Akreditasi LIPI Nomor : 536/D/2007
Tanggal 26 Juni 2007

SENSOR MAGNETIK *FLUXGATE* KARAKTERISTIK DAN APLIKASINYA

Mitra Djamal[1], Suyatno[2], Yulkifli[3] dan Rahmondia N. Setiadi[4]

[1]KK FTETI, FMIPA-ITB
Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132
[2]Jurusan Fisika, FMIPA-ITS
Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya 60111
[3]Departement Fisika, FMIPA-Universitas Padang
Jl. Prof. Dr. Hamka Air Tawar, Padang
[4]Program Pasca Sarjana Prodi Fisika, FMIPA-ITB
Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

ABSTRAK

SENSOR MAGNETIK *FLUXGATE*, KARAKTERISTIK DAN APLIKASINYA. Telah dilakukan pembuatan dan pengembangan sensor magnetik *fluxgate* berdasarkan prinsip harmonisa ke dua. Sensor ini mempunyai inti yang terbuat dari bahan khusus *vitrovac 6025,* dan dua buah *probe*, yakni *probe* untuk kumparan primer (pengeksitasi atau *excitation coil*) dan *probe* untuk kumparan sekunder (penangkap atau *pick-up coil*). Sensor ini memiliki sensitivitas yang meningkat dengan meningkatnya jumlah lilitan kumparan sekunder dan/atau meningkatnya suhu operasi. Dalam makalah ini akan ditunjukkan beberapa aplikasi dari sensor magnetik *fluxgate*, misalnya untuk mengukur kuat medan magnet lemah, kuat arus dan jarak. Pada pengukuran kuat medan magnet lemah dilakukan pengukuran pada daerah -20 μT sampai dengan +20 μT dan diperoleh ketelitian hingga 20 nT dengan sensitivitas 533,94 mV/ μT dan kesalahan relatif 2,76%. Untuk pengukuran jarak, sensor ini mampu melakukan pengukuran perubahan jarak hingga 5 mm dengan resolusi 10 μm dan kesalahan relatif sebesar 3,4%. Sedangkan untuk pengukuran kuat arus, *fluxgate* magnetometer mampu melakukan pengukuran arus (0 mA hingga 1900 mA) dengan kesalahan relatif < 4,6%

Kata kunci : Sensor magnetik, *Fluxgate*, Harmonisa ke dua, Sensor arus, Sensor posisi

ABSTRACT

FLUXGATE MAGNETIC SENSOR, CHARACTERISTIC AND ITS APPLICATION. A fluxgate magnetic sensor based on second harmonic principle has been made and developed. The sensor has core made of vitrovac 6025, two probes namely probe for primary or excitation coil and secondary or pick up coil. Sensor sensitivity increases by increasing number of secondary coils and/or increasing operational temperature. In this paper, some applications of fluxgate magnetic sensor will be shown, e.g. measuring low magnetic field, distance, and electric current. Measuring low magnetic field in the range of -20 μT until +20 μT produces 20 nT resolution, 533.94 mV/ μT sensitivity, and 2.76% relative error. The sensor can measure distance until 5 mm with 10 μm resolution, and 3.4% relative error. For current measurement, the developed sensor is used for measuring 0 until 1900 mA with relative error < 4.6%.

Key words : Magnetic sensor, Fluxgate, 2nd harmonics, Current sensor, Distance sensor

PENDAHULUAN

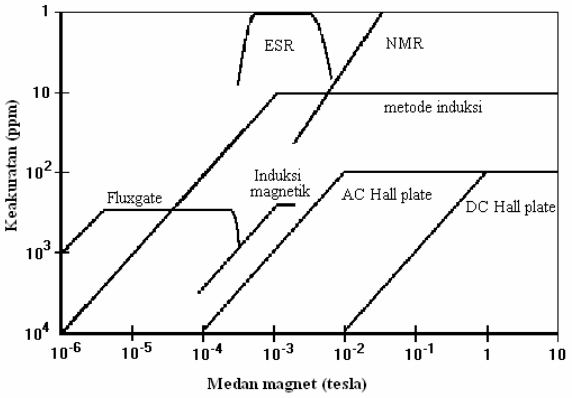
Pengukuran merupakan bagian terpenting untuk menganalisis sebuah kinerja alat ukur. Penggunaan alat ukur dengan kemampuan pengukuran yang akurat, resolusi tinggi, serta mudah dan aman dalam pemakaiannya sangatlah penting. Salah komponen penting dari semua itu adalah sensor yang digunakan untuk mendeteksi. Pengukuran medan magnet lemah sangat diperlukan dalam berbagai bidang, seperti : geofisika, geologi, kedokteran, oseanografi, dan ekspedisi luar angkasa. Pemetaan medan magnet merupakan hasil dari penggambaran medan magnet dalam ruang. Peta medan magnet diperlukan saat mendisain magnet dalam akselerator partikel, spektrometer (massa, *Nuclear Magnetic Resonance, Electron Spin Resonance*), dan sistem pencitraan resonansi magnetik. Peta medan

