520
6300	2400	3080	2360
6400	2400	2840	2160
6500	2400	2680	2000
6600	2400	2520	1880
6700	1600	2360	1760
6800	1600	2280	1640
6900	1600	2160	1560
7000	1600	2040	1480

Tabel B.3 Data Tegangan Terukur Baja Normal (Plat Baja Cacat 3 mm) Sensor Solenoida Variasi Posisi Koil.

Amplitudo (V)	1			4			8			16			20		
Posisi Cacat Frekuensi (kHz)	Cent	uRx	uTx	Cent	uRx	uTx	Cent	uRx	uTx	Cent	uRx	uTx	Cent	uRx	uTx
10	260	260	260	1040	1040	1040	2200	2200	2200	4000	4000	4000	4800	4800	5200
20	284	280	300	1120	1120	1120	2400	2200	2240	4800	4800	4800	5600	5600	5600
30	300	300	340	1200	1200	1200	2600	2400	2600	4800	4800	4800	6000	6400	6400
40	324	340	340	1280	1360	1280	2800	2600	2600	5200	5600	5600	6400	6400	6400
50	356	360	360	1440	1440	1440	3000	3000	3000	5600	5600	5600	7200	7200	7200
60	396	400	400	1600	1600	1600	3000	3200	3000	6400	6400	6400	8000	8000	8000
70	452	460	460	1840	1840	1840	3400	3800	3400	7200	7200	7200	8800	9200	9200
80	528	540	540	2160	2160	2160	4200	4200	4280	8800	8800	8800	10400	10400	10400
90	660	660	660	2640	2640	2640	5400	5400	5400	10400	10400	10400	13200	13600	13600
100	872	880	880	3520	3600	3600	7000	7200	7000	14400	14400	14400	17600	17600	18400
110	1370	1380	1400	5520	5520	5520	11000	11000	11000	22400	22400	22400	28000	28000	28000
120	3080	3080	3120	12200	12200	12400	24600	25000	25000	49600	49600	50400	61600	61600	62400
130	3840	3880	3880	15400	15800	15400	30600	31400	31000	61600	63200	61600	76400	78400	76800
140	1480	1500	1500	6000	6080	6080	12200	12200	12200	24000	24800	24000	29600	30400	30400
150	880	900	900	3600	3600	3600	7400	7400	7000	14400	14400	14400	17600	18000	17600
160	640	640	620	2480	2560	2560	5000	5000	5000	10400	10400	10400	12800	12800	12800
170	480	500	480	1920	2000	2000	3800	3800	3800	8000	8000	8000	9600	9600	9600
180	400	400	400	1520	1600	1600	3000	3400	3000	6400	6400	6400	8000	8000	8000
190	320	340	340	1360	1280	1360	2600	2600	2600	5600	5600	5600	6400	6400	6480
200	280	280	300	1120	1120	1200	2200	2200	2200	4800	4800	4800	5600	5600	5600

210	240	260	260	1040	1040	1040	2200	2200	2200	4000	4000	4000	4800	4800	4800
220	240	220	220	880	880	880	1800	1800	1800	4000	4000	4000	4800	4800	4800
230	200	200	200	800	800	800	1800	1800	1800	3200	3200	3200	4000	4000	4000
240	180	180	180	720	720	720	1400	1400	1400	3200	3200	3200	4000	4000	4000
250	172	180	180	720	720	720	1400	1400	1400	2800	2800	2800	3200	3200	3200

Tabel B.4 Data Tegangan Terukur Sensor Jenis Solenoida Variasi Sensor.

Desain Sensor Solenoida													
1		2		3		4		5		6		7	
Frek (kHz)	Vpp	Frek (kHz)	Vpp	Frek (kHz)	Vpp	Frek (kHz)	Vpp	Frek (kHz)	Vpp	Frek (kHz)	Vpp	Frek (kHz)	Vpp
100	1760	320	4320	360	3160	510	8880	320	4080	390	1680	210	1120
110	2800	330	5920	370	4200	520	9280	330	5680	400	1820	220	1220
120	6400	340	8960	380	5840	530	9600	340	8560	410	1960	230	1300
130	7600	350	11000	390	7040	540	9760	350	10100	420	2120	240	1360
140	2960	360	7680	400	5520	550	9800	360	6880	430	2240	250	1350
150	1760	370	5120	410	3840	560	9680	370	4480	440	2320	260	1250
160	1280	380	3680	420	2760	570	9360	380	3200	450	2340	270	1090

Tabel B.5 Data Tegangan Terukur Rata-Rata Sensor Solenoida Desain 2 Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx.

