

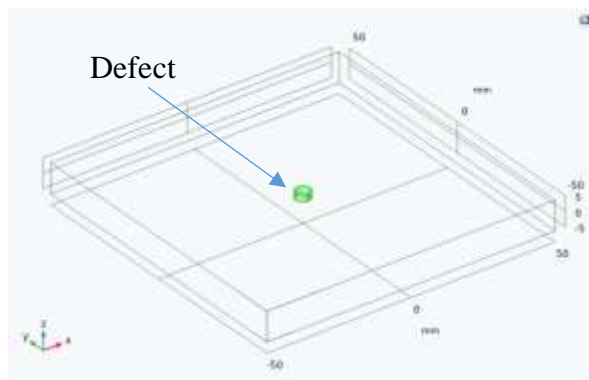
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Geometri Simulasi

Simulasi pemodelan sensor MIT untuk mendeteksi cacat pada pelat baja SS400 dilakukan menggunakan *software* simulasi *Multiphysics*. Cacat yang dimodelkan pada spesimen uji divariasikan ukurannya mulai dari 1 mm hingga 5 mm. Posisi cacat diletakkan di bawah permukaan dengan jarak 1 mm dan di bawah sensor MIT. Sensor MIT ini menggunakan sumber masukan berupa voltage sebesar 10 volt. Sensor MIT disimulasikan menggunakan frekuensi sebesar 10 kHz hingga 10 MHz, simulasi dilakukan pada rentang frekuensi tersebut dengan tujuan untuk menentukan frekuensi resonan.

Simulasi sensor MIT dilakukan untuk mengetahui parameter sensor yang terbaik untuk digunakan pada pengujian cacat. Sensor yang baik tidak hanya dapat mendeteksi cacat pada bagian permukaan saja, akan tetapi dapat mendeteksi cacat pada bagian bawah permukaan juga. Parameter sensor yang digunakan pada pengujian kali ini, sebelumnya sudah diuji untuk mendeteksi cacat pada bagian permukaan. Dalam penelitian ini dilakukan pengembangan untuk pengujian deteksi cacat pada bagian bawah permukaan spesimen uji menggunakan *software* simulasi *Multiphysics* (Comsol 6.2). Ilustrasi dari pemodelan cacat yang terletak pada spesimen benda uji ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Ilustrasi Cacat pada Spesimen Uji

Berdasarkan gambar 4.1 model cacat diletakkan pada bagian tengah dan di bawah permukaan spesimen uji, peletakkan cacat didalam permukaan merupakan salah satu upaya untuk membuktikan sensor MIT bahwa dapat mendeteksi cacat pada bagian dalam atau sumbu axial (z), tidak hanya bagian sumbu x dan y saja. Cacat yang dimodelkan dalam simulasi deteksi cacat ini bervariasi dari ukuran 0,5 mm hingga 3 mm. Cacat divariasikan agar dapat mengetahui bahwa sensor MIT juga dapat mendeteksi cacat dengan berbagai ukuran dan dibandingkan dengan hasil pengukuran yang tidak ada cacat sehingga diketahui perbedaannya.

Dalam simulasi sensor MIT ini memiliki prinsip kerja yang hampir sama dengan pengujian *nondestructive test eddy current testing*, yaitu *probe* dialiri arus listrik bolak-balik (AC), kemudian *probe* didekatkan kepada permukaan benda uji akan menghasilkan arus *eddy*, yang mana ketika terdapat cacat pada benda uji arus eddy yang akan terbentuk semakin luas dan jangkauannya semakin lebar sehingga mengakibatkan adanya perubahan nilai voltage lebih besar. Namun, terdapat perbedaan dalam simulasi sensor MIT dalam mendeteksi cacat buatan yang dimodelkan melalui software simulasi *Multiphysics*, yaitu voltage yang dihasilkan berdasarkan simulasi *magnetic field* atau distribusi persebaran medan magnet yang terjadi pada spesimen uji.

Hukum yang mendasari simulasi deteksi cacat menggunakan sensor MIT yaitu Hukum Faraday. Menurut Hukum Faraday, suatu tegangan diinduksikan pada suatu rangkaian konduktor jika konduktor tersebut terkena fluks magnet yang berubah terhadap waktu. Dalam simulasi sensor MIT ini Hukum Faraday diaplikasikan kepada komponen induktif seperti kumparan yang ada pada koil pemancar yang digunakan dalam rangkaian elektronik untuk menyimpan energi dalam medan magnet. Dalam hal ini koil pemancar yang digunakan yaitu koil jenis solenoid dengan jumlah kumparan 115 lilitan dan panjang lilitan sejauh 10 mm. Koil pemancar diberikan input tegangan agar bisa menginduksikan spesimen uji dan mendeteksi cacat pada spesimen uji. Tegangan yang diberikan divariasikan dengan tujuan mengetahui *voltage input* yang baik untuk mendeteksi cacat pada bagian bawah permukaan atau sumbu aksial (Z) spesimen uji. Variasi tegangan yang diberikan yaitu 10 Volt,

50 Volt dan 100 Volt. Selain itu juga dalam melakukan simulasi pada software *Multiphysics* diperlukan *electrical circuit*, yang mana dalam rangkaianannya terdapat komponen resistor dengan ukuran resistansi yang perlu ditentukan. Adapun ukuran resistansi yang digunakan yaitu 50 Ohm, 100 Ohm dan 1000 Ohm. Dalam rangkaian *electrical* terdapat 2 rangkaian yaitu rangkaian untuk koil pemancar dan rangkaian untuk koil penerima, besaran resistansi yang ditentukan dari masing-masing rangkaian yaitu 1:1 yang artinya ketika rangkaian koil pemancar menggunakan resistor dengan ukuran resistansi 100 Ohm, maka pada rangkaian koil penerima juga menggunakan resistor dengan ukuran resistansi 100 Ohm. Resistor dalam konfigurasi 1:1 dapat membantu menstabilkan tegangan dan arus di rangkaian pemancar dan penerima. Ini sangat penting untuk memastikan bahwa sinyal yang dikirim dan diterima memiliki amplitudo yang konsisten dan tidak terpengaruh oleh variasi dalam rangkaian.

4.2 Analisis Hasil Simulasi Frekuensi Optimal

Simulasi sensor MIT menggunakan software yang pertama dilakukan yaitu mengetahui bahwa sensor MIT secara optimal mendeteksi cacat pada frekuensi tertentu. Untuk mengetahui frekuensi yang optimal digunakan pada sensor MIT untuk mendeteksi cacat yaitu dengan cara melakukan simulasi sensor MIT yang diinduksikan tegangan, kemudian di dekatkan kepada spesimen uji yang berbahan *structural steel*. Simulasi sensor MIT untuk menentukan frekuensi optimal dilakukan dengan mensimulasikan rentang frekuensi dari 10 kHz hingga 1 GHz, dari rentang frekuensi yang ditentukan tersebut didapatkan data *voltage* Rx dan dicari titik maksimum atau frekuensi resonansi untuk sensor MIT ini. Dalam hal ini pada rangkaian listrik menggunakan resistor sebesar 50 Ohm, 100 Ohm dan 1000 Ohm. Data yang diperoleh dari hasil simulasi rentang frekuensi 10 kHz-1 GHz dapat dilihat pada tabel 4.1.