Edisi Khusus Oktober 2007, hal : 207 - 214
ISSN : 1411-1098

magnet juga digunakan dalam eksplorasi geologi dimana variasi dalam besar dan arah medan magnet bumi memberikan gambaran pada bagian bawah permukaan bumi. Peta medan magnet ini dapat dibuat dengan menggunakan sensor yang sensitif terhadap medan magnet bumi.

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mengukur kuat medan magnet[1]. Pemilihan metode ini bergantung pada beberapa faktor, antara lain: resolusi, kuat medan, homogenitas, variasi dalam waktu, sensitivitas dan keakuratan [2].

Gambar 1 menunjukkan beberapa metode yang banyak digunakan orang untuk mengukur medan magnet, antara lain: metode resonansi magnetik, metode induksi, metode pelat *Hall* dan metode *fluxgate*. Metode resonansi magnetik dijadikan standar utama untuk kalibrasi karena keakuratannya. Metode ini sering digunakan untuk tujuan kalibrasi.

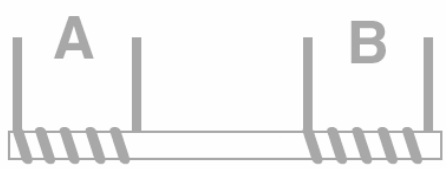


Gambar 1. Metode pengukuran: Keakuratan dan daerah pengukuran.

Keuntungan dari metode ini adalah keakuratannya yang sangat tinggi dan ketidaklinierannya yang kecil. Metode *NMR* dapat mengukur medan magnet sampai 0.1mT, sedangkan metode *ESR* dapat mencapai 0,55 mT hingga 3,2 mT untuk alat yang bersifat komersial [2].

Pengukuran medan magnet dengan metode pelat *Hall* dapat mencapai resolusi 10mT jika menggunakan sinyal eksitasi *DC* konvensional, tetapi terjadi tegangan induksi secara termal pada kabel dan konektor. Sensitivitas sensor ini dapat ditingkatkan dengan menggunakan sinyal eksitasi *AC*. Keakuratan pada medan yang lemah dapat diperoleh dengan menggunakan teknik deteksi sinkronisasi. Metode pelat *Hall* sangat berguna untuk pengukuran pada suhu yang rendah.

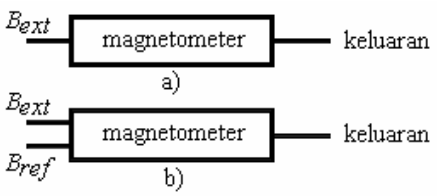
Sensor magnetik *fluxgate* dibuat berdasarkan karakteristik inti feromagnetik yang linier. Dalam bentuk yang sederhana, sensor magnetik *fluxgate* terdiri dari dua kumparan, yaitu kumparan primer untuk eksitasi (A) dan kumparan sekunder untuk *pick-up* (B) (lihat Gambar. 2). Sensor ini mempunyai sifat linieritas dan sensitivitas yang tinggi.



Gambar 2. Bentuk sederhana sensor magnetik *fluxgate*

Konfigurasi lilitan yang baik akan meningkatkan ketelitian karena medan yang akan diukur tidak mengalami distorsi yang berasal dari inti. Sensor ini merupakan salah satu sensor yang paling cocok untuk mengukur medan magnet *DC*/*AC* frekuensi rendah dalam daerah medan magnet 1nT – 1mT [3].

