

DOI: doi.org/10.21009/SPEKTRA.023.07

# EDDY CURRENT SENSOR BERBASIS FLAT COIL FR4 UNTUK MENENTUKAN KETEBALAN PELAT LOGAM NON MAGNETIK AL

Tengku Emrinaldi<sup>a)</sup>, Salomo<sup>b)</sup>, Yanuar Hamzah<sup>c)</sup>, Iwantono<sup>d)</sup>, Lazuardi Umar<sup>e)</sup>

*Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau  
Kampus Bina Widya Sp. Panam Pekanbaru 28293*

Email: <sup>a)</sup>tengku\_naldi@yahoo.com, <sup>b)</sup>sraya\_01@yahoo.com <sup>c)</sup>yanuar.hamzah@lecturer.unri.ac.id,  
<sup>d)</sup>iwan\_tono@yahoo.co.uk, <sup>e)</sup>lazuardi@unri.ac.id

## Abstrak

Sensor arus eddy (eddy current) digunakan untuk pengukuran ketebalan logam khususnya logam non magnetik seperti aluminium. Penelitian ini telah mengembangkan sensor eddy current berbahan PCB (printed circuit board) jenis FR4 yang memiliki ketebalan lapisan tembaga 35micron. Prototipe yang dihasilkan mempergunakan koil sensor dengan jumlah gulungan (n) 30 lilitan, diameter ( $\varnothing$ ) 30mm, lebar dan jarak antar koil, (dkoil) 0,254mm dan tahanan (Rkoil) sebesar 4,26 $\Omega$ . Respon sensor ketebalan pelat logam terhadap bahan uji dievaluasi dengan memberikan eksitasi frekuensi tunggal 700Khz, 1MHz dan 1.33MHz. Rangkaian ketebalan pelat telah mempergunakan rangkaian pengunci fasa (phase locked loop) dan mampu mengukur variasi ketebalan mulai 0,2 mm sampai 2 mm, sementara jarak antara sensor dengan logam uji dijaga konstan 2 mm. Hasil pengukuran memberikan respon kurva U(t) dalam hubungan

**Kata-kata kunci:** sensor eddy current, PCB FR4, material non magnetik, ketebalan logam, rangkaian phase locked loop

## Abstract

Eddy current sensor is used to measure the thickness of metals, especially non-magnetic metals such as aluminum. This research has developed eddy current sensor made from PCB (printed circuit board) type FR4 which has 35micron copper layer thickness. The developed prototype uses a designed coil sensor with the number of winding (n) 30 turn, diameter ( $\square$ ) 30mm, width and distance between coils, (dkoil) 0.254 mm and coil resistance (Rkoil) of 4.26  $\Omega$ . The sensor response to the test material was evaluated by giving a single frequency excitation of 700 Khz, 1 MHz and 1.33 MHz. The plate thickness electronics has used a phase locked loop circuit and is capable to measure the thickness variations from 0.2 mm up to 2 mm, while the distance between the sensor coil and the test object was kept constant at 2 mm. The measurement results give the U (t) curve response in the exponential relationship.

**Keywords:** eddy current sensor, PCB FR4, nonmagnetic material, thickness, phase locked loop circuit

## PENDAHULUAN

Pengukuran ketebalan logam sangat penting untuk proses kontrol dan pemeriksaan material. Metode yang umum dipergunakan adalah ultrasonic, thermal dan eddy current tergantung kepada kebutuhan. Berbagai jenis peralatan uji eddy-current komersial diset up untuk menentukan ketebalan lapisan non konduktive yang dilakukan berdasarkan fakta bahwa perubahan impedansi koil menurun secara eksponensial dengan jarak koil terhadap permukaan logam seperti pada literatur [1,2]. Estimasi akurat dari ketebalan pelat akan tergantung pada akurasi model dari impedansi koil sebagai fungsi dari karakteristik material dan geometri sampel koil [3].

