

STUDI KELAYAKAN SISTEM PLANAR INDUKSI MEDAN MAGNET MENGUNAKAN *SINGLE TRANCEIVER* PADA BAHAN FERROMAGNETIK DAN NON-FERROMAGNETIK

FEASIBILITY STUDY OF MAGNETIC FIELD INDUCTION PLANAR SYSTEM BY USING SINGLE TRANCEIVER ON FERROMAGNETIC AND NON-FERROMAGNETIC MATERIALS

Bella Eliana¹, Dudi Darmawan², Mahfudz Al Huda³

^{1,2}Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Telkom
³C-Tech Lab Edwar Technology

¹bellaeliana@gmail.com, ²dudidw@gmail.com, ³huda1126@gmail.com

Abstrak

Telah dibuat sistem planar induksi medan magnet menggunakan *single tranceiver*. Adanya masukan berupa arus bolak-balik (AC) pada koil pemancar menimbulkan medan magnet yang berubah-ubah sehingga menimbulkan tegangan induksi pada koil penerima, besarnya medan magnet induksi ini juga dipengaruhi oleh permeabilitas medium antara koil pemancar dan koil penerima. Simulasi COMSOL pada sistem digunakan sebagai studi awal penentuan rancangan geometri sensor koil, nilai induktansi koil, dan pola sebaran densitas fluks magnetik. Mengacu pada hasil simulasi ini, kemudian dibuat prototipe sistem. Prototipe sistem diuji coba untuk mengenali perbedaan bahan ferromagnetik dan non-ferromagnetik. Kemudian, setelah mendapatkan jenis bahan yang lebih sensitif terhadap sistem, maka jenis bahan tersebut diuji dengan variasi ketebalan dan anomali yang bervariasi. Nilai induktansi rata-rata hasil pengukuran adalah sebesar 0,06959 mH, sedangkan pada simulasi COMSOL sebesar 0,05162 mH. Pada pengujian sistem, masukan yang diberikan dari function generator sebesar 10,2 Volt dan dengan rentang frekuensi kerja 2 MHz – 8 MHz, kemudian hasilnya dibaca pada osiloskop. Sistem planar induksi medan magnet ini mampu membedakan jenis bahan ferromagnetik dan non-ferromagnetik berupa benda solid (parafin, besi di dalam parafin, besi) dan benda berbentuk serbuk (kuarsa dan Fe₃O₄ atau magnetite). Namun, sistem ini belum mampu membedakan ketebalan dan anomali dari bahan baja secara signifikan.

Kata kunci : koil, sensor, induksi, medan magnet, planar

Abstract

Magnetic field induction planar system has been developed by using single tranceiver. The existence of an input of alternating current (AC) in the transmitter coil cause magnetic field changing, it causing emf at the receiver coil. The magnitude of the magnetic field induction is also influenced by the permeability of the medium between the transmitter and receiver coil. COMSOL system of this system is used to preliminary study of coil sensor geometry design, value of coil inductance, and pattern of magnetic flux density distribution. Referring to the results of this simulation, then made prototypes of the system. System prototypes were tested to recognize differences in ferromagnetic and non-ferromagnetic materials. Then, after obtaining a type of material that is more sensitive to the system, then the type of material is tested with thickness and anomaly variations. The average inductance value of the measurement result is 0.06959 mH, while the COMSOL simulation is 0.05162 mH. In system test, the input is given by function generator is 10,2 Volt and with working frequency on range 2 MHz - 8 MHz, then the result is displayed on oscilloscope. The planar induced magnetic field system is capable of distinguishing types of ferromagnetic and non-ferromagnetic materials such as solids (paraffin, iron in paraffin, iron) and powdered objects (quartz and Fe₃O₄ or magnetite). However, this system has not been able to distinguish the thickness and anomaly of steel materials significantly.

