

## Pemodelan Arus Eddy pada Domain Dua Dimensi untuk Evaluasi Objek Logam Non-Magnetik

Imamul Muttakin<sup>1\*</sup>, Rian Fahrizal<sup>1</sup>, Alief Maulana<sup>1</sup>,  
Ceri Ahendyarti<sup>1</sup>, Dina Estining Tyas Lufianawati<sup>1</sup>,  
Irma Saraswati<sup>1</sup>, Fadli<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,  
Cilegon, Banten, Indonesia

<sup>2</sup>Program Magister Teknik Elektro, Universitas Ahmad Dahlan,  
Yogyakarta, Indonesia

<sup>3</sup>Ctech Lab Edwar Teknologi, Tangerang, Banten, Indonesia

### Informasi Artikel

**Naskah Diterima :**

27 November 2024

**Direvisi :** 2 Desember 2024

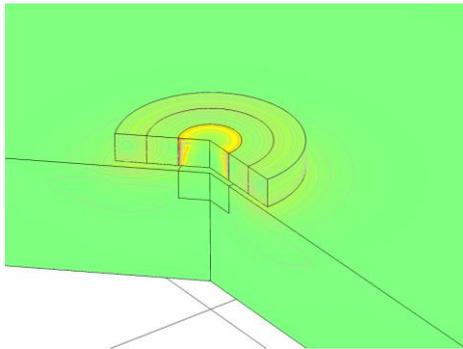
**Disetujui :** 3 Desember 2024

doi: 10.62870/setrum.v13i2.29845

**\*Korespondensi Penulis :**

imamul@untirta.ac.id

### Graphical abstract



### Abstract

Eddy current-based non-destructive testing (NDT) is a technique for evaluating metallic objects without direct contact or intrusion. This method is essential for monitoring the condition of various metallic structures. The diversity of target structures presents a challenge that requires high accuracy and spatial resolution in eddy current instrumentation. This paper explores the modeling of sensors in a two-dimensional domain using the finite element method with multiphysics software. The study examines the configuration of induction coil sensors under different object conditions at operating frequencies below 1 kHz. Findings indicate that the presence of defects in the object causes a 0.31% change in receiver voltage for air-core coils and a 0.41% change for iron-core coils. Incorporating an iron core into the induction coil sensor increases detection sensitivity by 86%. This approach provides a guideline for developing effective eddy current-based instrumentation systems.

**Keywords:** Eddy Current, FEM, Sensor Coil, Metal, NDT

### Abstrak

Pengujian tak merusak (NDT) berbasis arus eddy merupakan metode evaluasi objek tanpa melakukan kontak dan intrusi. Teknik ini penting digunakan dalam pemantauan kondisi suatu entitas berbahan logam. Keberagaman struktur target menjadi tantangan yang menuntut performa akurasi dan resolusi spasial dari instrumentasi arus eddy. Paper ini membahas pemodelan sensor pada domain dua dimensi menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak multifisika. Konfigurasi sensor kumparan induksi dikaji untuk variasi kondisi objek pada frekuensi operasi di bawah 1 kHz. Pada kumparan dengan inti udara, keberadaan cacat pada objek menghasilkan perubahan tegangan penerima sebesar 0,31%; sedangkan pada kumparan dengan inti besi sebesar 0,41%. Penambahan inti besi pada sensor kumparan induksi meningkatkan sensitivitas deteksi sebesar 86%. Prosedur ini dapat menjadi pemandu dalam mengembangkan sistem instrumentasi berbasis arus eddy yang efektif.

**Kata kunci:** Arus Eddy, FEM, Sensor Kumparan, Logam, NDT

© 2024 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved.

## 1. PENDAHULUAN

Pengujian tak merusak (*non-destructive testing*, NDT) berbasis arus eddy merupakan teknik untuk mendapatkan informasi mengenai objek kaji tanpa melakukan intervensi fisik dalam mengungkap

keadaan permukaan maupun internal yang tidak tampak secara langsung. Metode ini memungkinkan untuk penentuan cacat yang tidak terdeteksi secara visual dikarenakan lokasi kedalaman, ukuran, atau lapisan yang menutupinya [1]. Teknik uji tak merusak arus eddy penting digunakan dalam pemantauan kondisi suatu struktur seperti pipa [2], pesawat terbang [3], dan entitas berbahan material logam lainnya [4]. Variasi konduktivitas listrik lokal dari logam akibat keberadaan sesuatu yang abnormal menjadi besaran yang dapat dikuantisasi oleh instrumentasi elektromagnetik sehingga kondisi tersebut dapat diketahui melalui pengukuran arus eddy. Selain itu, metode ini juga dapat dimanfaatkan untuk penyortiran benda berdasarkan sifat elektromagnetik pasif seperti konduktivitas dan permeabilitas [5].

