

DESAIN ALAT HITUNG KECEPATAN SUDUT BERBASIS SENSOR MAGNETIK *FLUXGATE*

Yulkifli¹, Zul Anwar², Mitra Djamal³

¹*KK Fisika Instrumentasi Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang,
Jl. Prof. Dr. Hamka Padang - Sumatera Barat, e-mail: yulkifliamir@yahoo.com*

²*MAN Lubuk Alung Padang Pariaman*

³*KK-FTETI FMIPA Institut Teknologi Bandung*

ABSTRACT

This paper explains the design of angular velocity apparatus (Gyrometer) base on fluxgate sensor. The design of sensor elements consists of the double secondary coil (pick-up) and excitation coil with 10 layers, core layer is put into the isolative cavity. Fluxgate magnetic sensor works based on the principles of second harmonics, the intensity of magnetic fields proportional to the output sensor voltage. Based on data analysis on to sensor characterization it was obtained that the sensitivity $4.52 \text{ mV}/\mu\text{T}$, $\pm 20 \mu\text{T}$ in ranges. The maximum absolute error obtained from polynomial function approach in $0.53 \mu\text{T}$ and the relative error is 1.3% on magnetic fields $\sim 19 \mu\text{T}$. In this research the sensor can measure the frequency in the maximum absolute and relative error 0.68, 0.58, 0.17, 0.71 and 0.026%, 0.022%, 0.006%, 0.021%, whereas the disc magnet with the number of magnet 2, 4, 8 and 16 respectively.

Key words: angular velocity, fluxgate sensor, coil, second harmonic

PENDAHULUAN

Teknologi sensor memainkan peranan penting dalam pengembangan suatu produk baru dan sangat menentukan dalam membangun suatu sistem terutama sistem pengukuran yang berbasis sensor (Sergey, *et al.* 1999), diantara sensor tersebut adalah sensor kecepatan sudut. Kecepatan sudut dihitung berdasarkan jumlah putaran yang terjadi dari suatu piringan atau roda gigi. Untuk menentukan jumlah putaran dari roda gigi digunakan pencacah putaran. Secara umum pencacah putaran terdiri dari detektor, pulsa, pencacah dan display. Dari ketiga bagian ini yang paling menentukan adalah dektektor. Detektor adalah alat yang bisa membangkitkan pulsa ketika roda gigi berputar. Pulsa-pulsa yang dihasilkan harus sebanding dengan kecepatan putaran roda gigi dan sebanding juga dengan pulsa yang dihitung oleh pencacah setiap saat, akhirnya jumlah pulsa setiap saat dapat menggambarkan jumlah putaran (Djamil *et al.* 2005).

Beberapa sensor magnetik yang dapat digunakan untuk mendeteksi pulsa dari jumlah putaran roda gigi adalah *Tachometer* dan giroskop (*Gyrossopes*). Pengoperasian *tachometer* harus secara terus menerus dan ketelitian sangat ditentukan oleh keterampilan operator (Siregar, 2008). Sementara giroskop saat pengukuran posisi sensor harus kontak dengan objek yang diukur. Kelemahan sensor giroskop dapat ditanggulangi dengan sensor magnetik *fluxgate* karena memiliki kelebihan antara lain dapat dipergunakan nonkontak (*Non-destructive*) dengan objek yang berputar saat pengukuran dilakukan.

Kelebihan lain sensor *fluxgate* adalah ukurannya kecil, kebutuhan daya rendah, dan mempunyai kestabilan yang tinggi terhadap temperatur dengan koefisien sensitivitas temperatur $30 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ dan koefisien offset 0.1 nT (Ripka, 2001). Kelebihan sensor *fluxgate* ini menjadikannya sebagai sensor yang banyak dipergunakan dalam berbagai aplikasi antara lain: untuk penelitian bahan-bahan magnetik, geophysics, ruang angkasa, sistem navigasi (mendeteksi barang bawaan transpor-

tasi), pemetaan medan magnet bumi, kompas elektronik (Kaluza *et al.* 2003).

Mitra Djamal bersama tim riset dari KK-FTETI Jurusan Fisika FMIPA ITB selama ini telah mengembangkan sensor *fluxgate* beserta beberapa aplikasinya antara lain: pengukuran arus listrik DC (Djamal *et al.* 2000), penentuan posisi benda atau sensor jarak dalam orde kecil (Yulkifli *et al.* 2007a), pengukuran medan magnetik lemah (Djamal, *et al.* 2007) dan prototip sensor getaran (Djamal *et al.* 2008).