Keywords: coil, sensor, induction, magnetic field, planar

1. Pendahuluan

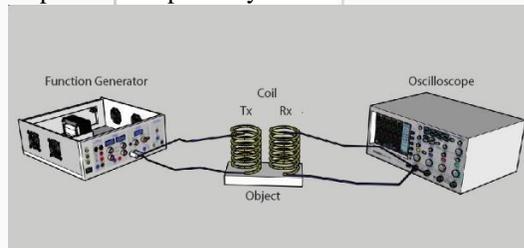
Pada penelitian ini akan dipelajari dan dikembangkan tomografi dengan modalitas gelombang magnet atau dalam penelitian ini disebut induksi medan magnet. Modalitas non-invasif ini memanfaatkan medan elektromagnetik dan sensitif terhadap ketiga sifat elektromagnetik pasif material yaitu konduktivitas, permitivitas, dan permeabilitas. Induksi medan magnet dikategorikan sebagai keluarga pencitraan pasif dengan teknik *electrodeless* melalui penggunaan eksitasi kumparan untuk menginduksi medan elektromagnetik dalam materi, yang kemudian diukur pada sisi penerima dengan sensor [1]. Induksi medan magnet biasa juga disebut sebagai induktansi tomografi atau tomografi *eddy-current*, merupakan teknik tomografi listrik yang paling baru dieksplorasi dibandingkan dengan sistem tomografi listrik lainnya, seperti tomografi impedansi listrik dan kapasitansi listrik. Induksi medan magnet juga dikembangkan dalam bentuk sensor planar yaitu sistem planar induksi medan magnet.

Pendekatan pertama yang dilakukan adalah uji kelayakan pada sistem planar induksi medan magnet yang cukup layak menghasilkan besaran yang dapat diobservasi pada bahan ferromagnetik dan non-ferromagnetik. Hal ini yang menjadi fokus utama pada penelitian tugas akhir ini. Uji kelayakan sistem planar induksi medan magnet ini dilakukan melalui studi simulasi dan eksperimen. Dengan studi simulasi dan eksperimen ini, diharapkan sistem ini dapat mendeteksi bahan ferromagnetik dan non-ferromagnetik. Kemudian, pada jenis bahan yang lebih sensitif, apakah sistem ini mampu mendeteksi perbedaan ketebalan dan anomali berupa lubang. Perbedaan tersebut dapat dilihat dari nilai ggl induksi yang dihasilkan oleh medan magnet yang masuk ke dalam objek.

2. Dasar Teori

2.1 Medan Magnet pada Sistem Planar Induksi Medan Magnet

Konsep sistem planar induksi medan magnet yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini yaitu konsep dari *Magnetic Induction Tomography* (MIT). MIT adalah teknik tomografi yang mampu mencitrakan sifat elektromagnetik pasif suatu objek [2]. Teknik ini disebut juga *Electrical Magnetic Tomography* (EMT) atau Mutual Induction Tomography. Jika arus bolak-balik (AC) diberikan ke koil pemancar (Tx) akan menghasilkan medan magnet (B) di ruang objek uji. Medan magnet tersebut biasa disebut medan magnet pertama atau medan magnet primer (B_0). Jika medan magnet pertama atau medan magnet primer (B_0) berinteraksi dengan objek uji yang bersifat konduktif akan menghasilkan arus eddy dan arus eddy tersebut akan menghasilkan medan magnet kedua atau medan magnet sekunder (B_1) yang akan diterima oleh koil penerima (Rx). Sedangkan, saat objek uji tidak bersifat konduktif, maka tegangan induksi yang muncul pada koil penerima sepenuhnya disebabkan oleh medan magnet primer.