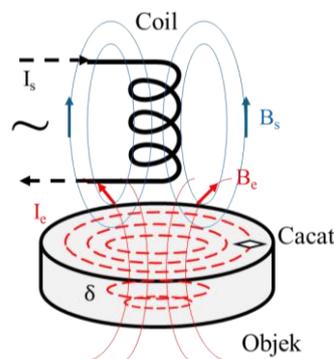
Resolusi spasial serta keberadaan cacat menjadi tantangan bagi pengukuran arus eddy. Ukuran cacat yang kecil akan menghasilkan perubahan arus eddy yang juga kecil dan sulit dideteksi oleh sensor. Lokasi inklusi (hal abnormal) yang terdapat pada sisi yang sulit dijangkau sensor atau terletak pada kedalaman tertentu membutuhkan strategi pengukuran yang lebih kompleks [6]. Dalam pengukuran aktual, terdapat faktor yang mempengaruhi efektifitas sensor arus eddy seperti halnya vibrasi, interferensi, dan sebagainya [7]. Beberapa strategi dikembangkan untuk meningkatkan performa deteksi, dari mulai konfigurasi probe [8] hingga pemanfaatan metode machine learning [9]. Di sisi instrumentasi, perancangan sensor adalah salah satu aspek penting [10-11] yang diinisiasi dengan tahap pemodelan *probe* [12].

Paper ini mengulas pemodelan arus eddy dalam mengevaluasi objek logam non-magnetik sehingga bahan magnetik tidak menjadi cakupan pembahasannya. Permasalahan arus eddy secara natural adalah fenomena yang terjadi dalam domain tiga dimensi. Namun demikian, secara pemodelan, kajian dua dimensi dapat mencukupi untuk asesmen awal demi menyederhanakan perhitungan dan menekan biaya komputasi [13]. Skema ini secara prosedur umum dilakukan karena keakuratan pemodelan biasanya diperoleh dari iterasi dan eliminasi yang biayanya dapat ditekan melalui penyederhanaan. Apabila model pendahuluan dinyatakan akurat, eskalasi dapat dilakukan untuk permasalahan tiga dimensi yang lebih merepresentasikan kondisi uji nyata.

Setelah introduksi, penulisan artikel akan dilanjutkan dengan menjabarkan metode pemodelan dari basis fisis arus eddy lalu berangkat ke formulasi potensial vektor yang umumnya menjadi perantara dalam penyelesaian komputasi elektromagnetik. Metode elemen hingga melanjutkan alur formulasi yang paling dominan digunakan dalam penyelesaian permasalahan elektromagnetik tingkat lanjut. Tahap implementasi menggunakan sensor kumparan yang dimodelkan pada perangkat lunak dijelaskan secara deskriptif untuk memandu analisis yang akan diberikan pada bagian hasil. Kasus objek logam normal dan cacat akan dikaji. Selain itu, pengaruh konfigurasi sensor berupa penambahan bahan inti magnetik juga dianalisis.

## 2. METODE

Arus eddy terjadi pada bahan konduktif dan/atau magnetik sebagai akibat dari paparan medan magnet eksternal. Medan magnet eksternal (disebut juga sebagai medan primer)  $B_s$  dapat dibangkitkan oleh suatu kumparan yang dialiri sumber arus ac  $I_s$ . Arus eddy  $I_e$  tersebut pada gilirannya juga akan membangkitkan medan magnet sekunder  $B_e$  yang arah vektornya berlawanan (menentang) medan magnet primer. Resultan dari interaksi medan primer dan sekunder menjadi total medan magnet yang akan menginduksi kumparan sehingga tegangan dapat terukur. Prinsip ini diilustrasikan di Gambar 1.



Gambar 1. Arus eddy pada objek yang terdapat cacat

Cacat yang terdapat pada objek akan mengakibatkan terganggunya arus eddy yang bersirkulasi. Ketergangguan arus eddy tersebut selanjutnya berdampak pada medan magnet sekunder yang dibangkitkan yang akhirnya juga mempengaruhi tegangan induksi. Dengan mekanisme tersebut, kondisi objek dapat diperkirakan secara tidak langsung melalui nilai tegangan induksi pada kumparan.

Keterdeteksian kondisi objek bergantung kepada distribusi arus eddy. Objek yang tidak homogen akan mengganggu kontinuitas arus eddy sehingga diperlukan intensitas yang cukup deras untuk dapat menghasilkan respon medan magnet yang bisa dikaji. Selain beredar di permukaan (secara dua dimensi), arus eddy juga berpenetrasi sepanjang dimensi vertikal. Standar kedalaman penetrasi  $\delta$  menunjukkan tingkat jangkauan dimana kerapatan arus eddy berkurang hingga 37% dari kerapatannya di permukaan. Hal ini mengakibatkan kemampuan deteksi terbatas hingga sejauh kedalaman tertentu pada objek. Kedalaman penetrasi diberikan oleh Persamaan (1) berikut

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{1}$$

dimana  $f$  adalah frekuensi sinyal arus dan medan,  $\mu$  merupakan permeabilitas, dan  $\sigma$  adalah konduktivitas listrik.

Pembangkitan medan primer oleh kumparan dapat direkayasa menggunakan Hukum Biot-Savart

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{L} \times \mathbf{R}}{R^2} \tag{2}$$

dimana  $d\mathbf{L}$  pada Persamaan (2) merupakan elemen panjang dari pembawa arus dan  $\mathbf{R}$  adalah vektor jarak dari sumber arus ke titik kaji medan. Relasi tersebut menunjukkan bahwa untuk membangkitkan medan magnet pada posisi target tertentu, konfigurasi geometri dari kumparan eksitasi dapat dirancang beserta kuat arus  $I$  yang diperlukan. Konfigurasi kawat melingkar akan menghasilkan suatu medan yang dapat dilipatgandakan dengan memperbanyak jumlah lilitan kumparan tersebut.