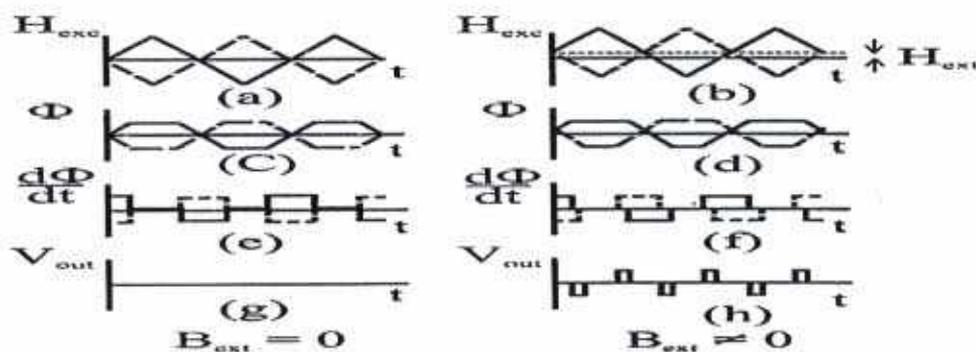
Tulisan ini kami mengembangkan aplikasi lain dari sensor *fluxgate* yaitu pembuatan prototip sensor kecepatan sudut berbasis sensor magnetik *fluxgate*. Paper ini ditulis dengan susunan sebagai berikut: bagian 2 menggambarkan kajian teori sensor *fluxgate*, sensor putaran dan rangkaian analog, bagian 3 menjelaskan metode eksperimen, bagian 4 menampilkan hasil eksperimen serta analisisnya, bagian 5 kesimpulan.

PRINSIP KERJA SENSOR FLUXGATE

Elemen sensor *fluxgate* terdiri dari inti (*core*) ferromagnetik, dua kumparan yaitu primer (eksitasi) dan sekunder (*pick-up*), dimana masing-masing kumparan memiliki jumlah lilitan tertentu. Kumparan primer berguna untuk membangkitkan medan eksitasi

(H_{exc}) yang akan digunakan sebagai medan referensi, medan magnet referensi bisa berbentuk sinyal bolak-balik sinusoida, segitiga atau persegi, yang di eksitasikan pada inti ferromagnetik (*core*), sedangkan kumparan sekunder berguna untuk menangkap perubahan flux magnetik yang dihasilkan oleh superposisi medan referensi dengan medan magnetik eksternal (H_{ext}) dalam bentuk tegangan gaya gerak listrik (ggl).

Prinsip kerja sensor *fluxgate* ketika mengukur perubahan medan magnet luar ditunjukkan pada Gambar 1. Prinsip kerja sensor magnetik *fluxgate*. a) Medan eksitasi tanpa medan magnet luar ($B_{ext}=0$) terlihat medan eksitasi memiliki fasa yang dan simetris sehingga tidak terdapat perbedaan; b) Medan eksitasi dengan medan magnet luar ($B_{ext} \neq 0$), terlihat medan eksitasi mengalami perubahan sebesar H_{ext} ; c) kurva magnetisasi dalam keadaan saturasi pada $B_{ext}=0$, terlihat tidak ada perubahan; d) kurva magnetisasi dalam keadaan saturasi pada $B_{ext} \neq 0$, terlihat kurva tidak simetris lagi; e) perubahan fluks terhadap waktu pada $B_{ext} = 0$; f) sehingga tegangan keluaran $V_{out}=0$; g) perubahan fluks terhadap waktu pada $B_{ext} \neq 0$; h) terlihat tegangan keluaran sensor $V_{out} \neq 0$. Informasi tegangan keluaran inilah yang memberikan informasi tentang besar medan magnet eksternal yang terukur.



Gambar 1. Prinsip Kerja Sensor *Fluxgate* (Grueger, H., 2000)

Untuk mengevaluasi tegangan keluran sensor digunakan fungsi transfer dengan teknik harmonisa kedua. Penurunan fungsi transfer dengan pendekatan polinomial dapat ditemukan dalam buku Gopel, W., 1989.

Tegangan harmonisa kedua (V_{out2h}) ditunjukkan oleh persamaan (1):

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

dimana B_0 adalah amplitudo medan magnetik, N jumlah lilitan pick-up, A luas penampang kumparan, ω kecepatan sudut medan eksitasi. Persamaan (1) dapat ditulis dalam bentuk sederhana menjadi persamaan (2)

$$V_{out} = h_{ext} K \sin 2\omega t \dots\dots\dots(2)$$

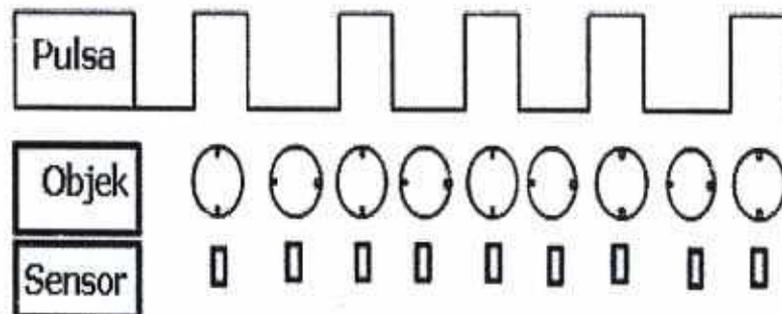
dengan K adalah konstan

$$K = -3 B_0 N A \omega a_3 h_{ref,max}^2 \dots\dots\dots(3)$$

Terlihat dengan jelas pada persamaan (2) bahwa tegangan keluaran harmonis kedua dari sensor sebanding dengan medan magnet eksternal (h_{ext}).

