

---

## SENSOR MAGNETIK FLUXGATE DAN APLIKASINYA UNTUK MENGUKUR KUAT ARUS

Mitra Djamal

Kelompok Keilmuan Fisika Teoretik Energi Tinggi dan Instrumentasi,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung  
Jalan Ganesa 10, Bandung 40132  
E-mail: mitra@fi.itb.ac.id

### ABSTRAK

**SENSOR MAGNETIK FLUXGATE DAN APLIKASINYA UNTUK MENGUKUR KUAT ARUS.** Secara konvensional kuat arus dapat diukur dengan menghubungkan alat secara seri pada rangkaian. Cara ini memiliki kelemahan karena mengganggu aliran arus yang akan diukur. Dengan menggunakan sensor magnetik, arus dapat diukur tanpa harus mengganggu aliran arus, karena yang diukur hanya kuat medan magnet yang dihasilkan oleh arus yang akan diukur. Dalam tulisan ini akan ditunjukkan penggunaan sensor magnetik *fluxgate* untuk mengukur kuat arus. Dari hasil penelitian terlihat bahwa sensor magnetik *fluxgate* yang digunakan dapat mengukur kuat arus dalam daerah pengukuran yang cukup lebar dan dengan ketelitian  $\leq 2\%$ .

**Kata kunci:** arus, sensor arus, sensor magnetik *fluxgate*.

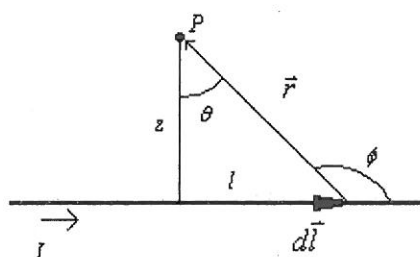
### ABSTRACT

**FLUXGATE MAGNETIC SENSOR AND ITS APPLICATION FOR CURRENT MEASUREMENT.** Conventionally electric current can be measured by connecting the instrument serially on the circuit. This method has disadvantage because it disturbs the measured current flow. By using a magnetic sensor, current can be measured without disturbing the current flow, because it just measures the magnetic field of the measured current. This paper shows the use of fluxgate magnetic sensor for current measurement. It is shown that the sensor can measure widely range of current with resolution  $\leq 2\%$ .

**Keywords:** current, current sensor, magnetic *fluxgate* sensor.

### 1. PENDAHULUAN

Ada cukup banyak metode yang dapat digunakan untuk mengukur kuat arus listrik, beberapa diantaranya adalah metode *shunt* resistif, transformator arus, dan sensor magnetik. Metode *shunt* resistif bekerja berdasarkan hukum Ohm yang menghasilkan suatu tegangan yang sebanding dengan arus yang melalui resistor *shunt*, yaitu resistor yang dihubungkan secara seri dengan beban yang hendak diukur arusnya. Cara ini menawarkan ketelitian yang bagus dan *offset* yang rendah, tetapi tanpa isolasi elektris. Selain itu *drift* termalnya tinggi. Hal ini memungkinkan terjadinya *transient spikes* yang dapat merusak sensor dan berpotensi menyebabkan peralatan elektronik mengalami kelebihan beban (1).



Gambar 1. Medan magnet akibat arus tetap yang mengalir pada sepotong kawat lurus panjang.

dengan  $r$  adalah jarak dari pangkal elemen panjang kawat ke titik P;  $\hat{r}$  adalah vektor satuan (jadi, besarnya adalah 1). Perhatikan bahwa arah vektor satuan ini adalah dari pangkal elemen kawat ke titik P; dan  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang vakum ( $4\pi \times 10^{-7}$  weber/A.m).

Karena  $|d\vec{l} \times \hat{r}| = dl \sin \theta$ , maka

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \sin \theta}{r^2} \quad (2)$$

sehingga

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \int dl \sin \theta \quad (3)$$

dengan  $\theta$  adalah sudut antara  $\hat{r}$  dan  $d\vec{l}$ .

Medan magnet di titik yang berjarak  $z$  di atas sepotong kawat lurus berarus listrik tetap  $I$  dapat dihitung sebagai berikut (lihat gambar 1):

Dari persamaan (3)  $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \int dl \sin \phi$ , tetapi  $\phi = 90 + \theta$ , maka  $dl \sin \phi = dl \cos \theta$

atau  $\sin \phi = \cos \theta$ . Dari  $l = z \tan \theta$ ,  $dl = \frac{z}{\cos^2 \theta} d\theta$ , dan  $\cos \theta = \frac{z}{r}$ , maka  $\frac{1}{r^2} = \frac{\cos^2 \theta}{z^2}$ .

