

# Karakterisasi Sensor Fluxgate sebagai Detektor Medan Magnetik AC

Widyaningrum Indrasari<sup>1a)</sup>, Mitra Djamal<sup>2,b)</sup>, dan Nina Siti Aminah<sup>2,c)</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta,  
Jl Pemuda no. 10 Rawamangun, Jakarta, Indonesia, 13220

<sup>2</sup>Laboratorium Fisika instrumentasi,  
Kelompok Keilmuan Fisika Teoretik Energi Tinggi dan Instrumentasi,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

<sup>a)</sup>Widyaningrum-indrasari@unj.ac.id (corresponding author)

<sup>b)</sup>mitra@fi.itb.ac.id

<sup>c)</sup>nina.sitiaminah@yahoo.com

## Abstrak

*Sensor fluxgate merupakan sensor vektor magnetik yang mempunyai sensitivitas tinggi dan dapat mengukur medan magnet DC maupun AC pada rentangan 0,1 nT – 1 mT. Prinsip pengukuran medan magnet oleh sensor fluxgate menggunakan metode medan referensi yang sangat cocok untuk mengukur medan magnet lemah. Dalam paper ini, akan dipaparkan karakterisasi sensor fluxgate dalam mendeteksi medan magnetik lemah dari sumber medan AC, dengan variasi jarak dan material magnetik pengganggu. Sumber medan yang digunakan terdiri dari pembangkit sinyal sinusoida, dan solenoida. Sementara itu sensor yang digunakan mempunyai sensitivitas 755 mV/ $\mu$ T. Sensor dapat mengukur perubahan medan magnet bolak-balik hingga 0,5  $\mu$ T pada sinyal dengan frekuensi 5kHz. Hasil pengukuran sensor kemudian dibandingkan dengan perhitungan secara teori berdasarkan Hukum Biot-Savart serta menggunakan alat ukur standar berupa fluxmeter.*

*Kata-kata kunci: fluxgate, medan magnet AC, material magnetik pengganggu, fluxmeter*

## PENDAHULUAN

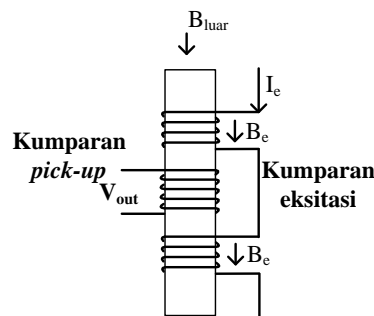
Kebutuhan akan otomatisasi dewasa ini terus meningkat, seiring dengan laju pertumbuhan penduduk dan perkembangan teknologi. Hal ini berdampak pada peningkatan pemanfaatan sensor dalam berbagai teknologi. Sensor sebagai piranti pendeteksi terus dikembangkan dengan berbagai metode agar dapat diperluas rentang pemanfaatannya. Salah satu jenis sensor yang terus mengalami perkembangan adalah sensor magnetik. Sensor magnetik telah banyak digunakan dalam bidang kesehatan, lingkungan, geologi, geofisika, sistem navigasi, penelitian ruang angkasa dan penelitian bahan-bahan magnetik. Dalam pengukuran medan magnet menggunakan sensor magnetik ada dua metode pengukuran yang dapat digunakan, yaitu pengukuran langsung dan pengukuran menggunakan medan referensi. Masing-masing metode mempunyai keunggulan dan kekurangan, namun pada pengukuran medan magnetik lemah metode medan referensi memberikan hasil yang lebih teliti. Salah satu sensor magnetik dengan metode tersebut adalah sensor fluxgate. Sensor fluxgate merupakan sensor magnetik yang memiliki sensitivitas dan stabilitas temperatur yang tinggi, berukuran kecil serta membutuhkan daya operasi yang rendah [1]. Selain itu, sensor fluxgate mampu mendeteksi medan magnet lemah dalam rentangan 0,1 nT – 1 mT baik DC maupun AC, serta mampu mendeteksi arah medan magnet dalam ruang tiga dimensi, sehingga sensor fluxgate termasuk

kelompok magnetometer vektor [2]. Dalam paper ini, akan dipaparkan aplikasi sensor magnetik fluxgate sebagai detektor medan magnet AC lemah.

