



Karakterisasi Sensor *Magnetic Induction Tomography* untuk Inspeksi Cacat Las pada Pelat Baja

Didied Haryono^{a,1}, Amalia Sholehah^b, Rahman Faiz Suwandana^c, Imamul Muttakin^d, Aldy Yana Saputra^e

^{a,b,c,e,f}Laboratorium Material Maju dan Tomografi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jalan Jenderal Sudirman km 03 Cilegon 42435, Indonesia

¹E-mail: didiedharyono@untirta.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 27 Mei 2024

Direvisi pada 00 Januari 00

Disetujui pada 00 Februari 00

Tersedia daring pada 00 Maret 00

Kata kunci:

Cacat las, desain sensor, impedansi, medan magnet, MIT

Keywords:

Weld defect, sensor design, impedance, magnetic field, MIT

ABSTRAK

Metode *Magnetic Induction Tomography* (MIT) mempunyai kelebihan seperti bersifat non-intrusive, contactless, aman dari radiasi dan relatif murah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa efektif desain sensor yang dikembangkan dalam menginspeksi cacat las serta menganalisis pola sinyal hasil inspeksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor tipe I menjadi sensor dengan karakterisasi yang paling optimal dilihat berdasarkan nilai gap impedansi baja dengan udara yang paling jauh dan sensitivitas dalam inspeksi baja cacat. Pada frekuensi 172 kHz nilai impedansi cacat porositas kedalaman 11 mm sebesar 34.587 mΩ, nilai impedansi cacat porositas kedalaman 7 mm sebesar 34.556 mΩ, dan nilai impedansi cacat porositas kedalaman 3 mm sebesar 34.518 mΩ. Hal tersebut menunjukkan pengukuran dengan sensor tipe I sudah dapat membedakan cacat porositas dengan variasi kedalaman dengan pengukuran optimum pada kedalaman 3 mm. Selain itu, sensor tipe I juga sudah sensitif untuk melihat perbedaan bentuk cacat yaitu cacat retak dan cacat porositas yang ditunjukkan dengan hasil nilai relatif impedansi pada frekuensi 172 kHz cacat retak menjadi nilai yang paling kecil dibandingkan dengan nilai relatif impedansi cacat porositas sebesar 0.222 mΩ. Sedangkan pada nilai relatif impedansi cacat porositas variasi kedalaman, nilai dari yang paling tinggi ke rendah adalah 0.356 mΩ pada kedalaman 11 mm, 0.325 mΩ pada kedalaman 7 mm, dan 0.287 mΩ pada kedalaman 3 mm.

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

ABSTRACT

The *Magnetic Induction Tomography* (MIT) method has advantages such as being non-intrusive, contactless, safe from radiation, and relatively inexpensive. This study aims to determine how effectively the developed sensor design can inspect welding defects and analyze the signal patterns obtained from the inspection. The results show that sensor type I became the sensor with the most optimal characterization based on the impedance gap value of steel with air being the farthest and its sensitivity in inspecting defective steel. At a frequency of 172 kHz, the impedance value of porosity defects at a depth of 11 mm is 34.587 mΩ, the impedance value of porosity defects at a depth of 7 mm is 34.556 mΩ, and the impedance value of porosity defects at a depth of 3 mm is 34.518 mΩ. This indicates that measurements with sensor type I can already distinguish porosity defects with varying depths, with optimum measurements at a depth of 3 mm. Furthermore, sensor type I is also sensitive enough to observe differences. In addition, the type I sensor is also sensitive enough to detect differences in defect shapes, namely crack defects and porosity defects, indicated by the relative impedance values at a frequency of 172 kHz, where the crack defect has the lowest value compared to the relative impedance of the porosity defect which is 0.222 mΩ. Meanwhile, for the relative impedance of the porosity defect at varying depths, the values from highest to lowest are 0.356 mΩ at a depth of 11 mm, 0.325 mΩ at a depth of 7 mm, and 0.287 mΩ at a depth of 3 mm.