Tegangan induksi  $V$  pada kumparan juga dapat direkayasa menggunakan prinsip Faraday [14] yang ditunjukkan oleh Persamaan (3),

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \tag{3}$$

dimana  $\Phi$  merupakan fluks magnet yang menembus suatu kumparan yang memiliki jumlah lilitan  $N$ . Apabila besarnya diekspansi, fluks magnet adalah  $\mu_0 \mu_r S \mathbf{H}$  dimana  $\mu_0$  permeabilitas vakum,  $\mu_r$  permeabilitas relatif material, dan  $S$  yaitu permukaan yang ditembus oleh intensitas medan magnet  $\mathbf{H}$ . Apabila terdapat medan magnet tertentu, maka untuk memperkuat tegangan induksi diperlukan area kumparan tertembus yang lebih luas, jumlah lilitan yang lebih banyak, serta material inti yang lebih bersifat magnetik.

### 2.1 Formulasi Potensial Vektor

Fenomena arus eddy merupakan aplikasi elektromagnetik yang dapat direpresentasikan melalui persamaan-persamaan Maxwell. Medan magnet diekspresikan sebagai *curl* dari suatu potensial vektor  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ . Penurunan ekspresi tersebut berupa Persamaan (4)

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \tag{4}$$

dan dari Hukum Faraday  $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  didapat

$$\nabla \times \left( \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (5)$$

Kuantitas di dalam tanda kurung pada Persamaan (5) dapat ditulis sebagai gradien dari suatu potensial scalar, sebagaimana Persamaan (6),

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla V \quad (6)$$

dikarenakan *curl* dari gradien adalah nol. Jika potensial listrik diambil sebagai konstan seperti pada konduktor, maka didapat Persamaan (7)

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (7)$$

Untuk medan harmonik waktu  $\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A}$ , serta mempertimbangkan Hukum Ohm  $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$ , persamaan Ampere-Maxwell (8) berikut

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu\mathbf{J}_e + \mu\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (8)$$

Menjadi bentuk Persamaan (9)

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = -j\omega\mu\sigma\mathbf{A} + \omega^2\mu\epsilon\mathbf{A} \quad (9)$$

Kemudian, mempertimbangkan identitas vektor  $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2\mathbf{A}$ , dan Coulomb *gauge* dimana  $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ , diperoleh Persamaan (10) yaitu vektor Helmholtz

$$\nabla^2\mathbf{A} = j\omega\mu\sigma\mathbf{A} - \omega^2\mu\epsilon\mathbf{A} \quad (10)$$

dengan tambahan komponen  $-\mu_0\mathbf{J}_s$  untuk keberadaan sumber. Setelah potensial vektor diselesaikan untuk suatu region konduktif, rapat arus eddy dapat langsung diperoleh melalui Persamaan (11)

$$\mathbf{J}_e = \sigma\mathbf{E} = -j\omega\sigma\mathbf{A} \quad (11)$$

Solusi analitik untuk permasalahan induksi arus eddy seringkali cukup kompleks karena melibatkan integral tak hingga atau penjumlahan Bessel atau fungsi khusus lainnya. Akan tetapi, prosedur untuk menghitung distribusi arus eddy cukup serupa untuk geometri konduktif yang berbeda. Hasil analitik berguna untuk verifikasi metode komputasi dan seringkali dapat diperluas untuk memodelkan distribusi arus eddy yang lebih kompleks menggunakan integral dan penjumlahan superposisi.

## 2.2 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga, atau *finite element method* (FEM), adalah metode yang mumpuni untuk menghitung medan pada regional dengan bentuk kompleks dan sifat material yang tidak homogen. FEM memberikan distribusi potensial yang kontinu sepanjang suatu region spasial. Secara umum, tahapan penyelesaian menggunakan FEM diawali dengan mendiskritkan region solusi menjadi sub-region atau elemen yang berjumlah tertentu. Kemudian, persamaan-persamaan pengaturannya diturunkan untuk suatu elemen yang spesifik. Selanjutnya, dilakukan penyusunan terhadap semua elemen pada region solusi. Sistem persamaan yang diperoleh lalu diselesaikan [15].

Untuk menyelesaikan potensial pada suatu region solusi, perlu ditentukan potensial dari titik-titik yang tidak dispesifikkan oleh syarat batas. Hal ini dicapai dengan konstruksi energi fungsional untuk tiap elemen. Energi total yang terkandung di dalam region solusi diperoleh dengan menyusun kontribusi dari tiap elemen. Potensial yang memenuhi persamaan Laplace atau Poisson juga

meminimalisasi energi total yang terkandung di dalam region solusi. Kebutuhan energi minimal diimplementasikan dengan mengeset turunan parsial dari energi total terhadap tiap potensial titik menjadi sama dengan nol. Hasil ini adalah suatu kumpulan dari persamaan-persamaan aljabar yang akan diselesaikan untuk tiap nilai potensial. Teknik untuk menyelesaikan persamaan tersebut meliputi *band matrix* dan metode iterasi.