Pengubahan kuat medan magnet yang akan diukur B_{ext} ke dalam sinyal listrik dapat dilakukan dengan cara langsung seperti ditunjukkan pada Gambar 3a. Cara ini memang sederhana, tetapi memberikan hasil yang kurang teliti terutama untuk mengukur medan magnet lemah. Sensor magnetik *fluxgate* tidak menggunakan cara langsung, tetapi menggunakan medan magnet referensi B_{ref} (lihat Gambar. 3b) untuk dibandingkan dengan medan magnet yang akan diukur B_{ext} menggunakan wadah (*probe*) yang diisi dengan bahan inti (*core*) [4]. Bahan inti biasanya berupa bahan yang dapat dimagnetisasi dengan permeabilitas yang tinggi dan medan koersivitas yang rendah [5].



Gambar 3. Prinsip pengukuran medan magnet a) dengan cara langsung; b) menggunakan medan magnet referensi B_{ref} sebagai pembanding terhadap medan magnet yang diukur B_{ext}.

Medan magnet referensi, bisa berbentuk sinyal bolak-balik: sinusoida, persegi, atau segitiga, yang dieksitasikan pada inti melalui kumparan primer. Medan magnet referensi B_{ref} disuperposisikan dengan medan magnet yang akan diukur B_{ext} pada bahan inti ditangkap oleh kumparan sekunder (*pick up coil*) untuk dievaluasi.

FUNGSI TRANSFER

Fungsi transfer suatu sensor magnetik *fluxgate* yang mengevaluasi tegangan keluaran sensor dapat dihitung menggunakan pendekatan polinomial [6,7] dan dengan mencari komponen frekuensi yang ada di dalam kerapatan fluks magnetik inti sensor. Penggunaan pendekatan polinomial menyederhanakan pembagian ke dalam komponen frekuensi.

Dengan asumsi bahwa inti sensor bertipe linear dan medan eksitasi berbentuk sinusoida, maka berdasarkan penurunan [3] inti ini akan disaturasikan dengan medan eksitasi sinusoida sebagai

$$H_{ref} = H_{ref\,\max} \sin \omega t \quad \text{.....} \quad (1)$$

yang akan disuperposisikan dengan medan magnet eksternal H_{ext} . Medan magnet di dalam inti sensor kemudian akan menjadi

$$H_{\text{int}} = \frac{H_{ext} + H_{ref\,\max} \sin \omega t}{1 + D(\mu_r - 1)} \quad \text{.....} \quad (2)$$

dengan μ_r adalah permeabilitas relatif dan D adalah faktor demagnetisasi untuk inti linier [8]

$$D = \frac{bc}{a^2}\left[\ln\left(\frac{4a}{b+c}\right) - 1\right] \quad \text{.....} \quad (3)$$

dengan a, b dan c adalah tetapan.

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

$$H_0^* = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{B_{sat}\left[1 + D(\mu_{rn} - 1)\right]}{\mu_{rn}\mu_0} \quad \text{.....} \quad (4)$$

Disini kuat medan magnet dalam inti menjadi

$$h_{\text{int}} = \frac{H_{\text{int}}}{H_0^*} = h_{ext} + h_{ref\,\max} \sin \omega t \quad \text{.....} \quad (5)$$

Kurva magnetisasi akan diaproksimasi dengan pendekatan polinomial ternormalisasi orde 3 [6]

$$b(h) = a1h - a_3 h_3 \quad \text{.....} \quad (6)$$

b adalah rapat fluks ternormalisasi:

$$b = B/B_0 \quad \text{.....} \quad (7)$$

dengan

$$B_0 = 2B_{sat}/\pi \quad \text{.....} \quad (8)$$

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

$$b = a_1 h_{ext} + a_1 h_{ref\,\max} \sin \omega t - a_3 (h_{ext} + h_{ref\,\max} \sin \omega t)^3 \quad \text{.....} \quad (9)$$

atau

$$b = a_1 h_{ext} - a_3 h_{ext}^3 - \frac{3}{2} a_3 h_{ext} \cdot h_{\text{ref max}}^2 + \left(\begin{matrix} a_1 h_{\text{ref max}} - 3a_3 h_{ext}^2 h_{\text{ref max}} - \\ \frac{3}{4} a_3 h_{\text{ref max}}^3 \end{matrix}\right) \sin \omega t - \frac{3}{2} a_3 h_{ext} h_{\text{ref max}}^2 \cos 2\omega t + \frac{1}{4} a_3 h_{\text{ref max}}^3 \sin 3\omega t \quad (10)$$

Dari persamaan (10) dapat diketahui bahwa komponen harmonisasi kedua sebanding dengan kuat medan magnet luar.