Prinsip arus eddy banyak dimanfaatkan pada teknologi saat ini. Usman [4] mempergunakan sensor induktif metode arus Eddy untuk menentukan jarak translasi. Metode arus Eddy juga digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi seperti pengukuran ketebalan, pemeriksaan mutu, penambahan dan perawatan permukaan [5]. Pengujian menggunakan metode arus eddy dapat diterapkan pada bahan magnetic maupun non magnetic. Yin [6] melakukan penelitian bahwa sensor eddy current dapat mengukur ketebalan bahan non magnetik dengan multi frekuensi.

Metode Eddy Current juga dipergunakan secara luas pada berbagai teknologi aplikasi seperti pengukuran ketebalan, inpeksi kualitas, pelapisan (*coating*) dan perlakuan permukaan. Sensor induktif seperti dipergunakan dalam sistem otomatisasi pengukuran skala mikro yang dijelaskan oleh Lemarquand [7]. Sistem deteksi juga dilengkapi dengan fitur pintar yang meningkatkan akurasi pengukuran [8]. Fungsi sensor induktif dapat digunakan pada bidang otomotif serta bidang otomatisasi baik untuk industri maupun untuk penggunaan sektor pribadi dijelaskan oleh [9]. Penelitian sebelumnya [10] telah dilakukan pengembangan sensor induktif *Eddy Current* untuk mengukur posisi linier berbasis koil datar (*planar coil*) dengan presisi tinggi, dengan salah satu aplikasi adalah sebagai sensor pengukur getaran dengan mempergunakan osilator LC untuk mengukur kelembaban material pertanian.

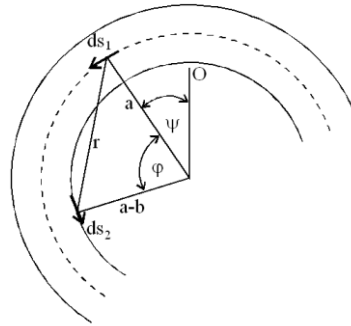
Pada kebanyakan aplikasi, pengukuran eddy current dipengaruhi oleh faktor lift off yaitu variasi jarak antara probe detektor dan sampel tes. Metode pengukuran dengan single dan pulse frequency (PEC dan SEC) sangat sensitif terhadap variasi jarak antara sensor dan target karena induksi eddy current dalam target menurun secara cepat dengan kenaikan faktor lift-off [11]. Oleh sebab itu faktor lift-off menjadi ganjalan utama untuk pengukuran mempergunakan koil arus eddy. Perbaikan dalam rancangan probe, pengolahan isyarat pada [12] dan strategi pengujian [13,14] telah dilakukan untuk mengurangi efek lift off. Saat ini, baik metode numerik (seperti metode finite-element) dan metode analitik dapat dipergunakan untuk menentukan spektrum real dan imajiner sehingga beda fasa dapat diturunkan. Sensor *eddy current* juga dapat mengukur lapisan tipis logam dengan variasi jarak [15] sementara penelitian pada [6] menyatakan bahwa sensor *eddy current* dapat mengukur ketebalan bahan non magnetik dengan multi frekuensi. Hasil yang diperoleh relative akurat namun memerlukan peralatan yang mahal.

Paper ini membahas pengembangan sensor *eddy current* berbahan PCB FR4 yang dapat dipergunakan untuk mengukur ketebalan pelat logam non magnetik yaitu aluminium (Al). Pelat logam aluminium sangat banyak dipergunakan sehari-hari sehingga diperlukan alat sederhana yang dapat membantu pekerjaan para pengrajin sehingga hasil pengukuran ketebalan akan lebih mudah dilakukan. Sensor induktif metode *eddy current* memiliki frekuensi tunggal sesuai yang ditentukan berdasarkan analisa frekuensi dari koil datar yang dijadikan elektroda ukur.