Permasalahan magnetik diselesaikan dengan FEM melalui potensial vektor. Relasi konstitutif  $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$  menghubungkan intensitas medan magnet  $\mathbf{H}$  dengan rapat fluks  $\mathbf{B}$ . Suatu arus tunak  $\mathbf{J}$  akan membangkitkan suatu medan  $\mathbf{H}$  dengan *curl* sesuai dengan persamaan Ampere-Maxwell (tanpa variasi waktu) pada Persamaan (12) berikut

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \tag{12}$$

Dalam kasus material non-magnetik, vektor magnetisasi  $\mathbf{M}$  tidak terlibat pada persamaan. Selanjutnya, Persamaan (12) di atas dapat dinyatakan sebagai Persamaan (13) berikut

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) \tag{13}$$

sehingga, pada simetri aksial  $r - z$ , potensial vektor  $A_\phi(r, z)$  hanya memiliki komponen  $\phi$  dan memenuhi Persamaan (14) [16]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial(rA_\phi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right) = -J_\phi \tag{14}$$

Syarat batas dapat ditentukan pada batas-batas dari model atau *edge* dari region solusi. Medan *uniform* dan *non-uniform* serta rapat arus permukaan dapat disimulasikan dengan nilai potensial vektor yang diberikan dan kuat medan tangensial. Kondisi Dirichlet menentukan nilai dari fungsi fluks  $rA_0 = a + b z r + c r^2/2$  pada simetri aksial pada batas model atau *edge* eksternal.  $a, b$ , dan  $c$  adalah konstanta untuk tiap *edge* dan ditentukan tergantung dengan konstrain-konstrain di atas.

Formulasi hukum induksi dan arus eddy yang terinduksi oleh medan magnet ac pada Persamaan (12) dan (13) dengan mempertimbangkan arus total serta memindahkan bagian arus sumber  $\mathbf{J}_s$  ke sisi kanan persamaan menghasilkan [17]

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} + j\omega\sigma\mathbf{A} = \mathbf{J}_s \tag{15}$$

dimana  $\omega$  adalah frekuensi sudut,  $\mu$  adalah permeabilitas,  $\mathbf{A}$  adalah potensial vektor magnetik total sebagai akibat dari efek arus eddy yang diinduksi oleh konduktivitas listrik  $\sigma$  dan sumber arus  $\mathbf{J}_s$ . Persamaan (15) dapat diselesaikan dengan mengaproksimasi sistem sebagai suatu kombinasi persamaan linier dalam elemen-elemen kecil dengan syarat batas yang sesuai menggunakan aproksimasi Galerkin [18]

$$\int_{\Omega_e + \Omega_s} \left( \nabla \times N_i \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) dv + \int_{\Omega_e + \Omega_s} (j\omega\sigma N_i \cdot \mathbf{A}) dv = \int_{\Omega_s} (\nabla \times N_i \cdot \mathbf{T}_s) dv \tag{16}$$

Pada model elemen hingga, komputasi arus diselesaikan melalui bentuk potensial medan. Dalam hal ini  $\mathbf{T}_s$  adalah potensial vektor listrik dimana  $\mathbf{J}_s = \nabla \times \mathbf{T}_s$ ,  $N_i$  adalah kombinasi linier dari *edge shape function*,  $\Omega_e$  adalah daerah arus eddy, dan  $\Omega_s$  adalah daerah sumber arus atau kumparan eksitasi. Sisi kanan dari Persamaan (16) dapat diselesaikan melalui Hukum Biot-Savart. Apabila dimodelkan rapat arus satuan yang mengalir pada kumparan adalah  $\mathbf{J}_0$ , tegangan induksi yang terukur pada kumparan penerima dapat dihitung menggunakan Persamaan (17) berikut [19]

$$V = -j\omega \int_{\Omega_s} (\mathbf{A} \cdot \mathbf{J}_0) dv \tag{17}$$

Persamaan-persamaan pengatur medan magnet didasarkan pada Persamaan (7) untuk medan harmonis waktu, Hukum Ampere (12) dengan formulasi potensial vektor, serta arus total yang terdiri dari arus sumber dan arus eddy  $\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e$ . Sistem sensor biasanya dirancang sedemikian sehingga efek kapasitansi parasitik diminimalkan. Dengan demikian, bentuk arus perpindahan  $j\omega\mathbf{D}$  dalam persamaan dapat diabaikan. Selain itu, pada permasalahan ini, fenomena arus induksi akibat pergerakan material termagnetisasi  $\sigma\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  juga tidak dilibatkan.