Prinsip Kerja Pengukuran Kecepatan Sudut

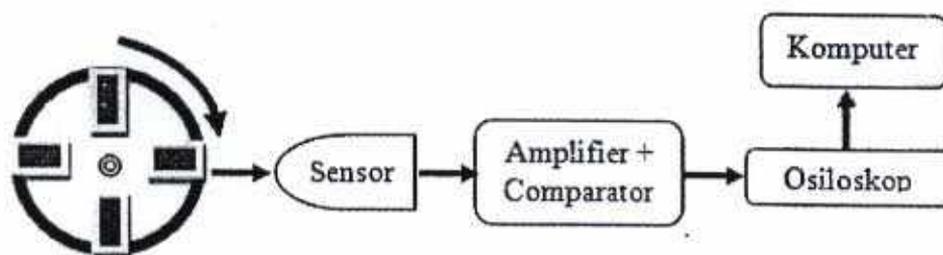
Untuk mendapatkan sinyal dari sensor, magnet permanen ditempatkan pada pinggir piringan dengan jumlah 2, 4, 8 dan 16 buah membentuk sudut 180° , 90° , 45° dan 22.5° . Sensor *fluxgate* akan mendeteksi putaran piringan ketika posisi benda bermuatan magnet menjauh dan mendekat terhadap probe sensor. Sensor akan mendeteksi sinyal medan magnet maksimum ketika magnet memiliki jarak terdekat dan minimum saat sebaliknya. Kondisi maksimum di tandai dengan *High* dan lainnya ditandai dengan *Low*, akibatnya akan timbul respon berupa pulsa-pulsa seperti ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Pulsa-pulsa yang dihasilkan dari sensor (Djamal *et al.* 2000)

Nilai *High-Low* akan dikirimkan ke mikrokontroler untuk di konversikan menjadi besaran kecepatan sudut. Agar memudahkan pencatatan hasil pengukuran ditampilkan pada

PC. Sistem pengukuran pulsa-pulsa dari perputaran piringan yang sudah di tempelkan benda bersifat magnetik ditunjukkan Gambar 3.



Gambar 3. Diagram blok sistem pengukuran kecepatan sudut berbasis sensor *fluxgate*

Untuk 2 magnet permanen ada dua putaran, sehingga sensor menghasilkan dua gelombang sinusoidal yang terjadi dalam satu periode gelombang dalam satu peredaran.

Karena ada dua periode dari sinyal dalam satu putaran maka kecepatan sudut adalah setengah kali frekuensi sinyal, seperti ditunjukkan persamaan (3).

$$\omega = \frac{f_{\text{signal}}}{2} \dots\dots\dots(3)$$

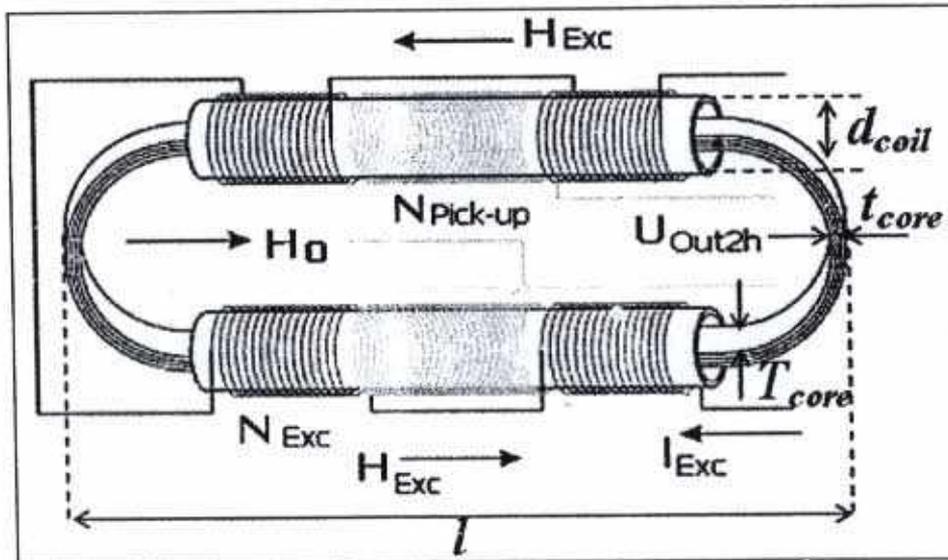
dimana ω , f_{signal} masing-masing adalah kecepatan sudut (put/sekon) dan frekuensi sinyal (Hz).