1. Latar Belakang

Salah satu teknik alternatif yang sedang dikembangkan untuk aplikasi pengujian non-destruktif adalah *Magnetic Induction Tomography* (MIT) [1]. Sistem MIT umumnya terdiri dari kumparan yang bertindak sebagai kumparan pemancar dan penerima. Selain itu, sistem MIT mampu menghasilkan citra pada objek-objek yang memiliki nilai konduktivitas yang tinggi seperti objek-objek logam sehingga sangat potensial untuk dimanfaatkan pada dunia industri terutama pada industri manufaktur. Penggunaan metode MIT sebagai pengujian tidak merusak dengan teknik pencitraan memiliki keunggulan seperti tidak memerlukan kontak langsung dengan sampel, objek atau material yang akan diinspeksi, bersifat non-destruktif, tidak ada radiasi dan biaya yang dikeluarkan untuk pemeriksaan cacat relatif rendah serta sistem MIT ini dapat dilakukan secara *real time* [2]. Berdasarkan keunggulan dan kemampuan MIT maka metode ini sesuai untuk dijadikan alat inspeksi cacat las dan perlu dilakukan pengembangan lanjutan. Dalam penelitian ini, karakterisasi sensor kumparan induksi magnetik dilakukan pada beberapa desain sensor yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja desain sensor dalam mengukur beberapa objek secara akurat, terutama dalam membedakan baja normal dan baja cacat.

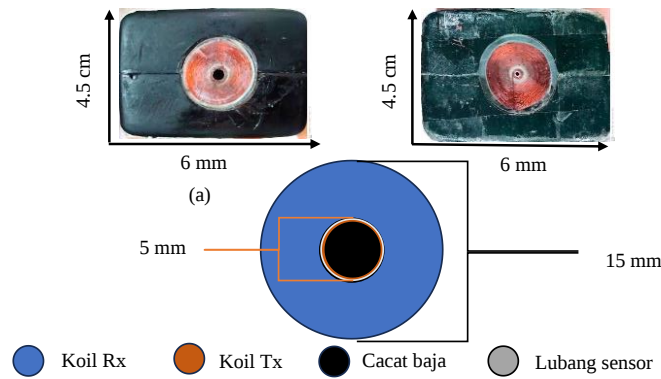
2. Metode Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa efektif desain sensor yang dikembangkan dalam menginspeksi cacat las serta menganalisis pola sinyal hasil inspeksi. Pada percobaan ini, objek yang diukur adalah udara, baja normal, dan baja cacat dengan kedalaman lubang 3, 7, dan 11 mm. Dalam percobaan yang dilakukan adalah dengan menggunakan 3 jenis desain sensor induksi magnetik dengan spesifikasi atau parameter masing-masing sensor seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan desain setiap sensor ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.

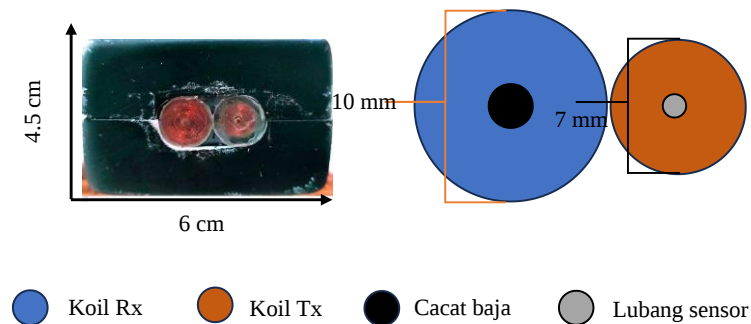
Rangkaian percobaan dapat dilihat pada Gambar 3. Sensor yang digunakan terdiri dari dua buah kumparan, yang satu berfungsi sebagai kumparan pemancar dan yang satu lagi sebagai kumparan penerima. Kumparan dihubungkan ke LibreVNA yang terpasang dalam WELINS serta sudah terkoneksi dengan *software spyder*, pengaturan pada *software spyder* diatur pada frekuensi awal 100 kHz dan frekuensi akhirnya 500 kHz (*point*: 101), mengatur IFBW sebesar 1 kHz, level sebesar -1, dan *average* sebesar 8. Sinyal atau hasil *output* yang diperoleh dari WELINS adalah bilangan numerik berupa *dut.real* dan *dut.image*.