### PRINSIP DASAR SENSOR FLUXGATE

Pada dasarnya sensor magnetik fluxgate terdiri dari dua kumparan, yaitu kumparan primer (eksitasi) dan kumparan sekunder (*pick-up*), seperti terlihat pada Gambar 1. Kumparan eksitasi digunakan untuk membangkitkan medan magnet. Sedangkan kumparan sekunder berfungsi untuk menangkap perubahan medan magnet yang di timbulkan oleh kumparan eksitasi. Kumparan sekunder akan menerima perubahan medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan eksitasi sehingga dihasilkan GGL induksi. Besarnya GGL induksi yang terjadi ditentukan oleh banyaknya garis gaya magnet yang mampu ditangkap oleh penampang kumparan. Perubahan medan magnet luar yang diterima oleh kumparan sekunder ini akan menghasilkan perubahan arus.

Prinsip dasar sensor fluxgate adalah mengukur kuat medan magnet di sekitar sensor atau perbedaan kuat medan antara dua titik yang berbeda di dalam inti sensor. Konversi kuat medan magnet luar yang diukur ( $B_{ext}$ ) menjadi sinyal listrik menggunakan medan magnet referensi ( $B_{ref}$ ) [3]. Medan referensi dapat berbentuk sinyal bolak-balik sinusoida, persegi, atau segitiga, kemudian dieksitasikan pada inti melalui kumparan primer. Medan magnet referensi  $B_{ref}$  disuperposisikan dengan medan magnet yang diukur  $B_{ext}$  pada bahan inti yang ditangkap oleh kumparan sekunder (*pick-up coil*) untuk dievaluasi. Untuk mendapatkan kelinearan antara sinyal keluaran terhadap medan magnet yang ditangkap oleh sensor, perlu digunakan pendekatan menggunakan prinsip harmonisasi kedua [3].



Gambar 1. Bentuk sederhana sensor magnetik fluxgate. Konfigurasi dasar kumparan elemen fluxgate [4].

Tegangan keluaran,  $V_{out}$  pada kumparan sekunder merupakan laju perubahan flux magnet di dalam inti. Berdasarkan Hukum Faraday, amplitudo tegangan keluaran induksi dituliskan sebagai :

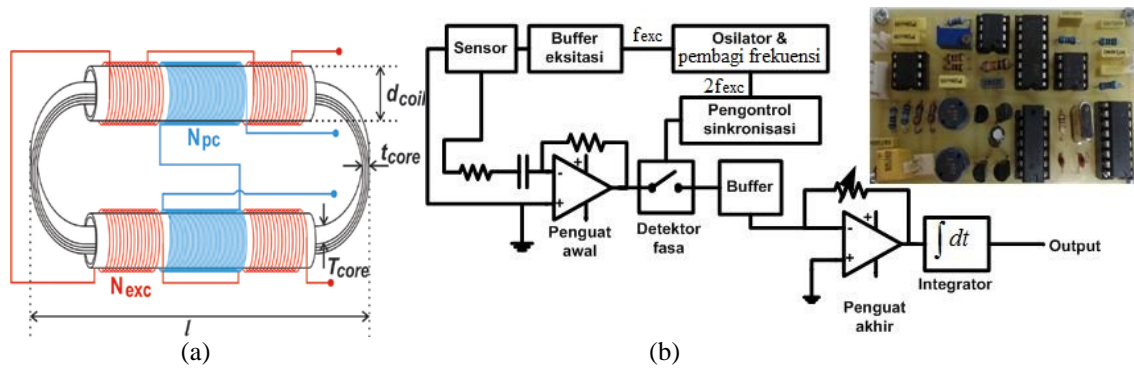
$$V_{out} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} \tag{1}$$

dengan  $N$  adalah jumlah lilitan kumparan sekunder dan  $A$  adalah luas bidang potong inti sensor. Sehingga tegangan keluaran harmonisasi kedua pada kumparan sekunder dapat dituliskan :

$$V_{out2h} = -3B_0NA\omega a_3 h_{ext}^2 h_{ref}^2 \max \sin 2\omega t \tag{2}$$

