

SENSOR FLUXGATE BERBASIS TEKNOLOGI PRINTED CIRCUIT BOARDS (PCBs)

Yulkifli* dan Mitra Djamal**)

*) Staf Pengajar Jurusan Fisika FMIPA UNP, email: yulkifliamir@yahoo.com

***) KK-FTETI FMIPA Institut Teknologi Bandung

ABSTRACT

An instrument to measure magnetic field based on Fluxgate magnetic sensor using element of model sensor printed circuit boards (PCBs) was presented. Fluxgate sensor element consisted of excitation coils and pick-up coils. Excitation coils generates magnetic field that functions as reference magnetic field whereas pick-up coils is used as a sensing of external magnetic field, so the sensitivity of fluxgate sensor depends on the design of secondary coils element. Based on the analysis of the experiment data, the sensor's sensitivity of the PCBs was 392.1 mV/ μ T. The maximum absolute error from the polinomial function approached was 0.0751 μ T. The maximum relative error of the sensor system in this approach was 0.38 %.

Keywords: *magnetic sensor, fluxgate, PCBs, excitation coils, pick-up coils*

PENDAHULUAN

Bahan magnet dan magnetisme merupakan salah satu cabang dari ilmu bahan yang terus berkembang sesuai dengan tuntutan kemajuan science dan teknologi. Kemajuan yang sangat pesat dan kebutuhan yang sangat besar dalam kehidupan menuntut suatu instrumen yang dapat menentukan kualitas bahan magnet itu sendiri. Instrumen untuk menguji kualitas dan kuantitas kandungan material bahan magnetik tersebut salah satunya adalah sensor magnetik.

Sensor magnetik adalah alat ukur medan magnet yang banyak digunakan orang untuk berbagai keperluan, antara lain untuk penelitian bahan-bahan magnetik, keamanan penerbangan (mendeteksi barang bawaan), pemetaan medan magnet bumi, penentuan posisi benda, pengetesan kebocoran medan magnet dari suatu alat penghasil medan magnet seperti pengeras suara, magnetron dan peralatan magnetik lainnya (Ripka P, 2001a).

Beberapa sensor magnetik yang banyak digunakan saat ini adalah efek Hall, *Magneto-resistif (AMR, GMR)*, *SQUID* dan

fluxgate (Caruso, M.J., dkk., 2007; Smith, C.H., dkk., 2007). Prinsip kerja berdasarkan efek Hall, kelemahan metode ini adalah sensitivitasnya yang rendah, offset tegangan yang cukup tinggi dan pengaruh temperatur yang cukup besar (Caruso, M.J., dkk., 2007).

Magneto-resistif bekerja Berdasarkan prinsip perubahan resistansi bahan akibat pengaruh medan magnet luar, Kelemahan sensor magnetik model ini adalah adanya pengaruh efek histeresis, berubahnya sensitivitas sensor terhadap kenaikan medan magnet H. Fluxgate berkerja berdasarkan pada hubungan antara kuat medan magnet H yang diberikan dengan fluks medan magnet induksi B. Besarnya sebanding dengan medan magnet luar yang mempengaruhi inti (core) dan arahnya sebanding dengan arah medan magnet luar tersebut (Göpel, W., 1996, Djamal, M., et al., 2007, Bashiroto, A., et al., 2006). Kelebihan lain sensor *fluxgate* adalah ukurannya kecil, kebutuhan daya kecil, dan mempunyai kestabilan yang tinggi terhadap temperatur dengan koefisien sensitivitas

temperatur 30 ppm/°C dan koefisien offset 0.1 nT (Ripka, P., *dkk.*, 2001a: L, Shibin., 2006).

