

Sensor Planar Induktif Berbasis Bahan PCB FR-4 Untuk Pengukuran Jarak Kecil

Usman Malik, Rahmondia N. Setiadi, Lazuardi Umar

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau, Pekanbaru

Kampus Bina Widya Sp. Baru 28293 Pekanbaru

Email: usmanmalik@unri.ac.id

Abstrak. Sensor koil datar berbahan PCB FR4 telah didesain sebagai sensor induktif untuk pengukuran jarak kecil. Sensor didesain dan dicetak menggunakan bahan *printed circuit board*(PCB) jenis FR4 yang merupakan bahan *glass-reinforced epoxy laminate sheets* dengan ketebalan lapisan 35 μ m. Perubahan induktansi akibat variasi jarak kecil dideteksi menggunakan osilator LC pada frekuensi 1-2MHz dan rangkaian beda fasa akan mengubah frekuensi menjadi tegangan keluaran dengan jangkauan pengukuran maksimum adalah 15mm dan resolusi sebesar 0,01mm. Pengaruh suhu diamati dengan mengkarakterisasi sensor pada suhu yang berbeda yaitu mulai suhu 20°C sampai dengan 60°C. Untuk mengakomodir perubahan suhu yang mempengaruhi kualitas pengukuran maka telah dikembangkan model koreksi dengan memasukkan nilai suhu pada saat pengukuran dalam persamaan umum model sensor sehingga perubahan ini dapat dieliminir untuk mengkoreksi perubahan nilai pengukuran pada aplikasi sensor.

Kata kunci: sensor jarak induktif, koil datar, osilator LC, model koreksi suhu

Abstract. Flat coil sensor based on FR4 PCB material has been designed as an inductive sensor for the measurement of small distances. Sensors are designed and printed using printed circuit board (PCB) which is a type of material FR4 glass-reinforced epoxy laminate sheets with a thickness of 35 μ m layer. Inductance changes due to the small distance variation is detected using the LC oscillator circuit frequency and phase difference 1Mhz to 2MHz will transform into a frequency output voltage with a maximum measurement range is 15mm and a resolution of 0.01 mm. The influence of temperature was observed by characterizing the sensor at different temperatures starting from 20°C to 60°C. Temperature affect the quality of the measurements was corrected using mathematical equation model of the sensor to eliminated value changes in sensor applications.

Keywords: inductive displacement sensor, flat coil, LC oscillator, mathematical model

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi sensor telah menawarkan paradigma baru untuk bidang komputasi, kontrol, komunikasi dan kolaborasi, baik aplikasi peralatan dalam kehidupan sehari-hari maupun di dalam dunia industri. Hal ini ditunjang oleh faktor kompetisi global, terbatasnya sumber daya dan proteksi lingkungan yang menyebabkan terjadinya kenaikan signifikan dalam teknologi otomatisasi dengan kemampuan yang lebih tinggi dan fungsionalitas yang diperluas.

Pada dunia otomatisasi industri dewasa ini terdapat kebutuhan yang sangat besar untuk mengukur jarakkecil linear maupun sudut (angular) dari suatu objek, yang



idealnya dapat dilakukan tanpa adanya kontak mekanis. Pengukuran ini sangat krusial dalam berbagai piranti elektromekanis dan mekatronik yang dipergunakan dalam otomatisasi proses-proses industri (Decker and Kostka, 1989).

Salah satu bidang yang banyak memanfaatkan sensor untuk pengukuran linear dan angular adalah industri otomotif, seperti penggunaan sensor angular untuk mengukur bukaan pedal gas, sistem actuator turbocharger, sensor sudut setir mobil, sensor posisi katub, sensor posisi gear box, sensor posisi lampu utama mobil dan sebagainya (Bosch, 2007). Sensor tersebut dituntut tidak saja presisi tetapi juga handal dan bebas perawatan jika bekerja pada alat dengan getaran-getaran berat dan pada suhu dan kelembaban yang berfluktuasi secara ekstrim

Untuk menentukan jarak linier kecil maupun angular dewasa ini terdapat banyak metode seperti metoda optik. Sensor sudut optik terdiri atas sumber cahaya (*transmitter*) dan *photo detector* yang memiliki kelemahan yaitu sensitif terhadap abu dan Metode lainnya adalah potensiometris yang mendeteksi perubahan kecil nilai resistansi yang proportional terhadap perubahan jarak linier maupun angular. Kelebihan metode ini adalah konstruksi yang sederhana dan akurasi tinggi tetapi memiliki kelemahan yaitu histeris mekanis dan sulit untuk diminiaturisasi. Metode kapasitif bekerja dengan mengukur perubahan jarak menjadi arus, namun memiliki kelemahan rentang pengukuran terbatas (Boby et al, 2008). Sementara sensor induktif bekerja dengan mendeteksi perubahan medan magnetik dalam menentukan posisi angular suatu benda (Hella, 2003). Oleh karena tidak terdapat kontak fisik dengan objek ukur sehingga memiliki faktor durabilitas yang sangat baik (Marioli et al, 2003).

