

# KARAKTERISASI SENSOR MAGNETIK *FLUXGATE* KUMPARAN SEKUNDER GANDA MENGGUNAKAN ELEMEN SENSOR *MULTI-CORE*

Widyaningrum Indrasari<sup>1,2\*)</sup>, Mitra Djamal<sup>1</sup>, Umiatin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika FMIPA Institut Teknologi Bandung, Jl Ganesha No 10 Bandung, 40132

<sup>2</sup>Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Jakarta, Jl. Pemuda N0 10 Rawamangun, Jakarta Timur, 13220

\*) Email: [widyafisikaunj@gmail.com](mailto:widyafisikaunj@gmail.com)

## Abstrak

*Fluxgate* merupakan sensor magnetik yang mampu mengukur medan magnet lemah. Prinsip dasar sensor *fluxgate* yaitu membandingkan medan magnet yang diukur dengan medan magnet referensi. Dalam paper ini akan dipaparkan hasil karakterisasi sensor magnetik *fluxgate* dengan desain kumparan sekunder ganda. Konfigurasi jumlah lilitan yang digunakan adalah 4x40 lilitan primer dan 2x60 lilitan sekunder, dengan inti vitrovacs 6025Z berukuran lebar 1.5 mm dan tebal 0.025 mm. Karakterisasi sensor dengan jumlah lapisan inti sensor bervariasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh jumlah lapisan inti terhadap faktor demagnetisasi dan sensitivitas sensor. Untuk mengetahui faktor demagnetisasi, terlebih dahulu dilakukan pengukuran dimensi elemen sensor dan induktansi kumparan. Induktansi kumparan diukur menggunakan LCR meter GW Instek seri 829 pada frekuensi 10 kHz. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah lapisan vitrovac, faktor demagnetisasi semakin besar. Kalibrasi sensor dilakukan dengan memberikan medan eksternal pada kumparan kalibrasi di dalam ruang Faraday. Berdasarkan kalibrasi sensor diperoleh hubungan antara medan eksternal dengan tegangan keluaran sensor. Melalui pendekatan linear pada rentang kerja  $\pm 4 \mu\text{T}$  diperoleh nilai sensitivitas untuk masing-masing sensor. Sensitivitas sensor berbanding terbalik dengan jumlah lapisan inti *vitrovac*. Sensor dengan dua lapis inti vitrovac mempunyai nilai sensitivitas tertinggi ( $641 \text{ mV} / \mu\text{T}$ ), dan kesalahan absolut terkecil (0.1 pada medan magnet  $3.87 \mu\text{T}$ ).

## Abstract

Fluxgate is a magnetic sensor that capable to measure the magnetic field in a very small order. The basic principle of the fluxgate sensor is by comparing the measured magnetic field with the magnetic field reference. In this paper, we describe the characterization of fluxgate magnetic sensor using the double secondary coil design. Configuration of primary coil winding and secondary coil that be used is 4x40 and 2x60. We use vitrovacs 6025Z (1.5 mm width and 0.025 mm thick) as the sensor core. Sensor characterization with varying amounts of the core layer is made to determine the influence of the core layer to the demagnetization factor and the sensor sensitivity. The demagnetization factor is performed by measuring the dimensions of the sensor element and the inductance of the sensor. The inductance of the sensor is measured using a LCR meter GW Instek 829 series at a frequency of 10 kHz. The calculation results show that the increasing amounts of the vitrovac core layer is proportional to the demagnetization factor. To determine the sensor sensitivity, sensor calibration is performed by giving the external field on the calibration coil in a faraday chamber. From the sensor calibration we get the relationship between the external fields with the sensor output voltage. Based on this relationship, we can calculate the sensor sensitivity in working range  $\pm 4 \mu\text{T}$ . Sensor sensitivity is inversely proportional to the amounts of vitrovac core layer. Sensor with 2 vitrovac core layers has the highest sensitivity ( $641 \text{ mV} / \mu\text{T}$ ), and has the smallest absolute error (0.1 at the point of  $3.87 \mu\text{T}$ ).