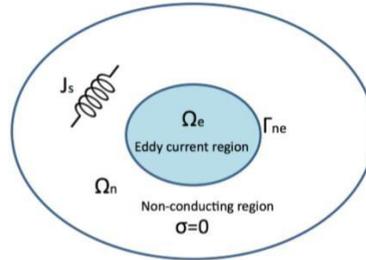


Gambar 1. Skema Pengukuran Tegangan Induksi pada Sistem Planar Induksi Medan Magnet

Skematik pengukuran tegangan induksi menggunakan prinsip MIT dengan menggunakan dua buah koil seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Salah satu koil tersebut bertindak sebagai koil pemancar dan yang lain bertindak sebagai koil penerima. Kedua buah koil tersebut diletakkan pada batas ruang objek uji dan posisi koil tegak lurus terhadap batasan ruang objek uji, seperti yang dilihat pada ilustrasi Gambar 1.

2.2 Persamaan Maxwell

Problema maju diselesaikan dalam kondisi medan elektromagnetik quasi-statis. Dalam kondisi ini, beberapa asumsi perlu dibuat. Pertama, pergeseran arus diabaikan; kedua, material atau bahan dianggap memiliki karakter isotropik; ketiga, efek arus eddy pada sumber arus juga diabaikan. Perhatikan bahwa ada dua daerah pada medan elektromagnetik quasi-statis, daerah *non-conducting* dan daerah arus eddy yang dapat dilihat pada Gambar 2 [2].



Gambar 2. Daerah Arus Eddy

Menggunakan notasi *time-harmonic* dari persamaan Maxwell, di daerah arus eddy Ω_e [2]:

Hukum Ampere $\nabla \times H = j_{eddy}$ (1)

Hukum Faraday $\nabla \times E = -j\omega B$ (2)

Hukum Gauss untuk medan magnetik $\nabla \cdot B = 0$ (3)

Di daerah *non-conducting* Ω_n :

Hukum Ampere $\nabla \times H = j_s$ (4)

Hukum Gauss untuk medan magnetik $\nabla \cdot B = 0$ (5)

Pada masing-masing daerah, medan B dan medan H memastikan bahwa komponen normal dari medan B adalah nol dan komponen tangensial dari medan H adalah nol. Di batas antara dua daerah :

$$n_e \cdot B_e + n_n \cdot B_n = 0 \quad (6)$$

$$n_e \times H_e + n_n \times H_n = 0 \quad (7)$$

2.3 Arus Eddy

Ketika lilitan dialiri oleh arus bolak-balik, maka akan timbul medan magnet di sekitar kawat penghantar. Medan magnet tersebut besarnya berubah-ubah sesuai dengan arus yang mengalir pada lilitan tersebut. Jika terdapat bahan konduktif disekitar medan magnet yang berubah-ubah, maka pada bahan konduktif tersebut akan mengalir arus yang disebut arus eddy. Jadi, arus eddy adalah arus pusar yang diinduksi ke bahan konduktif yang terjadi akibat diletakkan disekitar medan magnetik yang dibangkitkan oleh kawat penghantar yang dialiri arus bolak balik. Akibat munculnya arus eddy maka muncul daya disipasi. Rumus daya disipasi seperti dituliskan di bawah ini [2] :

$$P = \frac{2}{6} \frac{f^2}{\dots} \quad (8)$$

2.4 Frekuensi Resonansi pada Koil

Setelah diinputkan ke koil *transmitter* atau koil penerima, tegangan eksitasi akan mengalami penurunan atau biasa disebut dengan tegangan jatuh. Tegangan jatuh dapat terjadi karena pada suatu kumparan memiliki nilai impedansi sehingga setiap kali arus mengalir melalui kumparan tersebut, akan ada jatuh tegangan di sepanjang kumparan. Dari nilai tegangan pada koil *transmitter* dan tegangan eksitasi mengalami penurunan. Hal ini didasari dengan persamaan sebagai berikut [7] :

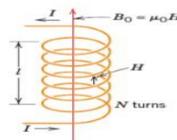
$$V_{\text{coil}} = \frac{V_{\text{source}}}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (9)$$

Besar amplitudo $V_{\text{Koil Tx}}$, V_{sumber} , serta hambatan R sudah diketahui, maka menggunakan persamaan 2.21 dan 4.2 tersebut dapat diperoleh besarnya reaktansi induktif koil pemancar tersebut.

$$X_L = 2\pi f L \quad (10)$$

2.5 Sensor Koil (Solenoida)

Medan magnet yang dihasilkan pemancar dibuat berdasarkan hukum Biot Savart yang menyatakan adanya medan magnet di sekitar kawat berarus listrik. Sensor berbentuk koil solenoida, yaitu berupa kawat yang dililitkan berbentuk silinder, seperti pada Gambar 3 [3].