## METODE PENELITIAN

### 2.1 Pembuatan Sensor Koil Datar Eddy Current

Nilai induktansi pada suatu koil datar dihitung dengan mengasumsikan bahwa koil datar tersebut tersusun menyerupai lapisan koaksial seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1 dibawah ini (16):



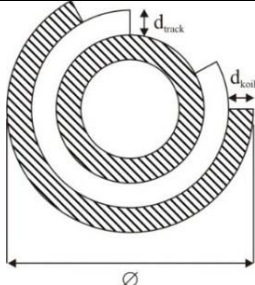
**GAMBAR 1.** Simpal tertutup dari induktansi koil datar

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

$$L = \sum_n^N L_n + \sum_m^N M_{n,m} \tag{1}$$

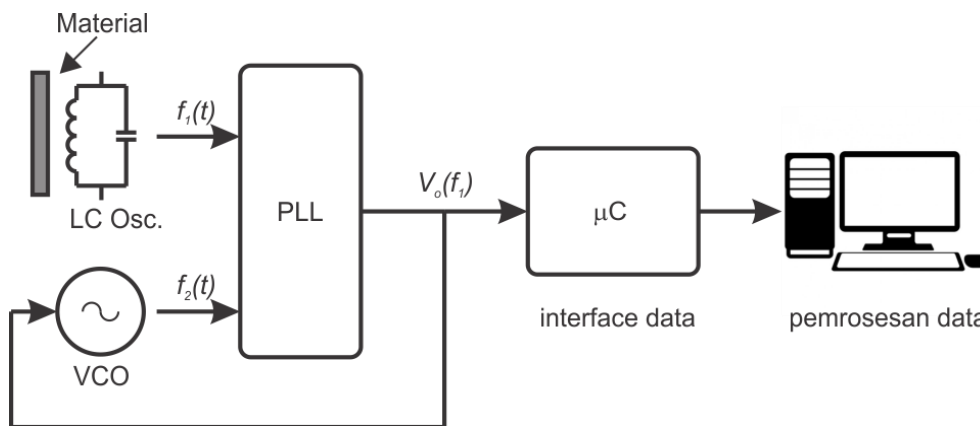
Sensor koil datar yang dipergunakan didesain mempergunakan software Corel Draw dan dicetak mempergunakan bahan dari papan rangkaian tercetak, PCB (*printed circuit board*) jenis FR4 dan tahan api yang dilapisi tembaga dengan ketebalan lapisan 35 micron. Lapisan tembaga ini melalui proses fotosensitive dengan *masking* (pola cetak) akan dibuat menjadi koil datar (*planar coil*). Adapun data pembuatan dan karakterisasi awal dari sensor beserta dimensi diberikan pada tabel 1 berikut.

**TABEL 1.** Data dan dimensi dari koil datar pada eksperimen ini yang dibuat dari bahan PCB tipe FR4

	Parameter Koil Datar	Koil ke-			
		1	2	3	4
	Tahanan Koil, $R_{koil}$ (W)	4,26	4,3	4,04	4,4
	Jumlah Gulungan, n	30	30	30	30
	Diameter, $\varnothing$ (mm)	30	30	30	30
	Lebar Koil, $d_{koil}$ (mm)	0,254	0,254	0,254	0,254
	Jarak Antar koil, $d_{track}$ (mm)	0,254	0,254	0,254	0,254