Kondisi Sensor	Udara					Baja Normal				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	1680	8360	16760	24720	32880	2160	10660	21560	31840	42640
330	2408	12100	24040	35520	47280	3000	14860	29960	44560	59280
340	4048	20160	40280	59360	78960	4552	23080	45640	67520	90000
350	5480	27380	54840	81120	107900	5680	27840	56400	83520	110900
360	3264	16280	32560	48080	64080	3984	19540	39440	58240	77280
370	2000	10020	19960	29520	39440	2616	12820	25800	38240	50880
380	1416	7000	14200	20800	27280	1840	9220	18440	27200	36480

Tabel B.5 (Lanjutan)

Posisi Cacat 1 mm	Posisi 1					Posisi 2				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2160	10880	21600	32000	42960	2160	10940	21840	32160	43200
330	3016	15080	30400	44800	59280	3040	15200	30400	45040	60160
340	4552	22700	45600	67360	89680	4560	22900	45840	68160	90640
350	5592	27780	55760	82320	109300	5656	28120	56400	83040	110300
360	3960	19680	39160	57840	77040	3992	19840	39840	58640	77840
370	2608	13000	26000	38240	50960	2632	13080	26280	38640	51560
380	1856	9380	18480	27200	36640	1888	9380	19000	27920	37040

Tabel B.5 (Lanjutan)

Posisi Cacat 1 mm	Posisi 3					Posisi 4					Posisi 5				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2160	10900	21600	32000	43040	2160	10900	21680	32000	43200	2160	10880	21600	32000	42880
330	3024	15060	30320	44720	59520	2992	15100	30400	44800	59760	3024	15040	30280	44800	59520
340	4552	22720	45600	67440	89840	4560	22760	45680	67680	90240	4552	22660	45520	67280	89620
350	5640	28020	55920	82800	110000	5632	27900	55840	82720	109900	5616	27880	56160	82640	109700
360	3984	19800	39680	58320	77680	3952	19720	39360	58160	77360	3968	19760	39440	58240	77440
370	2632	13460	26240	38400	51200	2632	12980	26120	38400	51120	2624	13000	26160	38400	51200
380	1872	9400	18840	27360	36880	1848	9340	18720	27200	36800	1848	9400	18600	27280	36800

Tabel B.5 (Lanjutan)

Posisi Cacat 3 mm	Posisi 1					Posisi 2				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2136	10500	20960	30880	41480	2144	10660	21080	31280	41600
330	2914	14620	29160	43200	57400	2944	14600	29360	43280	57760
340	4360	21920	44000	65120	86480	4408	22100	44080	66100	87120
350	5440	27380	54800	81200	107200	5512	27460	55400	81600	108500
360	3872	19520	39000	57680	76480	3928	19640	39160	58040	77120

370	2552	12800	25600	37760	50640	2616	13060	25680	38400	50880
380	1840	8452	18400	27200	36320	1840	8472	18480	27280	35960

Tabel B.5 (Lanjutan)

Posisi Cacat 3 mm	Posisi 3					Posisi 4					Posisi 5				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2152	10580	21000	30800	41520	2120	10400	20800	30500	41120	2104	10400	20800	30400	40880
330	2952	14620	29280	43200	57280	2904	14440	28920	42880	57040	2888	14440	28880	42800	56880
340	4408	22020	44080	65200	86640	4400	21960	43840	65040	86240	4408	21960	43960	65040	86240
350	5536	27480	55160	81280	107900	5616	27880	55720	82560	108800	5688	28240	56680	83760	111700
360	3928	19560	39160	57760	76880	3984	19840	39640	58560	77680	4072	20120	40400	59440	78800
370	2616	12940	25600	38400	50740	2616	12960	26000	38400	50800	2640	13140	26320	38480	51360
380	1840	9260	18400	27200	36320	1852	9240	18400	27200	36480	1856	8552	18680	27280	36460

Tabel B.6 Data Tegangan Terukur Sensor Solenoida Desain 2 Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx Percobaan 3.

