

OPTIMALISASI METODE PENGAMBILAN DATA PADA SISTEM PEMINDAI UNTUK MENDETEKSI ANOMALI PADA BAHAN NON-FERROMAGNETIK BERBASIS METODE *EDDY CURRENT TESTING*

OPTIMIZATION OF DATA COLLECTION METHOD ON THE SCANNING SYSTEM TO DETECT ANOMALY ON NON-FERROMAGNETIC MATERIAL BASED ON EDDY CURRENT TESTING METHOD

Nur Arya Fauzan Yusuf¹, Dr. Eng. Asep Suhendi², Dr. Dudi Darmawan³

^{1,2,3}Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹aryafauzan7@gmail.com ²as.suhendi@gmail.com ³dudidw@gmail.com

Abstrak

Non-Destructive Testing (NDT) adalah pengujian pada berbagai macam bahan yang tidak akan merusak fungsi dari objek. Keuntungan menggunakan metode NDT mengurangi kerusakan pada komponen, dan mencegah kegagalan selama pengerjaannya. Pada pengujian ini, metode NDT yang digunakan adalah Metode *Eddy Current Testing (ECT)*. Pada Metode ECT, arus listrik dialirkan pada kumparan untuk membangkitkan medan magnet. Jika medan magnet ini diinduksi pada benda logam yang akan diinspeksi, maka akan tercipta arus Eddy. Pada pengujian ini, koil transmitter akan terus menginduksi medan magnet pada objek uji dari awal pemindaian hingga selesai proses pemindaian. Koil receiver dirancang untuk mengambil data dari arus eddy yang dihasilkan pada permukaan objek uji. Distribusi data tegangan menunjukkan kondisi objek yang diuji apakah ada anomali atau tidak. Ketika objek terdapat anomali, maka nilai tegangan yang terbaca akan berbeda dengan bidang homogen yang tanpa anomali. Perbedaan nilai tegangan mengindikasikan adanya anomali pada objek. Dari hasil penelitian yang dilakukan, maka diperoleh tegangan pengurang 1 V_{DC} dan penguatan empat kali, Untuk mendapatkan hasil metode pengambilan data yang optimal adalah dengan pembacaan delapan kali di setiap titik dengan error ±0,192%, resolusi jarak antara titik uji 2 cm, dan delay 20 ms dengan anomali berukuran 10 mm.

Kata kunci : Metode pengambilan data, *Non Destructive Testing*, *Eddy Current Testing*, *Non Ferromagnetik*

Abstract

Non-Destructive Testing (NDT) is a test on a variety of materials that will not damage the function of the object. The benefits of using the NDT method are reducing damage to components and preventing failures during the process. In this test, the NDT method used is the *Eddy Current Testing (ECT) Method*. In the ECT Method, an electric current is supplied to the coil to generate a magnetic field. If this magnetic field is induced in a metal object inspected, an eddy current will be created. In this test, the transmitter coil will continue to induce a magnetic field in the inspected object from the beginning of the scan until the scanning process is complete. The receiver coil is designed to collect data from the eddy current generated on the surface of the inspected object. Stress distribution data shows the condition of the object being tested whether there is an anomaly or not. When there is an anomaly, the value of the stress that is read will be different from the homogeneous plate without anomaly. The difference in the voltage value indicates the anomaly in the object. From the results of the research conducted, we obtain a voltage reduction of 1 V_{DC} and four times reinforcement. To get the results of the optimal data collection method is by reading eight times at each point with an error of ± 0.192%, resolution of the distance between the test points is 2 cm, and delay 20 ms with an anomaly size of 10 mm.

Key words: Data collection method, *Non Destructive Testing*, *Eddy Current Testing*, *Non Ferromagnetic*

1 Pendahuluan

Pengujian kualitas hasil produksi merupakan hal yang penting dilakukan oleh suatu industri. Tidak jarang terdapat cacat pada produk yang dapat memengaruhi performa dan kelayakan dari produk tersebut. Cacat produksi bisa timbul dari proses pembuatan ataupun perakitan. Hal tersebut dapat berpengaruh pada kualitas produk yang dihasilkan dan tingkat kepuasan konsumen. Oleh karena itu, diperlukan pengujian pada akhir tahapan produksi secara keseluruhan.

