

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

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

4.1 Karakterisasi Sinyal *Output* pada Jenis Desain Sensor

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

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

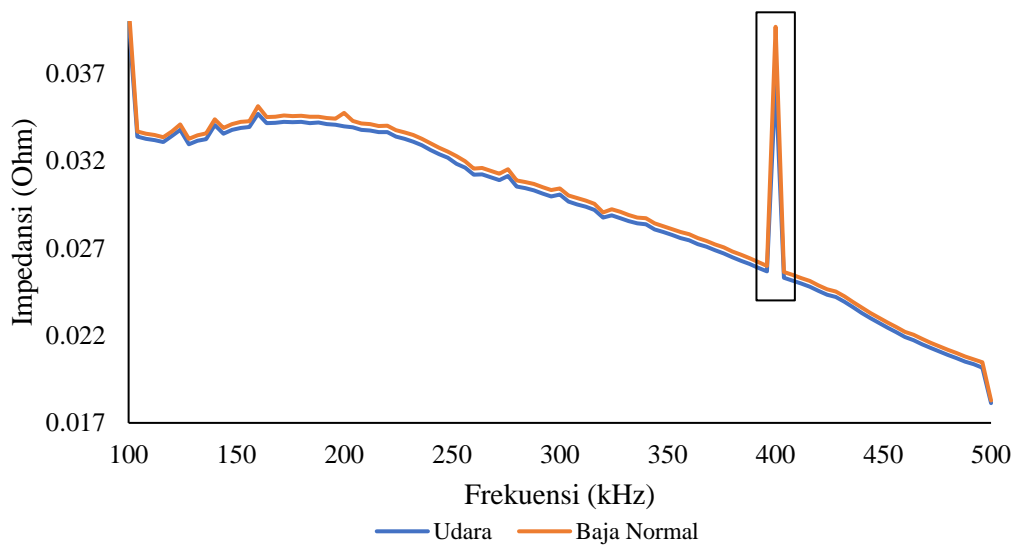
$$Z = \sqrt{\left(\rho \frac{L}{A}\right)^2 + (X_L - X_C)^2} \dots\dots\dots(4.1)$$

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

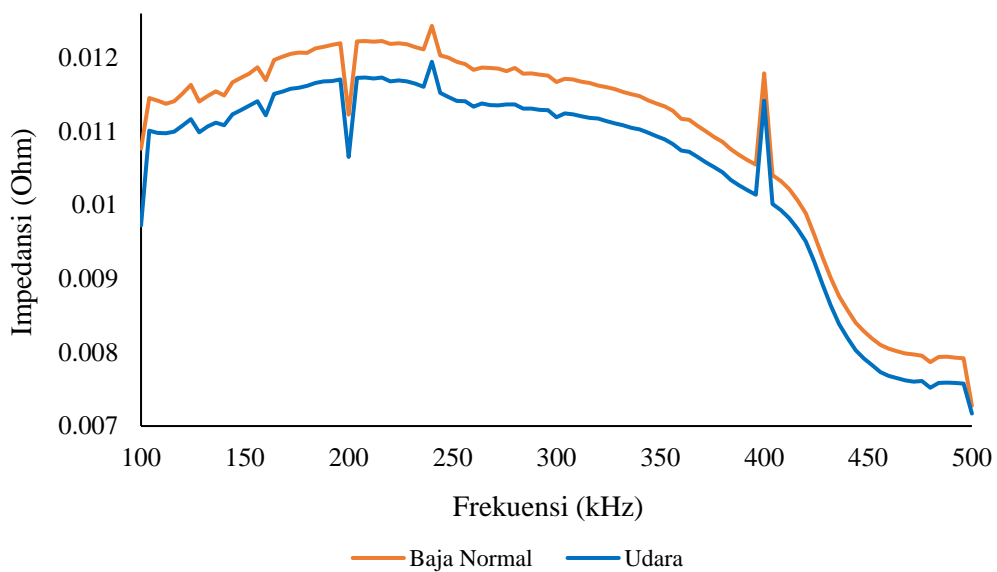
induksi magnetik yang dihasilkan lebih besar. Berdasarkan hal tersebut, maka hubungan permeabilitas dengan impedansi adalah berbanding lurus semakin besar suatu material uji mempunyai permeabilitas tinggi maka akan semakin besar juga nilai impedansi yang terukur. Perbedaan nilai impedansi udara yang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