METODE PENELITIAN

Metode/rancangan yang dibuat dalam penelitian ini eksperimen murni. Desain

elemen sensor fluxgate yang digunakan adalah sensor *double pick-up* dengan *multicore* (Yulkifli, 2007b; 2008), seperti ditunjukkan Gambar 4. Elemen sensor yang digunakan terdiri dari dua bagian kumparan yaitu kumparan primer 4 x 60 lilitan dan kumparan sekunder 2 x 40 lilitan menggunakan kawat email Cu berdiameter 0.9 mm.

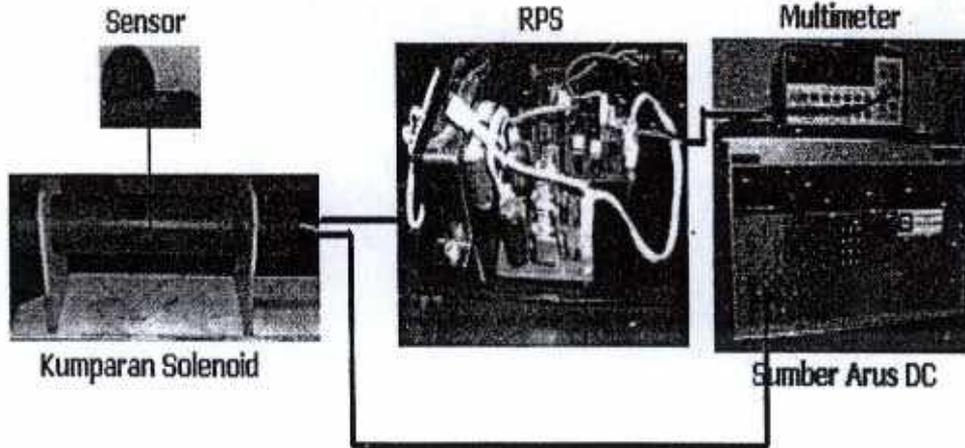
Kawat email Cu dililitkan pada tabung dengan diameter 0.23 cm. Sebagai inti ferromagnetik digunakan Vitrovac 6025X ([www. Vacuumschmelze.de](http://www.Vacuumschmelze.de)) dengan jumlah inti 10 lapisan, inti yang digunakan terbuat dari material $(\text{Co, Fe, Mo})_{73}(\text{Si,B})_{27}$.



Gambar 4. Desain elemen sensor fluxgate (Yulkifli, 2008)

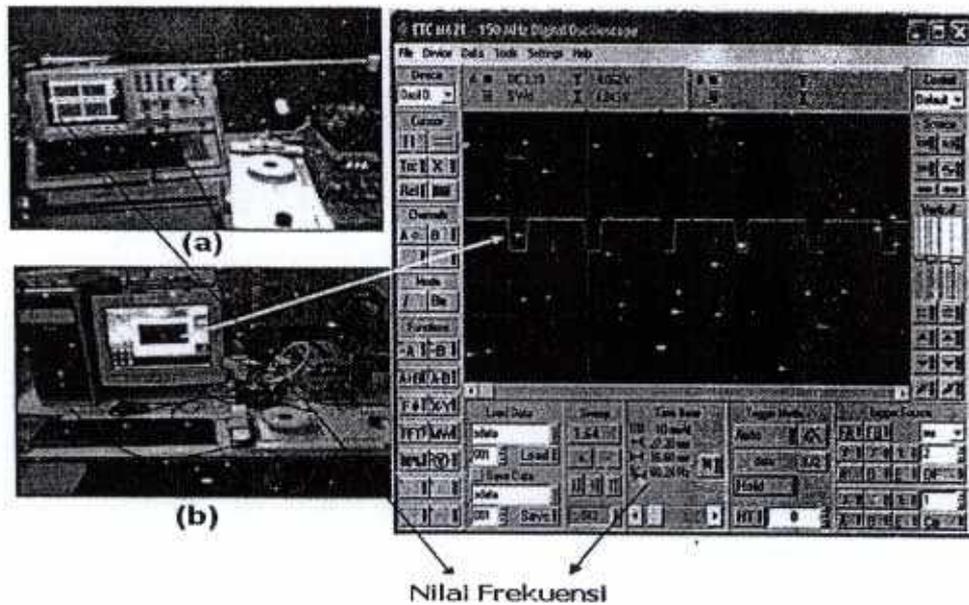
Sebelum sensor fluxgate digunakan untuk alat hitung kecepatan sudut maka dilakukan karakterisasi terlebih dahulu terhadap keluaran sensor. Karakterisasi sensor diperlukan untuk mengetahui seberapa besar respon sensor terhadap medan magnetik eksternal (*sensitivity*). Peralatan karakterisasi terdiri dari sumber arus DC (*Fluk*), Agilent 34401A 6½ Digit Multimeter, osiloskop dual

Channel dan solenoid sebagai sumber medan magnet eksternal. Untuk mengurangi pengaruh medan magnet bumi maka saat pengukuran arah sensor dibuat tegak lurus dengan arah medan magnet bumi sedangkan untuk mengurangi medan magnet lingkungan seperti medan elektromagnetik maka pengukuran dilakukan dalam ruang *Faraday*. *Setup* karakterisasi sensor ditunjukkan Gambar 5.