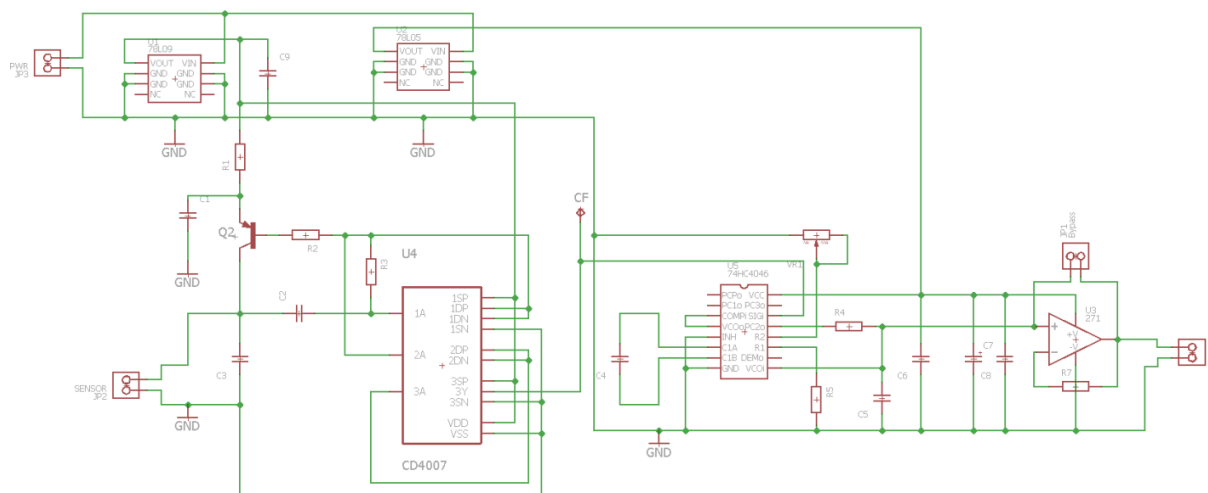
### 2.2 Rangkaian Pengunci Fasa

Pembuatan alat deteksi ketebalan lapisan material logam non konduktif dilakukan dengan merakit beberapa peralatan elektronik serta koil arus eddy yang berfungsi sebagai sensor. Adapun blok diagram diberikan seperti pada Gambar 2 berikut.



GAMBAR 2. Blok diagram sistem pengukuran ketebalan material.

Adanya perbedaan ketebalan pada material menyebabkan perbedaan besar *Eddy Current* dan mempengaruhi induktansi koil sensor yang dievaluasi dengan osilator LC menghasilkan sinyal dengan frekuensi yang berbeda. Osilator LC yang dibuat 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*. Sinyal dari osilator LC kemudian dibandingkan dengan sinyal dari pengunci fasa. Gambar 3 memperlihatkan rangkaian osilator yang dipergunakan pada penelitian ini.



GAMBAR 3. Rangkaian osilator LC dan PLL untuk detector ketebalan pelat non magnetik

Gambar 3 memperlihatkan komponen IC PLL 4046 tersusun dari 2 buah pembanding (komparator) fasa, VOC dan pengikut sumber (*source follower*). Komparator tersebut memiliki dua buah sinyal input PCa dan PCb dimana input PCa dapat langsung digunakan dengan cara dikopel ke sinyal tegangan besar atau secara tidak langsung dikopel dengan rangkaian kapasitor untuk sinyal tegangan kecil. Pembanding fasa 1 (gerbang EXOR) menghasilkan sinyal error digital PC 1out, dan mempertahankan fasa 90 bergantian diantara frekuensi antara PCa dan PCb (disaat *duty cycle* 50%), pembanding fasa 2 menghasilkan sinyal digital error, PC2out dan LD (*load data*), dan mempertahankan fasa 0 pergantian diantara PCa dan PCb. Linier VOC menghasilkan sinyal keluaran (VOCout) yang frekuensinya ditentukan oleh tegangan dari masukan VOC in, kapasitor dan resistor dihubungkan ke pin C1A, C1B, R1 dan R2.

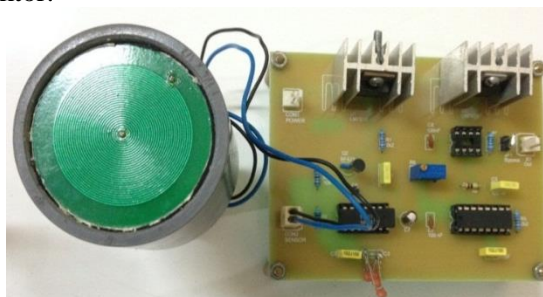
Output dari IC PLL akan masuk pada low pass filter dan diloloskan hanya yang mempunyai impedansi rendah, dilanjutkan ke VOCin yang akan melewati proses osilasi pulsa sehingga keluaran di pin 4 diatur agar sama dengan frekuensi referensi. Pengaturan frekuensi masukan pada rangkaian dengan nilai R sebesar 100 K $\Omega$  serta C sebesar 100 nF memberikan nilai frekuensi 15.9 Hz yang

akan menentukan keluaran dari IC PLL 4046 menjadi tegangan DC dengan bantuan  $R_3$  seperti pada Gambar 3. Tegangan keluaran ini proporsional dengan ketebalan logam.