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

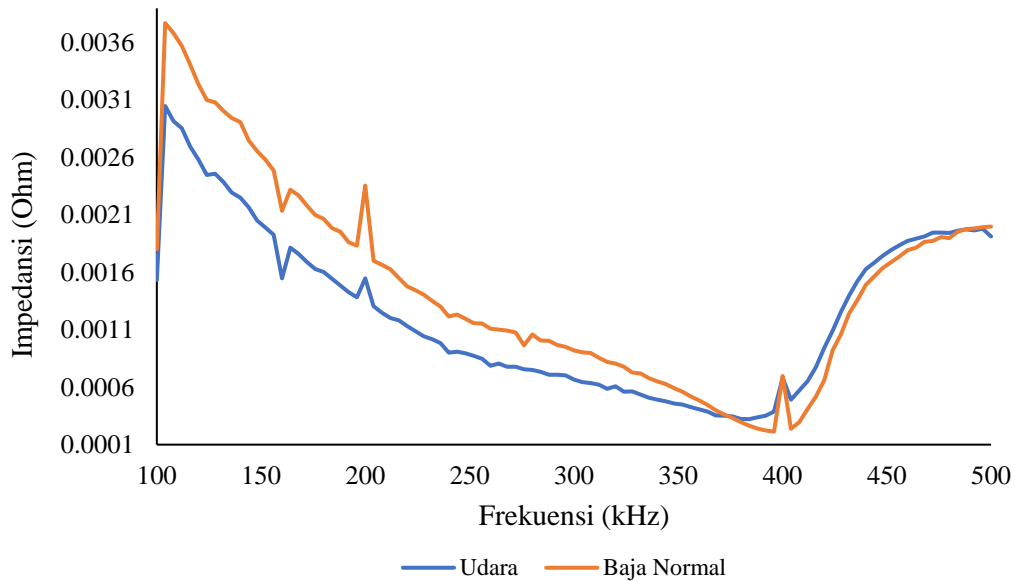
Dalam sistem tenaga listrik dikenal dengan beban linier. Beban linier memiliki karakteristik unik, yaitu arus yang dialirkannya sepenuhnya mengikuti perubahan tegangan dan impedansi. Fenomena yang paling umum dari harmonisa ini adalah bentuk gelombang arus dan tegangan terdistorsi, serta menciptakan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