Untuk meningkatkan efektifitas dan efisiensi sensor *fluxgate* dilakukan berbagai upaya oleh para peneliti seperti perbaikan pada desain struktur sensor, rangkaian pengolah sinyal dan meminiatur ukuran sensor dalam orde yang lebih kecil (Ripka, P., *dkk.*, 2001, Wang, Y., *dkk.*, 2006; Zorlu, O., *dkk.*, 2007). Selain itu teknik pembuatan sensor juga makin berkembang mulai dari metode konvensional sampai metode dalam bentuk printed circuit board (PCB) (Tipek, A., *dkk.*, 2004, Kubik, J., *dkk.*, 2006, Bashiroto, A., *dkk.*, 2006, O'Donnell, T., *dkk.*, 2006, B. Ando, *dkk.*, 2008, Janosek M. *dkk.*, 2009) dan teknologi microfluxgate, seperti: *electroplated/electroplating, chemical etching, flex-foil, photolithography*, evaporasi dan sputtering (Ripka, P., *dkk.*, 2001b, Park, H. S. *dkk.*, 2004, Fan., J., *dkk.*, 2006, Zorlu, O., *dkk.*, 2007, 2008), kombinasi dari beberapa metode tersebut disebut hybrid technology (Dezuari, O., *dkk.*, 1999: Belloy, E., *dkk.*, 2000).

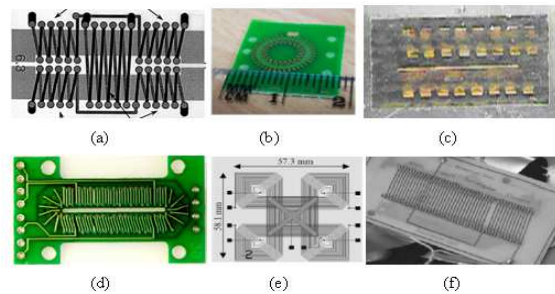
Metode dengan teknologi mikro mempunyai proses yang sangat kompleks sehingga mengakibatkan harga pembuatan mahal, sensitivitasnya yang dihasilkan rendah karena luas penampang (*cross-sectional*) menjadi kecil (Kubik, J., 2006).

Teknologi PCBs merupakan teknologi terkini dalam pembuatan elemen sensor Fluxgate, karena memiliki kelebihan antara lain luas penampang besar sehingga sensitivitas sensor lebih tinggi, proses pembuatan mudah, untuk jumlah massal tentunya biaya pembuatan rendah, akibatnya harganya lebih murah (Dezuari, O., *dkk.*, 1999, Tipek, A., *dkk.*, 2004, Baschiroto, A., *dkk.*, 2006, Kubik, J., *dkk.*, 2006).

Tulisan ini akan membahas penggunaan sensor magnetik fluxgate berbasis elemen sensor PCBs dan karakteristiknya.

1. Teknologi Printed Circuits (PCBs) dalam Pembuatan Elemen Sensor Fluxgate

Proses pembuatan elemen sensor fluxgate menggunakan teknologi PCBs memiliki keuntungan antara lain luas penampang besar sehingga sensitivitas sensor lebih tinggi, proses pembuatan mudah, tentunya biaya pembuatan rendah, akibatnya harganya lebih murah (Baschiroto, A., *dkk.*, 2006). Beberapa contoh elemen sensor fluxgate yang dibuat dengan teknologi PCB dapat terlihat pada Gambar 1.

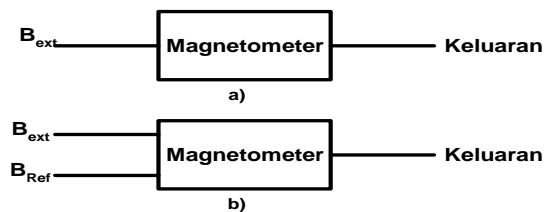


Gambar 1. Photograph desain elemen sensor fluxgate dengan teknologi PCB (Dezuari, O., 2000(a), Tipek, A., *dkk.*, 2004(b), O'Donnell, T., *dkk.*, 2006(c), Kubik, J., *dkk.*, 2006 (d), Baschiroto, A. *dkk.*, 2006 (e), B. Ando, *dkk.*, 2008(f).