Dengan mensubstitusi  $dl, r^2$  dan  $\sin \phi$  ke persamaan (3) diperoleh

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\cos \theta}{z} d\theta \quad (4)$$

dan kemudian

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi z} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \quad (5)$$

dengan  $a$ ,  $b$  dan  $c$  adalah tetapan.

Untuk mengukur rapat flux di dalam inti, ada baiknya menormalisasi kuat medan magnet internal menjadi  $H_0^*$ , dalam bentuk

$$H_0^* = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{B_{sat} [1 + D(\mu_{rn} - 1)]}{\mu_{rn} \mu_0} \quad (10)$$

Di sini kuat medan magnet dalam inti menjadi

$$h_{int} = \frac{H_{int}}{H_0^*} = h_{ext} + h_{ref \max} \sin \omega t \quad (11)$$

Kurva magnetisasi akan diaproksimasi dengan pendekatan polinomial ternormalisasi orde 3 (5)

$$b(h) = a_1 h - a_3 h^3 \quad (12)$$

$b$  adalah rapat fluks ternormalisasi

$$b = B/B_0 \quad (13)$$

dengan

$$B_0 = 2B_{sat} / \pi \quad (14)$$

Pendekatan polinomial ini digunakan untuk kedua cabang positif dan negatif kurva magnetisasi. Rapat fluks ternormalisasi adalah

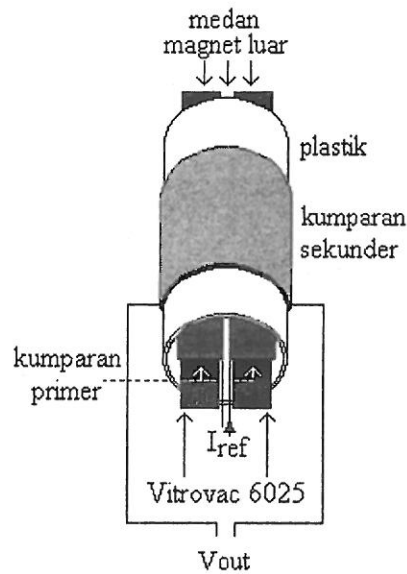
$$b = a_1 h_{ext} + a_1 h_{ref \max} \sin \omega t - a_3 (h_{ext} + h_{ref \max} \sin \omega t)^3 \quad (15)$$

atau

$$\begin{aligned} b = & a_1 h_{ext} - a_3 h_{ext}^3 - \frac{3}{2} a_3 h_{ext} \cdot h_{ref \max}^2 \\ & + \left( a_1 h_{ref \max} - 3a_3 h_{ext}^2 h_{ref \max} - \frac{3}{4} a_3 h_{ref \max}^3 \right) \sin \omega t - \\ & - \frac{3}{2} a_3 h_{ext} h_{ref \max}^2 \cos 2\omega t + \frac{1}{4} a_3 h_{ref \max}^3 \sin 3\omega t \end{aligned} \quad (16)$$

Dari persamaan (16) dapat diketahui bahwa komponen harmonisasi ke dua sebanding dengan kuat medan magnet luar.

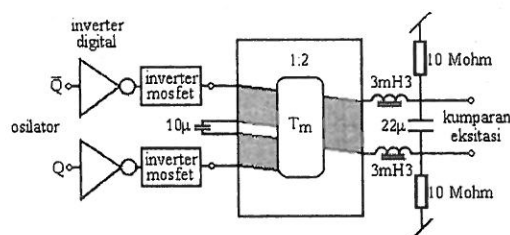
Tegangan keluaran  $V_{out}$  dari kumparan sekunder juga sesuai dengan turunan waktu rapat flux di dalam inti



Gambar 3. Desain probe sensor magnetik *fluxgate* yang dibuat.