$$\mathbf{J}_s = \frac{NI_{coil}}{a} \tag{18}$$

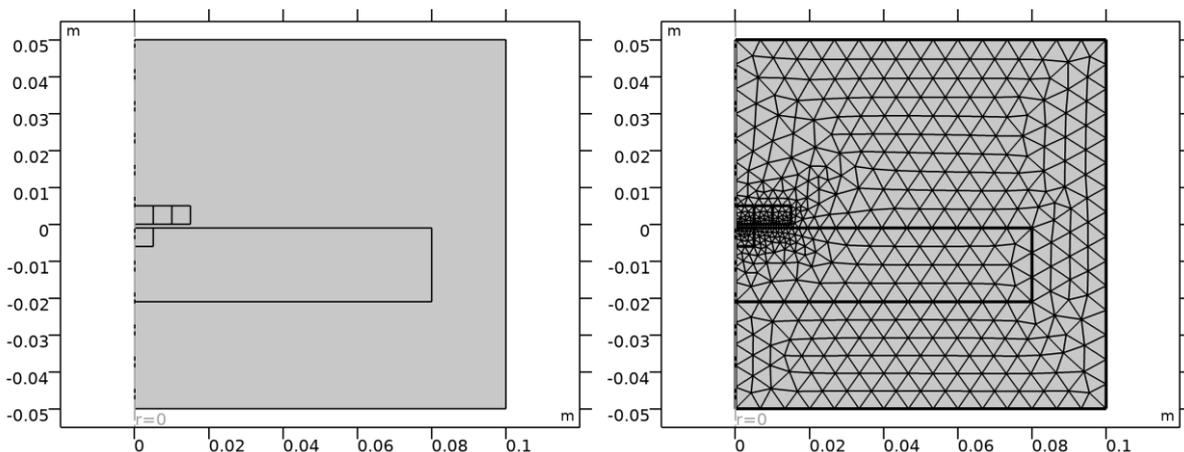
Pada kumparan, konstruksi diasumsikan berupa konduktor homogen sejumlah lilitan  $N$  dengan luas penampang  $a$  dialiri arus  $I_{coil}$  sesuai dengan Persamaan (18).

### 2.3 Pemodelan pada Perangkat Lunak

Sebagai contoh kasus permasalahan, pemodelan menggunakan perangkat lunak dapat dilakukan untuk mensimulasikan arus eddy yang terinduksi pada sebuah pelat yang memiliki cacat lubang di permukaannya. Perangkat lunak yang digunakan adalah COMSOL Multiphysics 5.6 (Build: 401) beroperasi pada Windows Server 2019 dengan prosesor Intel64 Family 6 (Model 85 Stepping 4, 8 cores) dan memori tersedia 65,54 GB (physical memory: 1.94 GB, virtual memory: 2.24 GB).

Dua kumparan ac diletakkan di atas sebuah pelat aluminum. Arus eddy pada pelat serta tegangan induksi pada kumparan akan dikomputasi. Respon dari kondisi normal dan kondisi cacat diperoleh dengan memonitor tegangan induksi kumparan penerima yang dibangkitkan dari perubahan medan magnet akibat induksi arus eddy. Kumparan sumber memiliki 10 lilitan, konduktivitas kawat  $6E7$  S/m, luas penampang kawat  $1E-6$  m<sup>2</sup> dialiri arus 1 A; sedangkan kumparan penerima memiliki 100 lilitan dengan konduktivitas dan luas penampang kawat yang sama.

Induksi arus eddy yang terjadi merupakan superposisi/resultan dari distribusi arus eddy kondisi normal dengan kondisi cacat. Domain udara dan cacat diset dengan material udara (permeabilitas relatif  $\mu_r = 1$ , permitivitas relatif  $\epsilon_r = 1$ , konduktivitas listrik  $\sigma = 0$  S/m). Domain kumparan diset dengan material tembaga (permeabilitas relatif  $\mu_r = 1$ , permitivitas relatif  $\epsilon_r = 1$ , konduktivitas listrik  $\sigma = 5,998E7$  S/m). Domain objek diset dengan material aluminum (permeabilitas relatif  $\mu_r = 1$ , permitivitas relatif  $\epsilon_r = 1$ , konduktivitas listrik  $\sigma = 3,774E7$  S/m).



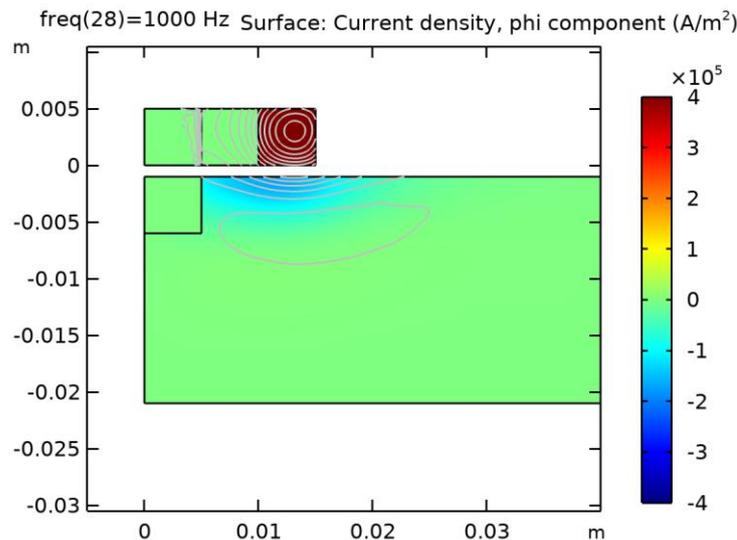
Gambar 2. Geometri dan *mesh* elemen hingga dari sepasang kumparan induksi di atas pelat yang memiliki cacat lubang pada permukaan