### 2.3 Prototipe Detektor Ketebalan Logam

Prototipe detektor ketebalan pelat logam non magnetik terpasang pada silinder PVC untuk menghindari adanya gangguan magnetic yang diterima koil datar yang mengganggu pengukuran. Sensor dibuat di dalam rumahan bertujuan agar kokoh selama pengukuran, yang dapat mengeliminir perubahan set up alat. Jarak antara sensor dengan material dibuat konstan yaitu 2 mm bertujuan untuk menghasilkan pengukuran yang tidak berubah. Sensor dan rangkaian elektronik dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.

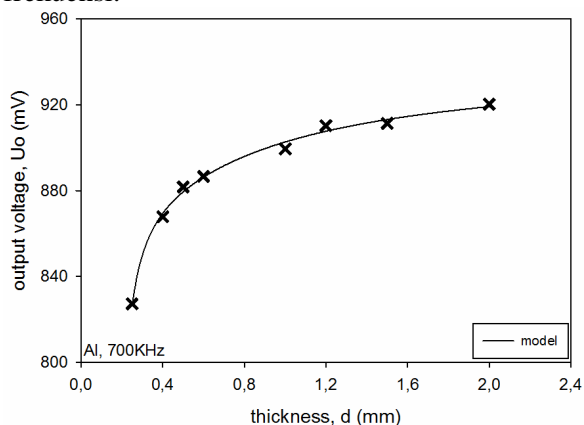
Sampel pengukuran dipergunakan adalah logam non magnetic alumunium dari berbagai jenis ketebalan mulai dari 0.2 mm sampai dengan 2 mm. Tiap-tiap pelat logam tersebut dipotong seluas 15cm panjang dan 15cm lebar, diukur mempergunakan detektor yang telah dibuat ini untuk setiap ketebalan sebanyak 5 kali. Frekuensi eksitasi dari osilator LC ditentukan sebanyak 3 frekuensi yaitu 700KHz, 1MHz dan 1.33MHz. Data yang telah diperoleh kemudian diolah dan dimodelkan untuk memperoleh fungsi transfer dari pelat logam dan dicari koefisien korelasi untuk menentukan persamaan umum dari detektor.



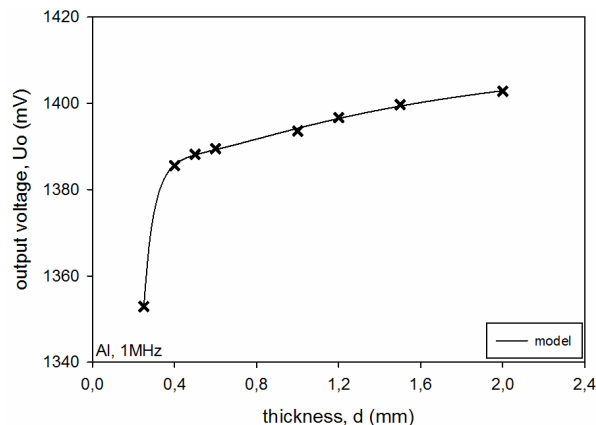
GAMBAR 4. Prototipe detektor ketebalan logam Al