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

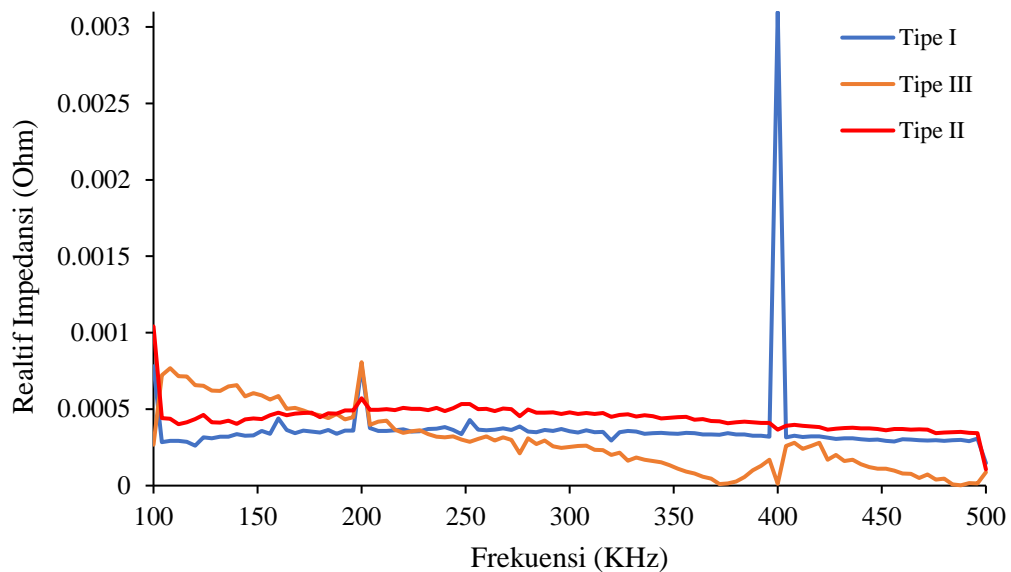


Gambar 4.2 Sinyal *output* sensor tipe II pada objek udara dan baja normal



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

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



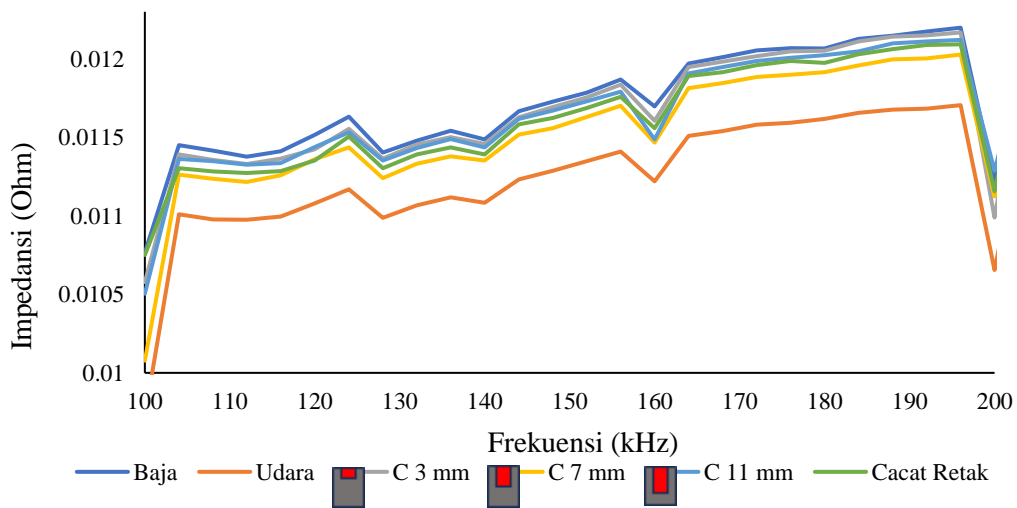
Gambar 4.4 Selisih nilai impedansi normalisasi baja normal dengan udara