Gambar 5. *Set-up* karakterisasi respon sensor terhadap medan eksternal

Untuk menerapkan sensor *fluxgate* menjadi sensor kecepatan sudut maka dirancang mekanik berupa piringan dengan menempatkan bahan magnetik di pinggir piringan sebanyak 2 buah (sudut 180°), 4 buah (sudut 90°), 8 buah (sudut 45°) dan 16 buah (sudut 22.5°). *Set-up* pengukuran terhadap frekuensi putaran ditunjukkan Gambar 6.



Gambar 6. *Set-up* pengukuran frekuensi: menggunakan osiloskop analog (a), osiloskop yang dilengkapi display PC (b) (Anwar, 2009)

HASIL DAN PEMBAHASAN

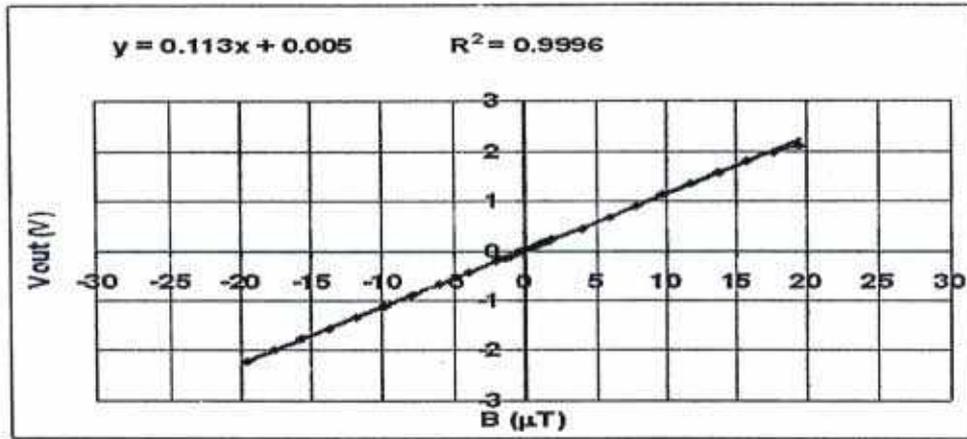
Karakteristik Sensor Fluxgate

Pengujian karakteristik sensor *fluxgate* dilakukan dengan cara memberikan medan

eksternal melalui sebuah kumparan berupa solenoid yang dialiri arus DC ± 50 mA (lihat gambar 5), nilai arus DC ini akan di konversi menjadi nilai medan magnetik melalui persamaan regresi yang telah di tentukan sebelumnya. Pencatatan terhadap tegangan

keluaran sensor dilakukan pada setiap perubahan medan yang terjadi di dalam solenoid.

Hubungan medan eksternal dengan tegangan keluaran sensor ditunjukkan Gambar 7.



Gambar 7. Kurva keluaran sensor pada daerah kerja $\pm 20 \mu\text{T}$

Terlihat pada Gambar 7 Respon tegangan keluaran sensor terhadap medan eksternal sangat linier pada rentang $\pm 20 \mu\text{T}$, rentang kerja ini disebut daerah kerja pengukuran. Untuk menganalisis kurva karakteristik keluaran sistem sensor diambil pendekatan linier menggunakan persamaan garis linier. Karena grafik sangat linier maka pendekatan linier har.ya menggunakan persamaan linier orde-1, seperti ditunjukkan oleh persamaan (4).

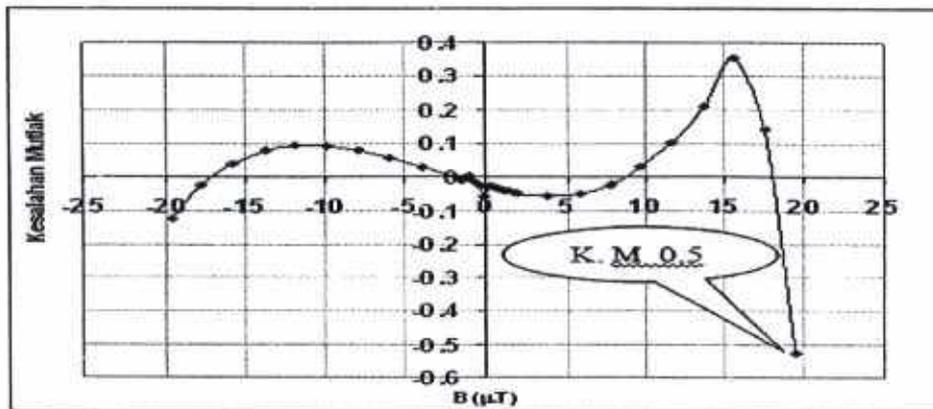
$$y = 0.113x + 0.005 \dots \dots \dots (4)$$