Secara umum, pengujian dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu *destructive testing* dan *non-destructive testing (NDT)*. *Destructive testing* adalah metode penginspeksian yang dapat mengakibatkan gangguan atau kerusakan pada objek uji. Sedangkan NDT adalah inspeksi suatu benda/material untuk mengetahui adanya cacat, retak, atau *discontinuity* lain tanpa merusak benda yang diuji. NDT dapat digunakan untuk menguji kondisi, ketahanan, dan kualitas bahan akan diketahui tanpa harus mengakibatkan kerusakan[1].

Ada beberapa jenis metode NDT, seperti *radiography*, *ultrasonic*, *thermography*, dan *eddy current*. Pada pengujian ini, objek uji merupakan plat logam dengan ketebalan 1 mm, maka metode NDT yang optimal digunakan adalah metode *Eddy Current Testing (ECT)*. Metode ini pada dasarnya memanfaatkan prinsip elektromagnet.

Prinsip metode ECT yaitu arus listrik dialirkan pada kumparan untuk membangkitkan medan magnet di dalamnya. Jika medan magnet ini diinduksi pada benda logam yang akan diinspeksi, maka akan tercipta arus Eddy[2]. Arus eddy biasanya tidak terlalu baik pada bahan ferromagnetik karena permeabilitas bahan-bahan tersebut biasanya terlalu tinggi untuk mendapatkan penetrasi yang baik [10]. Sehingga objek uji yang digunakan adalah bahan non-ferromagnetik.

Pada pengujian sebelumnya[3], Sistem pemindaian bergeser secara satu per satu menginspeksi pada titik pengujian apakah terdapat anomali atau tidak. Dengan pergeseran itu, nantinya didapat keluaran citra dari benda uji di monitor berupa distribusi tegangan koil receiver. Dari penelitian ini, alat sudah bisa menemukan anomali. Tapi alat ini hanya dapat mendeteksi anomali dengan diameter lebih dari 10 mm.

Metode pengambilan data ini lah yang digunakan untuk menampilkan hasil visualisasi, agar dapat menampilkan ukuran serta posisi anomali. Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini dirancang sistem pemindaian untuk mendeteksi anomali pada bahan non-ferromagnetik menggunakan metode *Eddy Current Testing* (ECT) dengan optimalisasi metode pengambilan data agar memperoleh hasil yang lebih akurat.

2 Dasar Teori

2.1 Eddy Current Testing (ECT)

Eddy Current Testing (ECT) merupakan salah satu teknik utama dalam metode NDT yang digunakan pada pengujian objek untuk mendeteksi cacat, retak, dan atau lubang dalam berbagai macam bahan yang bersifat konduktif. Prinsip *Eddy Current Testing* ini didasarkan pada adanya interaksi antara sumber medan magnet dengan objek uji. [7]

Arus yang dihasilkan oleh suatu fluks magnetik yang berubah dibuat dalam rangkaian (lilitan kumparan). Seringkali, fluks yang berubah itu membentuk arus yang bersirkulasi yang disebut arus pusar (*eddy current*). Oleh karena itu, dimanfaatkan untuk penelitian tugas akhir ini supaya arus dapat terdistribusi sempurna pada permukaan objek observasi sehingga distribusi resistivitas yang dihasilkan homogen.

Jika medan magnetik \vec{B} antara permukaan berubah terhadap waktu (ini akan terjadi jika arus dalam gulungan magnet berupa arus bolak-balik), fluks yang melalui objek akan berubah juga. Jika \vec{B} berubah, fluks akan berubah juga, dan akan terdapat GGL induksi di sekeliling objek. [6]

2.2 Aluminium

Aluminium adalah logam yang ringan dan cukup penting dalam kehidupan manusia. Aluminium merupakan unsur kimia golongan IIIA dalam sistem periodik unsur dengan nomor atom 13 dan berat atom 26,98 gram per mol (sma). Di dalam udara bebas, aluminium mudah teroksidasi membentuk lapisan tipis oksida (Al_2O_3) yang tahan terhadap korosi. Aluminium juga bersifat amfoter yang mampu bereaksi dengan larutan asam maupun basa. (Anton J. Hartono, 1992)

