

PEMBUATAN DETEKTOR FREKUENSI TUNGGAL BERBASIS PRINSIP *EDDY CURRENT* UNTUK PENGUKURAN KETEBALAN LOGAM NON MAGNETIK CU DAN AL

Santi T Sidabukke, Ari Sulisty Rini, Tengku Emrinaldi, Lazuardi Umar

Jurusan Fisika FMIPAUR

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Kampus Binawidya Pekanbaru, 28293, Indonesia

lazuardi.umar@gmail.com

ABSTRAK

Metode-metode yang telah dilakukan dalam pengukuran ketebalan logam adalah metode manual (jangka sorong) dan metode ultrasonic thickness. Kelemahan dari kedua metode ini yaitu data yang dihasilkan kurang akurat karena sulitnya proses pembacaan dan harga yang relative mahal. Pengembangan teknologi di bidang sensor memungkinkan pembuatan detektor ketebalan logam yang dapat mengatasi kelemahan dari kedua metode tersebut yaitu menggunakan eddy current. Sensor eddy current dapat mengukur ketebalan lapisan logam non magnetik melalui hubungan tegangan dengan variasi ketebalan dimana ketebalan yang digunakan untuk Cu yaitu 0,4 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 4 mm, 4,2 mm, 5 mm, 5,1 mm sedangkan Al yang digunakan yaitu 0,25 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm, 1 mm, 1,2 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm dengan frekuensi yang diperoleh 700 KHz, 1 MHz dan 1,33 MHz. Kurva tegangan vs ketebalan untuk aluminium dan tembaga memiliki hubungan eksponensial. Jarak antara sensor dengan material non magnetik dijaga konstan sebesar 2 mm.

Kata Kunci : eddy current, tegangan, ketebalan

ABSTRAC

Studies of the measurement of the thickness for metal non magnetic using manual method (calipers) and ultrasonic thickness have been made by researcher. The weakness of the both method were the accurateness of data for hard reading process and the price of materials more expensive. Development of the sensor technology allows to pubricate of metal thickness detector which can solution for the disadvantages of the two methods with using eddy current. Eddy current sensor using to measure the thickness of non-magnetic metal layer through relations of voltage and thickness variation, for Cu 0.4 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 4 mm, 4.2 mm, 5 mm, 5.1 mm and for Al 0.25 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm, 1 mm, 1.2 mm, 1.5 mm, 2 mm, 2.2 mm, 3mm, 4 mm, 5 mm, frequency delivered for 700 KHz, 1 MHz and 1,33 MHz. The graphic of voltage and thickness for aluminum and copper have exponential. Distance between sensor an non-magnetic material is was constant at 2 mm.

Keyword: eddy current, voltage, thickness

1. PENDAHULUAN

Teknologi yang dikembangkan di dunia industri dalam mengetahui cara mendeteksi ketebalan suatu logam telah banyak diteliti. Salah satunya mengukur ketebalan dengan jangka sorong. Alat ini merupakan pengukur ketebalan logam secara manual. Kelebihan daripada alat ini harganya yang cukup murah dan mampu mengukur ketebalannya dari sisi luar dengan cara diapit. Adapun kekurangannya yaitu sulit melihat angka sehingga hasil pengukuran sering tidak akurat. Alat lainnya yang lebih canggih yaitu dengan *Ultrasonic Thickness*. Alat ini cukup menggunakan satu sisi dari material dan persiapannya relatif mudah namun kekurangan alat ini adalah alat ini cukup mahal dan kurang sesuai untuk material yang tipis. Maka pada penelitian selanjutnya akan dilakukan percobaan dengan menghasilkan sensor yang menggunakan prinsip *eddy current*. Banyak kelebihan-kelebihan yang dapat digunakan dengan menggunakan prinsip arus eddy ini yaitu hasil pengukurannya sangat akurat, memiliki sensitivitas yang tinggi, mampu diujikan pada setiap logam.

Metode *eddy current* digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi seperti pengukuran ketebalan, pemeriksaan mutu, penambahan dan perawatan permukaan. Pengujian menggunakan metode *eddy current* dapat diterapkan pada bahan magnetik maupun non magnetik. Sensor *eddy current* berfungsi sebagai sensor induktif yang dapat digunakan pada bidang otomotif serta bidang otomatisasi baik untuk industri maupun untuk penggunaan sektor pribadi dijelaskan oleh Horsky pada tahun (2005). Rahmondia (2009) telah melakukan pengembangan sensor *eddy current* untuk mengukur posisi linier berbasis koil datar (*planar coil*) dengan presisi tinggi, dengan salah satu aplikasi adalah sebagai sensor pengukur getaran dan dilanjutkan dengan mengembangkan rangkaian pengolah isyarat sensor kapasitif-induktif mempergunakan osilator LC untuk mengukur kelembaban gabah.