Berdasarkan data pada tabel 4.1 menunjukkan bahwa adanya perbedaan nilai coil voltage Rx di setiap frekuensi dan resistor yang berbeda. Pada frekuensi 10 Hz, tegangan koil terukur sebesar 193.484 mV. Ketika frekuensi

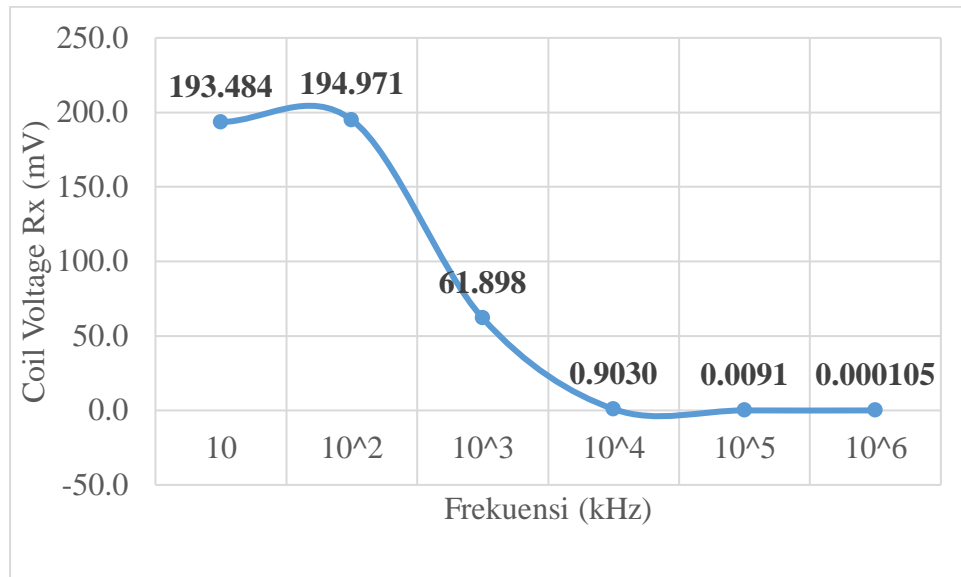
dinaikkan menjadi 100 kHz, tegangan koil sedikit meningkat menjadi 194.971 mV. Namun, pada frekuensi 1 MHz, tegangan koil mengalami penurunan drastis menjadi 61.898 mV. Penurunan ini berlanjut secara signifikan pada frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0.9030 mV pada 10 MHz, 0.0091 mV pada 100 MHz dan mencapai nilai yang sangat kecil sebesar 0.000105 mV pada 1 GHz. Dari data yang didapat di atas untuk memudahkan dalam menganalisanya, maka perlu dibuat grafik antara frekuensi dengan coil voltage Rx berdasarkan resistor yang digunakan. Grafik ini dibuat untuk mengetahui bagaimana bentuk data yang didapatkan dari masing-masing resistor dengan ukuran resistansi yang berbeda. Berikut ini grafik dari data yang menggunakan resistor 50 Ohm.

Tabel 4.1 Hasil Simulasi dengan Resistor 50 Ω (Ohm)

Frekuensi (kHz)	Coil Voltage Rx (mV)
10^1	193.484
10^2	194.971
10^3	61.898
10^4	0.9030
10^5	0.0091
10^6	0.000105

Berdasarkan grafik pada gambar 4.2 nilai coil voltage tertinggi berada pada frekuensi 100 kHz dengan nilai 194,971 mV. Frekuensi 100 Hz sebagai titik puncak coil voltage Rx tertinggi, akan tetapi memiliki selisih yang kecil dengan 10 kHz sehingga terbentuk garis horizontal yang terlihat hampir sama atau rata. Berbeda dengan frekuensi 100kHz ke 1000 kHz memiliki nilai coil voltage Rx yang turun sehingga membentuk garis vertikal yang turun drastis dari 194,971 mV ke 61,89 mV. Berdasarkan grafik tersebut pada resistor 50 Ohm rentang frekuensi yang optimal digunakan yaitu 10 kHz hingga 100 kHz karena dari data yang didapatkan nilai voltage masih di atas 100 mV sehingga ketika menggunakan resistor 50 Ohm dengan rentang frekuensi tersebut akan mudah membaca atau mendapatkan perbedaan ketika digunakan untuk

mendeteksi cacat pada spesimen uji. Sedangkan pada frekuensi 10 MHz hingga 1 GHz coil voltage Rx yang didapatkan sangat rendah yaitu sebesar 0,9030 mV pada frekuensi 10 MHz, 0,0091 mV untuk frekuensi 100 MHz dan 0,000105 mV untuk frekuensi 1 GHz.



Gambar 4.2 Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 50 Ohm

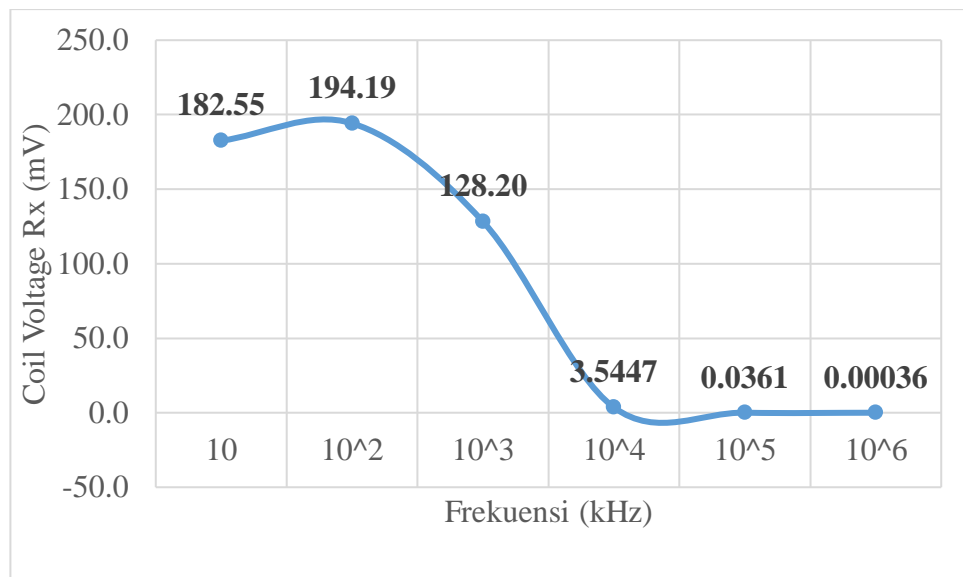
Grafik di atas menunjukkan perubahan tegangan koil pada berbagai nilai frekuensi. Grafik tersebut menggambarkan bahwa tegangan koil berkurang drastis seiring dengan peningkatan frekuensi, menunjukkan karakteristik respons frekuensi dari spesimen uji yang diukur. Dengan hasil coil voltage Rx yang didapatkan pada frekuensi tersebut sangat kecil maka dapat dikatakan tidak optimal, jika sensor MIT dengan rangkaian elektrik yang menggunakan resistor 50 Ohm diaplikasikan dengan frekuensi di atas 1 MHz. Hal tersebut tidak optimal dikarenakan ketika eksperimen dilakukan bisa saja nilai tersebut tidak terbaca dan harus menggunakan satuan yang sangat rendah, contohnya seperti satuan di bawah mili volt (mV) agar perbedaan nilai dapat terbaca.