Dalam pembuatan elemen sensor dengan teknik PCBs memiliki tiga tahapan proses, yaitu (1). Desain engineering, (2). Desain fisik PCBs, (3). Pencetakan ke PCBs. Setiap tahap memerlukan perangkat lunak tertentu. Ketiga perangkat lunak tersebut adalah Computer Aided Engineering (CAE), Computer Aided Design (CAD) dan Computer Aided Manufacturing (CAM). (SELC,2008). Agar mendapatkan hasil yang diharapkan semua proses mempunyai keterkaitan yang sangat erat dan tidak dapat dipisahkan. Untuk pembuatan elemen sensor fluxgate dengan teknik PCBs yang sangat menentukan adalah: *footprint* dan *track* (jalur) yang menggantikan sistem gulungan kawat yang dilakukan selama ini.

2. Konsep Sensor Fluxgate

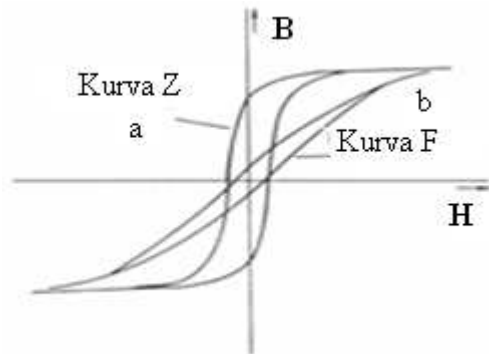
Rapat fluks B_{ext} dalam sebuah medan magnet dapat diukur secara langsung menggunakan koil rangkaian elektronika. Namun metode ini memberikan hasil yang tidak baik jika medan magnet tersebut kecil. Sensor *fluxgate* tidak menggunakan metode langsung seperti ini namun menggunakan suatu medan magnet referensi B_{ref} untuk dibandingkan dengan medan magnet B_{ext} dengan menggunakan bahan yang merupakan bahan yang dapat dimagnetisasi seperti pada Gambar 2b. Pada umumnya medan referensi menggunakan sinyal sinusoidal, sinyal persegi, maupun sinyal segitiga yang diberikan pada kumparan primer.



Gambar 2. Prinsip pengukuran medan magnet: (a) metode langsung; (b) per-bandingan rapat fluks yang hendak diukur B_{ext} dengan rapat fluks referensi B_{ref} . (Gopel, W 1996, Djamal, M. 2007).

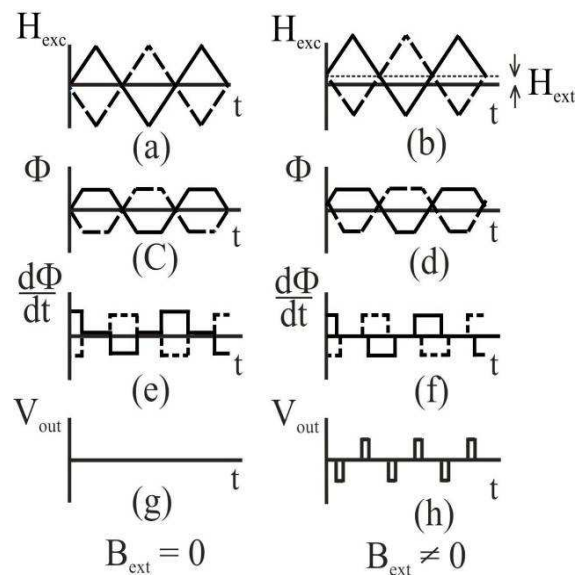
Hasil dari perbandingan kedua medan tersebut berdasarkan pada rapat fluks di dalam inti yang dideteksi oleh kumparan sekunder di sekeliling inti. Bahan inti sensor *fluxgate* biasanya menggunakan bahan paramagnetik dengan permeabilitas yang tinggi. Perbedaan pendekatan matematis dihubungkan dengan fungsinya dan arus yang diberikan telah membuat prinsip yang berbeda untuk sensor *fluxgate*. Pendekatan yang dilakukan antara lain dengan fungsi polinomial, fungsi pemotong linier, dan fungsi trigonometri. Kedua pendekatan pertama digunakan untuk kurva magnetisasi dengan karakteristik Z sedangkan pendekatan ketiga digunakan untuk kurva magnetisasi dengan karakteristik F.

Gambar kurva magnetisasi ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Bentuk kurva magnetisasi (a) karakteristik Z; (b) karakteristik F.