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

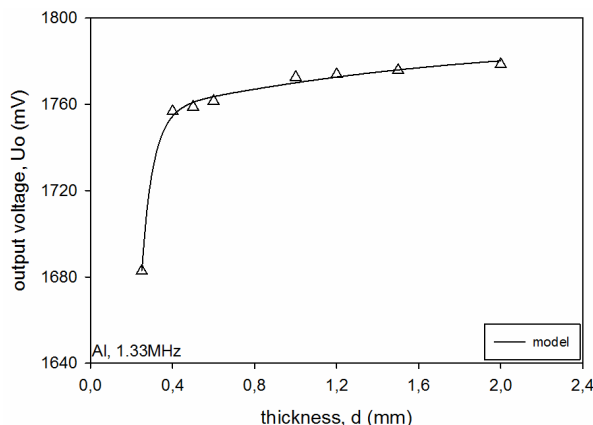
Gambar 5 menunjukkan hasil pengukuran dan pemodelan kurva yang menyatakan hubungan antara variasi ketebalan logam ( $d$ ) dan tegangan keluaran ( $U_0$ ) dimana koefisien model memberikan fungsi non linear yang diolah dengan perangkat lunak SigmaPlot dan Table Curve. Masing-masing kurva pada gambar 5 memberikan respon output pada berbagai ketebalan pelat dengan frekuensi osilator sebagai parameter. Penelitian ini mengevaluasi kurva respon terhadap ketebalan untuk 3 jenis frekuensi.



(a)



(b)



(c)

**GAMBAR 5.** Uji ketebalan pelat non magnetik pada tiga frekuensi eksitasi yaitu (a) 700KHz, (b) 1MHz dan (c) 1.33MHz

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara ketebalan pelat non magnetic Al dan tegangan sensor dimana semakin tebal pelat maka semakin tinggi tegangan sensor yang dihasilkan dikarenakan adanya arus eddy yang disebabkan oleh tegangan yang diberikan pada frekuensi 1.33 MHz. Ketebalan pelat yang meningkat menyebabkan efek kulit (*skin effect*) artinya kerapatan Arus Eddy menurun secara eksponensial pada logam yang memiliki ketebalan yang besar. Konduktivitas listrik material juga mempengaruhi pengukuran material dimana konduktivitas listrik aluminium sebesar  $3,8 \cdot 10^7 (\Omega/m)^{-1}$ , semakin tebal logam Al maka konduktivitasnya semakin kecil dan hambatan semakin besar. Pengukuran ketebalan logam non magnetic Al ini memberikan kedalaman penetrasi untuk pelat dari 0 mm sampai 2 mm yang disebabkan pengaruh kemagnetan yang dikenal sebagai efek Lenz, yang bekerja pada benda bersifat non magnetic. Kecenderungan keluaran detektor di daerah diluar yang disebutkan diatas adalah tidak terprediksi dan cenderung konstan.

Tabel 2 berikut memberikan resume dari setiap pemodelan kurva dalam bentuk persamaan matematis dan parameter yang diperoleh dari kurva *fitting*.

**TABEL 2.** Parameter pemodelan matematis pengukuran kurva koil datar

No	Logam	Persamaan	Frek. (KHz)	Parameter			
				a0	a1	a2	a3
1	Al	$U_0 = a_0 + \left(\frac{a_1}{d}\right) + \left(\frac{a_2}{d^2}\right) + \left(\frac{a_3}{d^3}\right)$	700	940,9	-49,9	13,8	-2,1
			1000	1418,6	-39,9	18,8	-3,2
			1330	1799,1	-49,1	25,0	-4,9

Berdasarkan hasil pemodelan terlihat bahwa kurva untuk ketiga frekuensi memiliki tren yang sama yang dibuktikan dengan jenis persamaan yang sama namun memiliki parameter yang berbeda. Perbedaan yang terlihat adalah pada frekuensi eksitasi yang meningkat maka kecenderungan kurva sensitive pada ketebalan tinggi dan naik cenderung linier. Aproksimasi yang paling baik didekati oleh osilator LC dengan frekuensi 700Khz yang memberikan bentuk kurva naik secara non linier jika dibandingkan 2 osilator lainnya yang cenderung flat. Perbaikan mutu pengukuran dapat dilakukan dengan memperbaiki mutu koil datar sebagai sensor serta rangkaian PLL yang responnya cenderung lambat pada frekuensi rendah. Pengembangan lanjut dapat dilakukan dengan mengoreksi ketidak linearan kurva mempergunakan mikrokontroler serta sensor yang lebih sensitive pada berbagai ketebalan.