Data hasil simulasi sensor MIT dengan Resistor 100 Ohm ditampilkan pada tabel 4.2. Rangkaian elektrik dengan resistor 100 Ohm nilai coil voltage Rx pada frekuensi 10 kHz sebesar 182,53 mV. Nilai coil voltage terbesar terletak pada 100 kHz dengan nilai sebesar 194,19 mV. Pada frekuensi 1 MHz

nilai coil voltage Rx yang diterima yaitu sebesar 128,20 mV. Pada frekuensi 10 MHz dan 100 MHz coil voltage Rx yang diterima sebesar 3,5447 mV dan 0,0361 mV. Nilai coil voltage Rx terendah terletak pada 1 GHz dengan nilai *voltage* sebesar 0,00036 mV. Nilai coil voltage Rx yang tertinggi pada saat menggunakan resistor 50 Ohm dan 100 Ohm yaitu terletak pada frekuensi 100 kHz, namun yang membedakan adalah selisih antara frekuensi 10 kHz dengan 100 kHz pada resistor 50 Ohm memiliki selisih yang sangat kecil yaitu kurang dari 1 mV sedangkan pada resistor 100 Ohm memiliki selisih lebih dari 10 mV. Pada gambar 4.3 menunjukkan grafik yang dihasilkan dari data hasil simulasi menggunakan resistor dengan ukuran resistansi sebesar 100 Ohm.

Tabel 4.2 Hasil Simulasi dengan Resistor 100 Ω (Ohm)

Frekuensi (kHz)	Coil Voltage Rx (mV)
10^1	182.55
10^2	194.19
10^3	128.20
10^4	3.5447
10^5	0.0361
10^6	0.00036



Gambar 4.3 Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 100 Ohm

Grafik yang terbentuk pada resistor 100 Ohm hampir sama dengan grafik yang menggunakan resistor 50 Ohm, namun terdapat perbedaan nilai dan bentuk garis yang terbentuk anatar 10 kHz dengan 100 kHz pada grafik ini terlihat cenderung meningkat dari 10 kHz menuju titik puncak pada 100 kHz dengan selisih nilai lebih dari 10 mV. Sedangkan pada grafik sebelumnya garis yang terbentuk hampir sama atau tidak terlihat meningkat dikarenakan selisih coil voltage Rx anantara frekuensi 10 kHz dengan 100 kHz kurang dari 1 mV. Garis yang terbentuk dari frekuensi 100 kHz ke 1 MHz terlihat cenderung menurun akan tetapi nilai coil voltage Rx yang diterima pada 1 MHz masih berada di angka 128,20 mV yang mana nilai tersebut masih dapat dibaca dengan jelas jika dilakukan eksperimen pengujian deteksi cacat kedepannya. Sedangkan garis yang terbentuk dari 1 MHz ke 10 MHz terlihat turun dengan drastis dikarenakan coil voltage Rx yang didapatkan pada frekuensi 10 MHz tergolong rendah yaitu sebesar 3,5447 mV. Hal tersebut mengalami penurunan lebih dari 100 mV. Pada frekuensi yang lebih besar dari 10 MHz nilai coil voltage semakin menurun yaitu di frekuensi 100 MHz dan 1 GHz nilai coil voltage kurang dari 1 mV yaitu 0,0361 mV dan 0,00036 mV sehingga garis yang terbentuk semakin turun dari frekuensi 100 kHz hingga 1 GHz.

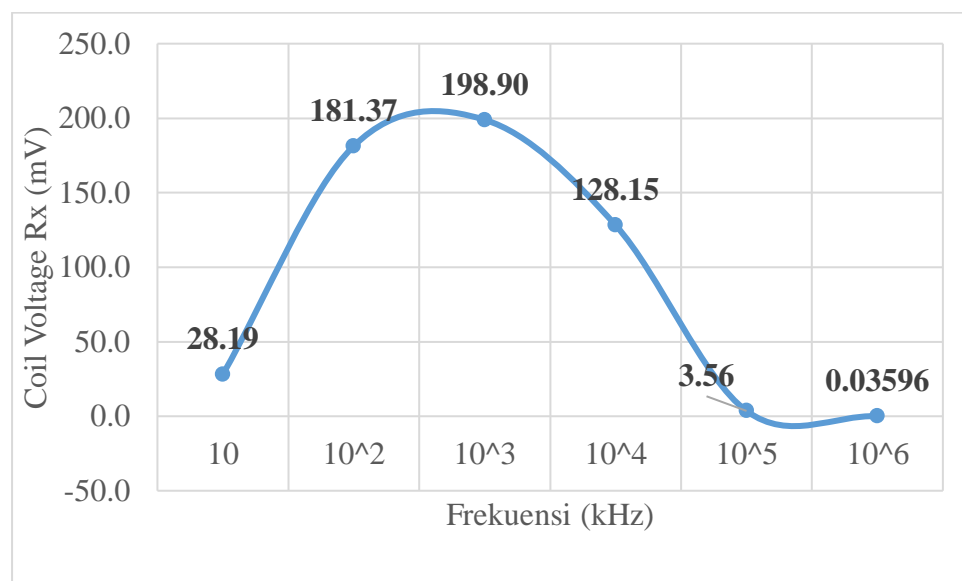
Tabel 4.3 Hasil Simulasi dengan Resistor 1000 Ω (Ohm)

Frekuensi (kHz)	Coil Voltage Rx (mV)
10^1	28,19
10^2	181,37
10^3	198,90
10^4	128,15
10^5	3,56
10^6	0,03596

Frekuensi berpengaruh besar terhadap tegangan coil. Pada frekuensi yang lebih rendah, tegangan coil lebih tinggi, sementara pada frekuensi yang lebih tinggi, tegangan coil lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi mempengaruhi kemampuan sensor dalam mendeteksi cacat. Pada

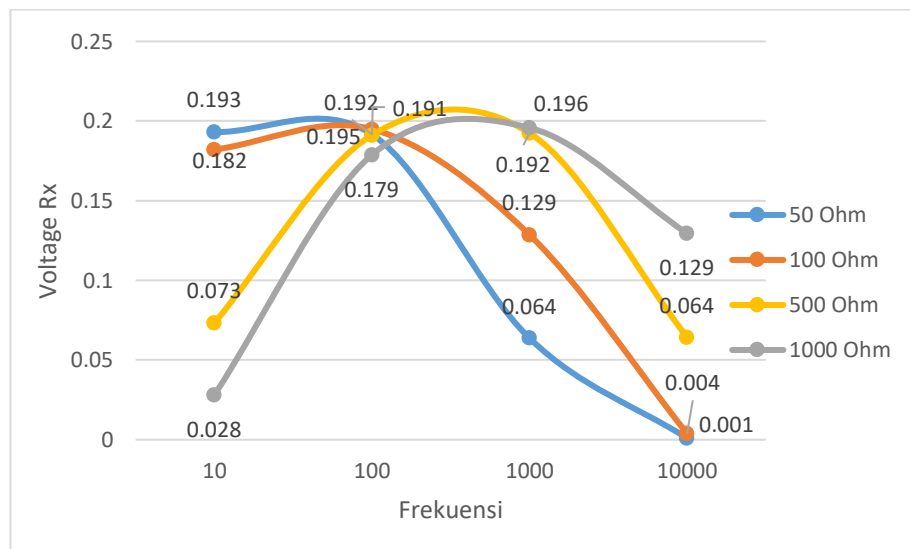
frekuensi yang sangat tinggi, seperti 1 GHz, tegangan coil sangat rendah, yaitu 0.00036 mV. Hal ini menunjukkan bahwa pada frekuensi yang sangat tinggi, kualitas suatu sensor MIT sangat buruk dalam mendeteksi cacat. Dalam simulasi sensor menggunakan 3 variasi rangkaian electric dengan resistor yang berbeda ukuran resistansinya. Data hasil simulasi ketiga yaitu menggunakan resistor yang ukuran resistansinya sebesar 1000 Ohm dapat dilihat pada tabel 4.3.