**Keywords:** *fluxgate, external field, vitrovac, sensitivity, demagnetization factor, inductance*

## 1. Pendahuluan

Meningkatnya kebutuhan untuk otomatisasi, keamanan dan kenyamanan di masa depan, menyebabkan jumlah sensor dan sistem sensor yang diperlukan juga meningkat. Sensor digunakan hampir di seluruh bidang kehidupan, tidak hanya di bidang kontrol dan otomotif saja. Hal ini mendorong orang

untuk selalu mengembangkan jenis sensor dan sistem sensor baru dengan prinsip dan metoda yang berbeda-beda, diantaranya adalah sensor magnetik. Sensor magnetik banyak digunakan untuk penelitian bahan-bahan magnetik, penelitian ruang angkasa, sistem navigasi, penentuan posisi benda atau sensor jarak dalam orde kecil, kompas elektronik, pemetaan medan magnet bumi, dan lainnya.

Ada beberapa metode pembuatan sensor magnetik, antara lain: metode Efek Hall, metode Magnetoresistif (AMR,GMR), metode SQUID (Superconducting Quantum Interference Devices) dan metode *Fluxgate*. Masing-masing metode mempunyai keunggulan maupun kelemahan, ditinjau dari sensitivitas, resolusi, teknik pembuatan serta harganya. Prinsip kerja sensor magnetik metode efek Hall adalah berdasarkan efek Hall [1]. Beberapa kelemahan metode ini adalah sensitivitasnya rendah, offset tegangan cukup tinggi, serta pengaruh temperatur yang cukup besar. Sedangkan sensor magnetik magnetoresistif bekerja berdasarkan perubahan resistansi bahan akibat pengaruh medan magnet luar [2]. Sensor ini memiliki kelemahan, diantaranya adanya pengaruh efek histeresis, serta adanya perubahan sensitivitas sensor terhadap kenaikan medan magnet H. Pada metode SQUID diperlukan helium cair atau nitrogen cair (temperatur tinggi) dalam pengoperasiannya, dan mempunyai keterbatasan rentangan dinamik, sehingga digunakan untuk keperluan khusus saja [3].

Sensor *fluxgate* merupakan sensor magnetik yang dapat mengukur medan magnet DC maupun AC pada rentangan 100pT – 1mT. Sensitivitas sensor *fluxgate* sangat tinggi, ukurannya kecil, kebutuhan daya kecil, dan mempunyai kestabilan temperatur yang tinggi [4]. Sensor *fluxgate* banyak digunakan untuk menentukan medan magnetik bumi, misalnya sebagai pengukuran sudut deklinasi dan inklinasi medan magnetik bumi, monitoring variasi medan magnetik permukaan bumi, penunjuk arah pada pesawat dan kapal, survei nondestruktif untuk menentukan material ferromagnetik dalam tanah, dan penentuan prospek geofisika [5].

Beberapa teknologi pembuatan telah digunakan oleh para peneliti dalam mengoptimasi sensor *fluxgate*, antara lain menggunakan teknologi konvensional, teknologi PCB, teknologi mikro, dan teknologi hybrid. Penggunaan teknologi yang berbeda akan menghasilkan perbedaan pada bentuk sensor, material inti, teknologi penanaman inti, dan daya kerja sensor, seperti: sensitivitas, akurasi, dan resolusi sensor.

Sensitivitas sensor *fluxgate* sangat bergantung pada permeabilitas bahan inti [6]. Bahan inti yang digunakan merupakan bahan yang dapat dimagnetisasi dengan permeabilitas tinggi ( $\mu_r \sim 10^5$ ), induksi magnetik saturasi pada 0.55 T, dan medan koersivitas yang rendah. Pemilihan bahan ini akan sangat menentukan kualitas sensor. Bahan inti yang sering digunakan adalah *Metglas* dan *Vitrovac* 6025,

tetapi *Vitrovac* lebih tahan terhadap temperatur tinggi dan pengaruh mekanik dari luar [7].

Faktor lain yang mempengaruhi tegangan keluaran dan *noise fluxgate* adalah faktor demagnetisasi (D). Secara umum ada dua faktor demagnetisasi yang mempengaruhi tegangan keluaran *fluxgate*, yakni demagnetisasi primer dan sekunder.

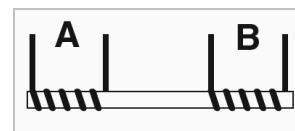
Dalam paper ini, akan dipaparkan pengaruh jumlah lapisan inti ferromagnetik *vitrovac* 6025Z terhadap nilai sensitivitas dan faktor demagnetisasi sensor *fluxgate*. Sensor *fluxgate* yang diteliti adalah menggunakan kumparan sekunder ganda dengan elemen sensor *multicore*.