Tabel 1. Parameter Sensor

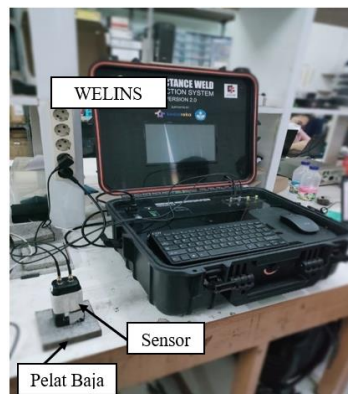
Parameter	Tipe I	Tipe II	Tipe III
Jumlah lilitan Tx (Lilitan)	115	115	750
Jumlah lilitan Rx (Lilitan)	1150	1150	1500
Diameter Tx (mm)	5	5	7
Diameter Rx (mm)	15	15	10
Diameter lubang Tx (mm)	3	1	1
Diameter lubang Rx (mm)	3	1	1



Gambar 1. Desain sensor; (a) tipe I dan (b) tipe II



Gambar 2. Desain sensor tipe III



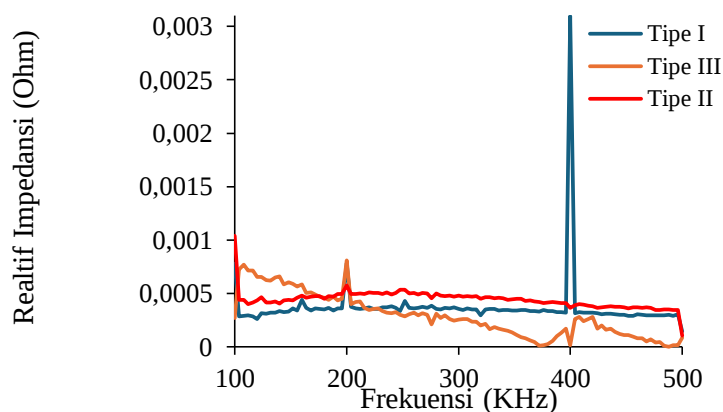
Gambar 3. Rangkain sistem MIT



3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 4 menunjukkan sensor tipe III yang ditunjukkan dengan garis berwarna oranye terlihat pada rentang frekuensi 100 kHz – 170 kHz memiliki nilai gap impedansi paling besar dibandingkan dengan kedua sensor yang lain. Namun setelah frekuensi 232 kHz hingga frekuensi 500 kHz nilai gap impedansi sensor tipe ini menjadi nilai gap impedansi yang paling kecil dibandingkan dengan nilai gap impedansi sensor yang lain. Berdasarkan hasil tersebut sensor tipe III dapat dikatakan belum optimal. Kemudian pada sensor tipe II dengan garis berwarna merah menunjukkan nilai gap impedansi yang konsisten dari frekuensi 100 kHz – 500 kHz. Selain itu dari frekuensi 200 kHz – 500 kHz nilai gap impedansi pada sensor tipe ini memiliki nilai paling besar dibandingkan dengan sensor dua lainnya, dari hasil tersebut sensor tipe ini dapat dikatakan optimal. Kemudian, untuk hasil sensor tipe I dengan garis berwarna biru menunjukkan secara keseluruhan dari rentang frekuensi 100 kHz – 500 kHz nilai gap impedansi terlihat konsisten sehingga sensor tipe I juga dianggap optimal. Dari hasil yang diperoleh dapat ditentukan sensor tipe I yang menjadi sensor optimum digunakan untuk mendeteksi baja cacat. Sensor dapat dikatakan optimal tidak hanya ditinjau dari seberapa besar nilai gap impedansi baja normal dan udara, namun ditinjau juga dari sensitivitas sensor dalam menginspeksi cacat ditandai dengan posisi sinyal nilai impedansi baja cacat berada di antara nilai impedansi baja dan udara serta nilai impedansi cacat yang diinspeksi berurutan.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, sensor yang paling optimal adalah sensor tipe I dibandingkan dengan sensor tipe II. Hal tersebut bisa dilihat dari grafik hasil inspeksi pada baja cacat menggunakan sensor tipe II yang ditunjukkan pada Gambar 7. Hasil yang ditunjukkan semua nilai impedansi baja cacat berada diantara nilai impedansi baja normal dan udara. Namun, urutan nilai impedansi cacat porositas dengan variasi kedalaman dan cacat retak tidak berurutan, yang mana seharusnya nilai impedansi cacat retak berada paling bawah. Kemudian untuk nilai impedansi cacat porositas seharusnya berurutan sesuai dengan masing-masing kedalaman cacat. Berbeda dengan hasil inspeksi pada baja cacat pada sensor I yang dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil yang ditunjukkan adalah nilai impedansi baja cacat berada diantara nilai impedansi baja normal dan udara, dan juga nilai impedansi cacat-cacat yang didapatkan sudah berurutan.