Gambar 2 menunjukkan *mesh* elemen hingga untuk sepasang kumparan induksi: bagian luar bertindak sebagai kumparan sumber/eksitasi; bagian dalam adalah kumparan penerima/deteksi. Konfigurasi seperti ini disebut juga sebagai struktur koaksial [20]. Kumparan sumber memiliki radius dalam 12,5 mm dan berupa bujur sangkar dengan sisi 5 mm. Kumparan penerima memiliki radius dalam 7,5 mm dan berupa bujur sangkar dengan sisi 5 mm. Kedua kumparan terletak 1 mm di atas sebuah pelat yang terdapat cacat lubang permukaan. Terdapat rongga berbentuk bujur sangkar dengan sisi 5 mm di bagian dalam kumparan penerima untuk menempatkan material inti dari kumparan. Pelat persegi memiliki panjang sisi 8 cm dengan ketebalan 2 cm. Cacat permukaan pada pelat tersebut berupa bujur sangkar berukuran 5 mm terletak pada batas simetri aksial  $r = 0$ . Struktur *mesh* adalah *free triangular* dengan jumlah elemen *triangle* 905, *edge* 139, *vertex* 19, ukuran elemen maksimal 0,0067, ukuran elemen minimal  $3,0E-5$ , *curvature factor* 0,3, serta *maximum element growth rate* 1,3. Batas *magnetic insulation* ditetapkan  $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$  pada sisi luar domain medium.

Study dilakukan pada domain frekuensi dengan *Stationary Solver. Parametric Solver* diset untuk mengakomodasi frekuensi operasi yang diubah pada tiap sesi penyelesaian. *Linear Solver* adalah pengaturan bawaan yang umumnya digunakan pada awal tahap penyelesaian. Jumlah *degrees of freedom* yang diselesaikan adalah 1880. Komputasi menentukan geometri *shape function Quadratic Lagrange*. Waktu penyelesaian komputasi potensial vektor magnetik pada frekuensi rendah adalah 1 detik dengan 1 iterasi, estimasi solusi 0,82, faktor redaman 1, *step size* iterasi 1, residu 1, evaluasi Jacobian 1, update solusi 1, *error* linier  $1,1E-15$ , dan residu linier  $2,8E-14$ .

### 3. HASIL

Garis-garis fluks dan rapat arus yang dihasilkan dari konfigurasi kumparan di atas pelat dengan cacat lubang pada permukaan ditunjukkan oleh Gambar 3. Frekuensi operasi pada kasus ini adalah 1 kHz.



Gambar 3. *Streamline* fluks dan rapat arus dari kumparan induksi di atas pelat dengan cacat lubang permukaan

*Streamline* pada gambar merepresentasikan sirkulasi fluks medan; sedangkan plot permukaan menunjukkan nilai rapat arus eddy di tiap domain. Sirkulasi fluks medan sesuai dengan karakter medan yang dibangkitkan oleh suatu kumparan elektromagnet. Nilai arus pada kumparan sumber tampak paling tinggi dikarenakan arus maksimum eksitasi yang diset pada kumparan tersebut; sedangkan pada kumparan penerima diset secara kondisi awal bernilai arus 0. Rapat arus pada pelat bernilai negatif menandakan distribusi yang terjadi adalah induksi arus eddy yang arahnya berlawanan dengan arus kumparan sumber untuk menimbulkan medan sekunder yang menentang medan sumber. Induksi arus eddy tersebut semakin mengecil hingga pada jarak sekian standar kedalaman penetrasi. Pada domain cacat, tidak induksi arus eddy disebabkan material pada domain tersebut adalah non-konduktif.

Simulasi juga dilakukan dengan menutup daerah cacat dengan material pelat sehingga objek menjadi normal. Selain itu, frekuensi kerja divariasikan dalam rentang 10 Hz hingga 10 kHz dengan kelipatan 1 dekade. Kemudian, material inti kumparan diubah dari udara ( $\mu_r = 1$ ) menjadi ( $\mu_r = 1000$ ). Untuk skema-skema tersebut tegangan induksi pada kumparan penerima dievaluasi.

Tabel 1. Tegangan Penerima pada Objek Normal dan Cacat untuk Kumparan Inti Udara

Frekuensi (Hz)	Tegangan Penerima Objek Normal (V)	Tegangan Penerima Objek Cacat (V)
10	0,000667007	0,000667028
100	0,005971955	0,005982085
1000	0,043508607	0,043749761
10000	0,346863580	0,348161577