## 2. Tinjauan Teori

### a. Prinsip Dasar Sensor *Fluxgate*

Sensor *fluxgate* bekerja dengan membandingkan medan magnet yang diukur  $B_{ext}$  dengan medan magnet referensi  $B_{ref}$ . Medan magnet referensi, dapat berbentuk sinyal bolak-balik sinusoida, persegi, atau segitiga, yang dieksitasikan pada inti melalui kumparan primer.

Dalam bentuk sederhana, sensor magnetik *fluxgate* terdiri dari dua kumparan, yaitu kumparan primer sebagai kumparan eksitasi (A) dan kumparan sekunder sebagai kumparan *pick-up* (B), seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bentuk sederhana sensor magnetik *fluxgate*

Kumparan primer digunakan untuk membangkitkan medan magnet. Medan magnet yang timbul pada kumparan primer akibat adanya medan listrik pada solenoid (Hukum Faraday). Sedangkan kumparan sekunder berfungsi untuk menangkap perubahan medan magnet yang di timbulkan oleh kumparan primer. Medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan primer akan diterima oleh kumparan sekunder, dan akan menghasilkan GGL induksi. Besarnya GGL induksi yang terjadi ditentukan oleh banyaknya garis gaya magnet yang mampu ditangkap oleh penampang kumparan (Hukum Ampere).

Perubahan medan magnet luar yang diterima oleh kumparan sekunder ini akan menghasilkan perubahan arus.

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

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

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 :

$$V_{out2h} = -3B_0 NA \omega_3 h_{ext} h_{ref\ max}^2 \sin 2\omega t$$

$$V_{out2h} = h_{ext} K \sin 2\omega t \quad (2)$$

### b. Faktor Demagnetisasi

Faktor demagnetisasi ( $D$ ) berperan penting dalam menentukan tegangan keluaran dan *noise* dari *fluxgate*. Faktor demagnetisasi ada dua jenis [9], yaitu:

1. Faktor demagnetisasi primer ( $D_{prim}$ ), yaitu faktor demagnetisasi yang disebabkan oleh kumparan primer. Nilai  $D_{prim}$  dipengaruhi oleh arus eksitasi. Secara teoritik untuk inti tertutup (close circuit core) nilainya sangat kecil bahkan nol, sehingga sering diabaikan.
2. Faktor demagnetisasi sekunder ( $D_{sec}$ ), yaitu faktor demagnetisasi yang disebabkan oleh kumparan sekunder. Nilai  $D_{sec}$  disebabkan oleh medan eksternal yang sedang diukur, sehingga faktor ini akan sangat mempengaruhi tegangan keluaran sensor.

Perhitungan faktor demagnetisasi cukup sulit dilakukan, mengingat hanya rotasi ellipsoid yang mempunyai nilai magnetisasi internal konstan jika dikenai medan magnet homogen [10]. Akan tetapi pada inti sensor *fluxgate*, kondisi ini tidak dapat dipenuhi, sehingga digunakan istilah *apparent permeability* inti ( $\mu_A$ ) yang merupakan representasi dari nilai faktor demagnetisasi efektif [5]. *Apparent permeability* inti merupakan cara untuk mengkarakterisasi perilaku keseluruhan inti *fluxgate* terhadap medan yang diukur dan kumparan sekunder

sensor. Hubungan antara *apparent permeability* dengan faktor demagnetisasi dituliskan dalam persamaan [11] :

$$\mu_A = \frac{\mu_r}{1 + D(\mu_r - 1)} \quad (3)$$

dengan

- $D$  : factor demagnetisasi efektif
- $\mu_A$  : apparent permeability inti
- $\mu_r$  : permeabilitas relative

Untuk mengetahui nilai  $\mu_A$  dapat dilakukan dengan mengukur induktansi kumparan tanpa inti ( $L_{coil}$ ) dan induktansi kumparan dengan inti ( $L_{core}$ ), serta menghitung luas penampang koil ( $A_{coil}$ ) dan luas penampang inti ( $A_{core}$ ) [8].  $\mu_A$  dihitung menggunakan persamaan :

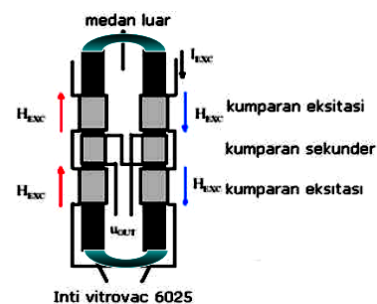
$$\mu_A = \left( \frac{L_{core} - L_{coil}}{L_{coil}} \right) \frac{A_{coil}}{A_{core}} + 1 \quad (4)$$

Berdasarkan persamaan (3) dan (4) diperoleh faktor demagnetisasi efektif inti ( $D$ ) sebagai berikut:

$$D = \frac{\mu_r / \mu_A - 1}{\mu_r - 1} \quad (5)$$

### 3. Metode Penelitian

Elemen sensor *fluxgate* dibuat menggunakan metode konvensional, berdasarkan desain kumparan sekunder ganda seperti Gambar 2.