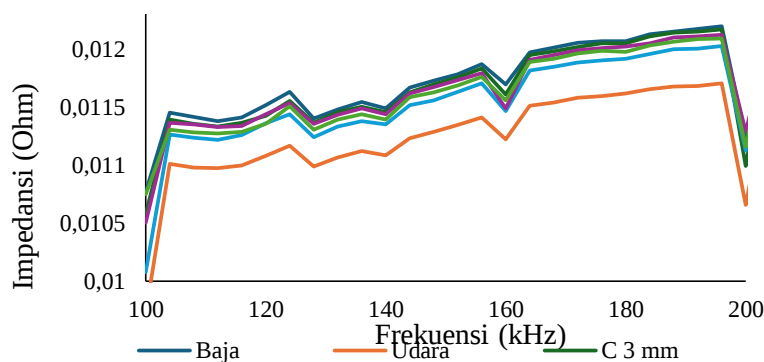


Gambar 4. Selisih nilai impedansi normalisasi baja normal dengan udara

Selain itu, hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 5. juga terlihat bahwa sensor dengan tipe III (dua kumparan dua sumbu) memiliki sinyal yang kurang stabil artinya sinyal yang dihasilkan sensor tipe III ini kurang sensitif dan sinyal yang kurang kuat. Berbeda dengan hasil yang diperoleh oleh sensor tipe I dan II. Sinyal yang dihasilkan oleh



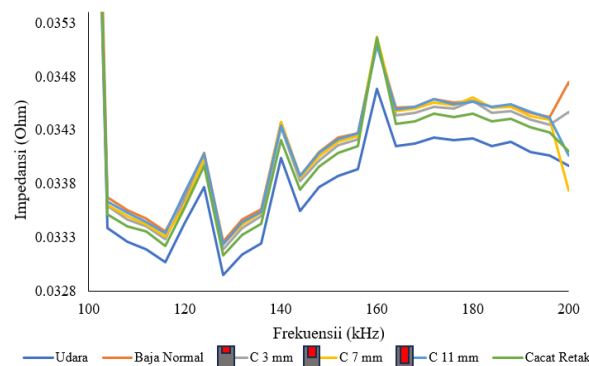
kedua sensor tersebut tidak mengalami penurunan dan cenderung konsisten artinya kedua sensor tersebut memiliki sinyal yang kuat dan lebih sensitif. Perbedaan yang terjadi diantara sensor-sensor tersebut disebabkan oleh adanya jarak antara koil *transmitter* dan koil *receiver*. Pada sensor tipe III terdapat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



Gambar 5. Hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara pada sensor III

Analisis Hasil Eksperimen Inspeksi Cacat dengan Sensor Optimal

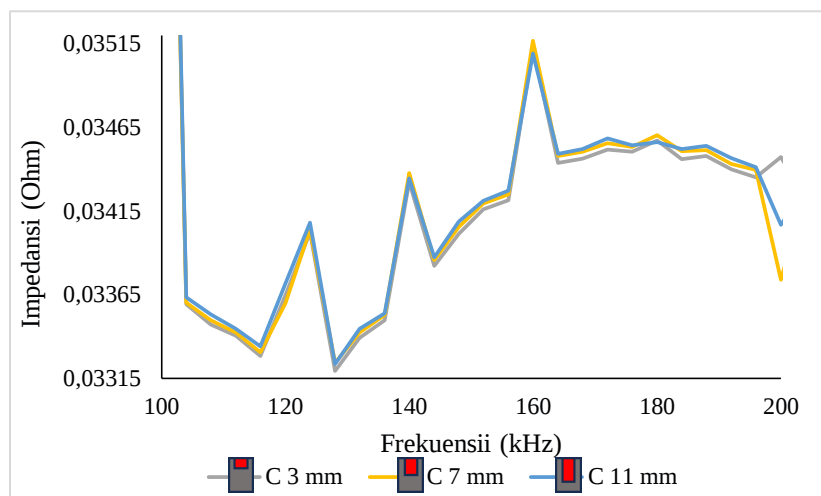
Hasil inspeksi dari sensor optimum terlihat pada Gambar 6 yang menunjukkan secara keseluruhan nilai impedansi baja normal merupakan nilai yang tertinggi dan hal itu sesuai dengan nilai impedansi baja normal dijadikan nilai batas atas. Hal yang sama pada nilai impedansi udara menjadi nilai batas bawah yang terbukti pada hasil grafik tersebut nilai impedansi udara menjadi yang paling kecil. Kemudian pada Gambar 6 juga menunjukkan nilai impedansi cacat retak berada lebih dekat dengan sinyal nilai impedansi udara hal tersebut disebabkan karena pada saat inspeksi persentase objek udara pada cacat retak lebih banyak dibandingkan dengan persentase udara pada cacat porositas.