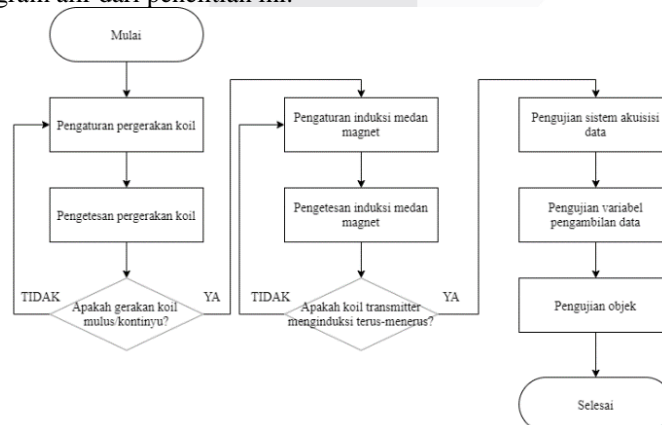
Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik, dan sifat-sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. (Surdia, T. 2005) Aluminium (Al) mempunyai massa atom 27 (hanya ada satu isotop natural), nomor atom 13, densitas 2,79g/cm, titik lebur 660,4 o C, dan titik didih 2467°C.

Aluminium adalah logam berwarna putih silver. Memiliki potensi redoks -1,66 V, bilangan oksidasi +3, dan jari-jari atom yang kecil yaitu 57pm untuk stabilitas dari senyawa aluminium. [7]

3 Metodologi Penelitian

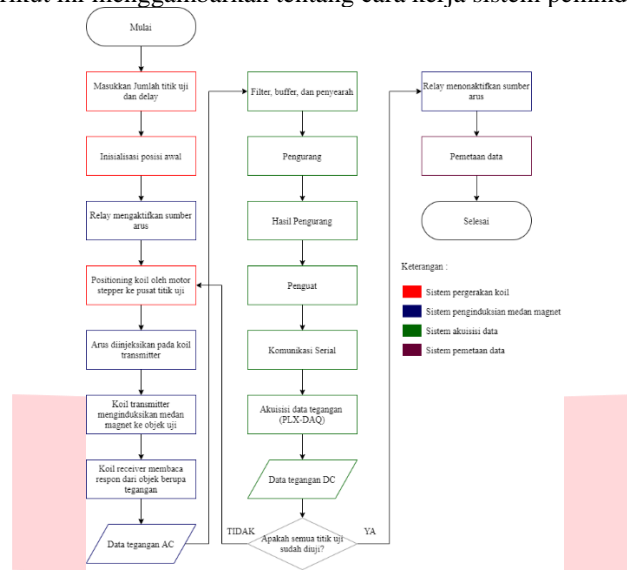
3.1 Gambaran Umum

Secara umum, terdapat empat bagian utama dalam perancangan sistem pemindaian ini, yaitu sistem pergerakan koil, sistem penginduksian medan magnet, sistem pengakuisisi data tegangan, dan sistem pemetaan data. Berikut ini adalah diagram alir dari penelitian ini.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

Diagram alir penelitian menjelaskan pekerjaan penulis pada tugas akhir ini. Pekerjaan penulis meliputi pengaturan pergerakan koil, pengaturan induksi medan magnet, pengujian system akuisisi data, dan pengujian variabel pengambilan data. Jika diagram alir diatas menggambarkan tentang tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan, diagram alir berikut ini menggambarkan tentang cara kerja sistem pemindai.

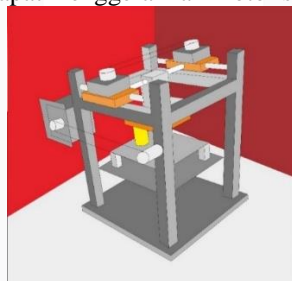


Gambar 3.2 Diagram alir cara kerja sistem

Pada Gambar 3.2 dijelaskan cara kerja sistem pemindai meliputi sistem pergerakan koil, sistem penginduksian medan magnet, dan sistem pemetaan data.