**Gambar 2.** Desain elemen sensor *fluxgate* kumparan sekunder ganda (Yulkifli, et al.) [11]

Elemen sensor terdiri dari empat lilitan primer dan dua lilitan sekunder. Kumparan sekunder terletak di tengah-tengah inti dan diapit oleh kumparan primer. Konfigurasi lilitan yang digunakan adalah lilitan primer 4 x 40 dan lilitan sekunder 2 x 60. Sebagai bahan inti feromagnetik digunakan *vitrovac 6025 Z* (Vacuumschmelze) dengan lebar 1.5 mm dan tebal

0.025 mm. Sedangkan panjang inti bervariasi disesuaikan dengan jumlah lapisan inti pada elemen sensor.

Karakterisasi sensor dilakukan di dalam ruang Faraday, dengan mengalirkan arus 80 mA sampai dengan - 80 mA pada kumparan kalibrasi. Sedangkan induktansi kumparan diukur menggunakan LCR meter GW Instek seri 829 pada frekuensi 10 kHz.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

##### a. Pengaruh Jumlah Lapisan Inti Terhadap Faktor Demagnetisasi

Untuk mengetahui faktor demagnetisasi, terlebih dahulu dilakukan pengukuran dimensi elemen sensor (diameter koil, lebar inti, tebal inti, panjang inti) dan induktansi kumparan. Penampang koil berbentuk

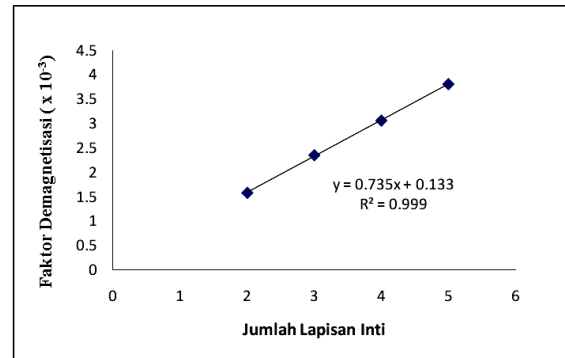
lingkaran memiliki luas  $A_{coil} = \frac{1}{4} \pi d_{coil}^2$ , sedangkan

luas penampang sensor dihitung menggunakan  $A_{core} = 2 \times l_{core} \times \text{tebal inti}$  [5]. Hasil pengukuran dimensi dan induktansi elemen sensor ditampilkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Pengukuran Dimensi dan Induktansi Elemen Sensor.

Jumlah Lapisan Inti	Tebal Lapisan Inti (cm)	Panjang Inti (cm)	$A_{coil}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{core}$ (cm <sup>2</sup> )	$L_{coil}$ (μH)	$L_{core}$ (μH)	$\mu_A$
2	0.005	23.3	0.05065	0.0015	4.33	82.72	612.22
3	0.0075	18.4	0.05065	0.00225	4.33	84.27	416.57
4	0.01	12.15	0.05065	0.003	4.33	86.64	321.91
5	0.0125	6.25	0.05065	0.00375	4.33	87.30	259.78

$l_{core} = 0.15$  cm;  $d_{coil} = 0,254$  cm;  $\mu_r = 25.000$  (bahan feromagnetik)



**Gambar 3.** Faktor Demagnetisasi sensor pada frekuensi 10 kHz

Nilai permeabilitas relatif ( $\mu_r = 25.000$  [8]) disesuaikan dengan bahan inti feromagnetik yang digunakan. Dari persamaan (5) diperoleh hubungan antara faktor demagnetisasi dengan jumlah lapisan inti feromagnetik seperti pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa faktor demagnetisasi bernilai antara  $1.59 \times 10^{-3}$  -  $3.89 \times 10^{-3}$ , serta jumlah lapisan inti feromagnetik tampak sebanding dengan faktor demagnetisasi. Semakin banyak jumlah lapisan inti feromagnetik, nilai induktansi sensor semakin besar, maka faktor demagnetisasi sensor pun semakin besar.