dimana $y = V_{\text{out}}$ (Volt), dan $x = B$ (μT), maka persamaan (4) dapat ditulis menjadi persamaan (5)

$$V_{\text{out}} = 0.113B + 0.005 \dots \dots \dots (5)$$

Dari persamaan (5) diperoleh sensitivitas sensor $0.113 \text{ V}/\mu\text{T}$ atau $113 \text{ mV}/\mu\text{T}$. Nilai sensitivitas sensor ini sudah melalui penguatan sebesar 25 kali. Jadi sensitivitas sensor tanpa penguatan adalah $\sim 4.52 \text{ mV}/\mu\text{T}$, artinya tiap $1 \mu\text{T}$ sensor dapat mengukur nilai sebesar 4.52 mV

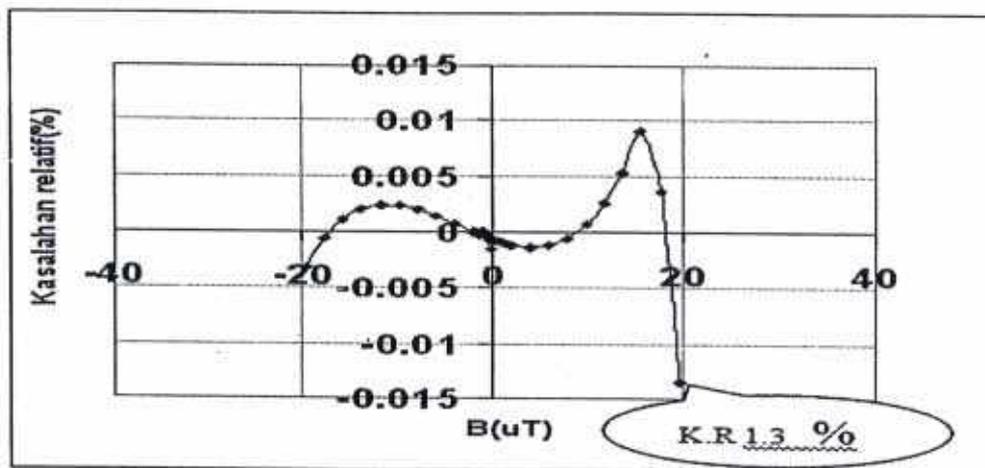
Untuk mengetahui seberapa besar kesalahan pengukuran maka dilakukan analisis terhadap kesalahan mutlak dan kesalahan relatif. Kesalahan mutlak sensor dapat diketahui dari tegangan keluaran sensor dikurangi dengan persamaan *trendline* regresi linear $\{ \Delta V = V_{\text{out}} - V(f(B)) \}$. Hasil analisis kesalahan mutlak ditunjukkan Gambar 8.



Gambar 8. Kesalahan mutlak sensor magnetik pada daerah $\pm 20 \mu\text{T}$

Berdasarkan Gambar 8 diperoleh kesalahan mutlak maksimum $0.53 \mu\text{T}$ pada medan magnet $18.99768 \mu\text{T}$. Kesalahan ini menunjukkan resolusi keluaran sensor terhadap medan magnetik eksternal. Untuk melihat seberapa persen penyimpangan pengukuran

maka dilakukan perhitungan kesalahan relatif. Kesalahan relatif dapat dihitung dari perbandingan kesalahan mutlak terhadap full scale dikali 100 %, full scale adalah $V_{out_{max}} - V_{out_{min}}$. Hasil analisis kesalahan relatif ditunjukkan gambar 9.



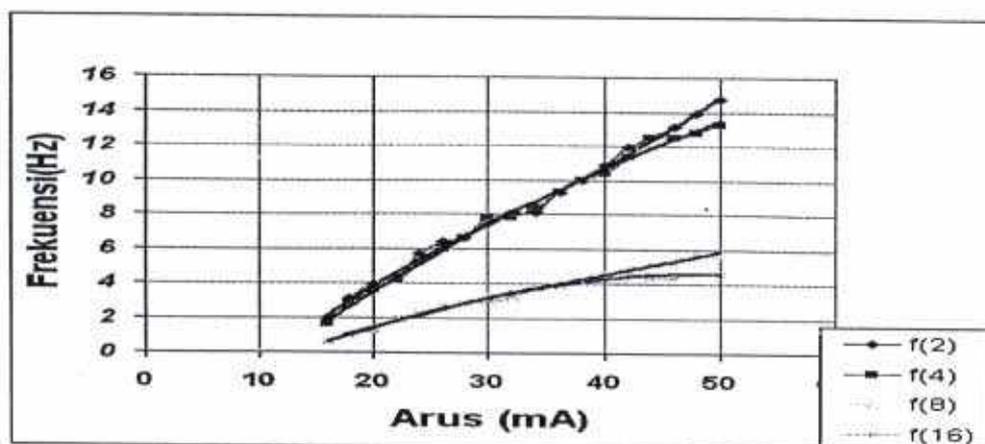
Gambar 9. Kesalahan relatif sensor magnetik pada daerah $\pm 20 \mu\text{T}$

Kesalahan relatif maksimum sensor adalah sebesar 1.3% pada medan magnet $18.9976 \mu\text{T}$.