Dari data di atas terdapat hal menarik yang dapat kita amati yaitu pada frekuensi 10 kHz nilai coil voltage Rx yang diterima lebih kecil dari kedua data sebelumnya yaitu sebesar 28,19 mV. Jika dibandingkan dengan data yang lainnya pada frekuensi 100 kHz nilai coil voltage Rx yang diterima tetap konstan berada di atas 100 mV yaitu sebesar 181,37 mV. Namun terdapat perbedaan frekuensi yang memiliki nilai *voltage* tertinggi yaitu pada resistor dengan resistansi 1000 Ohm, adapun nilai *voltage* tertinggi terletak pada frekuensi 1000 kHz dengan nilai sebesar 198,9011 mV dan nilai terendah pada frekuensi 1 GHz yaitu sebesar 0,03596 mV. Berikut ini bentuk grafik yang terbentuk berdasarkan data hasil simulasi menggunakan resistor 1000 Ohm.



Gambar 4.4 Grafik Coil Voltage Rx vs Frekuensi Resistor 1000 Ohm

Grafik yang terbentuk pada resistor 1000 Ohm memiliki perbedaan yang sangat signifikan yaitu terlihat bahwa nilai coil voltage Rx yang diterima pada frekuensi 10 khz lebih rendah dibanding kedua data sebelumnya sehingga garis yang terbentuk yaitu cenderung naik atau meningkat dari 10 kHz menuju ke 100 kHz dengan nilai coil voltage sebesar 182,37 mV. Titik puncak atau frekuensi resonansi pada resistor 1000 Ohm ini terletak pada frekuensi 1 MHz dengan nilai coil voltage Rx sebesar 198,90 mV. Pada frekuensi selanjutnya yaitu 10 MHz hingga 1 GHz coil voltage Rx yang diterima semakin turun yaitu 128,15 mV, 3,56 mV dan 0,03596 mV sehingga membentuk garis yang menurun pada grafik. Dari ketiga grafik di atas yang menunjukkan bahwa frekuensi yang optimal digunakan untuk sensor MIT yaitu disesuaikan dengan resistor yang digunakan karena setiap resistor memiliki rentang frekuensi yang berbeda, akan tetapi dapat kita lihat bahwa dari ketiga resistor pada frekuensi 100 kHz terlihat nilai yang konstan, sekalipun terjadi perubahan nilai tetapi perubahan yang tidak signifikan. Berdasarkan 3 grafik di atas bahwa frekuensi yang optimal digunakan yaitu disesuaikan dengan resistor yang digunakan.



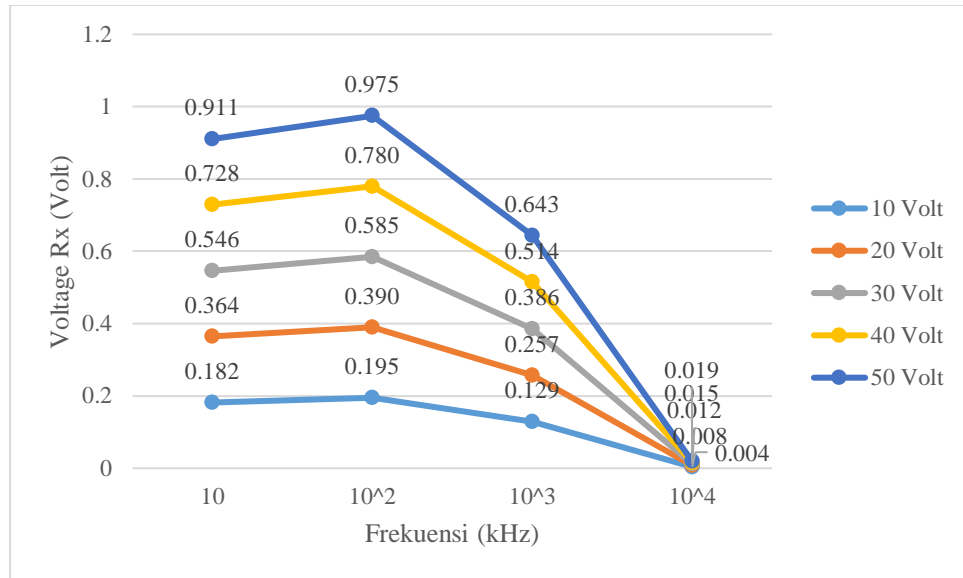
Gambar 4.5 Grafik Frekuensi terhadap Voltage Rx dengan Variasi Resistor

Grafik diatas menunjukkan hubungan antara frekuensi dan tegangan Rx untuk empat nilai resistor yang berbeda: 50 Ohm, 100 Ohm, 500 Ohm, dan

1000 Ohm. Pada frekuensi rendah (10 Hz), tegangan Rx bervariasi dengan nilai resistor, di mana resistor dengan nilai lebih kecil cenderung memiliki tegangan yang lebih tinggi. Namun, saat frekuensi meningkat, tegangan Rx mencapai puncaknya di sekitar 100 Hz hingga 1000 Hz, tergantung pada nilai resistornya, dan kemudian mulai menurun tajam pada frekuensi yang lebih tinggi, terutama pada 10000 Hz. Penurunan tegangan ini lebih drastis untuk resistor dengan nilai lebih rendah, sementara resistor dengan nilai lebih tinggi, seperti 1000 Ohm, menunjukkan penurunan tegangan yang lebih moderat. Grafik ini mengilustrasikan bagaimana tegangan Rx berubah seiring dengan variasi frekuensi dan nilai resistor, yang penting dalam aplikasi elektronik dan sensor yang memerlukan pemilihan resistor yang tepat untuk menjaga stabilitas tegangan pada frekuensi tertentu. Resistor dengan nilai yang lebih besar cenderung memiliki tegangan yang lebih stabil pada frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan resistor yang lebih kecil, yang mengalami penurunan tegangan yang lebih drastis. Hasil ini dapat digunakan untuk memilih nilai resistor yang tepat dalam aplikasi yang melibatkan variasi frekuensi, terutama dalam konteks rangkaian elektronik atau sensor yang perlu mempertahankan tegangan stabil di berbagai frekuensi.

4.3 Analisis Pengaruh VTx terhadap Coil Voltage Rx

Untuk mengetahui pengaruh tegangan input (VTx) terhadap coil voltage penerima (VRx) yaitu dengan mensimulasikan melalui software simulasi *Multiphysi*. Simulasi dilakukan dengan mengatur *parametric sweep* yaitu memvariasikan tegangan input (VTx) yang akan disimulasikan pada sensor MIT. Pada gambar 4.6 menunjukkan hubungan antara frekuensi (kHz) dengan tegangan yang diterima (VRx) dan memvariasikan tegangan yang dikirim (VTx). Grafik ini menggambarkan bagaimana perubahan frekuensi mempengaruhi VRx dengan voltage input yang berbeda mulai dari 10 volt, 20 volt, 30 volt, 40 volt dan 50 volt. Berdasarkan gambar 4.6 dapat diketahui bahwa Voltage Tx sangat berpengaruh terhadap hasil voltage Rx yang diterima. Dalam hal ini voltage yang besar akan membuat hasil dari voltage Rx semakin besar dan baik saat menggunakan resistor tertentu.