Gambar 3. Koil Solenoida

Pada penelitian tugas akhir ini digunakan koil *single-layer air core* sebagai sensor dan untuk mengetahui nilai induktansi diri dari masing-masing koil dapat dijelaskan melalui persamaan sebagai berikut :

$$L = \frac{\mu_0 N^2}{(45 + 100)} \tag{11}$$

Persamaan ini memiliki nilai *error* mencapai 1% ketika $1/D > 0,4$, yaitu jika koil tidak terlalu pendek. Persamaan ini tidak berlaku untuk koil yang pendek.

2.3 Skin Depth

Skin depth dari radiasi elektromagnetik sering disebut kedalaman penetrasi, maksudnya adalah jarak ke dalam sebuah logam beradiasi sampai $\frac{1}{e}$ dari intensitas awalnya. Namun, *skin depth* juga dapat menunjukkan ke kedalaman dari permukaan suatu konduktor dimana $\frac{1}{e}$ atau sekitar 37% dari *current density*. Ini menunjukkan bahwa medan magnet yang berubah terhadap waktu menginduksi arus eddy dalam melakukan pengujian pada suatu bahan[4]. *Skin depth* dirumuskan pada persamaan berikut :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{12}$$

2.4 Magnetisasi

Magnetisasi dari suatu bahan magnetik disebut magnetisasi dari suatu material. Magnetisasi merupakan proses untuk pembangkitan medan magnet pada bahan yang akan diinspeksi [5]. Magnetisasi dapat dilakukan pada solenoida yang dialiri arus untuk membangkitkan medan magnet pada bahan seperti logam. Besarnya magnetisasi tersebut dipengaruhi oleh seberapa besar arus yang dihasilkan pada lilitan solenoida yang mengimbas bahan tersebut. Namun, bahan logam tersebut memiliki sifat magnet yang berbeda-beda, dengan besar arus lilitan solenoida yang sama akan dihasilkan magnetisasi yang berbeda pula [6]. Maka magnetisasi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$M = \chi_m H, \tag{13}$$

3. Rancangan Prosedur Penelitian

Gambar 4 menunjukkan tahapan penelitian tugas akhir yang dilakukan. Penelitian dimulai dengan tahap simulasi desain sistem planar induksi medan magnet yaitu : desain simulasi menggunakan COMSOL Multiphysics 4.4 untuk melihat distribusi medan magnet serta mengetahui nilai self-inductance dari koil sensor. Tahap berikutnya adalah tahap pembuatan serta konfigurasi koil sensor yang dilanjut dengan pengukuran self-inductance menggunakan LCR meter dan pengambilan data tegangan induksi dari koil penerima.



Gambar 4. Blok Diagram Tahapan Penelitian Tugas Akhir

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Induktansi Diri Koil

Pada Tabel 1 nilai induksi rata-rata dari koil 1 adalah 0,069434 mH dan koil 2 adalah 0,06976 mH. Nilai induktansi kedua koil tersebut tidak berbeda secara signifikan, sehingga kedua koil tersebut dapat digunakan sebagai pasangan sensor koil untuk penelitian tugas akhir ini.