### METODE PENELITIAN

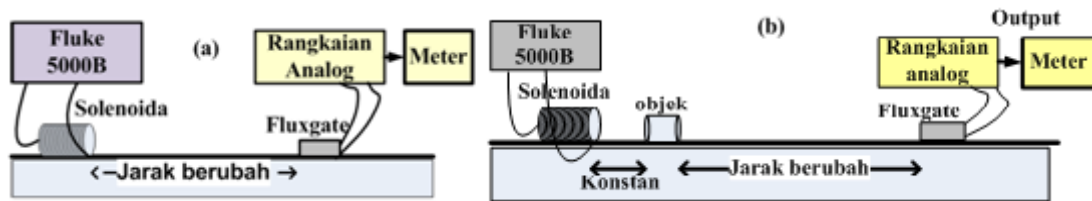
Elemen sensor fluxgate yang digunakan pada penelitian ini didesain dengan cara konvensional yang terdiri dari dua kumparan *pick-up*, empat kumparan eksitasi, selubung isolatif, serta inti feromagnetik berbentuk oval (Gambar 2a). Material yang digunakan sebagai inti feromagnetik dalam sensor fluxgate yaitu *Vitrovacs 6025Z* terdiri dari paduan  $Co_{66.5}Fe_{3.3}Si_{12}B_{18}$  [5]. Tegangan keluaran dari elemen sensor magnetik fluxgate diolah menggunakan rangkaian pengolah sinyal, yang terdiri dari dua bagian yaitu rangkaian eksitasi dan rangkaian *pick-up* (Gambar 2b). Rangkaian eksitasi berfungsi sebagai penghasil daya eksitasi yang akan membangkitkan medan pada kumparan eksitasi. Agar rangkaian pengolah sinyal analog sensor fluxgate dapat mendeteksi medan magnet AC, dilakukan peningkatan daya eksitasi pada rangkaian eksitasi yaitu dengan memperbesar frekuensi eksitasi ( $f_{ext}$ ) pada rangkaian osilator. Serta meningkatkan kemampuan filter tapis lolos rendah aktif *Sallen Key* tipe *Butterworth* pada rangkaian *pick-up*, yaitu dengan meningkatkan ambang frekuensi kutub filter [6].



Gambar 2. (a) Desain elemen sensor fluxgate kumparan sekunder ganda. (b) Skema Diagram Pengolahan Sinyal Sensor[7]

Sebagai penghasil sumber medan magnet AC digunakan transmiter. Sebuah transmiter harus mampu menghasilkan sinyal arus listrik bolak-balik terkontrol yang stabil. Sistem transmiter arus yang digunakan terdiri dari pembangkit sinyal sinusoida (Fluke 5000B) dan solenoida berinti ferrite dengan jumlah lilitan sebanyak 130, diameter 5 cm dan induktansu 2,93 mH.

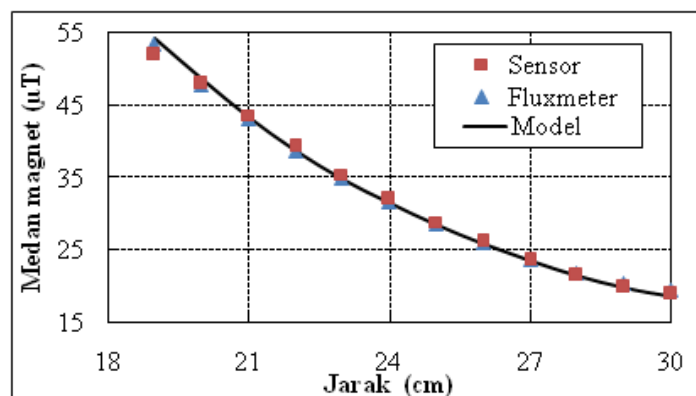
Sensor fluxgate sebagai detektor pada prinsipnya bekerja didasarkan pada kemampuannya dalam mendeteksi perubahan medan magnet. Perubahan medan magnet terjadi karena berubahnya jarak antara probe elemen fluxgate dengan objek yang diukur jaraknya. Fluxgate hanya dapat mendeteksi bahan yang mempunyai sifat magnetik atau material magnetik. Untuk aplikasi fluxgate sebagai detektor maka objek magnetik ditempatkan pada jarak tertentu dari fluxgate seperti di tunjukkan Gambar 3. Pengukuran menggunakan fluxmeter sebagai alat ukur medan magnet standar diperlukan untuk keperluan konversi medan magnet.



Gambar 3. (a) Prinsip pengukuran jarak dengan fluxgate (b) Prinsip pengukuran medan magnet bahan magnetik

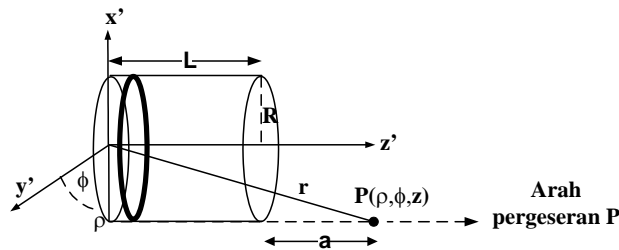
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil karakterisasi jarak deteksi sensor terhadap sumber medan solenoida berarus dan pengukuran dengan fluxmeter ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva karakterisasi jarak deteksi

Pendekatan model untuk mengetahui kecocokan hasil pengukuran dengan perhitungan berdasarkan teori dilakukan dengan menerapkan persamaan Hukum Biot-Savart pada solenoida dengan elemen arus di seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Hukum Biot-Savart pada solenoida berarus