Peluang pengembangan sensor posisi jarak kecil linier dan angular untuk aplikasi dunia otomotif di Indonesia masih besar seperti pengembangan industri otomotif nasional. Untuk mendukung industri otomotif nasional ini diperlukan banyak komponen dan salah satunya adalah sensor untuk berbagai keperluan deteksi.

Pada paper ini dijelaskan sensor koil datar berbahan PCB FR4 yang didesain sebagai sensor induktif untuk pengukuran jarak kecil. Sensor didesain dan dicetak mempergunakan bahan *printed circuit board* (PCB) jenis FR4 yang merupakan bahan *glass-reinforced epoxy* laminate sheets dengan ketebalan lapisan 35 μ m. Perubahan induktansi akibat variasi jarak kecil dideteksi menggunakan osilator LC pada frekuensi sampai 2MHz dan pengaruh suhu diamati dengan mengkarakterisasi sensor pada suhu yang berbeda yaitu mulai suhu 20°C sampai dengan 60°C.

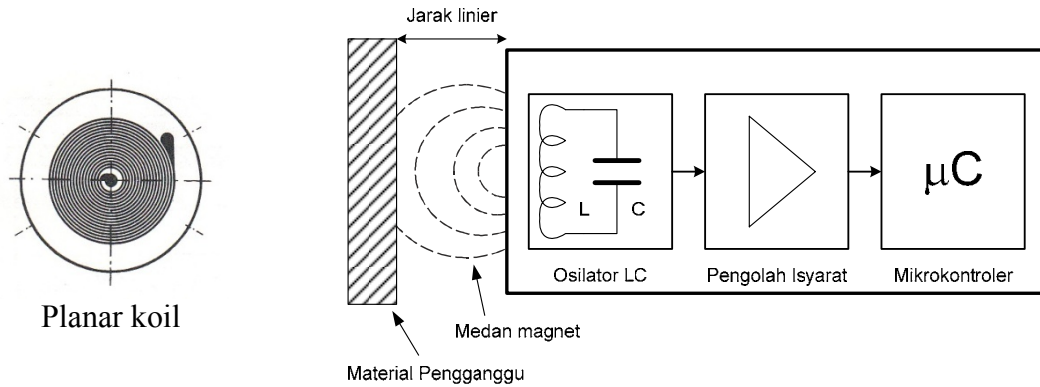
2. Metodologi

2.1. Prinsip Kerja Sensor Induktif Jarak Kecil

Penggunaan sensor induktif seperti dijelaskan oleh Lemarquand (1992) dipergunakan dalam sistem otomatisasi pengukuran skala mikro. Sistem deteksi ini juga dilengkapi dengan fitur *smart* yang meningkatkan akurasi pengukuran (Hlubeck, 2000). Sementara Horsky(2005) menerangkan fungsi sensor induktif dapat dipergunakan pada bidang otomotif serta bidang otomatisasi baik untuk industri maupun untuk penggunaan sektor pribadi.

Sensor induktif dikenal memiliki ketahanan terhadap kondisi lingkungan. Sensor ini dipergunakan sebagai detektor dengan memanfaatkan sifat arus *Eddy* (*Eddy Current*) pada objek ukur, terutama berkaitan dengan material non-ferromagnetik. Desain pembuatan sensor induktif pada penelitian ini berbentuk planar koil yang akan menghasilkan medan magnetik bolak balik pada ujung probe, lihat Gambar 1.



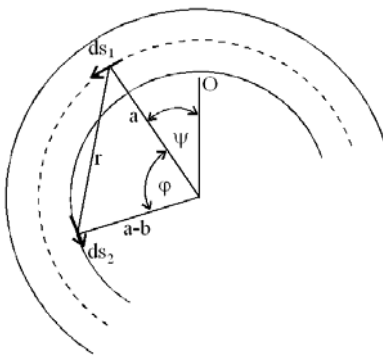


Gambar 1. Blok diagram sensor induktif planar koil memanfaatkan Eddy Current

Bila terdapat suatu material konduktif (objek pengganggu) di dekat medan magnetiknya maka medan akan menginduksi sejumlah kecil arus Eddy dalam material. Arus ini menghasilkan medan magnetik yang berlawanan dengan medan dari sensor. Interaksi antara kedua medan magnetik ini akan berubah jika terdapat jarak antara sensor dengan material pengganggu (*target*). Rangkaian elektronik sensor kemudian mengukur interaksi medan ini dan membangkitkan tegangan keluaran yang proporsional dengan perubahan jarak diantara sensor dengan objek.