Prinsip kerja sensor *fluxgate* ketika mengukur perubahan medan magnet luar ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Prinsip kerja sensor *fluxgate* (dimodifikasi dari Gruger, H., dkk., 2000)

Prinsip kerja sensor magnetik *fluxgate*. a) Medan eksitasi tanpa medan magnet luar $B_{ext}=0$; b) Medan eksitasi dengan medan magnet luar $B_{ext}\neq 0$; c) kurva magnetisasi dalam keadaan saturasi pada $B_{ext}=0$; d) kurva magnetisasi dalam keadaan saturasi pada $B_{ext}\neq 0$; e) perubahan fluks terhadap waktu pada $B_{ext}=0$; f) perubahan fluks terhadap waktu pada $B_{ext}\neq 0$; g) tegangan

keluaran sensor pada $B_{ext}=0$; h) tegangan keluaran sensor pada $B_{ext}\neq 0$ (Djamal, M. *et al.*, 2007).

Tegangan keluaran V_{out} dari elemen sensor diolah dengan menggunakan rangkaian pengolah sinyal. Untuk mengevaluasi tegangan keluaran sensor *fluxgate* digunakan fungsi transfer. Fungsi transfer suatu sensor magnetik *fluxgate* menggambarkan hubungan antara tegangan keluaran V_o dengan medan magnet yang diukur. Fungsi transfer dapat dihitung menggunakan pendekatan polinomial dan dengan mencari komponen frekuensi yang ada di dalam kerapatan fluks magnetik inti sensor. Penggunaan pendekatan polinomial menyederhanakan pembagian ke dalam komponen frekuensi (Göpel, W, 1989).

Tegangan keluaran V_{out} dari kumparan sekunder (*pick-up*) menghasilkan komponen tegangan harmonisa kedua (V_{out2h}) ditunjukkan persamaan (1):

$$V_{out2h} = -3B_0NA\omega a_3 h_{ext} h_{ref\ max}^2 \sin 2\omega t \dots (1)$$

N adalah jumlah lilitan kumparan sekunder, A luas bidang potong inti sensor, a_3 koefisien polinomial orde 3, $h_{ref\ max}$ medan referensi kumparan primer, H_{ext} medan magnet eksternal.

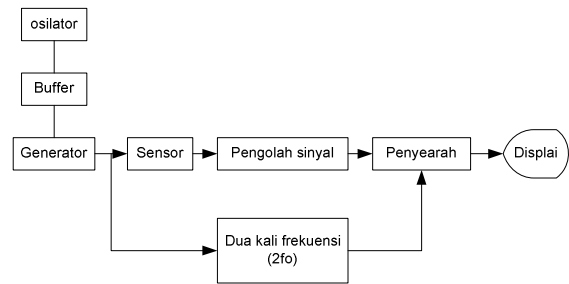
Berdasarkan persamaan (1) terlihat bahwa tegangan keluaran harmonisa ke dua adalah berbanding lurus dengan kuat medan yang diukur (Djamal, M., *et al.*, 2005,2007, Bashiroto, A., *et al.*, 2006).

METODE PENELITIAN

Metode/rancangan yang akan digunakan dalam penelitian ini berupa eksperimen murni. Untuk pengukuran medan magnetik menggunakan sensor *fluxgate* berbasis PCBs dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

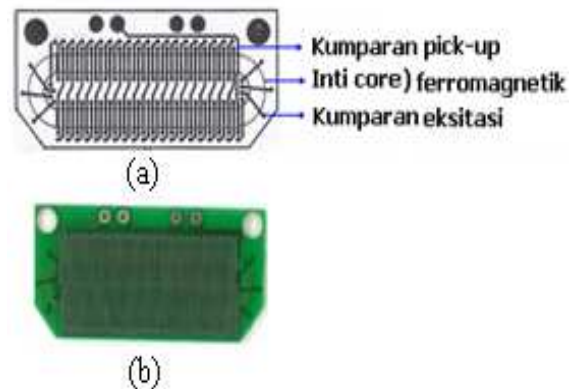
1. Pembuatan rangkaian analog sebagai rangkaian pengolah sinyal. Pengolah sinyal sensor terdiri dari beberapa bagian, yaitu differensiator, detektor, sinkronisasi fasa, integrator, dan

penguat akhir Blok diagram rangkaian pengolah sinyal ditunjukkan Gambar 5.