Kumparan primer dialiri arus eksitasi yang dikendalikan oleh sebuah osilator frekuensi yang frekuensinya ditentukan oleh frekuensi kristal yang digunakan. Frekuensi yang sering digunakan pada sensor magnetik *fluxgate* adalah 1-20 kHz [1], di sini digunakan osilator dengan frekuensi 4 kHz. Dengan frekuensi sebesar ini hasil yang diperoleh cukup optimal. Frekuensi yang digunakan untuk kumparan eksitasi adalah setengah dari frekuensi osilator yaitu 2kHz ( $f_0$ ), dan untuk detektor fasa digunakan frekuensi 4kHz ( $2f_0$ ). Agar frekuensi osilator ini dapat menggerakkan kumparan eksitasi sensor, maka sinyal eksitasi terlebih dahulu dilewatkan pada rangkaian penyangga atau *buffer* [11], sinyal yang dihasilkan oleh rangkaian penyangga ini berbentuk segitiga, rangkaian ini ditunjukkan pada gambar 4. Keluaran dari rangkaian penyangga ini akan menggerakkan kumparan eksitasi pada sensor.

Ketika kumparan eksitasi dialiri arus eksitasi bolak-balik, akan timbul medan eksitasi. Medan ini juga akan berarah bolak-balik sesuai dengan arus yang mengendalikannya. Pada



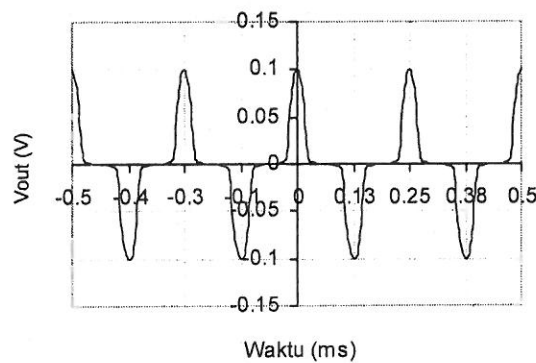
Gambar 4. Rangkaian penghasil sinyal segitiga.

sensor dapat mengukur medan magnet yang sangat lemah. Untuk mengatasi gangguan sinyal frekuensi tinggi, pada sensor dipasang filter lolos rendah orde dua.

Metode pengukuran ini masih dapat digunakan untuk mengukur medan magnet AC, asalkan frekuensinya masih jauh lebih kecil dari frekuensi sinyal referensi.

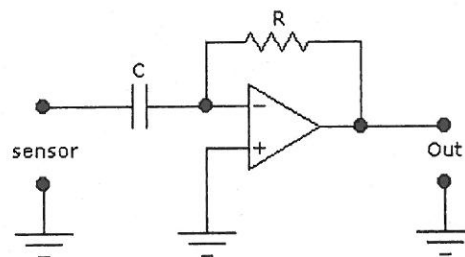
#### 4. PENGOLAH SINYAL

Pengolah sinyal terdiri dari beberapa bagian, yaitu: diferensiator, detektor sinkronisasi fasa, integrator, penguat akhir, dan tampilan.



Gambar 6. Sinyal keluaran *probe* sensor.

Pulsa dari *probe* sensor yang masih berorde millivolt AC terlebih dahulu dikuatkan dan didiferensialkan dengan pendiferensial penguat operasional. Ini dapat dilihat pada gambar 7.



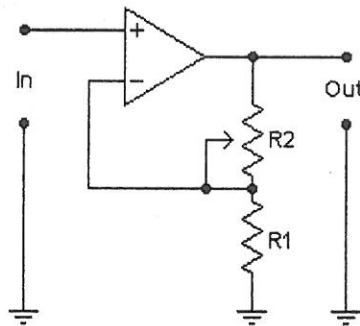
Gambar 7. Pendiferensial penguat operasional.

Tegangan keluaran pada diferensiator  $V_{out\ diff}$  ini sesuai dengan persamaan (22).

$$V_{out\ diff} = RC \frac{dV_{in\ diff}}{dt} \quad (22)$$

$$V_{out\ int} = \frac{1}{RC} \int V_{in\ int} dt \quad (17)$$

Tegangan keluaran dari integrator ini dikuatkan lagi dengan penguat operasional tidak membalik (*non inverting op-amp*) (3), seperti ditunjukkan pada gambar 10.



Gambar 10. Penguat akhir.