Gambar 4.6 Grafik Variasi Voltage Tx dengan Voltage Rx dan Frekuensi

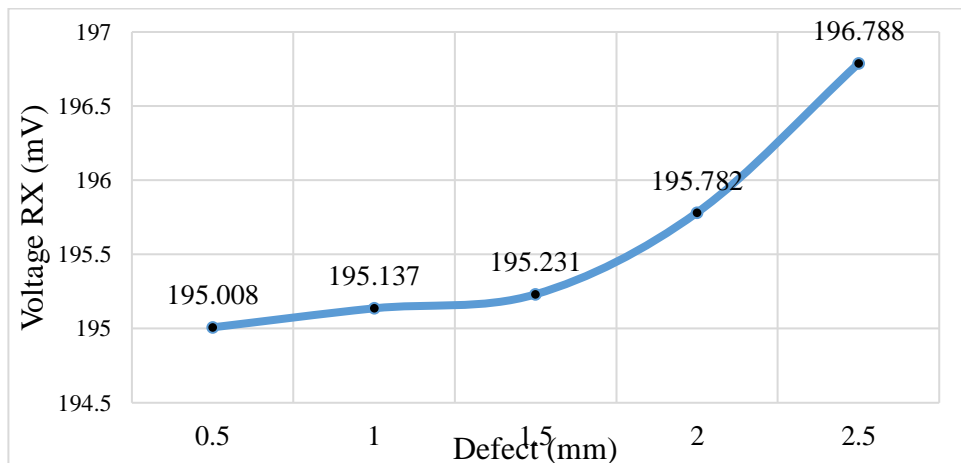
Grafik diatas tersebut menggambarkan hubungan antara tegangan keluaran (Voltage Rx) dan frekuensi pada berbagai tingkatan tegangan masukan (10 Volt, 20 Volt, 30 Volt, 40 Volt, dan 50 Volt). Secara umum, terlihat bahwa pada setiap tingkat tegangan masukan, tegangan keluaran (Voltage Rx) awalnya meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi, mencapai puncak pada frekuensi sekitar 10² kHz. Setelah mencapai titik puncak ini, tegangan keluaran mulai menurun drastis seiring dengan peningkatan frekuensi lebih lanjut hingga mencapai 10⁴ kHz. Misalnya, pada tegangan masukan 50 Volt, tegangan keluaran meningkat dari 0,911 Volt pada frekuensi 10 kHz menjadi 0,975 Volt pada 10² kHz, kemudian menurun tajam menjadi 0,019 Volt pada 10⁴ kHz. Pola yang sama juga terlihat pada tingkat tegangan masukan lainnya, di mana tegangan keluaran meningkat hingga puncak tertentu sebelum mengalami penurunan yang signifikan. Penurunan tajam setelah frekuensi mencapai titik tertentu menunjukkan adanya karakteristik resonansi dalam rangkaian atau sistem yang diuji, di mana terdapat frekuensi optimal sebelum efisiensi berkurang secara drastis pada frekuensi yang lebih tinggi. Ini menunjukkan bahwa sistem hanya dapat mempertahankan tegangan keluaran yang tinggi hingga frekuensi tertentu sebelum terjadi penurunan yang signifikan.

4.4 Analisis Pengaruh Ukuran Cacat terhadap Coil Voltage Rx

Dalam simulasi menggunakan software simulasi *Multiphysics* ini memodelkan cacat pada bagian dalam permukaan spesimen uji dengan tujuan untuk membuktikan sensor MIT dalam mendeteksi cacat didalam permukaan. Cacat yang dimodelkan divariasikan ukurannya untuk membuktikan sensor MIT juga yang sebelumnya telah diuji untuk medeteksi cacat pada permukaan dengan ukuran cacat divariasasi agar dapat membedakan ukuran cacat yang berbeda. Hal yang dapat mewakili dalam membedakan ukuran cacat yaitu dengan mengetahui nilai coil voltage Rx. Voltage Rx menerima respon tegangan setelah diinduksikan pada spesimen uji, ketika terdapat cacat jangkauan arus eddy berubah sehingga berpengaruh terhadap medan magnet yang terbentuk. Dalam hal ini persamaan yang mewakilkan kejadian ini yaitu persamaan dari Hukum Faraday berikut.

$$V = N \frac{d(BA)}{dt} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dalam persamaan Hukum Faraday di atas terdapat parameter A yaitu area yang dilalui medan magnet. Ketika terdapat cacat maka area yang dilalui tersebut semakin jauh atau luas jangkauannya sehingga berbanding lurus dengan Voltage yang diterima oleh Coil Rx. Ukuran cacat yang lebih besar akan menyebabkan perubahan yang signifikan pada medan magnet yang terdeteksi oleh coil Rx. Grafik yang membuktikan bahwa semakin besar cacat yang ada pada spesimen uji maka berdampak semakin besar juga voltage Rx yang diterima dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Defect terhadap Coil Voltage Rx pada Frekuensi 100 kHz

Gambar 4.7 menunjukkan hubungan antara ukuran cacat dengan voltage Rx yang diterima pada frekuensi optimal yaitu 100 kHz. Grafik membentuk garis yang cenderung meningkat dari ukuran cacat 0,5 mm hingga 2,5 mm. Coil voltage Rx yang diterima semakin besar ketika cacat yang dimodelkan semakin besar. Pengaruh ukuran cacat terhadap voltage penerima (Rx) yang diterima dalam *Magnetic Induction Tomography* (MIT), kita bisa menggunakan konsep induksi elektromagnetik dan analisis medan magnet. Salah satu persamaan yang dapat menyelesaikan permasalahan ini adalah persamaan 4.1 yang menjelaskan bahwa di mana B adalah medan magnet, dan A adalah area permukaan yang dilalui medan magnet. Ketika terdapat cacat pada spesimen uji hal yang terjadi adalah area yang dialiri medan magnet akan berubah sehingga mempengaruhi perubahan medan magnet. Coil voltage penerima dapat dinyatakan sebagai:

$$V_{Rx} = k. \Delta B_{cacat} \dots\dots\dots(4.3)$$

Dimana k adalah konstanta yang mencakup faktor-faktor seperti sensitivitas coil. ΔB_{cacat} merupakan perubahan medan magnet akibat cacat yang bergantung pada ukuran cacat dan sifat cacat yang ada. Dapat diasumsikan bahwa perubahan medan magnet sebanding dengan ukuran cacat (d) dan konduktivitas (σ). Sehingga dapat ditulis persamaan ΔB_{cacat} sebagai berikut:

$$\Delta B_{cacat} \propto d. \sigma \dots\dots\dots(4.4)$$

Sehingga dapat dituliskan persamaan dari coil voltage Rx sebagai:

$$V_{Rx} = k. d. \sigma \dots\dots\dots(4.5)$$

Persamaan yang dituliskan dalam konteks ini adalah persamaan yang mencoba menggambarkan hubungan antara ukuran cacat (d), konduktivitas (σ), dan coil voltage penerima (V_{Rx}) dalam sistem MIT. Dari persamaan ini dapat dilihat bahwa coil voltage Rx memiliki nilai berbanding lurus dengan

ukuran cacat. Maka dari hasil simulasi deteksi cacat dengan variasi ukuran cacat diketahui bahwa ukuran cacat dapat mempengaruhi hasil coil voltage Rx yang diterima. Secara spesifik, ketika ukuran cacat pada spesimen uji semakin besar, area yang dilalui medan magnet menjadi lebih luas, yang mengakibatkan perubahan lebih besar dalam fluks magnetik. Hal ini menyebabkan tegangan yang diinduksi pada coil penerima meningkat. Grafik pada gambar 4.7 dengan jelas mendemonstrasikan bahwa terdapat korelasi positif antara ukuran cacat dan tegangan (V_{Rx}), yang berarti bahwa sensor MIT efektif dalam mendeteksi dan membedakan ukuran cacat pada spesimen uji berdasarkan perubahan tegangan yang terukur.