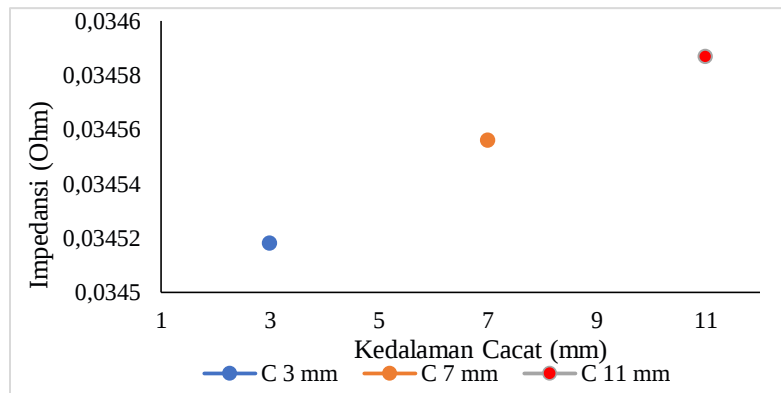
Gambar 6. Hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara



Gambar 7 merupakan hasil inspeksi pada variasi kedalaman cacat porositas menggunakan sensor optimal. Hasil menunjukkan bahwa nilai impedansi cacat porositas kedalaman 11 mm secara keseluruhan menjadi yang paling tinggi dibandingkan cacat porositas kedalaman lainnya. Nilai impedansi cacat kedalaman 7 mm berada diantara kedalaman cacat porositas lain, serta untuk nilai impedansi cacat porositas kedalaman 3 mm menjadi paling kecil. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 yang merupakan grafik variasi kedalaman cacat porositas pada frekuensi 172 kHz. Pada gambar tersebut di frekuensi 172 kHz, nilai impedansi cacat porositas kedalaman 11 mm sebesar 34.587 mΩ, nilai impedansi cacat porositas kedalaman 7 mm sebesar 34.556 mΩ, dan nilai impedansi cacat porositas kedalaman 3 mm sebesar 34.518 mΩ. Hasil tersebut menunjukkan pengukuran cacat porositas kedalaman 11 mm memiliki nilai impedansi mendekati nilai impedansi baja normal dan pengukuran cacat porositas kedalaman 3 mm mempunyai nilai impedansi yang paling jauh dengan nilai impedansi baja. Serta dapat disimpulkan bahwa pengukuran dengan sensor tipe I sudah dapat membedakan cacat porositas dengan variasi kedalaman dengan pengukuran optimum pada kedalaman 3 mm artinya sensor tipe I sudah sensitif. Akan tetapi, belum maksimal dalam menginspeksi cacat kedalaman 11 mm, karena arus eddy yang menginspeksi kedalaman tersebut kurang maksimal. Salah satu penyebab hal tersebut terjadi adalah geometri sensor, karena dikatakan jika semakin kecil geometri koil, maka semakin tinggi sensitivitas yang diperoleh. Dengan kata lain, agar dapat mendeteksi cacat kecil, ukuran koil juga harus diperkecil [6]. Berbeda dengan ukuran koil pada sensor tipe I ini yang memiliki diameter koil 15 mm yang ukuran koil melebihi ukuran cacat yang diinspeksi yaitu ukuran cacat 5 mm