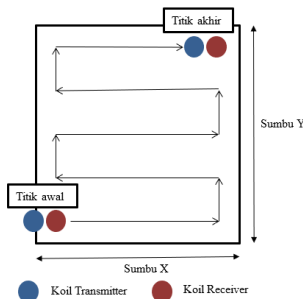
3.2 Sistem Pemindaian dan Pergerakan Koil

Sistem pemindaian merupakan rancang bangun mekanik yang berfungsi sebagai penggerak koil. Sistem pemindaian menggunakan sistem pada penelitian sebelumnya ini secara satu per satu menginspeksi pada titik pengujian, apakah terdapat anomali atau tidak. Agar dapat menguji semua titik uji dengan otomatis, perlu melakukan perpindahan posisi koil. Agar dapat menggerakkan koil tersebut, dibutuhkan motor stepper beserta rangkaian driver motor stepper untuk mengontrol pergerakan motor steppernya. Motor driver akan mengolah sinyal keluaran dari mikrokontroler agar dapat menggerakkan motor stepper sesuai kebutuhan.



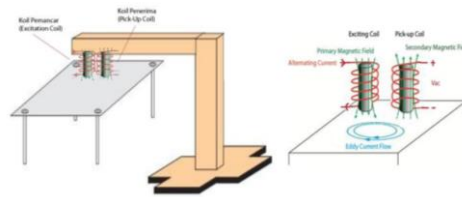
Gambar 3.3 Alat Pemindai

Dalam penelitian ini, untuk menggerakkan koil menggunakan motor stepper. Pergerakan koil dibatasi dalam bidang uji 10cm x 10cm. Ukuran diameter masing-masing koilnya adalah 1 cm. Pada objek uji, terbagi menjadi beberapa bagian kerja sebagai berikut.



Gambar 3.4 Ilustrasi alur pergerakan koil

3.3 Konfigurasi Koil



Gambar 3.5 Konfigurasi koil

Pada konfigurasi koil yang ditunjukkan pada gambar 3.5 diatas terdapat dua buah koil yang digunakan yaitu koil transmiter dan koil receiver. Konfigurasi ini tidak menggunakan koil yang sama untuk menghasilkan arus eddy dan mengambil tegangan bidang sekunder. Koil transmiter dapat dirancang khusus untuk membuat aliran arus eddy. Koil receiver dibuat untuk menerima tegangan bidang sekunder dari arus eddy dengan cukup sensitif.

Untuk sistem penginduksian menggunakan koil transmiter. Kumparan dihubungkan pada sumber arus AC berupa *function generator* dengan nilai amplitude 10 Vpp dan frekuensi 50 KHz. Arus yang dihasilkan oleh function generator akan diinjeksikan pada koil transmiter. Sehingga akan menimbulkan medan magnet pada koil tersebut untuk kemudian diinduksikan pada objek uji.

Koil yang akan digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut.

Lilitan (N)	: 400 lilitan
Panjang koil	: 4 cm
Bahan koil	: Ferrit
Diameter Koil	: 1 cm
Jarak antar koil	: 5 mm
Jarak antar koil-plat	: 10 mm

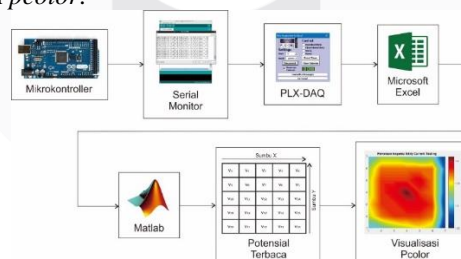
3.4 Sistem Akuisisi Data

Pada poin sebelumnya dijelaskan bahwa terdapat dua buah koil yang dipasang di alat ini. Pada bagian sistem pembacaan data tegangan, menggunakan koil penerima. Ketika diinduksikan medan magnet ke objek, maka akan timbul arus Eddy pada permukaan objek uji. Tugasnya koil penerima adalah membaca data tegangan yang terdapat pada permukaan objek tersebut, data tegangan yang terbaca akan diproses menggunakan mikrokontroler yang kemudian akan dianalisis data tegangan tersebut untuk menemukan anomali yang terdapat pada objek uji tersebut.

3.5 Pengambilan Data

Pada penelitian sebelumnya[3], untuk menampung data potensial dari beberapa titik pengujian menggunakan komunikasi antara Serial Monitor mikrokontroler ke dalam tabel pada Microsoft Excel kemudian divisualisasikan ke dalam Matlab R2013a. Untuk mengakuisisi data yang terbaca oleh mikrokontroler agar dapat dikonversi ke tabel di Microsoft Excel, maka diperlukan perangkat lunak PLX-DAQ.