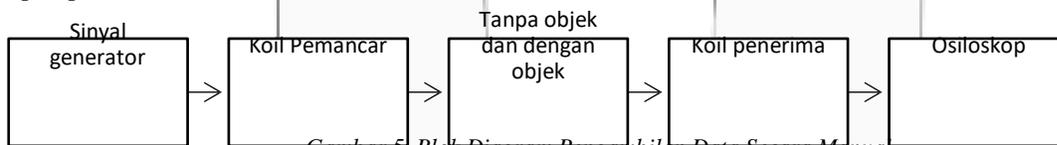
Nilai induktansi rata-rata hasil pengukuran adalah sebesar 0,069597 mH. Nilai ini berbeda dengan simulasi COMSOL yang dihitung pada pembahasan sebelumnya yaitu sebesar 0,05162 mH. Hal ini dapat diakibatkan adanya perbedaan kondisi *real* saat pengukuran dan simulasi.

Tabel 1. Nilai Induktansi Diri Koil dari Hasil Pengukuran Menggunakan LCR Meter

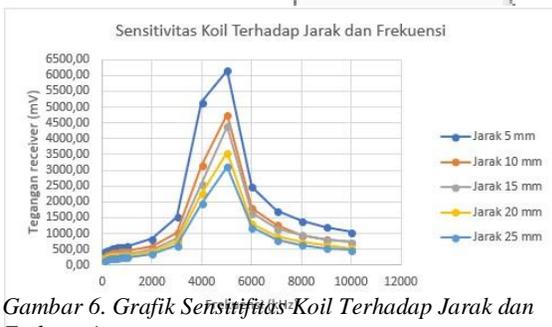
Koil	L (mH)	C (µF)	R (Ω)	Q
Koil 1	0.069	-3.6549	1.247	3.496
	0.0694	-3.6549	1.247	3.495
	0.06993	-3.6549	1.247	3.495
	0.06942	-3.6548	1.247	3.398
	0.06942	-3.6548	1.247	3.496
Koil 2	0.06983	-3.626	1.2479	3.512
	0.06983	-3.6259	1.2476	3.516
	0.06984	-3.626	1.2476	3.517
	0.06983	-3.6259	1.2476	3.517
	0.06947	-3.6259	1.2475	3.52

4.2 Pengujian Data Karakterisasi Sensor Koil

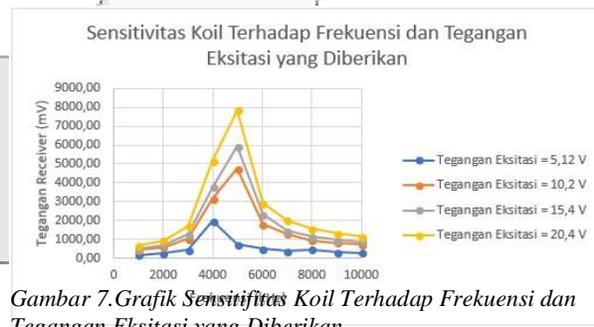
Gambar 5 menunjukkan blok diagram pengambilan data karakterisasi secara langsung dengan metode trial and error dengan terlebih dahulu bertumpu pada literatur yang telah ada. Kemudian, mencoba membuat kembali disesuaikan dengan kebutuhan objek disertai pengamatan terhadap besaran fisis seperti tegangan pada koil pemancar maupun penerima.



Gambar 5. Blok Diagram Pengambilan Data Secara Manual



Gambar 6. Grafik Sensitivitas Koil Terhadap Jarak dan Frekuensi

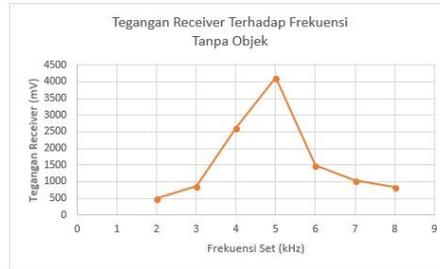


Gambar 7. Grafik Sensitivitas Koil Terhadap Frekuensi dan Tegangan Eksitasi yang Diberikan

Pada Gambar 6 dan Gambar 7 dapat dilihat bahwa ketika sebelum didekatkan objek uji, frekuensi 5 MHz merupakan frekuensi sumber arus yang paling optimal karena nilai tegangan yang dibaca oleh koil penerima besar dibandingkan dengan frekuensi lainnya. Namun, sensitifitas sistem pada setiap objek uji terhadap frekuensi berbeda-beda, maka dari gambar grafik tersebut diambil frekuensi dengan rentang 2 MHz – 8 MHz sebagai frekuensi sumber arus (frekuensi kerja).