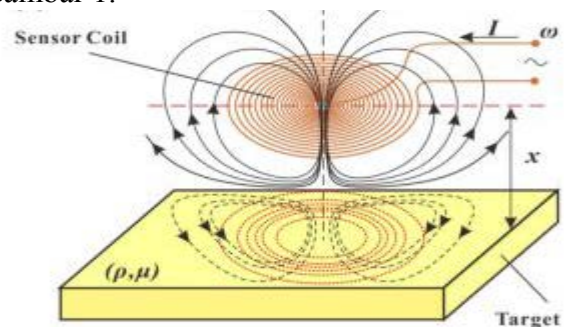
Sensor *eddy current* juga dapat mengukur lapisan tipis logam dengan variasi jarak (Wang, 2015) sementara Yin (2006) melakukan penelitian bahwa sensor *eddy current* dapat mengukur ketebalan bahan non magnetik dengan multi frekuensi.

Penelitian tentang sensor *eddy current* berguna untuk pembuatan kubah masjid yang menentukan variasi pelat logam, pengrajin emas dan perak yang memerlukan data ketebalan pelapisan dan pengusaha sepuh (chrom) dan sebagainya. Alat ini dapat membantu pekerjaan para pengrajin sehingga hasil pengukuran ketebalan akan lebih mudah dilakukan. Penelitian ini akan dikembangkan sensor induktif metode *eddy current* dengan frekuensi tunggal untuk mengukur ketebalan lapisan tipis non magnetik.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sensor Eddy Current

Medan magnet induksi yang dihasilkan oleh listrik bolak-balik besarnya berubah-ubah terhadap waktu menghasilkan arus listrik yang besarnya juga berubah-ubah terhadap waktu. Arus ini menghasilkan medan magnet di sekitar konduktor yang besarnya juga berubah-ubah. Prinsip kerja sensor *eddy current* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sensor *Eddy current* (Wang, 2015)

Gambar 1 terlihat bahwa dalam loop tertutup yang terinduksi dalam bidang tegak lurus terhadap fluks magnetik. Arus ini terpusat pada permukaan berdekatan dengan sebuah kumparan eksitasi dan kekuatannya menurun dengan jarak dari kumparan.

2.2. Sensor Koil Datar

Sensor kumparan induksi adalah salah satu sensor magnetik yang menggunakan prinsip *eddy current*. Induktansi koil datar berubah karena gangguan dari material konduktif dalam medan magnetik sehingga menghasilkan pusaran arus. Pengaruh dari arus bolak balik pada koil menyebabkan terjadi dua jenis induktansi yaitu induktansi diri (*self-inductance*) dan induktansi bersama (*mutual-inductance*).

2.2.1. Induktansi Diri (*Self Inductance*)

Medan magnetik interval yang dikenal sebagai induktansi diri dapat dihitung menggunakan Hukum Biot-Savart yang diberikan sebagai berikut.

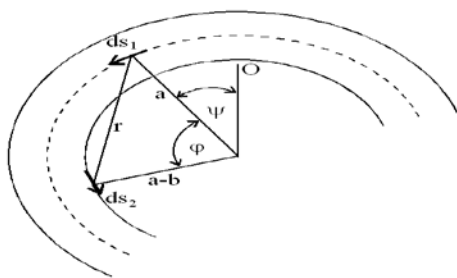
$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} = -L \frac{dl}{dt} \quad (1)$$

2.2.2 Induktansi Bersama (*Mutual Inductance*)

Kuat arus yang mengalir pada sebuah induktor menghasilkan induktansi diri namun hal ini dipengaruhi oleh adanya induksi magnetik luar sehingga menghasilkan induktansi bersama atau yang dikenal sebagai *Mutual Inductance*. Induktansi bersama bergantung pada bentuk geometri kedua rangkaian serta jarak antar rangkaian ataupun material pengganggu. Secara matematis induktansi bersama didefinisikan sebagai berikut :

$$\phi_{12} = L_2 I_2 + M_{12} I_1 \quad (2)$$

Nilai induktansi pada suatu koil datar dihitung dengan mengasumsikan bahwa koil datar tersebut tersusun menyerupai lapisan koaksial (**Lazuardi, 1999**) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2 dibawah ini :