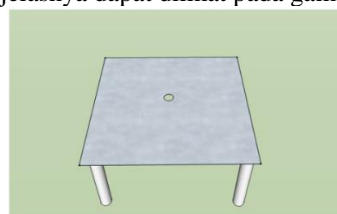
Berikut ini adalah cara menghubungkan antara Arduino dengan Microsoft Excel kemudian divisualisasikan ke dalam Matlab guna menghasilkan *pcolor*.



Gambar 3.6 Blok diagram pengambilan data

3.6 Metode Pengujian Pada Objek

Untuk melakukan pengujian sistem, digunakan plat aluminium berukuran 10cm x 10cm dengan tebal 1mm. Anomali yang terdapat pada objek uji berupa sebuah lubang berbentuk bulat dengan diameter yang berbeda-beda, yaitu 1mm, 5mm, dan 10mm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.7 Anomali Aluminium

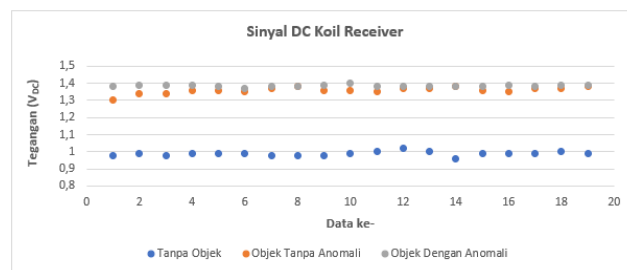
Agar sistem dapat mendeteksi adanya anomali pada bahan uji, maka perlu didefinisikan di awal metode pengujiannya. Adapun metode pengujian objek uji adalah sebagai berikut.

1. Melakukan rekonstruksi alat untuk penelitian tugas akhir ini.
2. Mengatur jumlah pembacaan, jumlah titik uji, dan *delay*.
3. Memposisikan koil pada posisi awal dengan koordinat A(0,0).
4. Sistem melakukan pemindaian pada objek sesuai jumlah titik ujinya.
5. Data tegangan dari setiap titik uji ditampilkan dan divisualisasikan.
6. Melakukan analisis letak dan ukuran anomali yang divisualisasikan oleh grafik *pcolor* dengan adanya perbedaan warna

4 Hasil dan Analisis

4.1 Pengujian Sistem Akuisisi Data

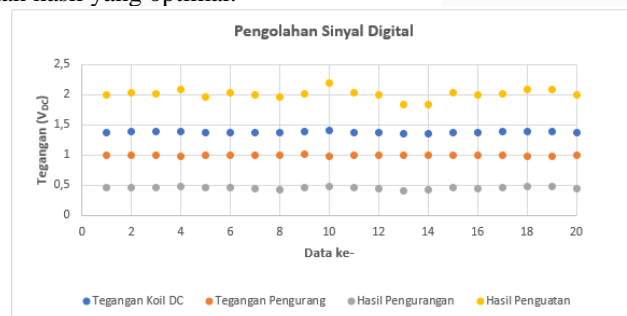
Koil receiver dapat membaca adanya tegangan walaupun tidak terdapat objek uji, sehingga perlu dilakukan pengondisian sinyal agar hasil yang didapatkan ketika tidak ada objek uji adalah nol. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai tegangan pengurang yang akan diterapkan dengan menggunakan input dari *function generator* sebesar 10 Vpp.



Gambar 4.1 Sinyal DC koil receiver

Dari gambar 4.1 diperoleh tegangan pengurang sebesar 1 V_{DC}, sehingga pada sistem pemindai tegangan diatur mendekati nilai 1 V_{DC}. Jadi setiap tegangan koil yang terbaca akan dikurangi tegangan pengurang.

Hasil dari tegangan DC koil receiver kemudian dikurangi oleh tegangan pengurang yang selanjutnya dikuatkan agar mendapatkan hasil yang optimal.