Kondisi Sensor	Udara					Baja Normal				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	1680	8200	16800	24000	32800	2160	10800	21600	32000	43200
330	2400	12000	24000	35200	47200	3040	15000	30400	44800	59200

340	4000	20000	40000	59200	78400	4560	22800	45600	67200	90400
350	5520	27600	55200	81600	109000	5680	28200	56800	83200	111000
360	3280	16400	32800	48000	64000	4000	19800	39200	57600	76800
370	2000	10000	20000	29600	40000	2560	13000	25600	38400	51200
380	1440	7000	14400	20800	27200	1840	9200	18400	27200	36800

Tabel B.6 (Lanjutan)

Posisi Cacat 1 mm	Posisi 1					Posisi 2				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	216	1080	2160	3200	4240	216	1080	2200	3200	4320
330	296	1500	3040	4480	5920	304	1520	3040	4480	6000
340	456	2280	4560	6720	8960	456	2300	4600	6800	9040
350	568	2800	5600	8320	11000	568	2840	5680	8400	11100
360	392	1980	3920	5840	7760	400	2000	4000	5920	7840
370	264	1300	2600	3840	5120	264	1320	2640	3920	5200
380	184	940	1840	2720	3680	184	940	1880	2800	3760

Tabel B.6 (Lanjutan)

Posisi Cacat 1 mm	Posisi 3					Posisi 4					Posisi 5				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	216	1080	2160	3200	4320	216	1080	2160	3200	4320	216	1080	2160	3200	4320
330	304	1520	3040	4400	6000	296	1520	3040	4480	5920	304	1500	3040	4480	5920
340	456	2280	4560	6640	9040	456	2280	4560	6720	8960	456	2260	4560	6720	8960
350	568	2840	5680	8240	11100	568	2800	5600	8320	11000	560	2800	5600	8320	11000
360	400	2000	4000	5760	7760	392	1960	3920	5760	7680	400	1980	3920	5760	7680
370	264	1320	2640	3760	5120	264	1300	2600	3840	5120	256	1300	2600	3840	5120
380	184	940	1880	2720	3680	184	920	1840	2720	3680	192	940	1840	2720	3680

Tabel B.6 (Lanjutan)

Posisi Cacat 3 mm	Posisi 1					Posisi 2				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	208	1020	2160	3120	4160	208	1040	2080	3120	4160
330	288	1460	2960	4320	5760	288	1460	2880	4320	5760
340	440	2220	4400	6560	8720	440	2180	4400	6560	8720
350	536	2740	5440	8160	10700	552	2720	5440	8160	10800
360	384	1940	3920	5760	7680	392	1940	3840	5760	7680

370	248	1280	2560	3840	5040	256	1280	2560	3760	5040
380	184	920	1840	2720	3600	184	920	1840	2720	3600

Tabel B.6 (Lanjutan)

Posisi Cacat 3 mm	Posisi 3					Posisi 4					Posisi 5				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	216	1060	2080	3120	4160	208	1020	2080	3040	4080	208	1040	2080	3040	4080
330	296	1460	2960	4320	5760	288	1440	2880	4320	5680	288	1440	2880	4320	5680
340	440	2220	4400	6560	8640	440	2180	4400	6480	8640	440	2200	4400	6480	8640
350	552	2740	5520	8160	10700	552	2760	5520	8240	10900	568	2820	5680	8320	11100
360	392	1940	3920	5760	7600	392	1960	3920	5840	7760	408	2000	4000	5920	7840
370	256	1280	2560	3760	5040	264	1280	2560	3840	5040	264	1300	2640	3840	5120
380	184	920	1840	2720	3600	184	920	1840	2720	3600	184	940	1840	2720	3680

Tabel B.7 Data Tegangan Terukur Rata-Rata Sensor Solenoida Desain 5 Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx.