#### 4. SIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan prototipe berupa detektor yang menggunakan prinsip Eddy Current untuk mendeteksi ketebalan suatu logam melalui hubungan tegangan dan ketebalan logam non magnetik. 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. Pengukuran ini juga dipengaruhi oleh efek Lenz. Efek luar pada sensor induktif dapat dieliminir mempergunakan metode kompensasi misalnya suhu dan kelembaban sehingga mutu sinyal pengukuran dapat dipertahankan konstan.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Riset ini dibiayai oleh Hibah Terapan Dikti 2017. Terimakasih diucapkan untuk saudari Santi T Sidabukke yang telah membantu mempersiapkan objek penelitian dan pengambilan data.

#### REFERENSI

- [1] J. Moulder, C.E. Uzal, J.H. Rose, "Thickness and conductivity of metallic layers from eddy current measurements", *Rev Sci Instrument* 63, pp. 3455–65, 1992.
- [2] C.C. Tai, J.H. Rose, J.C. Moulder, "Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy-current measurements", *Rev Sci Instrum* 67, pp. 3965–72, 2000.
- [3] L. Bavall, "Determination of Thickness of Silver Coatings on Brass by Measuring the Impedance of a Thin Elliptic Coil", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, No. 3, June 2007.
- [4] U. Malik, Yanuar, Lazuardi, "Sensor Planar Induktif Berbasis Bahan PCB FR-4 Untuk Pengukuran Jarak Kecil", *Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Andalas (SNFUA)*, 2015.
- [5] J. Fraden, "Handbook of modern sensor, physics, designs, and applications", Springer, San Diego USA, 2003.
- [6] W. Yin, S.J. Dickinson, A.J. Peyton, "A multi-frequency impedance analyzing instrument for eddy current testing", *Meas. Sci. Technol.* 17, pp. 393–402, 2006.
- [7] V. Lemarquand dan G. Lemarquand, "Inductive Absolute Angular Position Sensor", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, No. 5. pp. 2199- 2201,1992.
- [8] B. Hlubeck dan D. Hobein, "Smart sensor technology - the basic for perfect performance, *ATZ* 102 (12), 2000.
- [9] P. Horsky, "LC oscillator driver for safety critical applications", *Proc. of DATE 05 Conference, Designers Forum, Munich, Germany*, pp. 34-38, 2005.
- [10] N.S. Rahmondia, "Desain dan pembuatan sensor getaran frekuensi rendah berbasis koil datar", *MS Thesis, ITB Bandung*, 2009.
- [11] J. Kral, R. Smid, H.M.G. Ramos dan A.L. Ribeiro, "The lift-off effect in eddy currents on thickness modeling and measurement", *IEEE Trans.Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 7, pp. 2043–2049, Jul. 2013.
- [12] D. Kim, L. Udpa dan S.S. Udpa, "Lift-off invariance transformations for eddy current nondestructive evaluation signals", *Proc. AIP Conf.*, vol. 615, pp. 615–622, 2002.
- [13] C.V. Dodd, W.E. Deeds, "Analytical solutions to eddy-current probe coil problem", *J. Appl. Phys.* 39, pp. 2829–39, 1968.
- [14] D.F. He dan M. Yoshizawa, "Dual-frequency eddy current NDE based on high- $T_c$  rf SQUID", *Physica C: Supercond.*, vol. 383, no. 3, pp. 223–226, 2002.
- [15] H. Wang, W. Li dan Z. Feng, "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.
- [16] Lazuardi, "Studi awal sensor getaran berdasarkan prinsip induktif", *MS Thesis, ITB Bandung*, 1996.