Gambar 4.2 Pengolahan sinyal digital

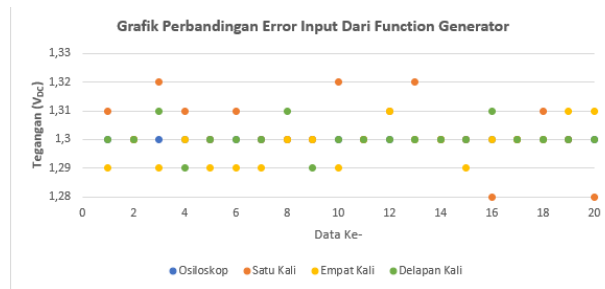
Dari gambar 4.2 diperoleh grafik yang menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara tegangan yang terbaca oleh mikrokontroler dan tegangan hasil penguatan. Tegangan hasil penguatan menunjukkan bentuk grafik dengan perubahan yang lebih ekstrim. Pada penelitian kali ini penulis menggunakan penguatan sebesar empat kali.

4.2 Pengujian Variabel Pengambilan Data

Penelitian berfokus pada proses pengambilan data pada sistem pemindai untuk mendeteksi anomali pada bahan non-ferromagnetik berbasis metode *eddy current testing*, kemudian penyajian data ditampilkan dalam grafik *pcolor*. Nilai yang diperoleh kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan mengubah variabel yang mempengaruhi hasil, yakni jumlah pembacaan, *delay*, dan resolusi.

4.2.1 Pengaruh Pengulangan Pembacaan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah pembacaan terhadap hasil visualisasi. Pengulangan pembacaan yang dimaksud adalah banyaknya pengulangan data yang dibaca oleh mikrokontroler pada satu titik selanjutnya dirata-rata. Inovasi yang dilakukan yaitu satu kali pembacaan, empat kali pembacaan, dan delapan kali pembacaan. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan nilai input dari *function generator* ke koil receiver dengan nilai 1,3 V_{DC}.



Gambar 4.3 Grafik Uji Perbandingan Pembacaan Dari *Function Generator*

Gambar 4.3 merupakan perbandingan hasil pembacaan satu kali, empat kali, dan delapan kali terhadap hasil tegangan pada koil receiver menggunakan osiloskop dengan input 10 Vpp pada koil receiver. Berdasarkan pengujian tersebut, dapat dihitung nilai error dengan persamaan.

$$\text{Percent Error (\%)} = \left(\frac{(\text{Nilai Acuan} - \text{Nilai Sensor})}{\text{Nilai Acuan}} \right) \quad (4.1)$$

Dari persamaan 4.1 diperoleh nilai error pembacaan satu kali sebesar $\pm 0,577\%$, pembacaan empat kali $\pm 0,500\%$, dan pembacaan delapan kali $\pm 0,192\%$. Selanjutnya, pengujian diterapkan pada plat aluminum berlubang 10mm. Pengujian dilakukan dengan mengubah jumlah pengulangan pembacaan pada objek.

4.2.2 Pengaruh Resolusi Jarak Antara Titik Uji

Pengujian diterapkan pada plat aluminum berlubang 10mm. Pengujian dilakukan dengan mengubah resolusi jarak pembacaan pada objek. Resolusi merupakan jarak antara titik uji yang dibaca oleh mikrokontroler, yaitu 5 cm, 2 cm, 1,25 cm dan 0,556 cm.

Tabel 4.1 Perbandingan pengaruh resolusi jarak titik pengujian

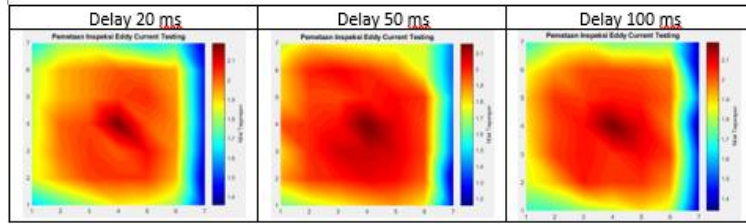
Resolusi Pengujian	Tanpa Shading	Dengan Shading
5 cm		
2 cm		
1,25 cm		
0,556 cm		

Hasil visualisasi disajikan dalam dua bentuk tanpa shading dan dengan shading. Shading berfungsi untuk memperhalus gradasi warna. Berdasarkan hasil visualisasi yang diperoleh, terlihat bahwa semakin kecil resolusi jarak antara titik uji, maka hasil visualisasi yang didapatkan semakin halus sehingga dapat menunjukkan letak anomali secara lebih presisi. Pada pengujian resolusi 2 cm, hasil visualisasi dapat merepresentasikan kondisi objek yang sebenarnya, dilihat dari perbedaan dan persebaran warna yang ditampilkan.