2.2. Induktansi Planar Koil Sensor

Sensor planar koil berbentuk lingkaran koil dengan jumlah lilitan tertentu. Pada aplikasinya, koil akan mempunyai dua jenis induktansi yang disebabkan arus bolak balik yaitu self-induktansi dan mutual induktansi (Rahmondia, 2009). Untuk mempermudah perhitungan induktansi maka koil dianggap tersusun sebagai lapisan koaksial. Misal radius cincin koaksial a dengan radius internal adalah $a-b$ dimana radius $b < a$ seperti Gambar (2) berikut ini :



Gambar 2. Induktansi diri pada simpal-kawat sirkular

Pada kasus konduktor dengan penampang sirkular, induktansi diri dari elemen koil datar untuk lilitan ke- j adalah

$$L_j = \frac{\mu_0}{2} a_j \sqrt{1 - b/a_j} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right] \quad (1)$$

Besarnya induktansi yang disebabkan oleh induksi arus Eddy pada objek target (induktansi mutual) dari elemen koil datar dengan jumlah lilitan tertentu adalah

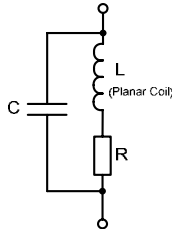
$$M_{jk} = \frac{\mu_0 \sqrt{a_1 a_2}}{k_{jk}} \left[\left(2 - k_{jk}^2 \right) K(k_{jk}) - \frac{2}{k} E(k_{jk}) \right] \quad (2)$$

Koefisien a adalah jari-jari lingkaran, d jarak antara elemen koil datar dengan objek, $a-b$ adalah setengah lebar lintasan elemen koil datar. Besar induktansi elemen koil datar keseluruhan dapat ditulis seperti berikut :

$$L = \sum_{j=1}^N L_j + \sum_{j,k=1}^N M_{jk} \quad (3)$$

dimana j adalah jumlah lilitan dari elemen koil datar dan k adalah jumlah lilitan yang terbentuk pada membran pengganggu.

Perubahan jarak angular antara sensor dan objek akan menyebabkan perubahan induktansi dari sensor planar koil. Untuk mengevaluasi perubahan ini dipergunakan suatu osilator LC yang berfungsi optimal dengan rangkaian umpan balik. Rangkaian umpan balik dirancang memberikan tegangan umpan balik yang fasanya sama dengan sinyal input. Osilator LC bekerja pada frekuensi 500 kHz keatas yang cenderung menggunakan induktor dan kapasitor sebagai bagian pengendali frekuensi (Traenkler, 1990). Bentuk suatu osilator LC diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian penala (*tank circuit*) dari osilator LC

Dari sudut fasa $ImZ=0$ ditentukan frekuensi resonansi ω_0 menjadi

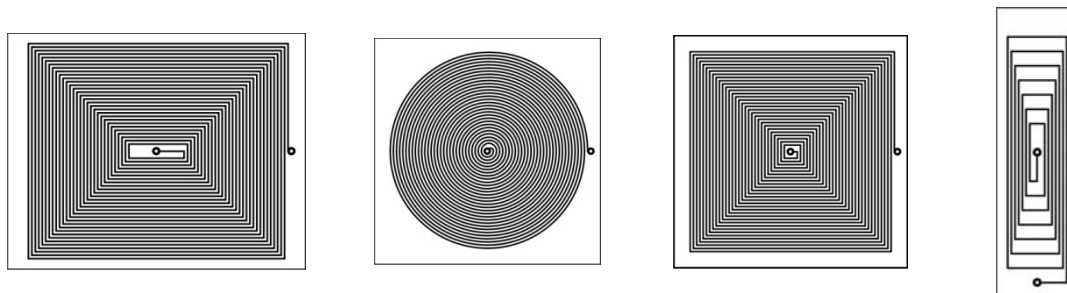
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left(1 - \frac{1}{2Q^2} \right) \quad (4)$$

Rangkaian ini juga memiliki kelemahan yaitu terjadinya drift frekuensi keluaran akibat faktor suhu dan faktor penuaan (Passeraub, 2000). Informasi yang diberikan oleh sensor planar dievaluasi oleh osilator LC, sementara parameter lingkungan yaitu suhu, diukur menggunakan sensor suhu tambahan.

2.3. Prosedur Penelitian

Penelitian ini direncanakan berlangsung mengikuti pola penelitian eksperimental dimana pendekatan teoritis pertama dibuak. Kemudian verifikasi dilaksanakan berdasarkan eksperimen yang dibuat untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh konsisten.

Fabrikasi sensor planar dilakukan dengan mendesain beberapa bentuk yang umum dan khusus mempergunakan fasilitas *Software Protel* dan *Corel Draw*. Untuk pembuatan sensor planar mempergunakan basis *printed circuit board*(PCB) dengan lebar *track* sebesar 0,25mm. Dimensi sensor mempengaruhi faktor induktansi dan lebar permukaan yang akan diganggu oleh material magnetik. Gambar 4 berikut memperlihatkan beberapa variasi yang akan dibuat.