Kondisi Sensor	Udara					Baja Normal				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	1584	7840	16000	23680	30880	2020	10220	20440	30720	40240
330	2260	11420	22560	34040	44800	2820	14140	28480	43280	55920

340	3780	19040	38240	56680	74800	4256	21360	42680	63960	84320
350	5052	25360	50620	75360	99000	5156	25680	51460	76680	100620
360	2972	14800	28720	44280	58240	3552	17720	35600	52880	69680
370	1828	9080	18280	27280	35600	2328	11680	23320	34880	45920
380	1280	6380	12800	19200	25120	1680	8360	16800	24880	33040

Tabel B.7 (Lanjutan)

Posisi Cacat 1 mm	Posisi 1					Posisi 2				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2016	10220	20280	29200	40160	2036	10240	20800	30920	40720
330	2820	14160	28280	42560	55760	2828	14280	28720	42880	56480
340	4228	21280	42720	63760	84000	4244	21380	42720	64080	84480
350	5092	25580	51080	76320	100660	5088	25480	51040	76120	100000
360	3540	17720	35520	52760	69440	3552	17740	35560	53000	69920
370	2316	11660	23160	34840	45680	2336	11780	23480	35080	46160
380	1672	8320	16760	24800	32640	1680	8460	16800	25280	33280

Tabel B.7 (Lanjutan)

Posisi Cacat 1 mm	Posisi 3					Posisi 4					Posisi 5				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2024	10220	20560	30720	40240	2024	10220	20680	30640	40200	2012	10180	20400	30480	40160
330	2816	14120	28360	42640	56080	2816	14140	28320	42640	56000	2792	13880	28240	42160	55600
340	4200	21060	42000	63200	83520	4196	21080	42240	63200	83600	4140	20880	41920	62400	82560
350	5040	25200	50560	75360	99260	5024	25160	50320	74920	98640	4964	24880	48600	74440	97960
360	3536	17720	35440	52960	69440	3516	17580	35320	52600	69200	3500	17540	35200	52440	68800
370	2328	11720	23360	35120	46440	2320	11660	23200	34800	45680	2316	11660	23160	34720	45600
380	1680	8400	16800	25160	33280	1676	8340	16760	25080	33280	1668	8380	16680	25040	33200

Tabel B.7 (Lanjutan)

Posisi Cacat 3 mm	Posisi 1					Posisi 2				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	1984	9880	19840	29240	38880	1968	9860	19800	29600	38480
330	2730	13620	27240	40200	53200	2692	13460	27160	40520	52960
340	4044	20140	40120	58920	78080	3952	20160	39840	59440	77860
350	4856	24360	47960	70100	92480	4720	23640	47520	70600	92320
360	3432	17060	33680	50000	65920	3348	16940	33840	50440	66000

370	2284	11300	22480	33460	44080	2296	11280	22480	33960	44260
380	1656	8140	16320	24280	31920	1652	8140	16280	24520	31760

Tabel B.7 (Lanjutan)

Posisi Cacat 3 mm	Posisi 3					Posisi 4					Posisi 5				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	1960	9760	19720	29360	38640	1952	9780	19640	29200	38400	1948	9760	19560	29320	38400
330	2672	14120	26800	40000	52800	2660	13300	26680	39920	52480	2660	13360	26640	39880	52480
340	3896	20020	39160	58600	77280	3860	19220	38860	57880	76240	3904	19420	38960	58400	76240
350	4724	22960	46720	69800	82600	4596	23060	46040	68680	90320	4708	23480	46840	69840	83040
360	3320	16640	33560	49480	65760	3312	16660	33080	49400	65040	3396	16900	33840	45664	66400
370	2236	11180	22480	33560	43860	2244	11160	22440	33440	43680	2276	11360	22800	35420	44480
380	1636	8080	16120	24360	31680	1640	8100	16280	24320	31680	1652	8180	16480	24620	32000

Tabel B.8 Data Tegangan Terukur Sensor Solenoida Desain 5 Variasi Posisi Cacat Sekitar Koil Rx Percobaan 3.

Kondisi Sensor	Udara					Baja Normal				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	1600	7800	16000	23600	30400	2040	10200	20800	31200	40800
330	2280	11400	22400	33600	44800	2840	14200	28800	43200	56800

340	3800	19000	37600	55200	73600	4280	21400	43200	64400	84800
350	5040	24600	49600	72000	94400	5080	25400	50800	76000	99200
360	2960	14600	18400	44000	56800	3520	17400	35200	52000	68800
370	1800	9000	18000	27200	35200	2320	11400	23200	34400	45600
380	1280	6400	12800	19200	24800	1680	8200	16800	24800	32800

Tabel B.8 (Lanjutan)