Gambar 2 Induktansi koil datar

Induktansi yang terjadi pada plat koil datar diperoleh dengan menjumlahkan nilai induktansi diri (L) dengan induktansi bersama (M) sehingga dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$L = \sum_n L_n + \sum_m M_{n,m} \quad (3)$$

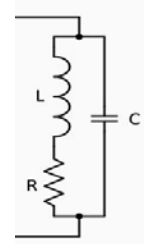
dimana ;

$$L_n = \frac{\mu_0}{2} a_n \sqrt{\left(1 - \frac{b}{a_n}\right)} \left[\left(\frac{2}{m} - m\right) K(m) - \frac{2}{m} E(m) \right] \quad (4)$$

$$M_n = \frac{\mu_0 \sqrt{a_1 a_2}}{n_{n,m}} \left[(2 - n_{n,m}^2) K(n_{n,m}) - \frac{2}{n} E(n_{n,m}) - \frac{2}{n} E(n_{n,m}) \right] \quad (5)$$

2.3 Osilator

Osilator LC menggunakan rangkaian resonansi sebagai pembangkit gelombang dan menggunakan penguat untuk mengatasi redaman oleh resistansi dalam induktor dan konduktansi kapasitor. Gambar rangkaian penala dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Rangkaian penala (*tank circuit*)

Nilai frekuensi dari rangkaian paralel diatas sama dengan tahanan kompleks Z (**Lazuardi, 1999**) yaitu :

$$Z = \frac{U_0}{I_0} = \frac{I}{Y} = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{R + j\omega L}} \quad (6)$$

$$Z = \frac{U_0}{I_0} = \frac{I}{Y} = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{R + j\omega L}} = \frac{1}{R^2 + (\omega L)^2 + j\omega \left[C - \frac{1}{R^2 + (\omega L)^2} \right]} \quad (7)$$

Dari sudut fasa $\text{Im } Z = 0$ ditentukan frekuensi resonansi ω_0 menjadi

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - R^2 \frac{C}{L}} \quad (8)$$

Untuk nilai $R \ll \omega_0 L$ diperoleh besarnya faktor kualitas Q sebesar

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

Dan frekuensi resonansi dari ω_0 yang diperoleh menjadi

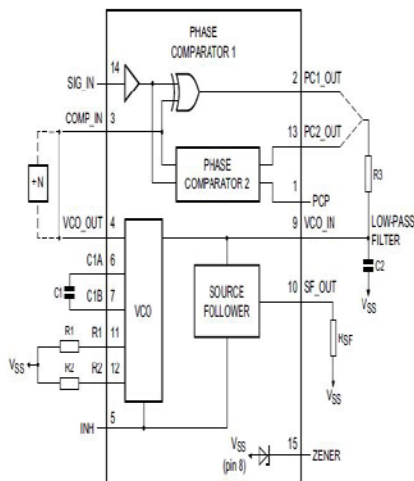
$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \left[1 - \frac{1}{2Q^2} \right] \quad (10)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left[1 - \frac{1}{2Q^2} \right] \quad (11)$$

Rangkaian osilator LC pada penelitian ini akan mempergunakan inverter dari IC 4007 yang merupakan *Dual Complementary Pair Plus Inverter* yang terdiri atas masing-masing 3 *N-channel* dan *P-channel enhancement mode devices packaged*.

2.6 Rangkaian Pengunci Fasa (Phase Locked Loop)

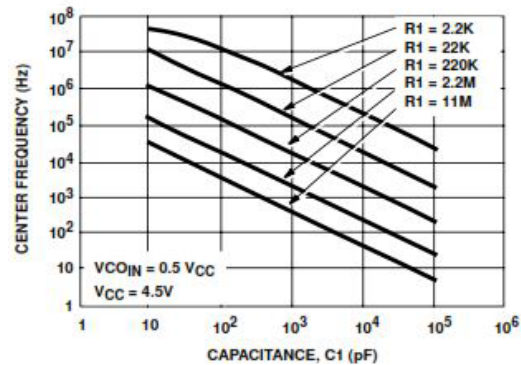
Blok diagram IC PLL 4046 dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Blok Diagram IC PLL 4046

Rangkaian 4046 tersusun dari 2 buah fasa komparator, 1 buah *source follower* dan 1 buah VCO. Fasa komparator memiliki dua buah sinyal masukan dimana kaki 14 menerima input

dari osilator LC sementara kaki 13 menerima input dari internal yang ditentukan oleh $R1$, $R2$ dan $C1$, setelah itu melewati komparator fasa 2. Komparator fasa 2 adalah sebuah pengontrol-tepian digital memori yang berisi pengontrol gerbang dan sebuah 3 state outputnya tipe n dan p . Nilai $R1$, $R2$ dan $C1$ pada rangkaian pengunci fasa dari IC PLL 4046 didapat dari interpolasi kurva pada Gambar 5 berikut ini.