Gambar 4. Variasi bentuk beberapa *planar coil* untuk sensor *angular*

Besarnya induktansi yang diperoleh masing-masing sensor planar tergantung pada jumlah lilitan jari-jari lingkaran, jarak antara elemen koil datar dengan objek, dan lebar lintasan elemen koil datar, seperti dijelaskan pada persamaan 3. Pengujian dan karakterisasi parameter koil yaitu induktansi L , kapasitansi C , resistansi R , Impedansi Z , faktor kualitas Q sebagai fungsi dari frekuensi dilakukan menggunakan LCR meter pada variasi frekuensi eksitasi. Dengan demikian diperoleh karakteristik sensor pada beberapa frekuensi kerja sehingga memudahkan dalam mendesain osilator LC dan RC sebagai rangkaian evaluasi.

Perubahan jarak linier sensor planar dengan objek pengganggu dievaluasi menggunakan rangkaian osilator LC dengan frekuensi keluaran seperti pada persamaan 4. Sensor ditempatkan pada suatu set up eksperimen menggunakan mikrometer sekrup sebagai kontrol posisi linier dimana perubahan jarak kecil linier dievaluasi menggunakan rangkaian osilator LC dan detektor fasa yang akan mengubah besaran frekuensi menjadi tegangan. Evaluasi pengaruh suhu luar dilakukan dengan memberikan variasi suhu pada sensor dan pengaruh suhu kemudian dimasukkan ke dalam algoritma deteksi sehingga dapat direduksi.

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Pengukuran Nilai RCL Sensor

Sensor koil datar pada penelitian ini dirancang menggunakan aplikasi desain grafis Corel Draw dan Protel SE99 dengan memperhatikan ukuran atau dimensi, jumlah lilitan (N), bentuk geometri serta jarak antar jalur (*tracking*). Variasi rancangan dimensi dan geometri Sensor Koil Datar diperlihatkan pada Tabel 1.

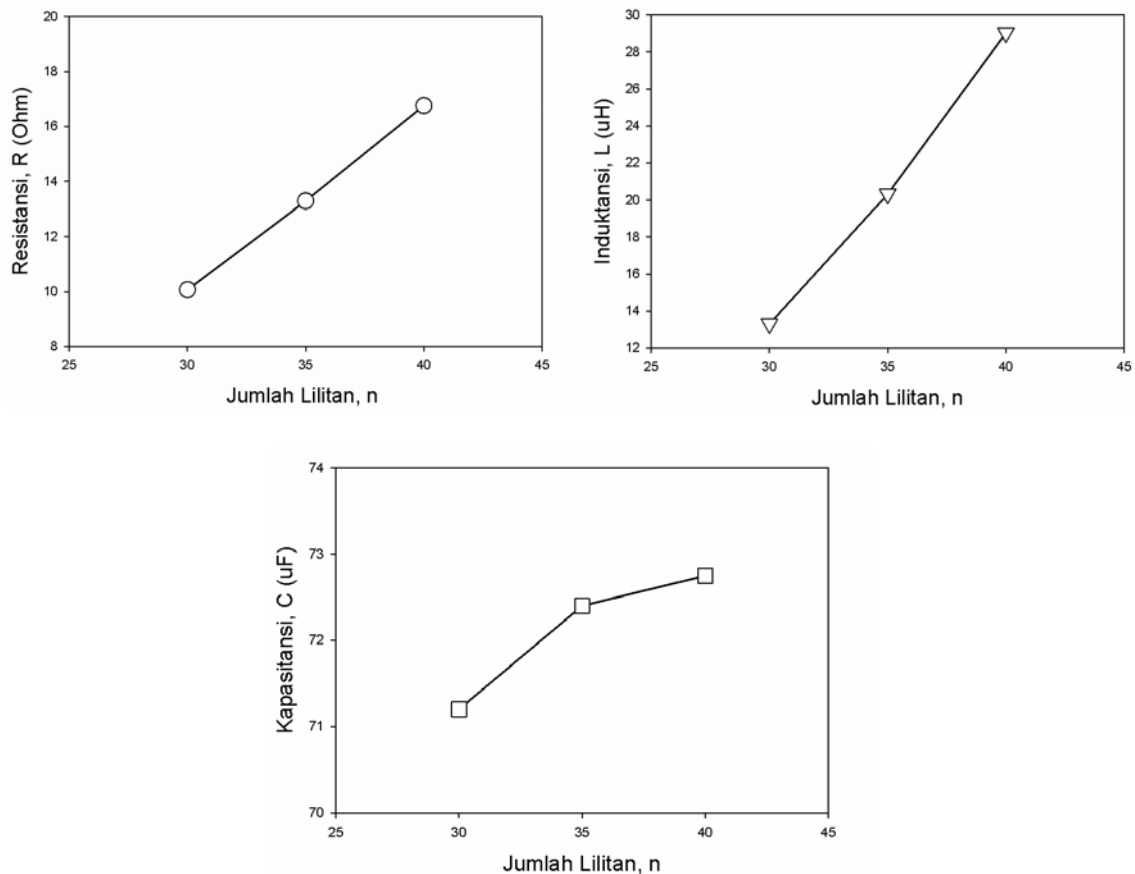
Tabel 1. Parameter pembuatan sensor koil datar