Gambar 5. Skema diagram pengolahan sinyal sensor *fluxgate*

2. Menggunakan elemen sensor seperti ditunjukkan Gambar 6. Jumlah lilitan dan nilai hambatan untuk kumparan eksitasi dan pick-up ditunjukkan Tabel 1. Elemen sensor ini mempunyai jumlah lilitan pick-up 48 lilitan, sedangkan sebagai inti ferromagnetik digunakan Vitrovac 6025X: $0,75 \times 0,025$ mm (Vacuumschmelze GMBH.6450 Hanau).



Gambar 6. Elemen sensor *fluxgate* PCB: desain elemen sensor (a), PCB sensor (b) (Janosek, M., 2009).

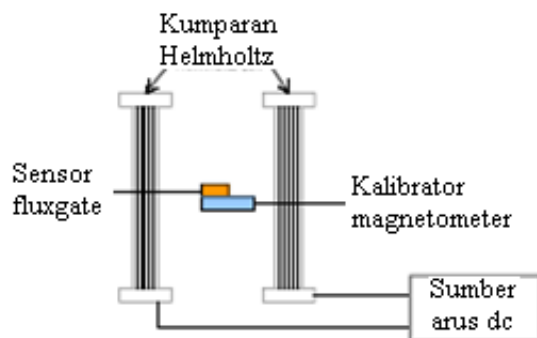
Tabel 1. Jumlah lilitan dan resistance elemen sensor PCB

PCB Coil	N (lilitan)	R (Ω)
Exc. Coil	46	0,6
Pick-up Coil	68	4.9

3. Melakukan pengukuran tegangan keluaran dengan memberikan sumber arus dc
4. Menghitung besar medan magnetik yang dihasilkan oleh solenoide sebagai sumber medan magnetik sensor.

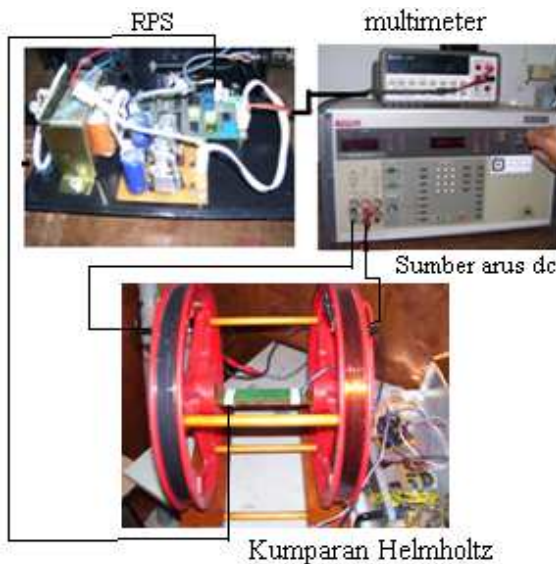
- Mencari nilai resolusi sensor, kesalahan mutlak dan relatif dengan pendekatan regresi polinomial.

Karakterisasi dilakukan di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi Fisika FMIPA ITB. Peralatan karakterisasi terdiri dari sumber arus dc, kumparan Helmholtz, osiloskop dan multimeter digital. Set-up karakterisasi ditunjukkan Gambar 7.



Gambar 7. Set-up karakterisasi sensor fluxgate dengan kumparan Helmholtz.

Foto lengkap peralatan karakterisasi ditunjukkan gambar 8.