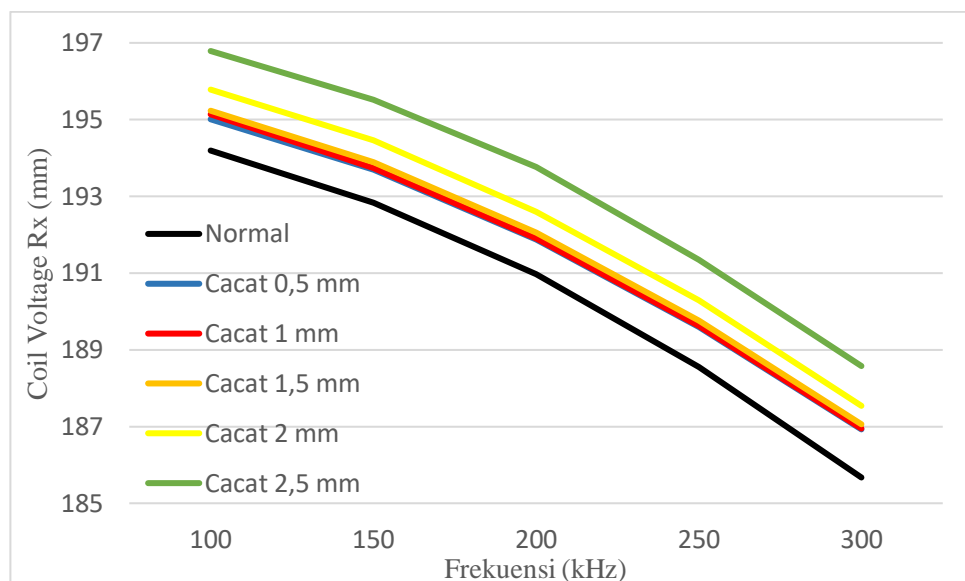
4.5 Analisis Kemampuan Sensor MIT untuk Mendeteksi Cacat di Sumbu Z

Berdasarkan beberapa hal di atas, selanjutnya akan mensimulasikan sensor MIT ini untuk mendeteksi perbedaan spesimen uji yang tidak ada cacat dengan yang terdapat cacat. Dalam pengujian ini menggunakan frekuensi 100 kHz hingga 300 kHz, frekuensi tersebut akan disimulasikan satu persatu tidak menjadi rentang frekuensi dikarenakan dalam simulasi ini sensor MIT diletakkan di atas spesimen uji yang di bawahnya terdapat cacat, sehingga sensor MIT tidak digerakkan. Data yang diambil untuk membedakan adanya cacat atau tidak yaitu dengan data sinyal *coil voltage* Rx yang diterima. Cacat yang dimodelkan pada simulasi sensor MIT ini berada di dalam permukaan, yang mana sebelumnya pengujian deteksi cacat menggunakan sensor MIT hanya dipermukaan, saat ini membuktikan bahwa sensor MIT dapat digunakan untuk mendeteksi bagian dalam permukaan.

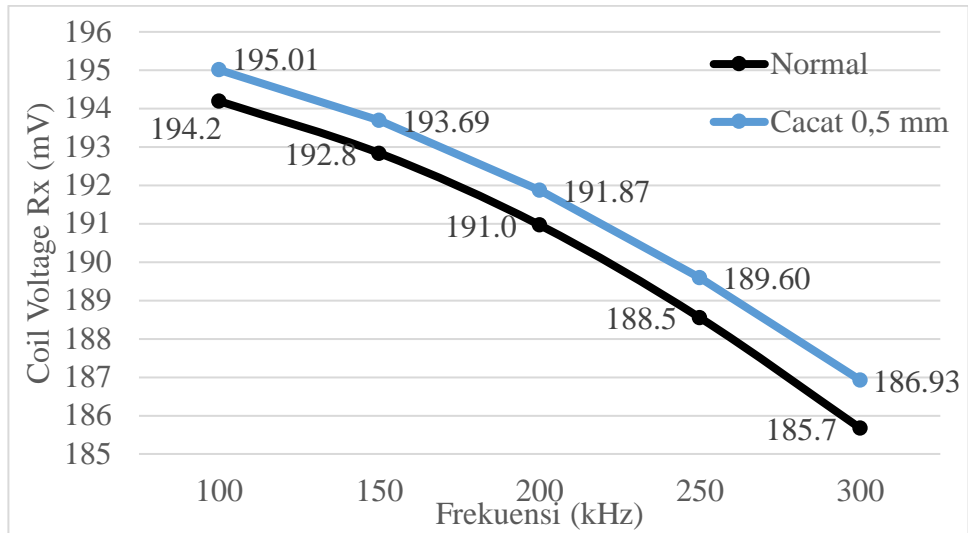
Adanya cacat pada spesimen uji diartikan sebagai adanya tambahan hambatan pada material spesimen uji. Menurut Hukum Ohm, besar tegangan (*voltage*) yang dihasilkan berbanding lurus dengan hambatan ketika arusnya konstan. Dapat diartikan semakin besar cacat maka akan semakin besar juga *voltage* yang diinduksikan dan yang diterima oleh koil Rx. Begitu pula dengan prinsip *eddy current* ketika terdeteksi adanya cacat maka jangkauan arus akan semakin luas yang menyebabkan besarnya tegangan meningkat. Untuk membuktikan hal itu maka dilakukan simulasi sensor MIT dengan cara

membandingkan data coil voltage Rx Normal dengan Cacat. Dalam hal ini cacat pada spesimen terletak dibagian dalam permukaan spesimen uji atau secara sumbu z (aksial). Hal ini dilakukan sebagai salah satu cara untuk membuktikan bahwa sensor MIT dapat mendeteksi cacat pada 3 sumbu sehingga kedepannya dapat digunakan untuk mendeteksi cacat secara 3 dimensi.

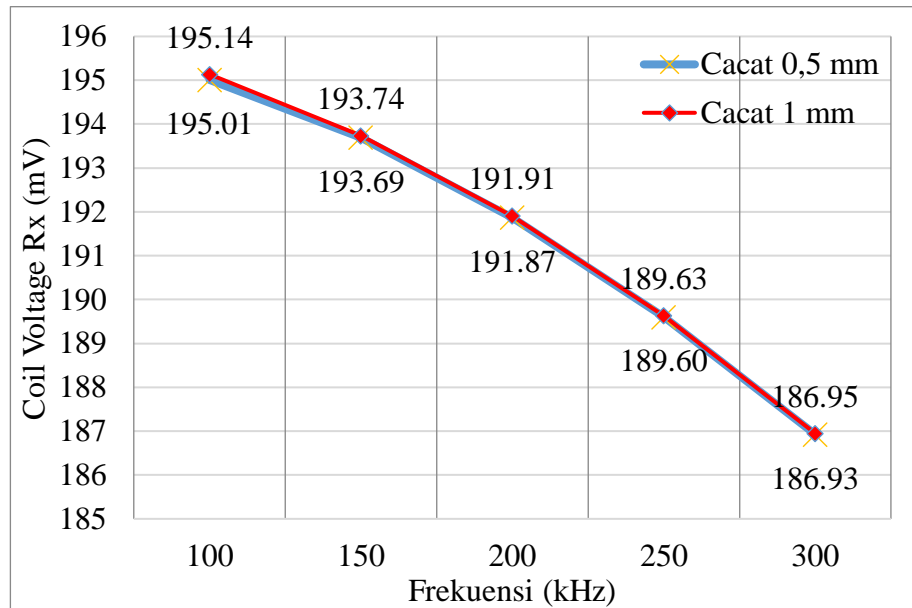
Berdasarkan gambar 4.8 menunjukkan bahwa sensor MIT yang dilakukan simulasi mendapatkan data coil voltage Rx yang berbeda-beda dari berbagai cacat yang dimodelkan. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa sensor MIT dapat digunakan untuk mendeteksi cacat yang berada dibagian bawah permukaan, selain itu juga sensor dapat membedakan berbagai ukuran cacat. Gambar 4.8 menunjukkan bahwa semakin besar cacat yang ada pada spesimen uji maka berpengaruh terhadap coil voltage Rx yang diterima yaitu semakin besar voltage Rx yang diterima. Sedangkan semakin besar frekuensi yang diberikan berpengaruh juga terhadap coil voltage Rx yang diterima semakin kecil dari setiap variasi yang dimodelkan. Garis yang hitam paling bawah merupakan data yang diambil pada spesimen uji yang tidak memiliki cacat atau dapat dikatakan normal. Dari gambar tersebut menjelaskan bahwa spesimen normal memiliki coil voltage Rx paling rendah atau lebih rendah daripada specimen cacat.