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

$$V_{out} = -N\frac{d\Phi}{dt} = -NA\frac{dB}{dt} \quad \text{.....} \quad (11)$$

N adalah jumlah lilitan kumparan sekunder dan A adalah luas bidang potong inti sensor. Tegangan keluaran kumparan sekunder ternormalisasi v_{out} adalah

$$v_{out} = -\frac{V_{out}}{NA} = \frac{dB}{dt} = B_0 \cdot \frac{db}{dt} \quad \text{.....} \quad (12)$$

dan menjadi

$$v_{out} = B_0\omega\left(\begin{matrix} a_1 h_{\text{ref max}} - 3a_3 h_{ext}^2 h_{\text{ref max}} - \\ \frac{3}{4} a_3 h_{ref\,\max}^3 \end{matrix}\right)\cos \omega t + 3B_0 \omega a_3 h_{ext} h_{\text{ref max}}^2 \sin 2\omega t + \frac{3}{4} B_0 \omega a_3 h_{\text{ref max}}^3 \cos 3\omega t \quad (13)$$

Komponen tegangan keluaran harmonisa kedua V_{out2h} dari kumparan sekunder adalah

$$V_{out\,2h} = -3B_0 NA\omega a_3 h_{ext} h_{ref\,\max}^2 \sin 2\omega t \quad \text{.....} \quad (14)$$

atau

$$V_{out2h} = h_{ext} K \sin 2\omega t \quad \text{.....} \quad (15)$$

dengan K adalah tetapan. Terlihat bahwa tegangan keluaran harmonisa ke dua adalah berbanding lurus dengan kuat medan yang diukur.

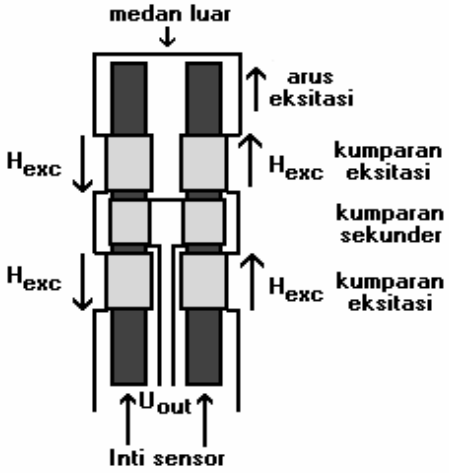
DESAIN SENSOR MAGNETIK *FLUXGATE*

Gambar 4 menunjukkan desain *probe* sensor magnetik *fluxgate* yang dibuat. *Probe* ini terdiri dari inti, kumparan primer (*excitation coil*), dan kumparan sekunder (*pick-up coil*). Pemilihan bahan inti sangat penting karena menentukan batas sensitivitas dan akurasi dari sensor [9]. Disamping itu inti harus bersifat robus terhadap pengaruh luar seperti vibrasi akustik dan deformasi mekanik. Bahan yang memenuhi persyaratan tersebut antara lain kaca logam $Co_{66.5}Fe_{3.5}Si_{12}B_{18}$ atau secara komersial dikenal sebagai *Vitrovac* 6025 [10].

Oleh karena itu dalam penelitian ini digunakan inti yang terbuat dari bahan *Vitrovac* 6025 yang berbentuk pita dengan ukuran panjang 30mm, lebar 1 mm dan tebal 25 μm dan dibentuk dalam susunan 3 lapis. Penggunaan pita *Vitrovac* 6025 memungkinkan desain sensor dengan ukuran yang cukup kecil (diameter sensor <5mm) dan robus. *Probe* yang dirancang di sini adalah *probe* sensor yang terdiri dari dua buah inti. Pada

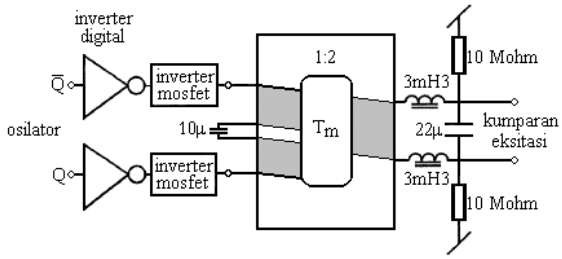
Edisi Khusus Oktober 2007, hal : 207 - 214
ISSN : 1411-1098

masing-masing inti dililitkan kumparan primer, sedangkan kumparan sekunder dililitkan mengelilingi kedua inti (Gambar. 4).