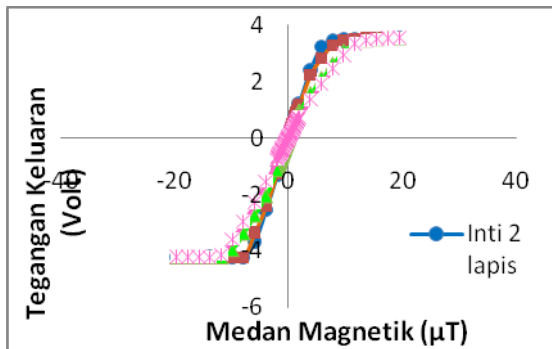
##### b. Pengaruh Jumlah Lapisan Inti Terhadap Sensitivitas

Respon tegangan keluaran sensor terhadap medan magnet yang dipakaikan untuk beberapa variasi jumlah inti dilukiskan dalam Gambar 4. Rentangan daerah kerja linear sensor pada setiap lapisan berbeda-beda, sehingga diambil pendekatan pada daerah kerja  $\pm 4$  μT. Rentangan daerah kerja sensor untuk beberapa variasi jumlah inti diperlihatkan dalam Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa kurva tegangan keluaran setiap sensor mempunyai kemiringan yang berbeda-beda, sehingga sensitivitas masing-masing sensor pun berbeda.

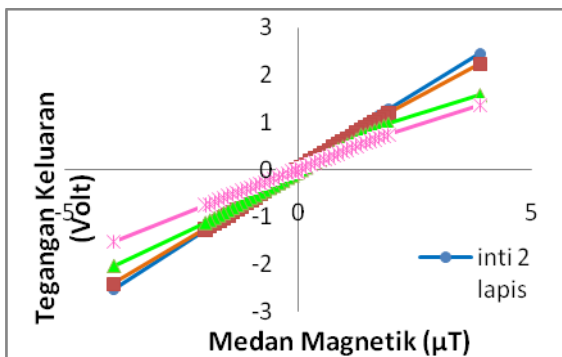
Tampak sensitivitas sensor berbanding terbalik dengan jumlah lapisan inti feromagnetik. Sensitivitas sensor dengan 2 lapis inti feromagnetik mempunyai nilai paling tinggi dibandingkan dengan lapisan inti yang lain, yaitu sebesar 641 mV/μT.

Nilai sensitivitas ini lebih baik dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada penelitian sebelumnya [13], yaitu 165.6 mV/μT menggunakan variasi lilitan primer 4 x 40 serta lilitan sekunder 2 x 60 dengan inti vitrivocs 6025 X berukuran lebar 0.75 mm, tebal 0.025 mm sebanyak 7 lapis.

Kesalahan pengukuran masing - masing konfigurasi jumlah inti ditunjukkan dalam Gambar 7.



Gambar 4. Kurva keluaran sensor dengan jumlah lapisan inti berbeda pada daerah ± 20 μT

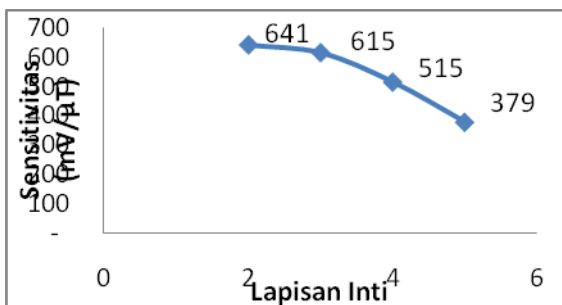


Gambar 5. Kurva pendekatan linear pada daerah kerja ± 4 μT

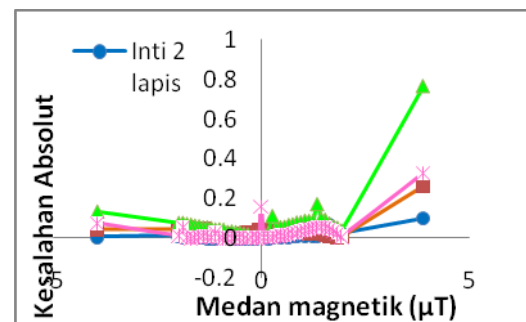
Sensitivitas sensor (S) merupakan rasio dari perubahan sinyal keluaran terhadap perubahan sinyal masukan, dapat ditentukan menggunakan persamaan:

$$S = \frac{\Delta \text{keluaran}}{\Delta \text{masukan}} \quad (6)$$

Hasil perhitungan sensitivitas masing-masing sensor ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Karakteristik sensitivitas keluaran sensor pada jumlah lapisan inti feromagnetik berbeda