Gambar 4.8 Grafik Spesimen Normal vs Cacat



Gambar 4.9 Grafik Spesimen Normal vs Cacat 0,5 mm



Gambar 4.10 Grafik Spesimen Cacat 0,5 mm vs Cacat 1 mm

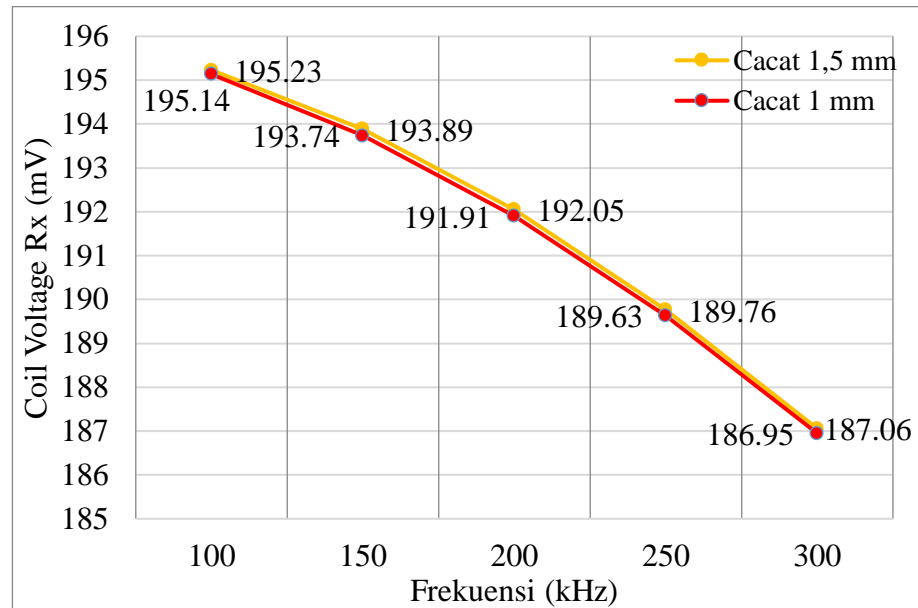
Berdasarkan gambar 4.9 di atas menjelaskan bahwa sensor MIT dapat membedakan spesimen uji yang normal dengan spesimen uji yang terdapat cacat pada bagian dalam permukaan sebesar 0,5 mm. Hal itu ditandai dengan perbedaan garis yang terbentuk dari nilai coil voltage Rx yang diterima pada spesimen normal dan spesimen cacat 0,5 mm, Nilai coil voltage yang diterima pada spesimen cacat 0,5 mm lebih besar dibandingkan nilai coil voltage yang diterima pada saat simulasi spesimen normal. Dalam hal ini dapat

disimpulkan bahwa sensor MIT ini dapat membedakan spesimen normal dengan spesimen cacat. Selain itu hal yang harus diuji yaitu mensimulasikan bagaimana sensor MIT dapat membedakan ukuran cacat yang ada pada spesimen uji. Pada gambar 4.5 terlihat garis antara cacat 0,5-1,5 mm terlihat menempel sehingga dapat diperjelas dengan membandingkan antara garis yang terbentuk pada cacat 0,5 mm dengan 1 mm terlebih dahulu.

Dari gambar 4.10 menunjukkan perbedaan cacat 0,5 mm dengan cacat 1 mm berdasarkan hubungan antara coil voltage Rx dengan frekuensi yang digunakan. Dari kedua data terlihat trend grafiknya sama yaitu semakin besar frekuensi yang digunakan berpengaruh kepada coil voltage Rx yang diterima yaitu semakin rendah. Secara kasat mata garis yang terbentuk terlihat menempel karena nilai yang diperoleh memiliki selisih yang sangat kecil yaitu di bawah 1 mV. Pada frekuensi 100-250 kHz coil voltage Rx yang diterima yaitu sebesar 195,01 mV hingga 186,93 mV untuk cacat 0,5 mm dan 195,14 mV hingga 186,95 mV untuk cacat 1 mm. perbedaan nilai coil voltage yang diterima pada cacat 0,5 mm dan cacat 1 mm memiliki selisih yang sangat rendah, sehingga membuat grafik yang terbentuk terlihat menempel. Namun, ketika dilihat dari nilai yang tertera yaitu coil voltage Rx pada cacat 1 mm lebih besar rata-rata 0,4 mV daripada nilai coil voltage Rx yang diterima pada cacat 0,5 mm. Dalam hal ini berarti bahwa semakin besar cacat maka berpengaruh terhadap nilai coil voltage Rx yang diperoleh. Selanjutnya kita melihat grafik perbedaan antara cacat 1 mm dengan cacat 1,5 mm.

Grafik 4.11 menunjukkan hubungan antara frekuensi (kHz) dan coil voltage Rx (mV) untuk dua kondisi cacat dengan ukuran yang berbeda yaitu cacat 1,5 mm dan cacat 1 mm. Pada sumbu horizontal (x) ditampilkan frekuensi dalam satuan kHz, sementara pada sumbu vertikal (y) ditampilkan coil voltage Rx dalam satuan mV. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa coil voltage Rx cenderung menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi untuk kedua kondisi cacat. Pada frekuensi sekitar 100 kHz, coil voltage Rx untuk cacat 1,5 mm dimulai dari 195,14 mV dan cacat 1 mm dari 195,23 mV. Ketika frekuensi meningkat hingga sekitar 300 kHz, tegangan kumparan turun menjadi 186,95 mV untuk cacat 1,5 mm dan 187,06 mV untuk cacat 1 mm.

Meskipun ada sedikit perbedaan dalam nilai tegangan pada tiap frekuensi, pola penurunan coil voltage Rx untuk kedua kondisi cacat ini hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi mempengaruhi coil voltage Rx secara konsisten, terlepas dari ukuran cacat.



Gambar 4.11 Grafik Spesimen Cacat 1 mm dan Cacat 1,5 mm

Penurunan coil voltage Rx yang terjadi bisa diinterpretasikan sebagai interaksi sensor MIT pada frekuensi tertentu dengan material spesimen uji. Semakin besar frekuensi yang diberikan maka penyebaran induksi magnet semakin menyebar dan rendahnya penetrasi kedalaman, dalam hal ini cacat dimodelkan didalam permukaan sehingga ketika frekuensi yang digunakan semakin besar maka cacat yang berada di bawah permukaan tersebut sulit untuk terdeteksi. Secara tidak langsung ketika sensor MIT mampu mendeteksi cacat pada bagian dalam permukaan, maka sensor MIT ini dapat bekerja pada 3 sumbu yaitu sumbu x secara mendatar, sumbu y melintang dan sumbu z secara aksial. Dalam simulasi ini hanya mengambil data cacat yang terletak pada bagian aksial karena untuk membuktikan bahwa sensor dapat mendeteksi dalam sumbu aksial atau sumbu z. Sehingga dari data yang didapat ini dapat membukrikan bahwa sensor MIT ini dapat digunakan untuk pengambilan cacat dalam bentuk 3 dimensi.