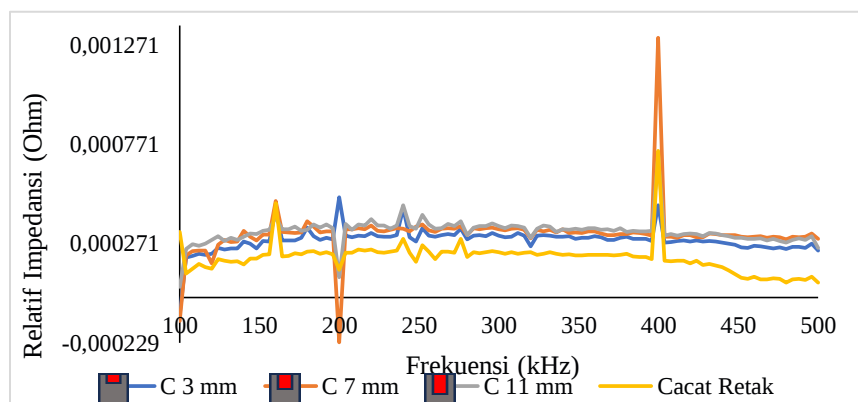
Gambar 7. Hasil inspeksi pada variasi kedalaman cacat porositas



Gambar 8. Grafik variasi kedalaman cacat porositas pada frekuensi 172 kHz

Analisis Nilai Relatif Impedansi pada Variasi Kedalaman dan Bentuk Cacat

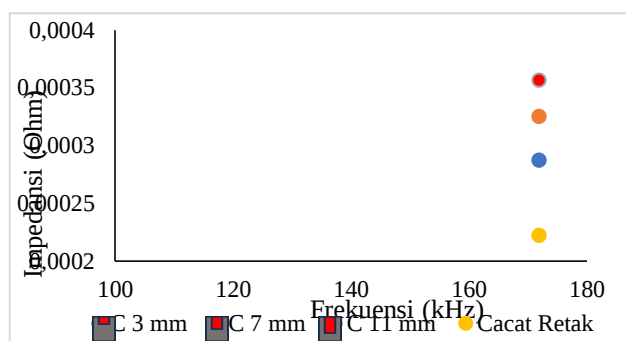
Gambar 9 merupakan grafik relatif impedansi objek uji cacat porositas dengan kedalaman yang berbeda dan cacat retak. Secara keseluruhan nilai impedansi semua kondisi baja cacat dari frekuensi 100 kHz hingga 500 kHz menunjukkan nilai impedansi yang berurutan. Untuk lebih jelas melihat perbedaan nilai impedansi yang diperoleh maka dapat dilihat Gambar 10. Gambar 10 menunjukkan grafik pada frekuensi 172 kHz cacat retak memiliki nilai relatif impedansi yang paling kecil sebesar 0.222 mΩ dibandingkan dengan nilai relatif impedansi cacat porositas. Sedangkan pada nilai relatif impedansi cacat porositas variasi kedalaman, cacat porositas kedalaman 3 mm memiliki nilai relatif impedansi paling kecil diantara cacat porositas kedalaman lainnya yaitu sebesar 0.287 mΩ. Sedangkan cacat porositas kedalaman 7 mm berada diantara kedalaman 3 mm dengan 11 mm dengan nilai relatif impedansi 0.325 mΩ, dan cacat porositas kedalaman 11 mm memiliki nilai relatif impedansi yang paling tinggi dengan nilai sebesar 0.356 mΩ. Berdasarkan hal itu, pengukuran pada cacat porositas kedalaman 3 mm terukur memiliki nilai impedansi udara yang lebih besar dibuktikan dengan nilai relatif impedansi menjadi paling kecil artinya pengukuran maksimal terjadi pada kedalaman tersebut. Selain itu terdapat hubungan juga dengan distribusi dan intensitas arus eddy pada material dengan konduktivitas yang relatif tinggi, arus eddy yang kuat dihasilkan di permukaan. Arus eddy yang kuat membentuk medan elektromagnetik sekunder yang kuat yang berlawanan dengan yang diterapkan bidang utama.