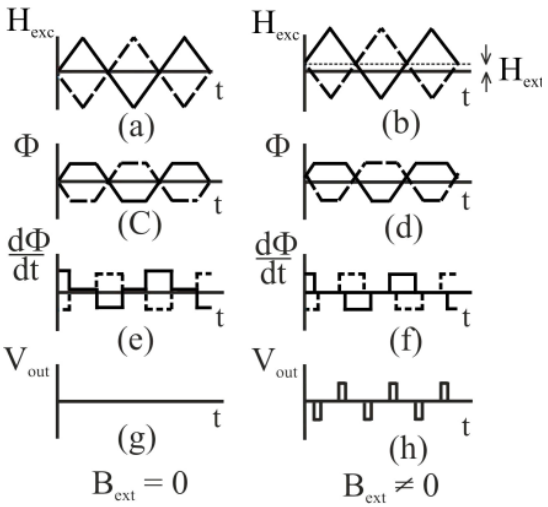
Gambar 4. Desain *probe* sensor magnetik *fluxgate* yang dibuat

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 mangetik *fluxgate* adalah 1 kHz hingga 20 kHz [11], 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* [12], sinyal yang dihasilkan oleh rangkaian penyangga ini berbentuk segitiga, rangkaian ini ditunjukkan pada Gambar 5. Keluaran dari rangkaian penyangga ini akan menggerakkan kumparan e



Gambar 5. Rangkaian penghasil sinyal segitiga

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 masing-masing inti medan mempunyai arah yang berbeda, akibatnya medan eksitasi simetris ketika tidak ada medan magnet luar (B_{ext} = 0) (Gambar 6a). Medan ini akan mensaturasikan inti secara simetris (Gambar 6c) dan perubahan fluks magnetik (Gambar 6e) yang dideteksi kumparan sekunder (*pick-up coil*) akan nol (Gambar 6g). Ketika inti tersaturasi, medan magnet di sekitar inti akan homogen.



Gambar 6. Prinsip kerja sensor magnetik *fluxgate*
a) medan eksitasi tanpa medan magnet luar B_{ext}= 0,
b) medan eksitasi dengan medan magnet luar B_{ext}≠ 0,
c) kurva magnetisasi dalam keadaan saturasi pada B_{ext}= 0,
d) kurva magnetisasi dalam keadaan saturasi pada B_{ext}≠0,
e) perubahan fluks terhadap waktu pada B_{ext}= 0,
f) perubahan fluks terhadap waktu pada B_{ext}≠ 0,
g) tegangan keluaran sensor pada B_{ext}= 0,
h) tegangan keluaran sensor pada B_{ext}≠ 0 [13]

Adanya medan magnet luar B_{ext} (B_{ext}≠0) yang frekuensinya jauh lebih kecil daripada frekuensi medan magnet eksitasi, akan menggeser titik nol medan simetri sebesar B_{ext} (Gambar 6b), fluks magnetik Φ (Gambar 6d) dan perubahan fluks terhadap waktu (Gambar 6f). Akibatnya tegangan keluaran yang ditangkap kumparan sekunder tidak lagi nol (Gambar 6h). Dari Gambar 6 dapat ditunjukkan bahwa tegangan keluaran sensor sebanding dengan besar medan magnet eksternal.

Dari Gambar 6 terlihat bahwa sensor magnetik *fluxgate* bekerja berdasarkan prinsip diferensial. Dengan cara ini maka gangguan/*nois* yang berasal dari lingkungan seperti temperatur atau pengaruh lingkungan lainnya akan saling menghilangkan dan sensor dapat mengukur medan magnet yang sangat lemah. Untuk mengatasi gangguan sinyal frekuensi tinggi, pada sensor dipasang filter lolos rendah orde dua.

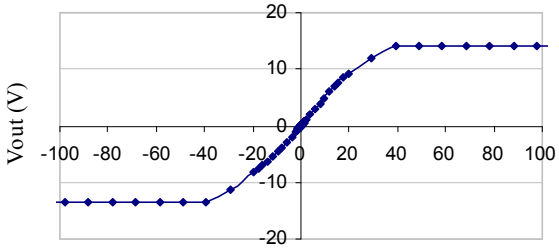
Metode pengukuran ini masih dapat digunakan untuk mengukur medan magnet *AC*, asalkan frekuensinya masih jauh lebih kecil dari frekuensi sinyal referensi.