Tegangan keluaran penguat ini adalah:

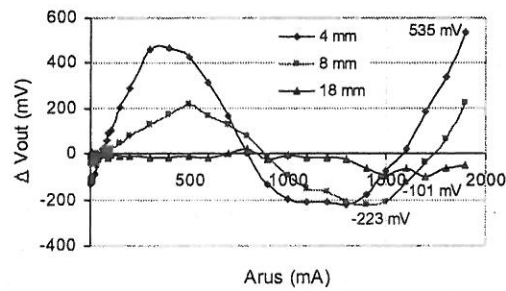
$$V_{out\ amp} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in\ amp} \quad (18)$$

Dengan menggunakan  $R_1 = 2,2\text{ k}\Omega$  dan  $R_2$  suatu resistor variabel  $10\text{ k}\Omega$ , maka diperoleh penguatan maksimum pada penguat ini yaitu 5,55 kali. Setelah ditambah penguatan sebelumnya, keluaran sensor ini dapat mencapai  $\pm V_{cc}$  penguat operasional.

## 5. HASIL UJI COBA DAN PEMBAHASAN

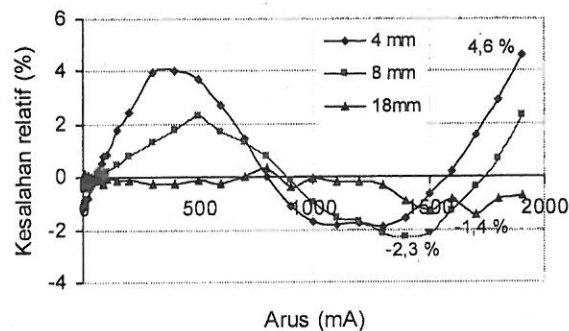
Setelah semua bagian-bagian dari sensor dibuat, maka dilakukan pengujian terhadap alat yang dibuat. Hasil pengujian alat sebagai sensor medan magnet lemah untuk satu dan tiga dimensi dapat dilihat pada (3, 4). Untuk uji coba dilakukan penentuan arus yang mengalir pada kawat lurus dengan mendeteksi medan magnet yang dipancarkan. Sebagai kawat digunakan jalur pada PCB yang panjangnya 20 cm. Sensor medan magnet diletakkan saling memotong tegak lurus di atas jalur tersebut.

Pada jalur PCB dilewatkan arus mulai dari 0,1 mA, sampai 1900 mA dengan interval tertentu. Pengukuran dilakukan dengan jarak sensor yang berbeda-beda.



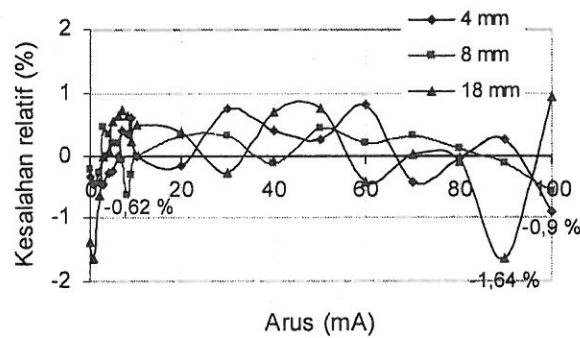
Gambar 13. Kesalahan absolut sensor.

Dari gambar di atas tampak jelas bahwa kesalahan yang paling besar terdapat pada pengukuran dengan jarak sensor 4 mm, dan kesalahan terkecil terdapat pada pengukuran dengan jarak sensor 18 mm karena pada jarak yang terlalu dekat, setiap bagian sensor mempunyai jarak yang bervariasi terhadap kawat berarus, sehingga harga yang terukur cukup bervariasi. Sedangkan pada pengukuran dengan jarak terjauh, sensor bersifat sebagai sebuah titik yang mendeteksi arus dengan harga yang relatif sama pada setiap bagian. Dari kurva di atas dapat diketahui bahwa kesalahan absolut terbesar adalah 535 mV untuk jarak 4 mm, 223 mV untuk jarak 8 mm, dan 101 mV untuk jarak 18 mm. Ini sesuai dengan alasan-alasan yang telah dikemukakan di atas. Kesalahan relatif sensor dapat dilihat pada gambar 14.



Gambar 14. Kesalahan relatif sensor.

Dari kurva di atas dapat diketahui kesalahan relatif maksimum dari masing-masing pengukuran, yaitu 4,6 % untuk jarak 4 mm, 2,3 % untuk jarak 8 mm, dan 1,4 % untuk jarak 18 mm.



Gambar 17. Kesalahan relatif (0-100 mA).