Pengukuran Kecepatan Sudut Piringan Magnet

Berdasarkan hasil karakterisasi sensor terhadap pengaruh medan eksternal maka

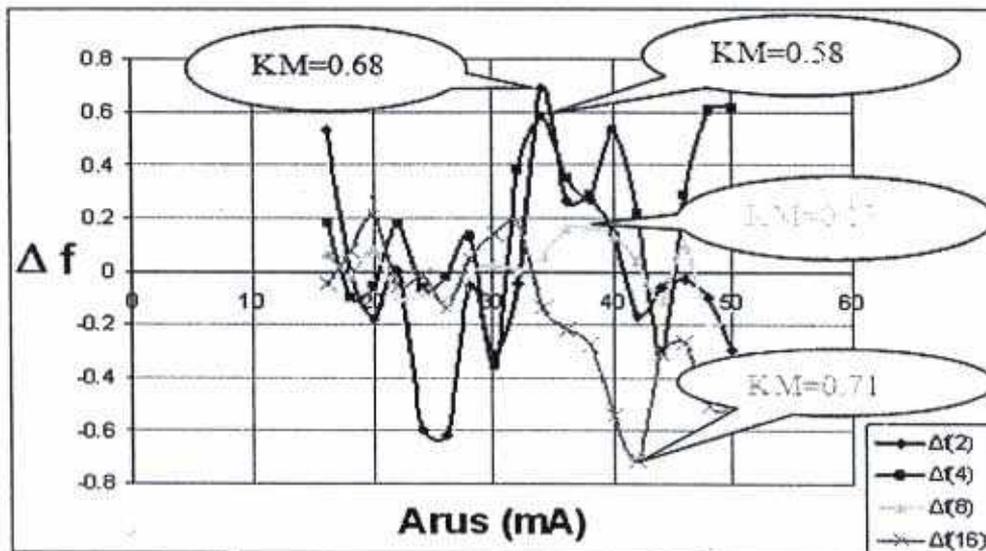
dilakukan pengukuran kecepatan sudut dengan *set-up* pengukuran seperti Gambar 6. Besar kecepatan sudut piringan magnet ditentukan oleh besar frekuensi putaran yang dihasilkan oleh piringan magnet. Hasil pengukuran ditunjukkan Gambar 10.



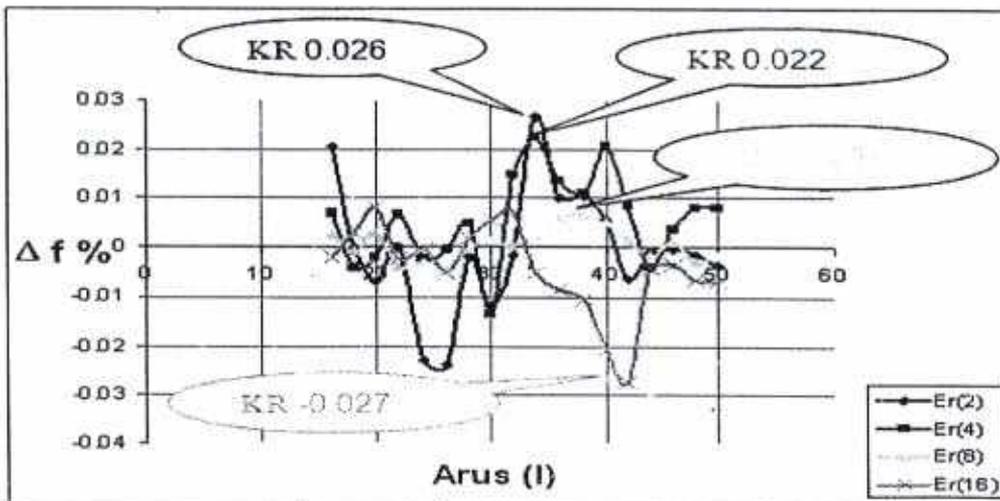
Gambar 10. Kurva frekuensi piringan magnet

Terlihat pada Gambar 10 bahwa respon frekuensi untuk jumlah benda magnet 2 dan 4 lebih tinggi dari pada 8 dan 16. Bentuk sinyal antara piringan dengan 2 magnet dan 16 ada perbedaan dari rapat sinyal, bahwa piringan 16 magnet mempunyai bentuk sinyal lebih rapat dari 2 magnet. Hal ini disebabkan oleh massa benda magnet yang ditempelkan pada piringan. Benda magnet dengan jumlah 16 mempunyai massa lebih berat dari massa 2

magnet, akibatnya untuk arus yang sama terjadi perubahan nilai frekuensi. Untuk mencari kesalahan absolut dan kesalahan relatif terhadap pengukuran kecepatan sudut maka dilakukan pendekatan melalui persamaan regresi dari masing-masing garis pada Gambar 10. Besar kesalahan mutlak frekuensi piringan magnet dengan jumlah magnet 2, 4, 8, dan 16 seperti pada Gambar 11 dan 12.