Posisi Cacat 1 mm	Posisi 1					Posisi 2				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2040	10200	20400	30400	40000	2040	10200	20800	31200	40800
330	2840	14200	28400	42400	56000	2840	14400	28800	43200	57600
340	4240	21400	43200	64000	84800	4280	21600	43200	64800	84800
350	5080	25400	51200	76000	101000	5080	25600	51200	76800	101000
360	3480	17400	35200	52000	68800	3520	17800	35200	52800	70400
370	2280	11400	23200	34400	44800	2320	11800	23200	35200	46400
380	1640	8200	16800	24800	32000	1680	8400	16800	24800	32800

Tabel B.8 (Lanjutan)

Posisi Cacat 1 mm	Posisi 3					Posisi 4					Posisi 5				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2040	10200	20800	31200	40000	2040	10200	20800	31200	40000	2040	10200	20800	30800	40000
330	2840	14200	28800	42800	56000	2840	14200	28800	43200	56000	2840	14200	28800	42800	56000
340	4240	21400	42400	64000	84800	4240	21400	42800	64000	84800	4240	21400	42800	64000	84800
350	5080	25400	51200	76000	99200	5040	25400	50400	75200	99200	5000	25200	50400	75200	99200
360	3520	17800	35200	52800	68800	3480	17400	35200	52000	68800	3480	17400	35200	52000	68000
370	2320	11800	23200	35200	46400	2320	11600	23200	34400	44800	2320	11600	23200	34400	44800
380	1680	8400	16800	24800	32800	1680	8400	16800	24800	32800	1680	8400	16800	24800	32800

Tabel B.8 (Lanjutan)

Posisi Cacat 3 mm	Posisi 1					Posisi 2				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2000	9800	20000	29600	39200	2000	10000	20000	29600	39200
330	2720	13800	27600	41200	54400	2760	13800	28000	41600	54400
340	4080	20600	41600	61600	80800	4160	20800	41600	61600	81600
350	4960	24600	49600	74400	96800	4960	24600	49600	73600	97600
360	3440	17400	34400	51200	68000	3440	17400	34400	51200	68000

370	2280	11400	22400	33600	44800	2280	11400	22400	34400	44800
380	1640	8200	16000	24000	32000	1640	8200	16000	24800	32000

Tabel B.8 (Lanjutan)

Posisi Cacat 3 mm	Posisi 3					Posisi 4					Posisi 5				
Amplitudo (V) Frekuensi (kHz)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
320	2000	10000	20000	29600	39200	2000	9800	20000	29600	39200	2000	9800	20000	29600	39200
330	2720	13800	27200	40800	54400	2760	13800	27600	41600	54400	2720	13800	27200	40800	53600
340	4080	20600	41600	61600	81600	4160	20600	41600	61600	80800	4080	20600	41200	61600	80800
350	4960	25000	49600	74400	97600	4960	24600	49600	73600	96800	5040	25200	50400	75200	99200
360	3480	17400	35200	52000	68000	3440	17400	34400	51200	68000	3520	17800	35200	52800	69600
370	2280	11400	23200	34400	44800	2280	11400	22400	34400	44800	2320	11600	23200	34400	45600
380	1640	8200	14400	24800	32000	1640	8200	16000	24800	32000	1680	8200	16800	24800	32000

Tabel B.9 Data Tegangan Terukur Rata-Rata Sensor Solenoida Desain 2 pada Pipa Baja Variasi Diameter Cacat.

Amplitudo (Vpp)	Udara	Baja Normal	Diameter Baja Cacat (mm)						
			1	2	3	4	5	6	7
320	3528	4328	4304	4296	4232	4216	4152	4152	4080
330	5104	6072	5928	5912	5880	5856	5776	5752	5672
340	8472	9280	9152	9072	8952	8904	8848	8800	8736

Tabel B.10 Data Tegangan Terukur Sensor Solenoida Desain 2 pada Pipa Baja Variasi Diameter Cacat Percobaan 3.

Amplitudo (Vpp)	Udara	Baja Normal	Diameter Baja Cacat (mm)						
			1	2	3	4	5	6	7
320	3520	4320	4320	4320	4240	4160	4000	4000	4080
330	5040	6080	6000	5920	5840	5760	5600	5600	5680
340	8480	9200	9200	9120	8960	8880	8800	8720	8640

LAMPIRAN C. FOTO ALAT



Gambar C.1 Jangka Sorong.



Gambar C.2 L-C-R Meter.



Gambar C.3 Penggaris



Gambar C.4 *Signal Generator*



Gambar C.5 Osiloskop Digital.