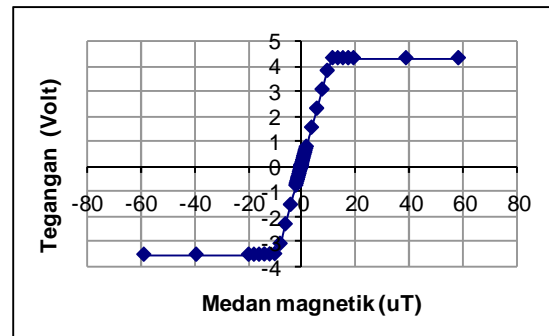


Gambar 8. Foto peralatan karakterisasi menggunakan kumparan Helmholtz.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui karakteristik sistem sensor magnetik PCBs dilakukan

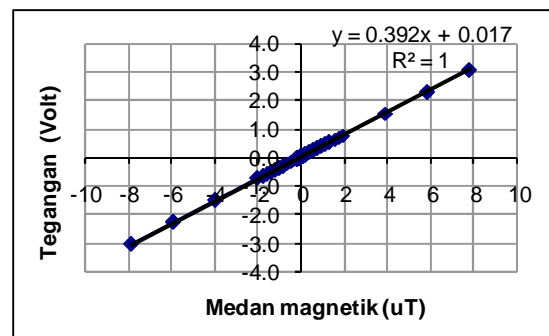
pengukuran dengan memberikan medan magnet yang berasal dari kumparan kalibrasi dengan cara memberikan arus pada kumparan kalibrasi. Dari data hasil pengukuran, diperoleh respon tegangan terhadap medan magnetik, seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. Kurva keluaran sensor PCBs pada daerah $\pm 59\mu\text{T}$

Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat terdapat bagian kurva yang linier dan konstan, kurva bersifat linier pada medan magnetik $\pm 12 \mu\text{T}$, setelah melewati daerah $\pm 12 \mu\text{T}$, kurva tampak konstan, tidak ada perubahan tegangan keluaran ketika arus diperbesar, pada daerah ini inti kumparan sensor telah mengalami saturasi.

Untuk menganalisis daerah linier pada kurva karakteristik keluaran sistem sensor diambil pendekatan linier untuk daerah kerja sensor. Kurva linier sistem sensor PCBs dapat dilihat pada Gambar 10, untuk daerah kerja $\pm 8\mu\text{T}$.



Gambar 10. Kurva linier sensor PCBs pada daerah kerja $\pm 12\mu\text{T}$.

Untuk mengetahui sensitivitas, kesalahan absolut dan kesalahan relatif maka keluaran daerah kerja sensor didekati dengan

persamaan linier. Dari gambar 8. terlihat bahwa keluaran sensor dengan pendekatan persamaan linier adalah:

$$y = 0,3921x - 0,0175 \dots\dots\dots(2)$$

dimana $y = V_{out}$, dan $x =$ medan magnet (**B**), maka persamaan (3) menjadi:

$$V_{ou} = y = 0,3921B - 0,0175 \dots\dots\dots(3)$$

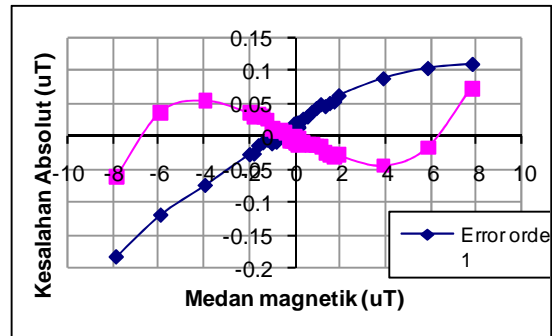
Dari gambar 8 tampak bahwa daerah linier keluaran sensor berada dalam daerah $\pm 8\mu T$, tingkat kesalahannya cukup kecil jika dilihat dari harga R^2 sama dengan 1. Persamaan (3) menggambarkan secara umum hubungan antara keluaran sensor dengan medan magnet yang dideteksi oleh sensor. Sensitivitas (S) adalah perbedaan rasio dari perubahan sinyal keluaran terhadap perubahan sinyal input. Dimana nilainya dapat diukur : $S = \frac{\Delta \text{keluaran}}{\Delta \text{masuk}}$, sehingga dari persamaan (3) diperoleh sensitivitas sensor $392.1 \text{ mV}/\mu T$.