Gambar 7. Kurva kesalahan absolut pada daerah kerja ± 4 μT

Kesalahan absolut terkecil diperoleh pada sensor dengan 2 lapis inti feromagnetik yaitu sebesar 0.1 pada medan magnet 3.87 μT. Hal ini terkait dengan pemilihan daerah kerja sensor, semakin sedikit jumlah lapisan inti feromagnetik semakin lebar daerah linear sensor. Sehingga untuk rentangan daerah kerja yang sama, kesalahan pengukuran pada titik batas daerah kerja seharusnya berbanding lurus dengan jumlah lapisan inti feromagnetik (ada penyimpangan data pada inti 4 lapis).

#### 4. Kesimpulan

Telah dilakukan karakterisasi terhadap sensor magnetik fluxgate kumparan sekunder ganda menggunakan elemen sensor multi-core. Dari paparan di atas dapat disimpulkan bahwa jumlah lapisan inti feromagnetik sangat berpengaruh pada sensitivitas dan faktor demagnetisasi sensor. Semakin banyak lapisan inti, faktor demagnetisasi semakin besar sehingga sensitivitas sensor semakin kecil.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada DP2M DIKTI DEPDIKNAS yang telah membiayai penelitian ini melalui Program Hibah Bersaing Dikti 2011 dengan nomor kontrak 06/SP2H/Dit.Litabnas/ HB/LP-UNJ/II/2012.

## Daftar Acuan

- [1]. M.J. Caruso. And B. Tamara, A New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensor Magazine*, Magnetic Sensor, www.ssec.honeywell.com. 2007.
- [2]. M. Djamal, and M. Barmawi, Design and development of magnetic sensors based on giant magnetoresistance (GMR) materials, *J. Materials Science Forum*, **517** (2006), pp. 207-211.
- [3]. A. Cerman, and P. Ripka, Towards Fully Digital Magnetometer, *Sensors and Actuators A*, **106** (2003), pp. 34-37.
- [4]. Yulkifli, *Pengembangan Elemen Fluxgate dan Penggunaannya untuk sensor –sensor berbasis magnetic dan proksimiti*, Disertasi Doktor, ITB (2010).
- [5]. J. Kubik, *PCB Fluxgate sensors*, Doctoral Thesis, Czech Technical University, Prague (2006)
- [6]. X.P. Li, J. Fan, Ding, X.B. Qian., Multi-core Orthogonal Fluxgate Sensor, *J. Magnetism and Magnetic Material*, **300** ( 2006), pp, 98-103.
- [7]. A. Baschiroto, E. Dallago, P. Malcovati, M. Marchesi, G. Venchi, Development and Comparative Analysis of Fluxgate Magnetic Sensor Structure in PCB Technology, *IEEE Trans. Magn.* **42** No. 6 (2006), pp. 1670-1680.
- [8]. J. Kub'ik, and P. Ripka, Racetrack fluxgate sensor core demagnetization factor, *Sensors and Actuators A* **143** (2008), pp. 237–244.
- [9]. Hinrichsh, C., Stahl, J., Kuchenbrandt, K. and Shiling, M., Dependence of Sensitivity and noise if Fluxgate Sensors on Racetrack Geometry, *IEEE Trans. Magn.* **37** No. 4 (2001), pp. 1983-1985.
- [10]. J.A. Osborn: Demagnetizing Factors of the General Ellipsoid, *Physical Review*. **67** no. 11-12 (1945), pp. 351-357.
- [11]. Primdahl F, Hernando B, Nielsen O V and Petersen J R, Demagnetizing factor and noise in the fluxgate ring-core sensor . *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **22** (1989), 1004–1008
- [12]. Yulkifli, R. Nanda, Suyatno, M.Djamal, Designing and Making of Fluxgate Sensor with Multi-Core Structure for Measuring of Proximity, *Procd. On CSSI, Serpong Tangerang* (2007).
- [13]. Z. Azhar, Yulkifli, Rahmondia, Mitra Djamil, Desain Awal Prototip Magnetometer untuk Mengukur Medan Magnet dalam Ruang 3 Dimensi. *Prosiding SIBF 2008*, 28 Agustus 2008, ITB Bandung.