Gambar 5 Kurva Khas Frekuensi vs Kapasitansi

3. METODE PENELITIAN

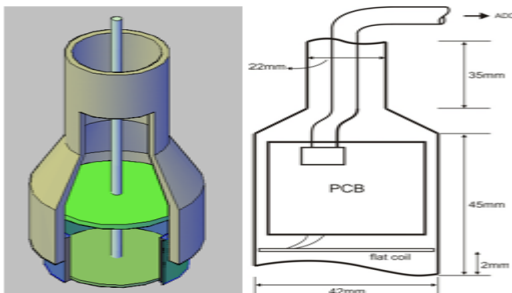
3.1 Pembuatan Osilator LC

Osilator LC dibuat dengan cara merakit komponen-komponen elektronik pada PCB (*Printed Circuit Board*) yang didesain menggunakan software EAGLE versi 7.4.0. Sensor *eddy current* dengan material pengganggu akan dibuat pada jarak yang konstan sehingga dapat diperoleh frekuensi keluaran menggunakan rangkaian osilator LC. Pengujian akan dilakukan terhadap perubahan frekuensi dengan jarak konstan terhadap material pengganggu. Suatu set up eksperimen dibuat sebagai tempat sensor pada jarak konstan dan akan diteliti pengaruh sifat bahan dan variasi ketebalan dari material non magnetik.

3.2 Pembuatan Prototipe Detektor Ketebalan Logam

Pembuatan prototipe menggunakan bahan seperti PVC menjadi rumahan dilakukan untuk menghindari adanya gangguan (interferensi) yang akan diterima

koil datar sehingga akan mengganggu hasil pengukuran. Hal ini bertujuan agar sensor kokoh berada dalam rumahan selama pengukuran yang mengeliminir perubahan set up alat. Tahap awal pembuatan rangkaian elektronik dilakukan terpisah dari rumahan prototipe kemudian pada tahapan akhir rangkaian elektronik akan ditempatkan di dalam rumahan seperti pada Gambar 6 dan dibuat mempergunakan komponen tipe SMD (*Surface Mounting Devide*).

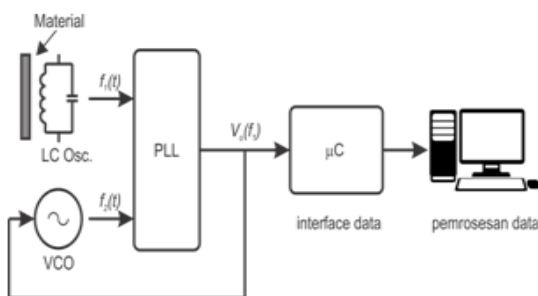


Gambar 6 Bentuk dan geometri irisan dari prototipe alat pengukur ketebalan lapisan non konduktif pada (a) dalam 3 dimensi dan (b) dimensi probe

3.3 Susunan Eksperimen

Pengukuran Ketebalan Lapisan Logam

Eksperimen pengukuran ketebalan lapisan logam dilakukan di laboratorium Fisika Terapan. Sensor *eddy current* diletakkan pada rumahan dengan bahan PVC agar hasil yang diterima tidak terpengaruh oleh interferensi. Susunan set up pengukuran dapat digambarkan pada blok diagram berikut :

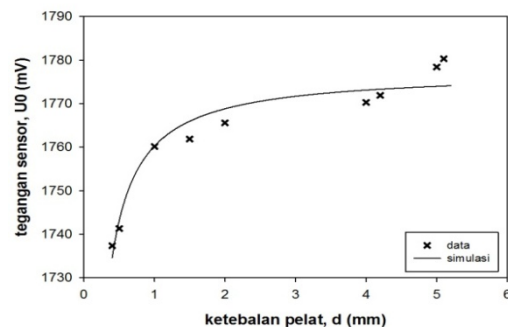


Gambar 7. Blok diagram sistem pengukuran ketebalan material

Hasil pengukuran logam yang dilakukan sensor *eddy current* menghasilkan data hubungan antara tegangan (U_0) dan frekuensi (f) yang selanjutnya diolah menggunakan Sigma Plot berdasarkan permodelan dari grafik antara tegangan (U_0) dengan ketebalan (t). Pengukuran dilakukan dengan bervariasi ketebalan pelat yang dinyatakan sebagai t (*thickness*). Jarak antara sensor *eddy current* terhadap material dibuat konstan