4.2.3 Pengaruh Delay

Pengujian ini dilakukan dengan mengubah variable *delay* yang diterapkan pada pemindaian plat aluminum berlubang 10 mm. Delay yang dimaksud adalah waktu perpindahan sensor ke titik berikutnya, yaitu 20 ms, 50 ms, dan 100 ms.

Tabel 4.2 Hasil visualisasi pengaruh delay

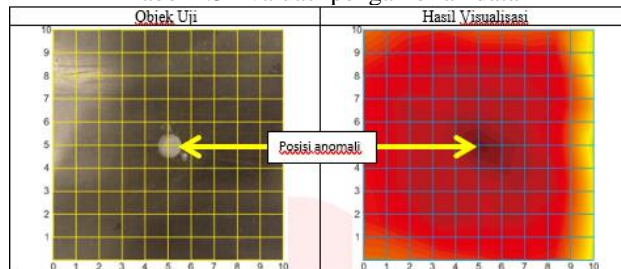


Dari hasil yang didapatkan, ternyata pengaruh *delay* tidak terlalu memberikan perbedaan yang signifikan terhadap hasil visualisasi objek. Pengujian dengan delay 20 ms, 50 ms, dan 100 ms menunjukkan hasil visualisasi yang relatif serupa.

4.3 Evaluasi Hasil Pengambilan Data

Untuk memastikan ketepatan hasil pengambilan data, maka dibutuhkan evaluasi untuk membandingkan hasil pengambilan data dengan objek yang sebenarnya. Perbandingan ini menampilkan garis-garis koordinat pada gambar hasil visualisasi dan gambar objek uji berukuran 10 cm x 10 cm dengan resolusi antara garis adalah 1 cm.

Tabel 4.3 Evaluasi pengambilan data

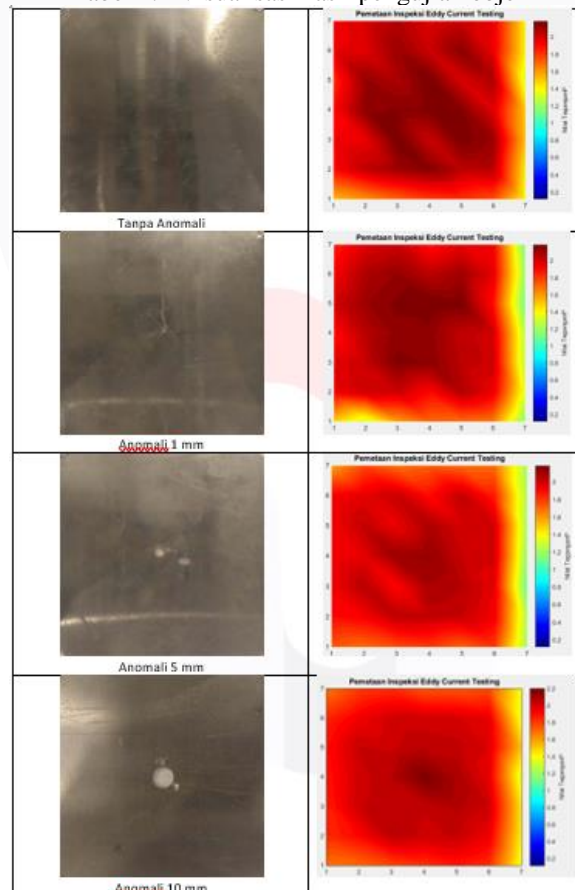


Tabel 4.3 menunjukkan kesesuaian antara titik koordinat anomali pada objek uji dan titik koordinat pada hasil visualisasi, yaitu pada titik (5,5).

4.4 Pengujian Objek

Setelah mendapatkan variabel yang optimal dalam proses pengambilan data, penulis melakukan pengujian pada objek dengan mengubah ukuran anomali.