Bila persamaan (3) diaplikasikan terhadap besar medan magnet dan dibandingkan dengan hasil yang terukur maka akan diperoleh kesalahan linieritas dari sistem sensor tersebut. Kesalahan nilai medan magnet yang dihasilkan sensor magnetik dinyatakan oleh selisih nilai medan magnetik keluaran (ΔB). Selisih ini menyatakan selisih antara respon medan magnet keluaran dengan fungsi linier. Respon kesalahan linieritas (kesalahan absolut) medan magnetik keluaran dari sensor magnetik ditunjukkan pada Gambar 11. Kesalahan absolut maksimum sensor untuk masing pendekatan persamaan regresi orde 1 dan orde 3 adalah 0.184 dan $0.0751 \mu T$.

Untuk merepresentasikan kesalahan fungsi sistem sensor dalam daerah kerjanya, digunakan besaran kesalahan relatif yaitu $\frac{\Delta \bar{B}}{\bar{B}_{Kerja}}$, dimana ΔB adalah

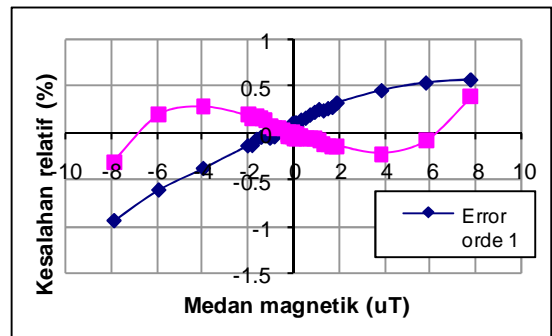
selisih antara medan magnetik yang diberikan pada kumparan kalibrasi dengan medan magnet keluaran hasil perhitungan

dari fungsi linier dan B_{kerja} adalah daerah kerja medan magnet yang dihasilkan sistem sensor.



Gambar 11. Kurva kesalahan absolut sensor PCBs pada daerah kerja $\pm 8\mu T$ dengan pendekatan linier.

Kesalahan relatif dari sistem sensor ditampilkan pada Gambar 12. Kesalahan relatif maksimum untuk pendekatan regresi orde 1 dan 3 masing-masing adalah $0,94\%$ pada medan magnet $0,38 \%$.



Gambar 12. Kurva kesalahan relatif sensor PCBs pada daerah kerja $\pm 8\mu T$ dengan pendekatan linier.

Berdasarkan Gambar 11 dan 12, terlihat bahwa kesalahan absolut dan kesalahan relatif cukup kecil. Kesalahan juga dapat diperkecil dengan menggunakan pendekatan persamaan polinomial yang lebih tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran yang diperoleh dari pengujian sensor magnetik fluxgate menggunakan elemen sensor model *printed circuit boards* (pcbs),

ternyata didapatkan kurva yang linear sebelum mencapai daerah saturasinya. Pada daerah saturasi keluaran sensor magnetik konstan walaupun medan magnetik diperbesar.

Beberapa hal yang telah berhasil dicapai dengan dalam penelitian ini antara lain:

1. Diperoleh kurva tegangan keluaran yang linear terhadap medan magnetik yang diukur sampai harga medan magnetik $\pm 8 \mu\text{T}$, dan untuk medan magnetik lebih besar dari $\pm 8 \mu\text{T}$ terdapat daerah saturasi.
2. Sensitivitas pada daerah kerja $\pm 8 \mu\text{T}$ untuk elemen sensor model *printed circuit boards* (PCBs) diperoleh $392.1 \text{ mV}/\mu\text{T}$. Dengan menggunakan pendekatan linieritas.
3. Kesalahan absolut maksimum sensor untuk masing pendekatan persamaan regresi orde 1 dan orde 3 adalah 0.184 dan $0.0751 \mu\text{T}$. Kesalahan relatif maksimum untuk pendekatan regresi orde 1 dan 3 masing-masing adalah 0.94% pada medan magnet 0.38% .