No	Geometri	Jumlah Lilitan (n)	Luas Penampang (mm ²)	Diameter/ Diagonal (mm)	Jarak Jalur (mm)
1	Lingkaran	30	3025	30	0.25
		35	3300	35	0.25
		40	3600	40	0.25
2	Persegi	30	3224	45	0.25
		35	3410	50	0.25
		40	3844	55	0.25
3	Persegi Panjang	30	5772	62	0.25
		35	7280	65	0.25 – 0.5
		40	7605	73	0.25 – 0.5

Desain sensor yang dirancang kemudian dicetak pada bahan PCB (*Printed Circuit Board*) jenis FR4 yang memiliki material jalur berupa campuran antara tembaga-perak (*Ag-Cu*) yang terletak diatas substrat pertinaks. Pada penelitian ini telah dipilih bentuk

geometri lingkaran karena lebih mudah dibuat dan memiliki kemudahan dalam aplikasinya.

Untuk melihat nilai tahanan R , kapasitansi C dan induktansi L dari sensor dilakukan karakterisasi sifat fisis sensor mempergunakan RCL meter dengan frekuensi tetap 1KHz. Berikut adalah hasil karakterisasi sensor dengan berbagai bentuk.



Gambar 5. Nilai RCL sensor planar koil lingkaran

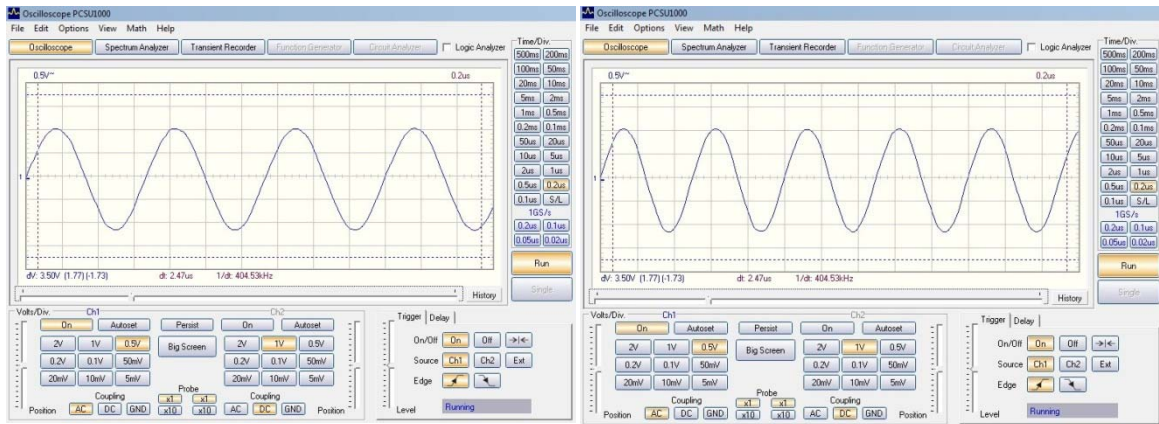
Hasil karakterisasi resistansi (R) dengan nilai terbesar pada sensor koil datar berbentuk lingkaran ditunjukkan pada jumlah lilitan lilitan (N) 40 adalah 16,75 Ω . Resistansi (R) bertambah secara linear dengan pertambahan jumlah lilitan. Induktansi pada sensor meningkat secara tajam pada jumlah lilitan 40 dengan nilai sebesar 29,02 μ H. Nilai kapasitansi pada tiap lilitan relatif sama dikarenakan substrat penyusun serta jarak antar jalur sensor dibuat sejenis (*homogen*) antara sensor pada jumlah lilitan 30, 35 ataupun 40.

3.2. Karakterisasi Dengan Osilator LC

Pengukuran dan pengujian sensor induktif dilakukan menggunakan suatu rangkaian osilator LC dengan bagian pengendali penala frekuensi (*tank circuit*) berupa bagian induktif L dan kapasitif C . Frekuensi keluaran osilator akan diubah menjadi tegangan mempergunakan f/V converter sehingga lebih mudah dibaca oleh rangkaian pengukur digital biasa dan ADC untuk diteruskan ke mikrokontroler.

Realisasi osilator LC 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*, yang dilengkapi rangkaian penala (tank

circuit) eksternal mempergunakan induktansi dan kapasitansi. Frekuensi keluaran dari osilator 1-3MHz dan diukur mempergunakan *frequency counter* Philips Digital PM3382 dan USB Osiloskop Velleman PCSU1000 yang dapat secara digital mengakuisisi keluaran dari osiloskop. Output yang dihasilkan berbentuk sinusoida. Nilai frekuensi osilator yang dirancang adalah mulai 1,5MHz dan 2,0MHz seperti diperlihatkan pada Gambar 6 berikut.