4.3 Pengambilan Data Eksperimen

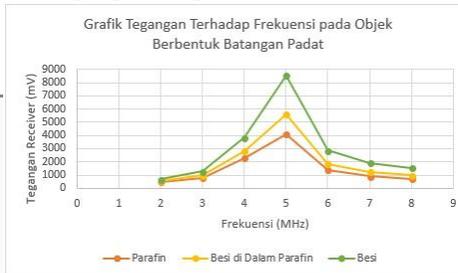
4.3.1 Pengujian Tanpa Objek



Gambar 8. Grafik Tegangan Induksi Koil Penerima Terhadap Frekuensi Tanpa Objek

Pada Gambar 8 menunjukkan grafik tegangan induksi pada koil penerima terhadap frekuensi. Pada gambar grafik di bawah ini dapat dilihat bahwa dari rentang frekuensi 2 MHz – 8 MHz nilai tegangan induksi pada koil penerima (tegangan receiver) mengalami fluktuasi. Pada saat frekuensi kerja 5 MHz, nilai tegangan induksi pada koil penerima adalah yang paling besar dibandingkan dengan frekuensi lainnya dan tegangan pada koil pemancar pun tidak mengalami tegangan drop. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran tanpa objek atau objek berupa udara optimal pengukurannya pada frekuensi 5 MHz.

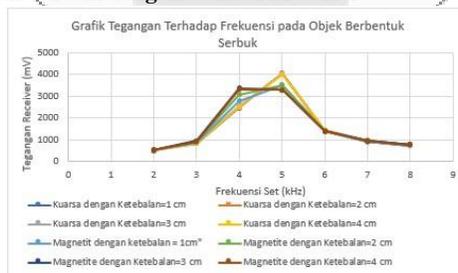
4.3.2 Pengujian pada Objek Berbentuk Lempengan dengan Variasi Jenis Material



Gambar 9. Grafik Tegangan Induksi Koil Penerima Terhadap Frekuensi pada Objek Berbentuk Lempengan Padat

Pada Gambar 9 menunjukkan bahwa nilai tegangan induksi koil penerima objek lempengan besi lebih besar dari nilai tegangan induksi koil penerima pada lempengan parafin, dan lempengan besi dalam parafin. Perbedaan tegangan induksi koil penerima ini disebabkan perbedaan sifat material yang dimiliki. Pada objek besi bersifat ferromagnetik dan pada objek parafin bersifat non-ferromagnetik, dimana nilai konduktivitas listrik material ferromagnetik lebih besar dari material non-ferromagnetik. Dimana nilai konduktivitas listrik berbanding terbalik dengan nilai resistivitas bahan tersebut. Nilai resistivitas dari besi sebesar $9,71 \times 10^{-8} \Omega m$, sedangkan resistivitas paraffin berada pada rentang nilai $10^{13} \Omega m$ sampai dengan $10^{17} \Omega m$.