Gambar 11. Kurva kesalahan mutlak frekuensi piringan magnet



Gambar 12. Kurva kesalahan relatif frekuensi piringan magnet

osiloskop dengan display PC sensor memiliki nilai $< 5\%$ artinya kemampuan sensor cukup bagus. Dengan mengetahui frekuensi putaran piringan magnet kecepatan sudut piringan magnet dapat ditentukan dengan mengalikan 2π pada frekuensi putaran piringan magnet.

KESIMPULAN

Dari pengukuran dan analisa data yang dilakukan dapat diambil kesimpulan, antara lain adalah:

1. Sensor *fluxgate* dapat mengukur perubahan medan magnet disekitarnya.
2. Perubahan medan magnet terhadap waktu akan menghasilkan tegangan, tegangan keluaran dari sensor akibat benda magnet yang dipasang pada piringan berputar berbentuk sinyal persegi, periode sinyal persegi dapat digunakan untuk menghitung frekuensi dan kecepatan sudut.
3. Berdasarkan pengukuran frekuensi dari osiloskop + komputer menghasilkan sinyal yang berbeda antara piringan dengan 16 magnet dan 2 magnet, piringan dengan 16 magnet sinyalnya lebih rapat dari piringan 2 magnet.
4. Adanya sedikit perbedaan frekuensi antara 2, 4 magnet dan 8, 16 magnet akibat sinyal yang kurang persegi akibat pengaruh medan magnet luar.
5. Pengembangan aplikasi sensor fluxgate sebagai alat hitung kecepatan dapat digunakan untuk media pembelajaran sebagai alat bantu penyampaian konsep tentang mekanika gerak rotasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai dari dana Hibah Bersaing DIKTI N0. 080/H35.2/PG/HB/2009

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Anwar Z. 2009. Pembuatan Alat Ukur Kecepatan Sudut Berbasis Sensor Fluxgate Sebagai Media Pembelajaran Fisika, *Tesis S2*. ITB Bandung
- Djamal M, Rahmondia NS. 2005. Rotation Speed Measurement Using GMR Magnetic Sensor, *Proc. ICICI*

- Bandung, Indonesia. Institut Teknologi Bandung.
- Djamal M, Rahmondia N, Setiadi. 2006. Pengukuran Medan Magnet Lemah Menggunakan Sensor Magnetik Fluxgate dengan Satu Koil Pick-up. *Jurnal Proceedings ITB*.
- Djamal M, Rahmondia N, Setiadi. 2008 Yulkifli: Preliminary Study of Vibration Sensor Based on fluxgate Magnetic Sensor. *Proc. ICMNS Bandung*.
- Gopel W. 1989. *Sensor a Comprehensive Survey Volume 5 Magnetic Sensor*. VCH, Weinheim.
- 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.
- Kaluza F, Angelika G, Heinrich G. 2003. New and Future Applications Flxgate. *J. Sensors, Sensor and Actuator*, 106, pp. 48-51.
- Sergey Y, Nikolay V, Nester O. Shpak. 1999. *Novel Rotation Sped Measurement Concept for ABS Appropriated for Microsystem Creation, Advanced Microsystems for Automotive Applications 99 (Ed. By Detlef E. Ricken and Wolfgang Gessner)*, Springer, pp.215-223
- Siregar S. 2008. Perancangan alat ukur RPM turbin. *Prosiding SIBF*, Institut Teknologi Bandung
- Ripka P. 2001. *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Boston, MA, London: Artech,
- Yulkifli, Rahmondia NS, Suyatno, Djamal M. 2007a. Designing and Making of Fluxgate Sensor with Multi-Core Structure for Measuring of Proximity. *Proc. CSSI*
- Yulkifli, Rahmondia NS, Djamal M, Khairurrijal, Deddy K. 2007b. The Influences of Ferromagnetic cores, Pick-up Coil Winding Numbers, and Environmental Temperature to the Output Signal of a Fluxgate Magnetic Sensor, APS 2007. *Jurnal IJP*. Vol 18. No. 3 2007.

Yulkifli, Rahmondia NS, Zul A, Djamel M,
Khairurrijal. 2008. Desain Elemen
Sensor Fluxgate Menggunakan

Kumparan Sekunder Ganda Untuk
Meningkatkan Resolusi Sensor.
Prosiding SNF HFI.