DAFTAR PUSTAKA

- B. Ando, A., Ascia, S. Baglio, A.R. Bulsara, J.D. Neff, V. In. (2008). **Towards an Optimal Readout of a Residence Times Difference (RTD) Fluxgate Magnetometer**. *J. Sensors and Actuators A*, 142, pp. 73-79.
- Belloy, E., S.E. Gilbert, O. Dezuari, M. sancho, M.A.M. Gijs. (2000). **A Hybrid Technology for Miniaturised Inductive Device Applications**. *J. Sensor and Actuator*, 85, pp 304-309.
- Caruso, M.J, Tamara B. (1998). **A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Sensor Magazine, Magnetic Sensor**. Tersedia di www.ssec.honeywell.com. 2007.
- Dezuari, O., Eric Belloy, Scott E., Gilbert, Martin A., M. Gijs. (1999). **New Hybrid Technology for Planar Fluxgate Sensor Fabrication**. *IEEE Transaction on Magnetics*, 35, pp. 2111-2117.
- Djamal, M. (2007). **Sensor Magnetik Fluxgate dan Aplikasinya untuk Pengukuran Kuat Arus**. *J. Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, III, pp. 51-69
- Djamal, M., et al. (2005). **Desain dan Pembuatan Sensor Medan Magnet Fluxgate Presisi Tiga Dimensi Menggunakan Metoda Posisi Pulsa**. Laporan Penelitian Hibah Bersaing XII.
- Fan, J., X.P Li, P. Ripka. (2006). **Low Power Orthogonal Sensor with Electroplated Ni80Fe20/Cu Wire**. *J. of Applied Physics*, 99, pp. 08B3111-08B3113.
- Göpel, W., et al. (1989). **Sensors, A Comprehensive Survey**. *Magnetic Sensors*, VCH Publishers Inc., Suite.
- Grueger, H., Gottfried-Gottfried, R. (2000). **“CMOS Integrated Two Axes Magnetic Field Sensors – Miniaturized Low Cost System With Large Temperature Range”**. Fraunhofer Institute for Microelectronic Circuits and Systems IMS, pp. 35-38.
- Janosek, M, P. Ripka. (2009). **PCB sensors in fluxgate magnetometer with controlled excitation**. *J. Sensors and Actuator A*, 151, pp. 141-144.
- Kubík, J. (2006). **PCB fluxgate sensors, Dissertation Thesis**. CTU in Prague, pp. 56–58.
- L. Shibin. (2006). **Studi on the low power consumption racetrack fluxgate**. *J. Sensor and Actuator*, 130, pp. 124-128.
- O'Donnell, T., A. Tipek, A. Connel, P. McCloskey, S.C. O'Mathuna. (2006).

- Planar Fluxgate Sensor Integrated in PCB.** J. Sensor and Actuator, 129, pp. 20-24.
- Park, H.S., Jun, S.H., Won Y.C., Dong S.S., Kyoung W.N., Sang O.C. (2004). **Development of Micro Fluxgate Sensors with Electroplated Magnetic Cores for Electronic Compas.** J. Sensor and Actuator, 114, pp 224-229.
- Ripka, P. (2001). **Mangetic Sensor and Magnetometers.** Artec House.
- Ripka, P. (2001). **Micro-fluxgate Sensor with Close Core.** J. Sensor and Actuator, A 9. pp. 65-69
- SELC. (2008). **Penuntun Layanan PCB Purwarupa.** SELC Sumber elektronik, Bandung
- Smith, C.H, Robert Scheneider. (1998). **A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Sensor Magnazine, Magnetic Sensor.** Tersedia di www.nve.com. 2007.
- Tipek, A., P. Ripk, Terence O, J. Kubik. (2004). **PCB Technology Used Fluxgate Sensor Construction.** J. Sensor and Actuator, 115, pp. 286-292.
- Wang, Y., Gang Liu, Yin X., Jianzhong Y., Yangchao T. (2006). **Fabrication ot the Three-dimensional Solenoid Type Micra Magnetic Sensor.** J. of Physics: Conference Series 34, pp 880-884.
- Zorlu, O., P. Kejik, R.S. Popovic. (2007). **An Orthogonal Fluxgate-type Magnetic Microsensor with Electroplated Permalloy Core.** J. Sensor and Actuator, 135, pp. 43-49
- Zorlu, O. (2008). **Orthogonal Fluxgate Type Mangetic Microsensors With Wide Linier Operation range,** Disertation, Ellectrical and electronic engineering, Midle East University, Turki.