4.3.3 Pengujian pada Objek Berbentuk Serbuk dengan Variasi Material



Gambar 10. Grafik Tegangan Induksi Koil Penerima Terhadap Frekuensi pada Objek Berbentuk Serbuk

Pada Gambar 10 menunjukkan bahwa nilai tegangan induksi koil penerima pada objek pasir kuarsa mendekati nilai tegangan induksi ketika objek berupa udara pada rentang frekuensi 2 MHz – 8 MHz, sedangkan pada serbuk Fe_3O_4 mengalami penurunan tegangan induksi koil penerima mulai frekuensi 5 MHz – 8 MHz. Sehingga, untuk

mendapatkan nilai tegangan induksi koil penerima pada serbuk Fe₃O₄ optimum dilakukan pada frekuensi sumber arus 4 MHz. Berbeda dengan pengujian-pengujian sebelumnya dimana frekuensi sumber yang optimum yaitu pada frekuensi 5 MHz. Hal ini dikarenakan nilai resistansi Fe₃O₄ meningkat dibandingkan dengan nilai resistansi kuarsa. Diketahui bahwa nilai resistivitas Fe₃O₄ berada pada rentang 1 Ωm hingga 1000 Ωm dan nilai resistivitas kuarsa berada pada rentang 500 Ωm hingga 800000 Ωm. Hubungan antara resistansi dan resistivitas dapat dijelaskan dengan persamaan berikut :

$$R = \frac{\rho L}{A} \tag{14}$$

Dimana :

L = Panjang Konduktor (m)

ρ = Resistivitas Bahan (Ωm)

A = Luas Penampang Konduktor (m²)

R = Resistansi Bahan (Ω)

4.3.4 Pengujian pada Objek Baja dengan Variasi Ketebalan

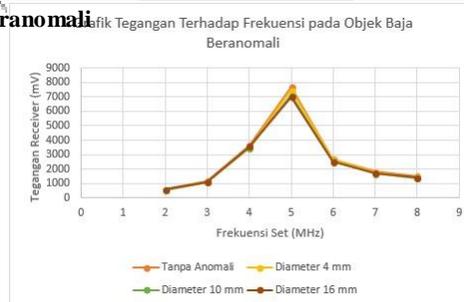


Gambar 11. Grafik Tegangan Induksi Koil Penerima Terhadap Frekuensi pada Objek Baja dengan Variasi Ketebalan

Pada Gambar 11 menunjukkan grafik hasil pengukuran sistem planar induksi medan magnet pada objek baja dengan variasi ketebalan menggunakan frekuensi sumber arus 2 MHz hingga 8 MHz dan amplitudo tegangan koil pemancar 10,2 Vpp. Pada gambar grafik di bawah ini dapat dilihat bahwa pada rentang frekuensi 2 MHz – 8 MHz nilai tegangan induksi koil penerima tidak mengalami perubahan yang signifikan pada masing-masing ketebalan objek uji. Nilai tegangan induksi koil penerima paling besar dibaca pada frekuensi sumber 5 MHz.

Tidak terdapat perbedaan nilai tegangan induksi koil penerima secara signifikan disebabkan oleh adanya faktor skin depth. Dimana skin depth atau biasa disebut juga skin effect akan menurun dengan meningkatnya frekuensi sumber arus dan permeabilitas magnetik dari bahan. Pada pengujian ini, nilai skin depth yang dihasilkan yaitu sebesar 9,55 μm. Nilai skin depth tersebut jauh lebih kecil dari ketebalan masing-masing objek baja yang digunakan dalam pengujian ini, sehingga tak ada perbedaan tegangan induksi koil penerima dari hasil pengujian masing-masing ketebalan lempengan baja.

4.3.5 Pengujian pada Objek Baja Beranomali



Gambar 12. Grafik Tegangan Induksi Koil Penerima Terhadap Frekuensi pada Objek Baja Beranomali

Pada Gambar 12 menunjukkan hasil pengujian pada objek baja yang diberi anomali berupa lubang di tengah objek dengan diameter yang berbeda-beda. Dari hasil di atas diperoleh bahwa perbedaan tegangan induksi yang dihasilkan tidak signifikan untuk perbedaan ukuran anomali, tetapi terlihat perbedaan data tegangan induksi koil penerima pada objek baja yang sudah diberi anomali saat diberi frekuensi dengan rentang 2 MHz – 8 MHz. Pada

grafik di atas perbedaan tegangan induksi koil penerima dapat dilihat bedanya pada frekuensi 5 MHz, dengan begitu frekuensi 5 MHz dapat dikatakan sebagai frekuensi yang optimum dalam membedakan tegangan induksi koil penerima dari masing-masing diameter anomali.