Kesalahan relatif pada daerah pengukuran ini cukup kecil dengan kesalahan maksimum 1,64 % yang terjadi pada pengukuran dengan jarak 18 mm. Sedangkan kesalahan relatif untuk jarak pengukuran yang lain lebih kecil lagi, yaitu 0,9 % untuk jarak 4 mm dan 0,62 % untuk jarak 8 mm.

## 6. KESIMPULAN

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa sensor magnetik *fluxgate* dapat digunakan untuk mengukur kuat arus yang mengalir pada suatu kawat.

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, terlihat bahwa keluaran sensor bersifat linier dan kuadratis. Pendekatan kuadratis diaplikasikan untuk daerah pengukuran arus 0-1900 mA, dan pendekatan linier dilakukan untuk daerah pengukuran arus 0-100 mA. Dari kedua cara pendekatan tersebut diperoleh kesalahan maksimum yang relatif kecil, untuk daerah 0-1900 mA kesalahan maksimumnya adalah 4,6 % untuk jarak pengukuran 4 mm, 2,3 % untuk jarak pengukuran 8 mm, dan 1,4 % untuk jarak pengukuran 18 mm.

Dari uraian di atas dapat diketahui pula bahwa hasil pengukuran akan banyak mengandung kesalahan untuk pengukuran arus yang besar jika sensor terlalu dekat pada kawat berarus. Sebaiknya diberi jarak yang ideal agar pengukuran tidak mengandung banyak kesalahan.

Untuk daerah pengukuran arus yang kecil kesalahan dapat lebih dihindari, hal ini terbukti ketika dilakukan pengukuran pada daerah arus 0-100 mA, kesalahan maksimum pengukuran pada daerah ini adalah 1,64 % (18 mm), 0,62 % (8 mm) dan 0,9 % (4 mm).



- 
12. Grueger H, Gottfried-Gottfried R. CMOS Integrated Two Axes Magnetic Field Sensors – Miniaturized Low Cost System With Large Temperature Range”, Fraunhofer Institute for Microelectronic Circuits and Systems IMS (2000), p. 35-38.
  13. Bish A, Fraser BJ dkk. Magnetic Field Measurements in Space: The New Mag Magnetometer, Department of Physics University of Newcastle, Callaghan, 2000
  14. Sutrisno. Elektronika Teori dan Penerapannya Jilid 1, Bandung: Penerbit ITB 1986
  15. Sutrisno. Elektronika Teori dan Penerapannya *Jilid 2*, Bandung: Penerbit ITB 1986
  16. Djamal M, Setiadi RN. Pengukuran Medan Magnet Lemah Menggunakan Sensor Magnetik Fluxgate dengan Satu Koil *Pick-Up*, PROC ITB Sains & Tek 2006 Vol 38A, No 2:99-115
  17. Djamal M, Setiadi RN. Design and Development of Three-Dimensional Fluxgate Magnetometer. Proc. of ICMNS 2006 Nov:29-30

### Indeks Penulis

1. Dudung A.R. 41
2. Duyeh Setiawan 29
3. E. Susilawati 17
4. Erizal 1
5. Hendriyanto 1
6. Henky P.Rahardjo 41
7. Kustiwa 17
8. Mitra Djamal 51
9. Nanny Kartini Oekar 17
10. Swarsono R.Tamat 1
11. V.I.S Wardhani 41

---

### Indeks Subjek

1.  $^{58}\text{Co}$  29
2.  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  – etambutol 17
3. Arus 51
4. Dimetil Gliksim 31
5. Efektivitas Penukar Kalor 41
6. *Fluxgate* 51
7. Hidrogel 1
8. Imobilisasi 1
9. Iradiasi Gamma 1
10. Karakterisasi fisika-kimia 17
11. Karakterisasi Mikrobiologi 17
12. Karakteristik Penukar Kalor 41
13. Kromatografi 17
14. *Mycobacterium Tuberculosis* 17
15. Pelepasan Kembali 41
16. Pengotor Penukar Kalor 41
17. Penukar Kalor 41
18. Polivinil Piroolidon (PVP) 1
19. Propanolol HCl 1
20. Radio Perunut 29
21. Radiofarmaka 17
22. Radioisotop 29
23. Radiokimia 29
24. Sensor Arus 51
25. Sensor Magnetik 51
26. Senyawa Bertanda 29
27. Spektro Fotometri 29
28. *Swelling* hidrogel 1
29. Tuberkolosis 17