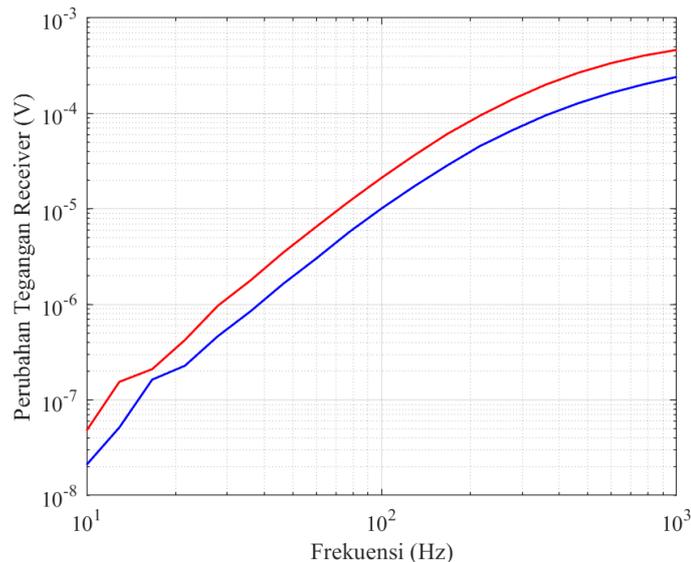
Tabel 1 menunjukkan nilai tegangan penerima pada kondisi objek normal dan objek cacat untuk konfigurasi kumparan dengan inti udara pada beberapa frekuensi eksitasi. Secara konsisten tegangan penerima untuk objek cacat bernilai lebih tinggi daripada objek normal pada semua frekuensi uji. Kondisi objek normal memfasilitasi sirkulasi induksi arus eddy yang kontinyu sehingga menghasilkan medan sekunder dengan intensitas tertentu. Keberadaan cacat membuat terhambatnya sirkulasi induksi arus eddy yang berdampak pada berkurangnya intensitas medan sekunder yang dibangkitkan. Dengan demikian tegangan induksi pada kumparan penerima juga menjadi relatif lebih kecil. Pada kumparan dengan inti udara ini, keberadaan cacat pada objek menghasilkan perubahan tegangan penerima sebesar 0,31%.

Tabel 2. Tegangan Penerima pada Objek Normal dan Cacat untuk Kumparan Inti Besi

Frekuensi (Hz)	Tegangan Penerima Objek Normal (V)	Tegangan Penerima Objek Cacat (V)
10	0,000903830	0,000903878
100	0,007949216	0,007970423
1000	0,054739053	0,055201902
10000	0,407605114	0,408301938

Tabel 2 menunjukkan nilai tegangan penerima pada kondisi objek normal dan objek cacat untuk konfigurasi kumparan dengan inti besi pada beberapa frekuensi eksitasi. Perbandingan nilai tegangan penerima pada kondisi objek normal dengan objek cacat mengikuti tren skema sebelumnya. Pada kumparan dengan inti besi ini, keberadaan cacat pada objek menghasilkan perubahan tegangan penerima sebesar 0,41%. Nilai tegangan yang terinduksi pada kumparan dengan inti besi lebih besar (untuk semua kasus) daripada nilai tegangan pada kumparan dengan inti udara. Hal ini mengkonfirmasi landasan dari Persamaan (3) yang menghubungkan besaran tegangan induksi secara proporsional dengan nilai permeabilitas material yang menjadi bagian dari suatu sensor induksi.

Dalam rangka evaluasi sensitivitas, perubahan tegangan penerima (dari selisih nilai untuk objek cacat vs normal) yang diperoleh dari kumparan inti udara dan inti besi sepanjang rentang frekuensi operasi diplot pada Gambar 4.



Gambar 4. Perubahan tegangan penerima (*receiver*) pada kondisi objek cacat vs normal untuk rentang frekuensi 10 Hz – 1 kHz

Perubahan tegangan penerima untuk kumparan inti udara ditunjukkan pada grafik garis biru; sedangkan selisih nilai tegangan penerima untuk objek cacat vs normal untuk kumparan inti besi ditunjukkan pada grafik garis merah. Terlihat bahwa perubahan tegangan penerima untuk kumparan inti besi lebih besar dari selisih nilai tegangan penerima untuk kumparan inti udara. Dengan demikian, penambahan inti besi pada konfigurasi sensor kumparan induksi meningkatkan rata-rata sensitivitas deteksi sebesar 86% sepanjang rentang frekuensi arus eksitasi di bawah 1 kHz.

#### 4. KESIMPULAN

Pemodelan arus eddy untuk evaluasi objek logam non-magnetik telah dieksekusi menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak multifisika. Konfigurasi sensor kumparan induksi dikaji untuk variasi kondisi objek pada frekuensi operasi di bawah 1 kHz. Pada kumparan dengan inti udara, keberadaan cacat pada objek menghasilkan perubahan tegangan penerima sebesar 0,31%; sedangkan pada kumparan dengan inti besi, keberadaan cacat pada objek menghasilkan perubahan tegangan penerima sebesar 0,41%. Penambahan inti besi pada konfigurasi sensor kumparan induksi meningkatkan rata-rata sensitivitas deteksi sebesar 86%. Penelitian ini menganalisis arus eddy dalam domain dua dimensi secara simetri aksial yang tidak langsung dapat merepresentasikan kondisi riil pengujian berupa domain tiga dimensi yang umumnya tidak simetris. Meskipun demikian, hasil simulasi berpotensi dieskalasi ke model yang lebih kompleks sehingga bermanfaat untuk memandu optimasi pengukuran. Prosedur ini dapat menjadi sarana perancangan prototipe cepat dalam pengembangan sistem instrumentasi berbasis arus eddy yang efektif pada kasus pengujian tak merusak.