Gambar 9. Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat



Pada material yang sangat konduktif, arus eddy yang kuat terbentuk di dekat permukaan, tetapi kekuatan berkurang dengan cepat dengan kedalaman [7]. Nilai relatif impedansi cacat retak pada sensor tipe I menunjukkan yang paling bawah dari nilai relatif impedansi cacat lain. Hal tersebut dapat dikatakan bahwa sensor tipe I dapat membedakan cacat retak. Hal tersebut disebabkan pada saat inspeksi cacat retak, udara yang terukur lebih banyak dibandingkan dengan cacat porositas sehingga nilai impedansi cacat retak paling kecil. Sensor ini juga sudah dapat membedakan cacat porositas dengan kedalaman 3 mm, 7 mm dan 11 mm walaupun sedikit berimpit. Harus ada perbedaan nilai relatif impedansi pada pengukuran cacat porositas maupun cacat retak dengan objek uji baja normal sebagai material dasar disebabkan ketika sensor melewati area pelat baja yang terdapat diskontinuitas, arus eddy mengalami perubahan aliran atau terganggu, sehingga besar medan magnet sekunder yang dihasilkan arus eddy juga mengalami perubahan. Adanya rongga pada baja dapat mengubah nilai konduktivitas dan permeabilitas baja. Hal ini menyebabkan medan magnet pada koil *receiver* ketika melewati area diskontinuitas mengalami perubahan dan menyebabkan terjadinya perbedaan pada besaran yang terukur.



Gambar 10. Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat pada frekuensi 172 kHz

4. Kesimpulan

Sensor tipe I sudah sensitif dalam membedakan bentuk cacat yaitu cacat retak dan cacat porositas yang ditunjukkan dengan hasil nilai relatif impedansi pada frekuensi 172 kHz cacat retak menjadi nilai yang paling kecil dibandingkan dengan nilai relatif impedansi cacat porositas sebesar 0.222 mΩ. Sedangkan pada nilai relatif impedansi cacat porositas variasi kedalaman, nilai dari yang paling tinggi ke rendah adalah 0.356 mΩ pada kedalaman 11 mm, 0.325 mΩ pada kedalaman 7 mm, dan 0.287 mΩ pada kedalaman 3 mm. Pada frekuensi 172 kHz nilai impedansi cacat porositas kedalaman 11 mm sebesar 34.587 mΩ, nilai impedansi cacat porositas kedalaman 7 mm sebesar 34.556 mΩ, dan nilai impedansi cacat porositas kedalaman 3 mm sebesar 34.518 mΩ. Hasil tersebut menunjukkan pengukuran dengan sensor tipe I sudah dapat membedakan cacat porositas dengan variasi kedalaman dengan pengukuran optimum pada kedalaman 3 mm.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Warsito P. Taruno atas masukan dan diizinkannya pemakaian laboratorium di PT Ctech Lab Edwar Teknologi dan Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi atas pendanaan melalui program Matching Fund tahun 2023 dengan nomor kontrak 79/E1/HK.02.02/2023.



FURNACE: JURNAL METALURGI DAN MATERIAL

Homepage jurnal: <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jf>



Daftar Pustaka

- [1] U. Aschemeier (Ed.).2015. *Welding Inspection Handbook, 4th ed.*, American Welding Society, USA.
- [2] Sutisna, D. et al. (2014) 'Flaw detection in welded metal using magnetic induction tomography', *Advanced Materials Research*, 896, pp. 722–725. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.896.722>
- [3] Wilkinson, H. Y. W. a. A. J., 2011. Design of A Sensor Coil and Measurement Electronics for Magnetic Induction Tomography. pp. vol. 60, no. 12, pp. 3853–3859.
- [4] Igney, C.H. et al. (2005) 'Design and performance of a planar-array MIT system with normal sensor alignment', *Physiological Measurement*, 26(2). Available at: <https://doi.org/10.1088/0967-3334/26/2/025>.
- [5] Griffiths, H. (2001) 'Magnetic induction tomography', *Electrical Impedance Tomography: ethods, History and Applications*, 1126, pp. 309–337. Available at: <https://doi.org/10.1201/9780429399886-16>.
- [6] Helier, C. (2003) *Handbook Of Nondestructive Evaluation*. Second Edi. USA: McGraw-Hill Companies.
- [7] Prayuda, A.S.T. and Putra, W.H.A., 2021. Analisis Kemampuan Pendeteksian Pengujian Eddy Current terhadap Crack Toe pada Sambungan Tee Material Aluminium 5083 yang Dilapisi Non-Conductive Coating dengan Variasi Kedalaman dan Panjang Crack. *Jurnal Teknik ITS*, 10(1), ppG14-G21.