Tabel 4.4 Visualisasi hasil pengujian objek



Berdasarkan tabel 4.4, sistem yang dirancang mampu membedakan objek tanpa anomali dan dengan anomali. Ukuran anomali yang terdeteksi dengan baik adalah 10 mm. Untuk ukuran anomali yang lebih kecil daripada itu masih belum terdeteksi dengan baik. Diperlukan penelitian lebih lanjut lagi untuk mendapatkan hasil yang optimal untuk mendeteksi anomali yang berukuran lebih kecil.

5 Simpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dengan tiga variabel, yakni jumlah pembacaan, resolusi, dan delay, diperoleh beberapa hasil sebagai berikut:

1. Sinyal pada koil dengan input sebesar 10 Vpp dari *function generator*, menghasilkan tegangan pada koil receiver dengan kondisi tanpa objek 1,84 Vpp, kondisi dengan objek tanpa anomali 2,76 Vpp, dan objek dengan anomali 2,88 Vpp dengan bentuk sinyal sinusoidal.
2. Tegangan pengurang sebesar 1 V_{DC} dan penguatan 4 kali agar menghasilkan sinyal yang optimal untuk pembacaan ADC.
3. Dengan penggunaan pembacaan berulang dan dirata-ratakan didapatkan error sebesar $\pm 0,192\%$ dari 8 kali pengulangan pembacaan. Pengujian dengan mengubah resolusi jarak antara titik uji menunjukkan hasil yang lebih optimal dengan jarak 2 cm antara titik uji. Variabel delay 20 ms, 50 ms dan 100 ms, ditemukan pengaruh yang tidak signifikan terhadap hasil visualisasi.
4. Sistem pemindai mendeteksi anomali dengan adanya perbedaan warna pada hasil visualisasi, warna merah pekat yang terkonsentrasi menjelaskan adanya anomali pada objek yang diuji. Sistem belum mampu mendeteksi anomali secara optimal dengan ukuran kurang dari 10 mm.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Mengadakan studi lanjutan mengenai rangkaian elektrik sistem pemindai.
2. Menggunakan bahan yang berbeda dalam pengujian.
3. Menggunakan metode yang berbeda dalam proses akuisisi data.
4. Menggunakan konstruksi koil yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. F. Sutarwan, "NDT(*Non-Destructive Testing*)," Tentang NDT, 05, 1995.
- [2]. J. Salach, "*Eddy Current Tomography for Nondestructive Testing*," vol. 8, no. 1, pp. 11–14, 2014.
- [3] S, Agung, "Optimalisasi Parameter Koil Pada Sistem Pemindai Untuk Mendeteksi Anomali Pada Bahan Non-Ferromagnetik Berbasis Metode *Eddy Current Testing*" Teknik Fisika, Universitas Telkom, Bandung, 2018
- [4] A. Anggi Pranasa, "perancangan dan realisasi sistem pemindaian pada metode *eddy current testing* (ect) untuk mendeteksi anomali pada bahan ferromagnetik," Teknik Fisika, Universitas Telkom, Bandung, 2016
- [5] F. Novitasari, "Studi Perbandingan Konfigurasi Koil Metoda Eddy Current Testing (ECT) pada Bahan Ferromagnetik dan Non-Ferromagnetik," Teknik Fisika, Universitas Telkom, Bandung, 2014.
- [6] Martin, J.G. Gil, J.G. Sánchez, E.V. (2011). *Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing*. Journal. Department of Signal Theory, Communications and Telematic Engineering. University of Valladolid (UVA), Spain.
- [7] MN. Muliyo, "Diktat Mata Kuliah Teknik Kimia" Sumatera Utara : Universitas Negeri Sumatera Utara. 2011
- [8] Martin, J.G. Gil, J.G. Sánchez, E.V. (2011). *Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing*. Journal. Department of Signal Theory, Communications and Telematic Engineering. University of Valladolid (UVA), Spain.
- [9] Broberg, Patrik & Sjö Dahl, Mikael & Runnemalm, Anna. (2015). Comparison of NDT-methods for automatic inspection of weld defects. *International Journal of Materials and Product Technology*.
- [10] M. Grenier, "Eddies and Currents," Eddyfi, May 2015. [Online]. Available: <http://www.eddyfi.com/ndt/basics-skin-depth/>. [Accessed 14 Januari 2019].