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

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

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

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

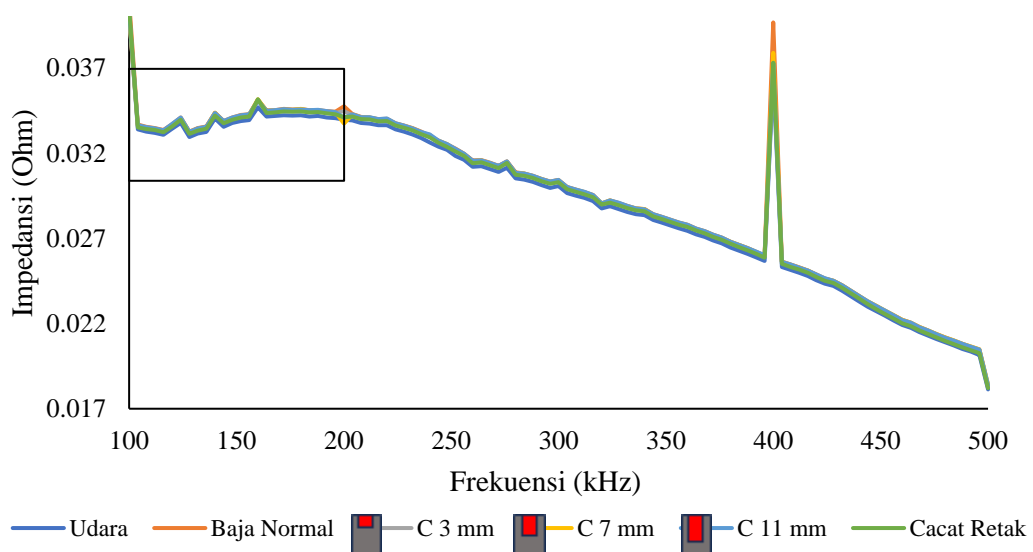


Gambar 4.5 Hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara pada sensor II

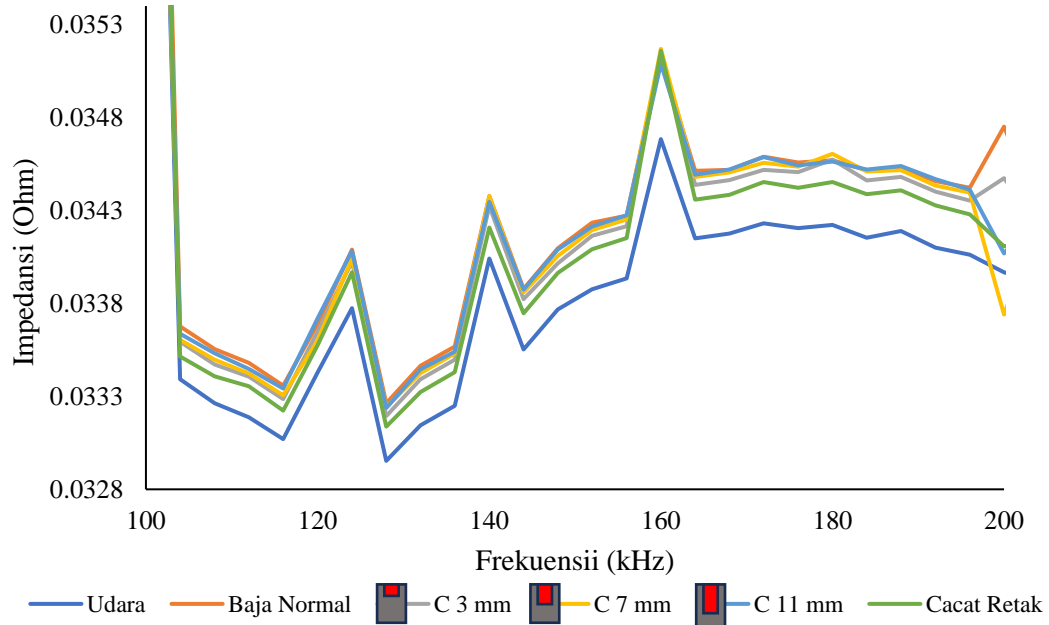
4.2 Analisis Hasil Eksperimen Inspeksi Cacat dengan Sensor Optimal