Jika di titik P diletakkan sensor searah sumbu z, maka medan magnetik **B** di titik P yang akan ditangkap oleh sensor akibat elemen arus di dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [8] :

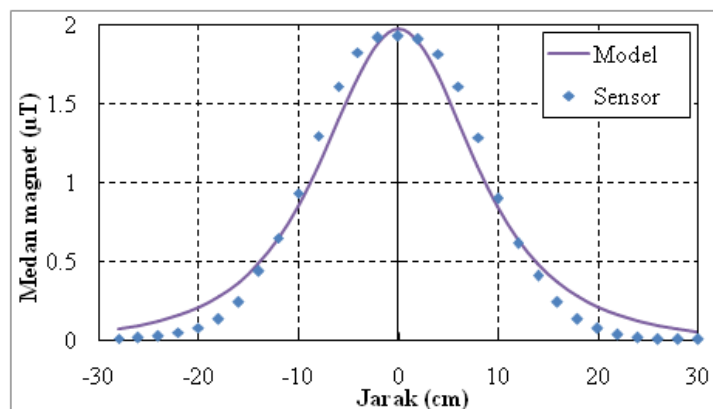
$$B_{z'} = \frac{\mu IA(2z'^2 - \rho^2)}{4\pi(\rho^2 + z'^2)^{3/2}} \hat{z} \tag{3}$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{4}$$

dengan **Bz'** adalah kuat medan magnet pada arah z' dalam satuan μT, I adalah kuat arus (A), A adalah luas penampang solenoida, serta μ permeabilitas inti solenoida. Sementara ρ adalah panjang proyeksi jarak titik P terhadap pusat koordinat di bidang x'y', dan z adalah jarak sumber medan terhadap sensor pada sumbu z'. Persamaan (3) berlaku hanya untuk menghitung **Bz'** akibat satu buah kawat melingkar (n=1) di titik P<sub>1</sub>(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>) dengan nilai z<sub>1</sub> sebesar :

$$z_1 = \left( L + a - \frac{(nL)}{N} \right) \tag{5}$$

L dan a masing-masing adalah panjang solenoida dan jarak dari ujung solenoida ke titik P<sub>1</sub>. Jika ada N lilitan pada solenoida maka di titik P<sub>1</sub> akan ada **Bz<sub>1</sub>** akibat kawat n=1 sampai dengan **Bz<sub>N</sub>** akibat kawat n=N. Jumlah medan total searah sumbu z di titik P<sub>1</sub> akibat N lilitan merupakan penjumlahan dari **Bz<sub>1</sub>**, **Bz<sub>2</sub>**, sampai dengan **Bz<sub>N</sub>**. Setiap titik P<sub>1</sub> bergeser ke arah z positif tanpa mengubah x<sub>1</sub> dan y<sub>1</sub> maka nilai a dan **Bz'** akan berubah. Perhitungan **Bz'** tersebut dilakukan menggunakan Matlab dengan mensubstitusikan parameter I, N, L, a, R sesuai dengan pengukuran dan diasumsikan permeabilitas inti ferrite (μ) adalah 20 x μ<sub>0</sub>. Kemudian hasil perhitungan **Bz'** dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan sensor dan fluxmeter seperti ditampilkan pada Gambar 4 (kurva model). Tampak bahwa kurva pendekatan model berhimpit dengan kurva pengukuran dengan kesalahan absolut maksimum pada jarak 30 cm sebesar 0,78 μT, dengan koreksi R terhadap titik pusat solenoida sebesar 1,25 cm.



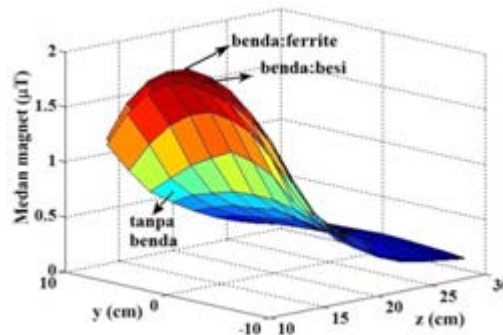
Gambar 6. Karakterisasi keluaran sensor terhadap perubahan jarak y