#### REFERENSI

- [1] N. O. Romero-Arismendi, J. C. Olivares-Galvan, J. L. Hernandez-Avila, R. Escarela-Perez, V. M. Jimenez-Mondragon, and F. Gonzalez-Montañez, "Past, Present, and Future of New Applications in Utilization of Eddy Currents," *Technologies*, vol. 12, no. 4, p. 50, Apr. 2024, doi: 10.3390/technologies12040050.
- [2] A. J. Mohamad, K. Ali, D. Rifai, Z. Salleh, and A. A. Z. Othman, "Eddy Current Testing Methods and Design for Pipeline Inspection System: A Review," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2467, no. 1, p. 012030, May 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2467/1/012030.
- [3] B. Karanfiloğlu, N. V. Erden, and E. E. Gültekin, "Inspection of aircraft parts by eddy current method," *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, vol. 4, no. 1, pp. 36–42, Jun. 2023, doi: 10.55212/ijaa.1310747.

- [4] A. D. Eslamlou, A. Ghaderiaram, E. Schlangen, and M. Fotouhi, “A review on non-destructive evaluation of construction materials and structures using magnetic sensors,” *Construction and Building Materials*, vol. 397, p. 132460, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132460.
- [5] K. C. Williams, M. D. O’Toole, M. J. Mallaburn, and A. J. Peyton, “A review of the classification of non-ferrous metals using magnetic induction for recycling,” *insight*, vol. 65, no. 7, pp. 384–388, Jul. 2023, doi: 10.1784/insi.2023.65.7.384.
- [6] A. N. AbdAlla, M. A. Faraj, F. Samsuri, D. Rifai, K. Ali, and Y. Al-Douri, “Challenges in improving the performance of eddy current testing: Review,” *Measurement and Control*, vol. 52, no. 1–2, pp. 46–64, Jan. 2019, doi: 10.1177/0020294018801382.
- [7] S. Borovik, M. Kuteynikova, and Y. Sekisov, “Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors,” *Sensors*, vol. 23, no. 1, p. 351, Dec. 2022, doi: 10.3390/s23010351.
- [8] A. S. Repelianto and N. Kasai, “The Improvement of Flaw Detection by the Configuration of Uniform Eddy Current Probes,” *Sensors*, vol. 19, no. 2, p. 397, Jan. 2019, doi: 10.3390/s19020397.
- [9] F. Barrarat, K. Rayane, B. Helifa, and I. K. Lefkaier, “Characterization of subsurface cracks in eddy current testing using machine learning methods,” *Int J Numerical Modelling*, vol. 35, no. 6, p. e2876, Nov. 2022, doi: 10.1002/jnm.2876.
- [10] M. A. Machado, “Eddy Currents Probe Design for NDT Applications: A Review,” *Sensors*, vol. 24, no. 17, p. 5819, Sep. 2024, doi: 10.3390/s24175819.
- [11] B. Dita Ayu, R. Rohmadi, A. Rudin, I. Muttakin, and W. P. Taruno, “Design of a Sensor Coil for Electromagnetic Induction Tomography,” *MATEC Web Conf.*, vol. 218, p. 02001, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201821802001.
- [12] F. N. Adiputri, E. N. Prasetiani, Rohmadi, A. Saputra, I. Muttakin and W. P. Taruno, “Simulation of Magnetic Induction Tomography Sensor with 8-Coils Solenoid and Planar,” *2017 5th International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME)*, Bandung, Indonesia, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICICI-BME.2017.8537753.
- [13] I. Muttakin, S.- Y. Yeap, M. M. Mansor, M. H. M. Fathil, I. Ibrahim, I. Ariffin, et al., “Low cost design of precision medical ultrasound power measurement system”, *International Journal of Circuits Systems and Signal Processing*, vol. 5, no. 6, pp. 672-682, 2011
- [14] S. Tumanski, “Induction coil sensors—a review,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 3, pp. R31–R46, Mar. 2007, doi: 10.1088/0957-0233/18/3/R01.
- [15] M. N. O. Sadiku, “A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems,” in *IEEE Transactions on Education*, vol. 32, no. 2, pp. 85-93, May 1989, doi: 10.1109/13.28037.
- [16] J. R. Claycomb, *Applied Electromagnetics Using QuickField and MATLAB*, USA: Jones & Bartlett Publishers, 2010.
- [17] O. Bíró, “Edge element formulations of eddy current problems,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 169, no. 3–4, pp. 391–405, Feb. 1999, doi: 10.1016/S0045-7825(98)00165-0.
- [18] B. Rivière, *Discontinuous Galerkin Methods for Solving Elliptic and Parabolic Equations: Theory and Implementation*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008. doi: 10.1137/1.9780898717440.
- [19] I. Muttakin, T. Wondrak and M. Soleimani, “Magnetic Induction Tomography Sensors for Quantitative Visualization of Liquid Metal Flow Shape,” in *IEEE Sensors Letters*, vol. 4, no. 7, pp. 1-4, July 2020, Art no. 6001204, doi: 10.1109/LSENS.2020.3000292.
- [20] D. Haryono, I. Muttakin, R. F. Suwandana, A. Sholehah, K. Nugraha, and Fadlil, “Sensor Arus Eddy Koaksial,” *Paten Indonesia No. IDS000008689*, Aug. 12, 2024.