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

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



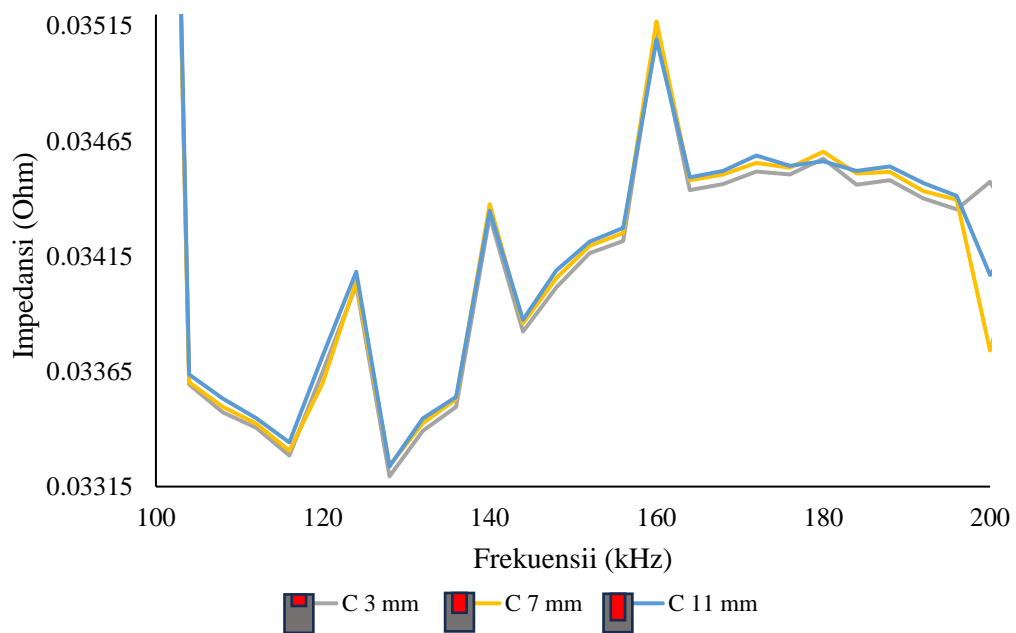
Gambar 4.6 Hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara



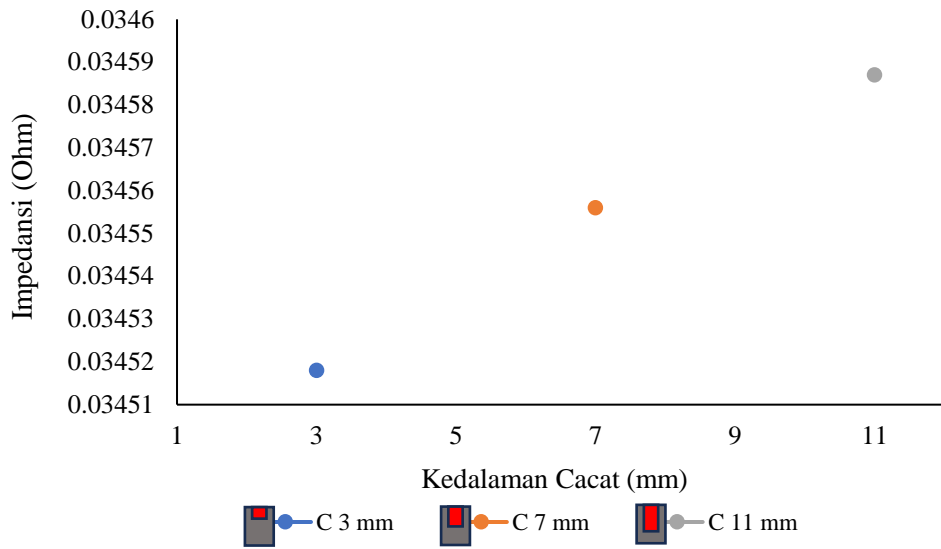
Gambar 4.7 *Zoom out* hasil inspeksi objek uji baja normal, baja cacat, dan udara