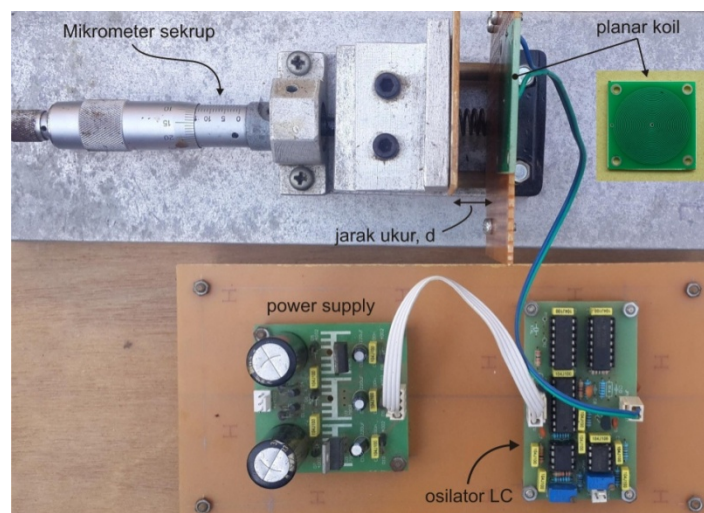


Gambar 6. Frekuensi keluaran osilator pada 1,5Mhz dan 2,0Mhz

Pengukuran suhu diperlukan pada penelitian ini karena suhu berpengaruh pada frekuensi osilasi dari osilator yang akan menimbulkan drift frekuensi. Oleh sebab itu, pengaruh suhu akan dieliminir dengan memasukkan faktor suhu dalam algoritma deteksi sensor sudut ini sehingga keakuratan pengukuran akibat pengaruh suhu luar dapat dijaga. Sensor yang akan dipergunakan adalah jenis sensor suhu PT100 Air probes, diameter 6mm, three-wires cable. Tahanan sensor ini akan bervariasi dengan perubahan suhu, sensor PT100 memiliki resistansi 100Ω pada 0°C dan variasi koefisien suhu $0,00385\Omega$ tiap $^\circ\text{C}$.

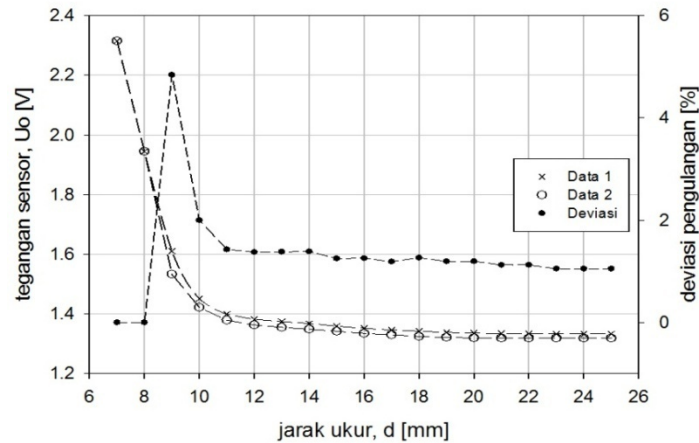
3.3. Uji coba Sensor Koil Datar Mempergunakan Mikrometer Sekrup

Pengujian sensor koil datar (planar coil) dilakukan mempergunakan set up percobaan seperti dibawah ini yang terdiri atas mikrometer sekrup dengan dudukan dari bahan alu Dural, sensor koil datar dengan rangkaian pengolah isyarat dan rangkaian power supply.



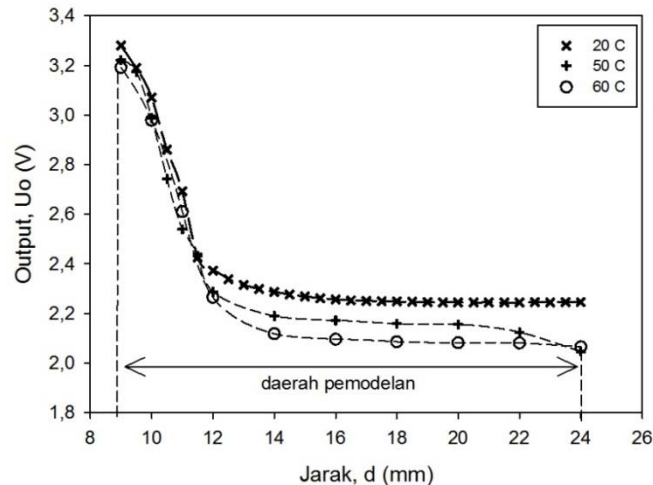
Gambar 7. Rangkaian osilator LC dan susunan eksperimen

Pengujian tahap pertama hubungan antara tegangan keluaran sebagai fungsi jarak translasi dari sensor diperlihatkan pada Gambar 8. Untuk menguji konsistensi sensor di jangkauan pengukurannya maka dilakukan pengukuran berulang sehingga diperoleh kurva yang saling berkoinsidensi dengan deviasi maksimum 4%. Perubahan ini boleh jadi disebabkan oleh perubahan suhu atau pengaturan jarak menggunakan micrometer yang tidak pas sehingga diperoleh nilai yang sedikit berbeda. Namun, dengan menggunakan pemodelan dan statistik akan diperoleh kurva yang mewakili karakteristik sensor.