Besar nilai tegangan induksi koil penerima pada objek baja beranomali dipengaruhi oleh besar diameter lubang pada lempengan baja. Seperti yang ditampilkan pada gambar grafik di atas, semakin kecil diameter anomalnya, maka nilai tegangan induksi koil penerimanya akan semakin mendekati nilai tegangan induksi pada lempengan baja tanpa anomali. Sedangkan, semakin besar diameter anomalnya, maka nilai tegangan induksi koil penerima pun semakin mendekati nilai tegangan induksi pada objek udara. Hal ini disebabkan oleh luasan lempengan baja yang berkurang terisi oleh udara sehingga informasi yang dibaca sensor koil tak hanya objek berupa lempengan baja tetapi juga objek berupa udara. Sehingga, nilai tegangan induksi koil penerima pada lempengan baja beranomali yang dibaca tidak kurang dari nilai tegangan induksi pada objek udara dan juga tidak lebih dari nilai tegangan induksi pada objek lempengan baja.

5. Kesimpulan

Pada sistem planar induksi medan magnet, nilai tegangan induksi pada koil penerima saat diberi objek berupa pasir kuarsa sama dengan saat diberi objek berupa udara. Sedangkan, pada serbuk Fe_3O_4 yang merupakan bahan ferromagnetik terjadi pergeseran frekuensi sumber arus yang optimum. Dimana ketika pada objek berupa pasir kuarsa frekuensi puncak sumber arusnya pada frekuensi 5 MHz, sedangkan pada serbuk Fe_3O_4 frekuensi puncak sumber arusnya pada frekuensi 4 MHz. Hasil data pengukuran sistem planar induksi medan magnet terhadap objek yang diuji lebih baik pada objek berbahan ferromagnetik dibandingkan dengan objek berbahan non-ferromagnetik. Namun, sistem ini belum mampu membedakan ketebelan dan anomali dari bahan baja secara signifikan.

Daftar Pustaka:

- [1] Z. Zakaria, R. A. Rahim, M. S. B. Mansor, S. Yaacob, N. M. N. Ayub, S. Z. M. Muji, M. H. F. Rahiman, and S. M. K. S. Aman. Jan. 2012. "Advancements in Transmitters and Sensors for Biological Tissue Imaging in Magnetic Induction Tomography," *Sensors*. vol. 12, no. 6, pp. 7126–7156.
- [2] Ma, Lu., & Soleimani, Manuchehr. 2017. *Magnetic Induction Tomography Methods and Application : a Review*. Measurement Science and Technology, Vol. 28, No. 7.
- [3] M. T. Endarko, M.Si. Gatut Yudoyono. 2007. *Draf Modul Fisika*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional Biro Perencanaan Dan Kerjasama Luar Negeri.
- [4] Novitasari, Febriyanti. 2014. *Tugas Akhir : Studi Perbandingan Konfigurasi Koil Metoda Eddy Current Testing (ECT) pada Bahan Ferromagnetik dan Non-Ferromagnetik*. Bandung: Universitas Telkom.
- [5] Reitz, J.R, Frederick, J.M. 1979. *Dasar Teori Listrik Magnet*. Terjemahan Suwarno Wiryosimin. Penerbit ITB, Bandung.
- [6] Darmawan, D. 2010. *Bertanya Fisika Seri Listrik Magnet*, Bandung: CV. Maju Jaya.
- [7] Puji, Muhammad Nurul. 2015. *Tugas Akhir : Perancangan Sistem Volumetric Magnetic Induction Tomography Menggunakan 8 Koil Pemancar dan 8 Koil Penerima*. Depok : Universitas Indonesia.