KARAKTERISASI

Untuk mengetahui karakteristik sensor *fluxgate* yang dibuat, dilakukan karakterisasi sensor meliputi daerah kerja sensor, pengaruh jumlah lilitan *pick-up* dan pengaruh perubahan suhu.

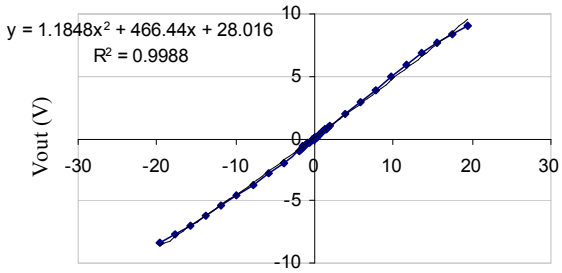
Daerah Kerja Sensor

Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran yang telah dilakukan.



Gambar 7. Karakteristik statik sensor

Dari gambar ini terlihat bahwa daerah linier sensor berada pada daerah medan magnet antara -20μT hingga 20μT. Pada daerah ini terdapat perbandingan yang lurus antara tegangan keluaran sensor dengan medan magnet yang diukur. Daerah kerja magnetometer ini tampak pada Gambar 8.

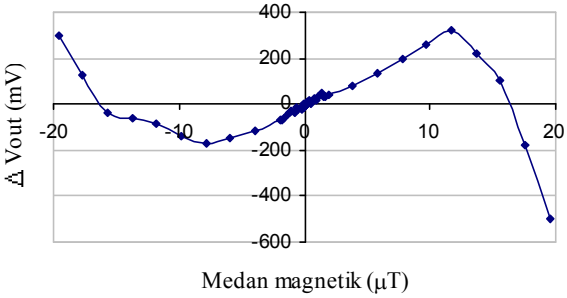


Gambar 8. Keluaran medan magnet pada daerah kerja

Untuk mengetahui kesalahan sensor, dilakukan pemodelan sensor menggunakan polinomial orde dua, seperti pada persamaan (16)

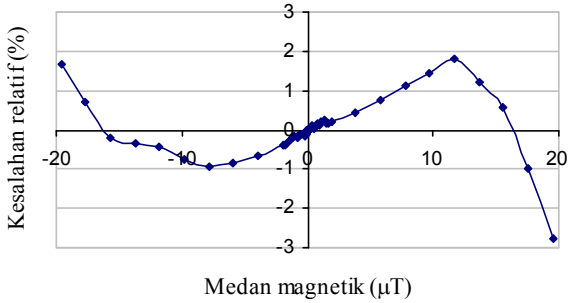
$$V_{out} = 1.1848B^2 + 466{,}44B + 28{,}016 \quad \text{.....} \quad (16)$$

Dari persamaan di atas dapat diketahui sensitivitas sensor, karena koefisien B^2 sangat kecil dibandingkan koefisien B, maka untuk B yang kecil, sensitivitas sensor adalah koefisien B yaitu 466,44 mV/μT. Kesalahan sensor adalah selisih dari keluaran sensor yang sebenarnya dengan hasil dari persamaan (16) di atas, selisih ini disebut kesalahan absolut sensor, seperti terlihat pada Gambar 9.



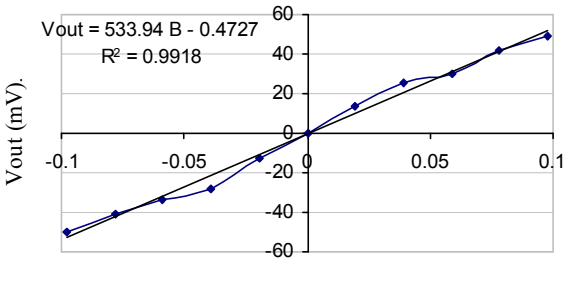
Gambar 9. Kesalahan absolut sensor

Kesalahan relatifnya cukup kecil yaitu < 2,76%, kesalahan relatif sensor dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Kesalahan relatif sensor