Gambar 8.Perubahan nilai induktansi dan tegangan pada variasi jarak

Untuk perubahan suhu pada pengukuran sensor datar maka alat dikarakterisasi pada suhu yang berbeda yaitu pada suhu 20°C, 50°C dan 60°C (Gambar 9). Suhu sebesar 20°C diperoleh dengan mengkarakterisasi sensor dan rangkaian pada ruangan dengan suhu konstan 20°C, sementara suhu 50°C dan 60°C dilakukan dengan menempatkan rangkaian pada ruang terkontrol suhu Termostat Heraus Instrumen yang dapat mengatur suhu sampai dengan 300°C. Dari ketiga hasil pengukuran memperlihatkan bahwa sensor memiliki kurva yang sama dengan kecenderungan turun secara eksponensial (non linier) sesuai dengan persamaan koil datar. Dari rentang pengukuran yang ada tidak semua daerah bisa dipergunakan sehingga hanya daerah pemodelan saja yang akan diolah lebih lanjut yaitu dari 9mm sampai dengan 24mm atau sebesar 15mm rentang pengukuran, dengan resolusi 0,01mm.



Gambar 9. Pemodelan dan konversi kurva sensor koil datar pada 3 suhu berbeda

Adapun persamaan umum dari tiap kurva adalah:

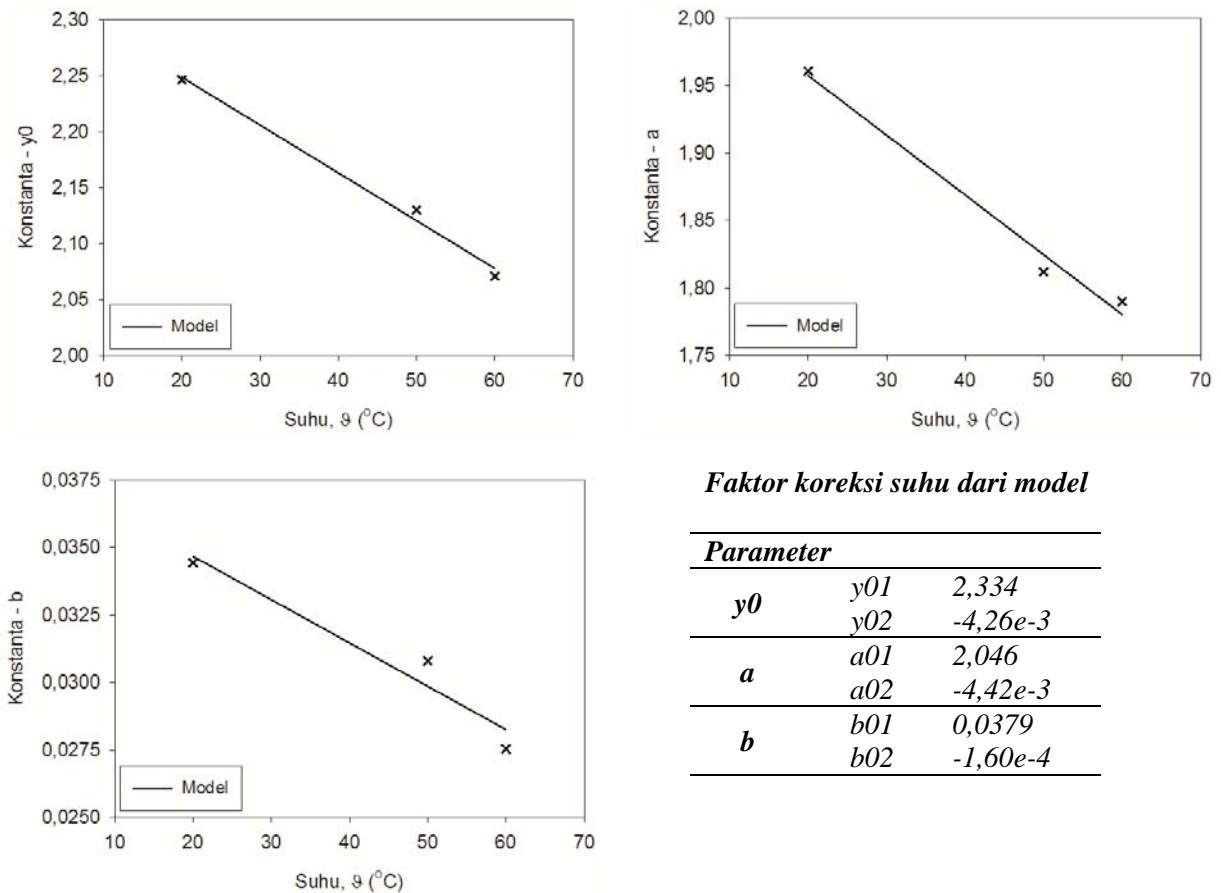
$$U_0(\vartheta) = y_0 + a \cdot \exp(-b\theta)$$

dimana f adalah frekuensi keluaran, θ adalah sudut dan y_0 , a dan b merupakan konstanta persamaan seperti diberikan pada Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Parameter model sensor koil datar pada 3 suhu yang berbeda