4.6 Validasi Deteksi Cacat Hasil Simulasi dengan Eksperimen

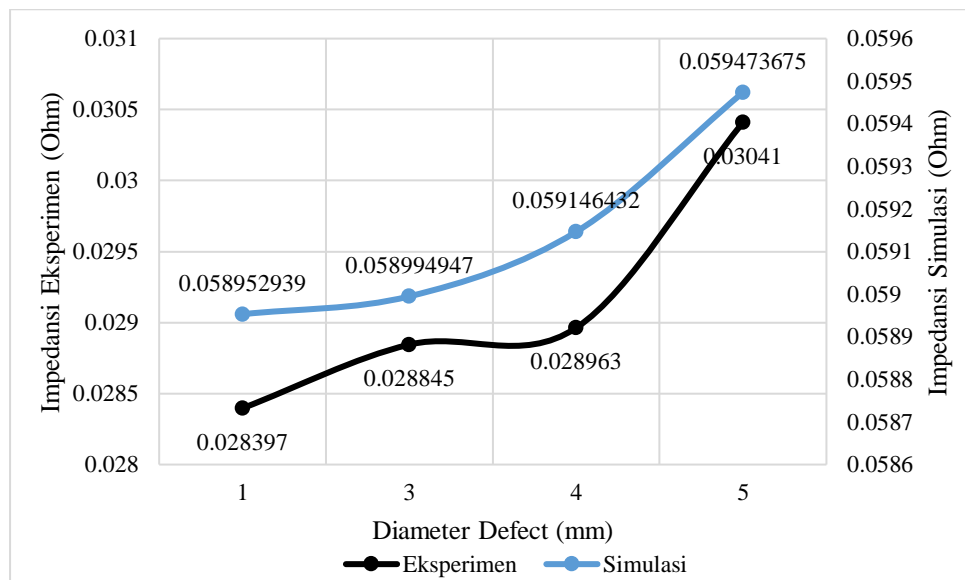
Validasi hasil deteksi cacat yang diperoleh dari simulasi dengan menggunakan data eksperimen. Proses ini sangat penting dilakukan untuk memastikan bahwa model simulasi yang digunakan mampu menggantikan kondisi sebenarnya secara akurat. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil deteksi cacat dari simulasi dengan hasil yang diperoleh dari eksperimen fisik atau pengujian lapangan. Parameter yang dibandingkan ukuran cacat yang dideteksi memiliki ukuran yang sama, akan tetapi dicari perbedaan yang menandakan bahwa terdapat cacat. Dengan melakukan validasi ini, kita dapat mengevaluasi kehandalan dan akurasi model simulasi, serta mengidentifikasi dan memperbaiki ketidakakuratan atau ketidaksesuaian yang mungkin ada. Hasil validasi yang memuaskan menunjukkan bahwa model simulasi dapat diandalkan untuk digunakan dalam aplikasi praktis, sementara hasil yang tidak memuaskan memberikan informasi berharga untuk penyempurnaan lebih lanjut dari model tersebut.

Untuk melakukan validasi dari hasil simulasi yaitu dengan melakukan eksperimen deteksi cacat menggunakan sensor MIT dengan menggunakan parameter yang sama seperti saat simulasi. Pada saat melakukan eksperimen menggunakan sistem yang terdiri dari layar monitor/laptop, VNA dan sensor. Sebelum melakukan pengambilan data eksperimen terlebih dahulu menentukan frekuensi yang ingin digunakan dan berapa data yang diambil dari masing masing titik eksperimen. Kemudian, mengkalibrasi sistem MIT yang digunakan melalui monitor yang sudah terinstal dalam sistem kalibrasi yang dilakukan yaitu pada VNA memiliki 2 port yang masing-masing port memiliki 3 jenis seperti *short*, *open* dan *load*. Kalibrasi dapat dikatakan berhasil ketika muncul frekuensi dan berapa data yang akan diambil.

Spesimen uji yang digunakan untuk pengambilan data eksperimen yaitu dibuat matriks terlebih dahulu agar mempermudah dalam pengambilan datanya. Data yang dihasilkan dari sistem MIT itu berupa impedansi real dan impedansi imajiner yang perlu diolah kembali menjadi impedansi total. Pengolahan dilakukan menggunakan software python yang didalamnya memasukkan logika rumus impedansi berikut ini.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \dots\dots\dots(4.6)$$

Dimana Z adalah impedansi total, R merupakan nilai impedansi ril yang didapatkan dari hasil eksperimen dan X merupakan nilai impedansi imajiner yang didapatkan dari hasil eksperimen. Persamaan 4.6 tersebut digunakan dalam software python agar memudahkan pengolahan data yang sangat banyak. Dari data yang didapatkan tersebut kemudian dibuat grafik sehingga dapat mengetahui pengaruh defect terhadap impedansi pada material. Berikut ini grafik yang dibuat dari hasil eksperimen yang telah dilakukan.



Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Hasil Simulasi dengan Eksperimen pada Frekuensi 300 kHz

Gambar di atas menunjukkan perbandingan antara impedansi yang diukur dari eksperimen dan simulasi terhadap diameter defect pada material. Pada sumbu x, tertera ukuran diameter defect dalam milimeter (mm), sedangkan sumbu y kiri menampilkan impedansi eksperimen dalam satuan Ohm, dan sumbu y kanan menampilkan impedansi hasil simulasi juga dalam satuan Ohm. Pada grafik ini, terdapat dua kurva yaitu kurva hitam yang mewakili hasil eksperimen dan kurva biru yang mewakili hasil simulasi. Dari kurva Eksperimen, pada diameter cacat 1 mm, impedansi yang diukur adalah sekitar 0.028397 Ohm. Saat diameter cacat meningkat menjadi 3 mm,

impedansi naik menjadi 0.028845 Ohm. Pada diameter 4 mm, impedansi sedikit meningkat menjadi 0.028963 Ohm. Pada diameter 5 mm, terjadi lonjakan signifikan dalam impedansi yang tercatat sebesar 0.03041 Ohm.

Terlihat bahwa impedansi baik dari hasil eksperimen maupun simulasi menunjukkan tren peningkatan seiring dengan bertambahnya diameter defect. Pada diameter defect terkecil (1 mm), impedansi eksperimen adalah sekitar 0.028397 Ohm, sementara impedansi hasil simulasi adalah sekitar 0.058952939 Ohm. Kedua nilai ini menunjukkan sedikit perbedaan yang cukup signifikan, dimana hasil simulasi memberikan nilai yang lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen. Ketika diameter defect meningkat menjadi 2 mm, nilai impedansi eksperimen sedikit meningkat menjadi sekitar 0.028845 Ohm, dan impedansi hasil simulasi juga mengalami peningkatan menjadi sekitar 0.058994947 Ohm. Tren ini terus berlanjut hingga diameter defect 5 mm, dimana nilai impedansi eksperimen mencapai sekitar 0.03041 Ohm dan hasil simulasi mencapai sekitar 0.059473675 Ohm.

Dapat disimpulkan bahwa terdapat konsistensi dalam peningkatan impedansi seiring dengan bertambahnya diameter defect pada kedua metode, meskipun hasil simulasi selalu menunjukkan nilai impedansi yang lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti ketidaksempurnaan dalam model simulasi atau kondisi eksperimental yang tidak sepenuhnya dapat direplikasi dalam simulasi. Namun, secara keseluruhan, baik eksperimen maupun simulasi menunjukkan tren yang serupa dalam respons impedansi terhadap peningkatan diameter defect. Hal ini mengindikasikan bahwa cacat yang lebih besar dalam material cenderung menghasilkan peningkatan nilai impedansi.