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

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



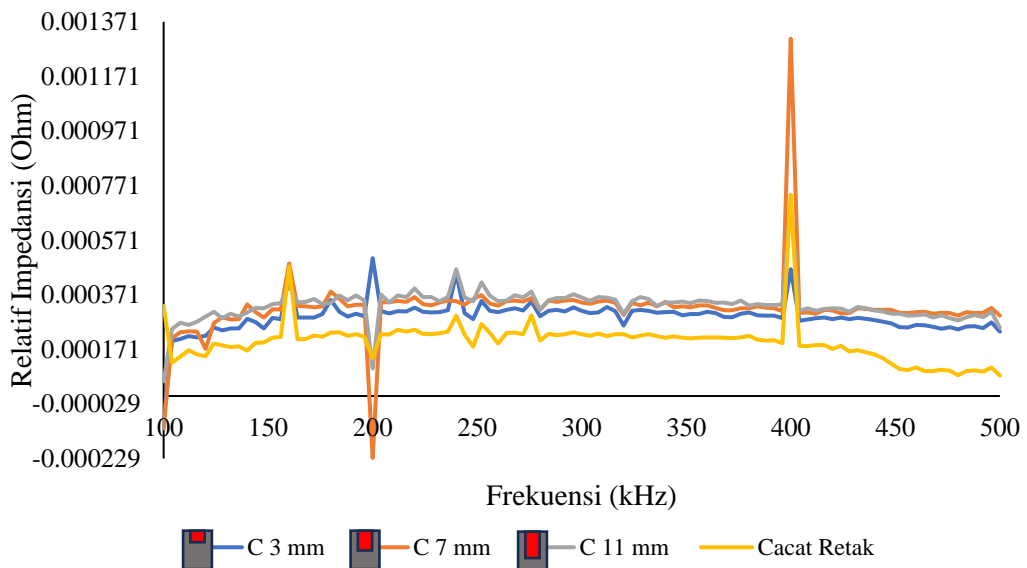
Gambar 4.8 *Zoom out* hasil inspeksi pada variasi kedalaman cacat porositas



Gambar 4.9 Grafik variasi kedalaman cacat porositas pada frekuensi 172 kHz

4.3 Analisis Nilai Relatif Impedansi pada Variasi Kedalaman dan Bentuk

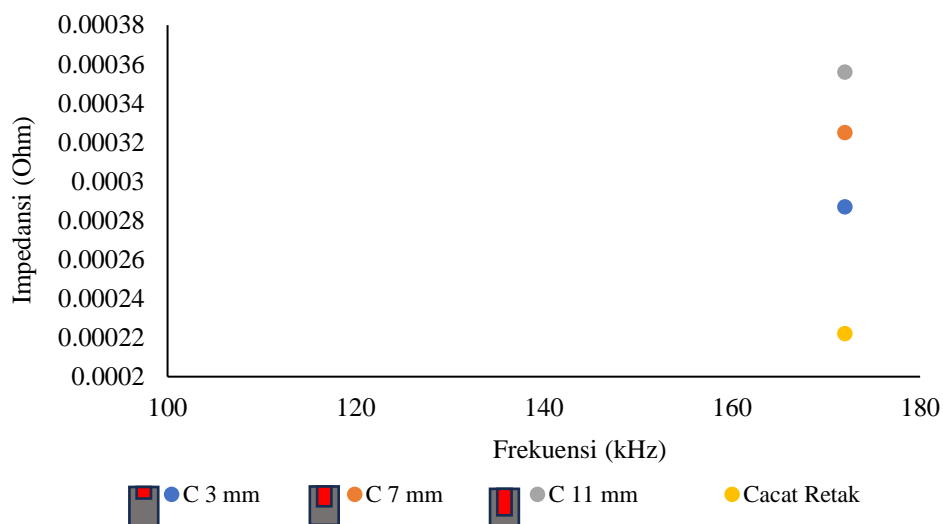
Cacat



Gambar 4.10 Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat

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

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

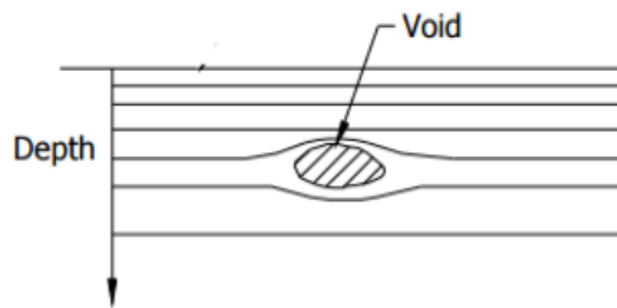


Gambar 4.11 Nilai relatif impedansi variasi kedalaman dan bentuk cacat pada frekuensi 172 kHz

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

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

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



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