Suhu Karakterisasi (°C)	Parameter Model		
	y_0	a	b
20	2,2463	1,9606	0,0344
50	2,1300	1,8121	0,0308
60	2,0710	1,7899	0,0276

Seperti diperlihatkan pada Tabel 2 dan Gambar 9 terlihat bahwa masing-masing konstanta y_0 , a dan b menunjukkan pengaruh suhu pada pengukuran. Untuk itu dilakukan koreksi suhu untuk masing-masing parameter ini dengan memodelkan sehingga diperoleh faktor koreksi suhu dari masing-masing parameter seperti Gambar 10 berikut.



Faktor koreksi suhu dari model

Parameter		
y_0	y_{01}	2,334
	y_{02}	$-4,26e-3$
a	a_{01}	2,046
	a_{02}	$-4,42e-3$
b	b_{01}	0,0379
	b_{02}	$-1,60e-4$

Gambar 10. Koreksi suhu pemodelan kurva dari sensor jarak

Berdasarkan hasil pada Gambar 10 terlihat bahwa hubungan antara suhu dan koefisien model memberikan fungsi linier dan menghasilkan konstanta-konstanta koreksi suhu. Adapun bentuk persamaan umum dengan faktor koreksi suhu adalah:

$$U_0 = (y_{01} + y_{02} \cdot \vartheta) + (a_{01} + a_{02} \cdot \vartheta) \cdot \exp(-(b_{01} + b_{02} \cdot \vartheta)\theta)$$

Berdasarkan persamaan empiris ini maka untuk aplikasi selanjutnya adalah sensor sudut dilengkapi dengan sensor suhu yang secara rutin akan mengukur suhu lingkungan. Jika

besarnya tegangan keluaran terukur dan konstanta koreksi suhu diketahui maka akan diperoleh nilai sudut yang bersesuaian.

4. Kesimpulan

Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa terdapat perubahan signifikan dari perubahan frekuensi dan tegangan keluaran dari sensor yang diakibatkan perubahan jarak translasi dari objek yang berada di dalam daerah medan magnetik sensor memanfaatkan efek Eddy Current. Penelitian ini potensial untuk dikembangkan selanjutnya khususnya sebagai engsel elektronik dimana perubahan jarak translasi akan diubah menjadi rotasi (gerakan angular) sehingga dapat dipergunakan untuk mengukur sudut.

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai oleh dana penelitian Hibah Bersaing tahun 2015 dari DP2M Direktorat Pendidikan Tinggi Kementerian Riset Teknologi Dikti Republik Indonesia.

6. Daftar Pustaka

Boby G., N. Madhu Mohan dan V. Jagadeesh Kumar, 2008. A Linear Variable Differential Capacitive Transducer for Sensing Planar Angles, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, Vol. 57, No. 4, April 2008, 736 – 742.

Bosch, 2007. Sensors – the vehicle's "Sensory System, *Technical Information*, Bosch GmbH, Germany.

Decker, W. and Kostka, P., 1989. Inductive and eddy current sensors. In: Gopel, W., Hesse, J. and Zemel, J. N. (Eds.), *Sensors: A Comprehensive Survey*, Vol. 5, Chapter 7. VCH, Weinheim, 300–304.

Hella, 2003. *Contactless Sensors for X-By-Wire Systems*, Technical Information, He Hueck & Co. Rixbecker Straße 75 59552 Lippstadt Germany.

Hlubeck B., Hobein D. 2000. *Smart Sensor Technology - The Basic for Perfect Performance*, ATZ 102 (12).

Horsky, P. 2005. LC Oscillator Driver for Safety Critical Applications. *Proc. of DATE 05 Conference*, Designers Forum, Munich, Germany, 34-38.

Lemarquand, V. dan Lemarquand, G., 1992. Inductive Absolute Angular Position Sensor, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 28. No. 5, 2199- 2201.

Marioli, D., Sardini E., dan Taroni A., 2003. Flat Type Thick Film Inductive Sensors, *Active and Passive Elec. Comp.*, Vol. 26(1), 37–49.

Passeraub, Ph. A., Besse, P. A. dan Popovic, R. S., 2000. Temperature compensation of an integrated low power inductive proximity microsensor. *Sensors and Actuators A*, 82, 62–68.

Rahmondia NS, 2009. Desain dan Pembuatan Sensor Getaran Frekuensi Rendah Berbasis Koil Datar, *Thesis S2*, Jurusan Fisika FMIPA ITB Bandung.

Traenkler, H.-R., 1990. *Taschenbuch der Messtechnik mit Schwerpunkt Sensortechnik*, 2., Auflage, Oldenbourg Verlag, Muenchen.