Untuk mengetahui hasil pengukuran sensor terhadap perubahan jarak y dengan z tetap dilakukan dengan mengubah posisi sensor terhadap sumber medan magnet. Sensitivitas sensor yang digunakan adalah 755 mV/μT dengan sumber medan 0.1 A 5 kHz. Hasil pengukuran ditunjukkan oleh Gambar 6. Sensor

mendeteksi medan sejajar solenoida, semakin jauh letak titik P dari sumbu solenoida maka medan yang ditangkap oleh sensor akan semakin kecil sehingga untuk perubahan jarak y kurva medan magnet berbentuk gaussian. Kecocokan bentuk kurva hasil pengukuran dengan perhitungan secara teori dilakukan dengan pendekatan menggunakan Hukum Biot-Savart [8], yaitu :

$$B_{y'} = \frac{3IA\rho z\mu \sin \phi}{4\pi(\rho^2 + z^2)^{5/2}} \tag{6}$$

dengan  $B_{y'}$  adalah kuat medan magnet pada arah  $y'$  dalam satuan  $\mu T$ . Sementara  $I$  adalah kuat arus (A),  $A$  adalah luas penampang solenoida,  $\mu$  permeabilitas inti solenoida,  $\rho$  adalah panjang proyeksi jarak titik P terhadap pusat koordinat di bidang  $x'y'$ , dan  $z$  adalah jarak sumber medan terhadap sensor pada sumbu  $z'$ . Hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 6 kurva model. Tampak bahwa kurva model cukup mendekati hasil pengukuran sensor.



Gambar 7. Keluaran sensor dalam mendeteksi keberadaan material magnetik

Kemampuan deteksi sensor terhadap keberadaan medan magnet dari material magnetik di sekitar sumber medan magnet diselidiki dengan meletakkan material magnetik berupa besi dan ferrite di antara sensor dan solenoida. Hasil pengukuran kuat medan magnet yang terukur oleh sensor fluxgate ditunjukkan pada Gambar 7. Terlihat bahwa terjadi kenaikan kuat medan pada sensor sebagai akibat adanya magnetisasi pada objek (besi atau ferrite) oleh medan magnet dari solenoida, sesuai dengan persamaan :

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \tag{7}$$

dengan  $B$  dan  $H$  adalah induksi magnetik dan intensitas medan magnetik,  $M$  adalah magnetisasi (A/m),  $\mu_0$  adalah permeabilitas hampa. Perubahan medan magnet solenoida terhadap waktu membangkitkan arus eddy pada objek, sehingga muncul medan sekunder yang ditangkap oleh sensor. Karena letak bahan pengganggu sejajar dengan solenoida, diasumsikan medan sekunder searah dengan medan primer sehingga menghasilkan superposisi yang memperkuat sinyal pada sensor.

## KESIMPULAN

Telah berhasil dilakukan pengembangan aplikasi sensor fluxgate untuk mendeteksi medan magnet AC. Sistem deteksi dapat memberikan respon cukup baik terhadap keberadaan medan magnet dari material magnetik dengan intensitas  $0.5 \mu T$ . Kurva sebaran kuat medan magnetik hasil eksperimen sensor berhasil didekati dengan perhitungan secara teori menggunakan Hukum Biot-Savart

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Makalah ini didanai oleh Hibah BLU Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta 2015.

## REFERENSI

1. P.Ripka, Fluxgate Sensors, in: P. Ripka (Ed), Magnetic Sensors and Magnetometers, Artech House Inc, Norwood MA, (2001).
2. S.A.Macintyre, *Magnetic Field Measurement*, Copyright 2000 CRC Press LLC, <http://www.engnetbase.com>

3. W, Göpel, J. Hesse, dan J.N. Zemel, *Sensors, A Comprehensive Survey, Magnetic Sensors*, VCH Publishers Inc., Suite (1989).
4. B. Ando, S. Baglio, V. Caruso, dan A. Bulsara, *Multilayer Based Technology to Build RTD Fluxgate Magnetometer*, *Sensors & Transducers Magazine (S&T e-Digest)*, Vol.65, Issue 3, March 2006, pp.509-514
5. O.V. Nielsen, J.R. Petersen, B. Hernando, P. Spisak, F. Primdahl, N. dan Moser, *Metallic Glasses for Fluxgate Applications*, *Anales de Fisica B*, 86 (1991), 271-6.
6. W. Indrasari, M. Djamal, W. Sriguromo, N. Hadziqoh, *High Sensitivity Fluxgate Sensor for Detection of AC Magnetic Field: Equipment for Characterization of Magnetic Material in Subsurface*, *Advanced Materials Research* Vol. 896 (2014) pp 718-721.
7. M. Djamal, W. Indrasari, N. Hadziqoh, *Karakterisasi Material Magnetik Bawah Permukaan Tanah dengan Sensor Fluxgate*, *Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains 2014*, Bandung.
8. W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, R.E. *Applied Geophysics*, Cambridge University Press (1990).