4. Hasil dan pembahasan

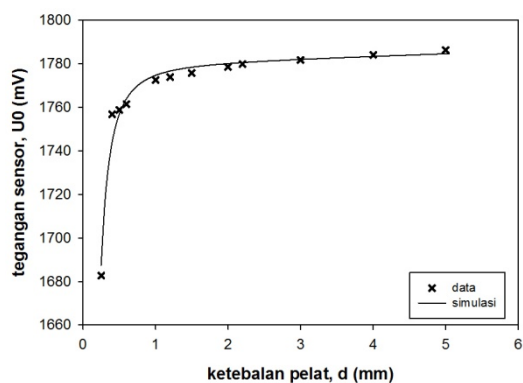
Data pengukuran yang didapat kemudian diolah menggunakan SigmaPlot. Hubungan antara ketebalan logam dengan tegangan keluaran dapat dilihat pada pemodelan yang berbeda pada setiap logam. Pemodelan yang dihasilkan berbeda tergantung material yang digunakan. Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan pemodelan antara ketebalan logam (d) dengan tegangan keluaran (U_0) dimana Gambar 8 merupakan pemodelan dari material tembaga (Cu) sedangkan Gambar 9 pemodelan dari material aluminium (Al). Ketebalan material tembaga (Cu) yang digunakan yaitu 0,4 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 4 mm, 4,2 mm, 5 mm, 5,1 mm sedangkan ketebalan aluminium (Al) yang digunakan yaitu 0,25 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm, 1 mm, 1,2 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,2 mm, 3 mm, 4mm, 5mm.



Gambar 8. Pemodelan Tembaga (Cu)

Berdasarkan Gambar 8 menunjukkan hubungan antara ketebalan (d) material tembaga dengan tegangan keluaran (U_0)

dimana semakin tebal material maka semakin tinggi tegangan keluarannya. Hubungan tersebut dapat dinyatakan oleh fungsi model dengan persamaan $U_0 = a + bd$ dimana d merupakan ketebalan logam dengan masing-masing nilai parameter. Data yang didapat diolah dengan perangkat lunak SigmaPlot. Nilai parameter model sistematis dari pemodelan diatas ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini



Gambar 9 Pemodelan Alumunium (Al)

Hasil pemodelan memberikan fungsi yang menyatakan hubungan antara ketebalan logam (d) dan tegangan keluaran (U_0) dimana fungsi model persamaannya adalah $U_0 = a + bd + c/d^2$. Data yang didapatkan diolah dengan perangkat lunak SigmaPlot dengan nilai parameter model ditunjukkan pada Tabel 2 berikut

5. KESIMPULAN

Berdasarkan data yang diperoleh pada penelitian ini, didapat beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Menghasilkan berupa prototipe detektor menggunakan prinsip *Eddy Current* yang dapat mendeteksi ketebalan suatu logam melalui hubungan tegangan dan ketebalan logam non magnetik.
2. Hubungan antara ketebalan pelat non magnetik dan tegangan sensor dimana semakin tebal pelat maka semakin tinggi tegangan sensor yang dihasilkan dikarenakan adanya

Arus Eddy yang disebabkan oleh tegangan yang diberikan dengan frekuensi 700 KHz, 1 MHz dan 1,33 MHz.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Fraden, Jacob. 2003. Handbook of Modern Sensor, Physics, Designs, and Applications. Springer. San Diego USA.
- Horsky, P. 2005. LC Oscillator Driver for Safety Critical Applications. Proc. of DATE 05 Conference, Designers Forum, Munich, Germany, 34-38.
- Lazuardi, 1999. Studi Awal Sensor Getaran Berdasarkan Prinsip Induktif, Thesis S2, Jurusan Fisika FMIPA itb Bandung.
- Malik, dkk. 2015. Sensor Planar Induktif Berbasis Bahan PCB FR-4 Untuk Pengukuran Jarak Kecil. Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Andalas (SNFUA).
- Rahmondia NS, 2009. Desain dan Pembuatan Sensor Getaran Frekuensi Rendah Berbasis Koil Datar, Thesis S2, Jurusan Fisika FMIPA ITB Bandung.
- Wang H. Li W., dan Feng Z. 2015. Noncontact Thickness Measurement of Metal Films Using Eddy-Current Sensors Immune to Distance Variation, IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol. 64, no. 9, September 2015 2557.
- Yin W, Dickinson SJ, Peyton AJ. 2006. A multi-frequency impedance analyzing instrument for eddy current testing. Meas Sci Technol 17:393-402.