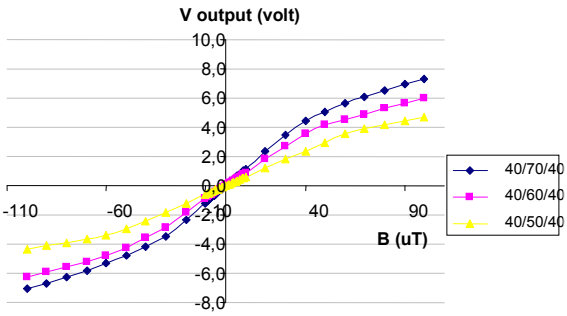
Untuk medan magnet lemah (Gambar 11), sensor mampu mendeteksi medan magnet hingga 20nT dengan sensitivitas 533,94mV/μT.



Gambar 11. Pengukuran medan magnet lemah

Pengaruh Jumlah Lilitan Kumparan Sekunder (*pick-up coil*)

Untuk mengetahui pengaruh jumlah lilitan kumparan sekunder, telah dilakukan pengukuran dengan memvariasikan jumlah kumparan sekunder sebanyak 50 lilitan, 60 lilitan dan 70 lilitan pada jumlah lilitan kumparan primer yang tetap (80 lilitan) [13]. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 12.



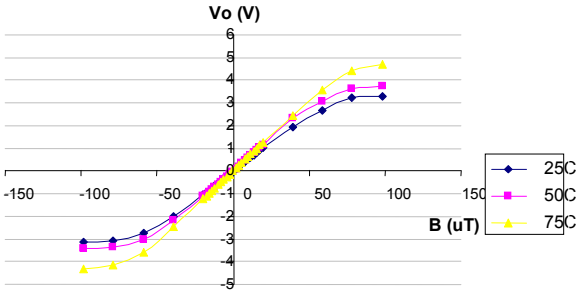
Gambar 12. Respon sensor terhadap variasi jumlah lilitan kumparan sekunder (pick-up coil)

Dari Gambar 12, tampak bahwa kenaikan jumlah lilitan kumparan sekunder akan meningkatkan sensitivitas sensor. Hal ini mudah dipahami karena kenaikan jumlah lilitan kumparan sekunder akan meningkatkan kemampuan sensor dalam menangkap fluks magnetik yang ada pada bahan inti.

Edisi Khusus Oktober 2007, hal : 207 - 214
ISSN : 1411-1098

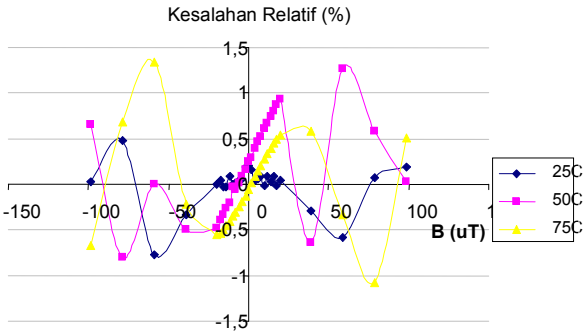
Pengaruh Perubahan Suhu

Suhu lingkungan seringkali berubah, umumnya seringkali mempengaruhi kinerja sensor. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perubahan suhu pada kinerja sensor magnetik *fluxgate* yang telah dibuat telah dilakukan pengukuran dengan memvariasikan suhu lingkungan pada suhu 25 °C, 50 °C dan 75 °C [14]. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Pengaruh variasi suhu terhadap keluaran sensor

Dari Gambar 13 terlihat bahwa kenaikan temperatur akan meningkatkan sensitivitas sensor. Dengan menggunakan polinom fungsi dasar (*basic function*) perubahan tegangan keluaran akibat perubahan suhu dapat dikoreksi [15]. Pada referensi [15] ditunjukkan bahwa dengan cara ini kesalahan akibat perubahan suhu dapat ditekan menjadi < 1,5%, seperti ditunjukkan pada Gambar 14.

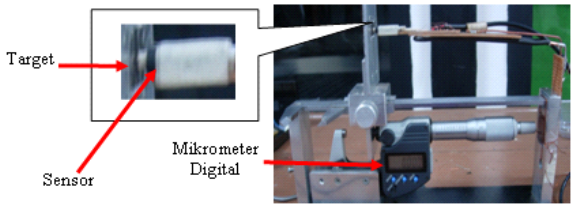


Gambar 14. Kesalahan relatif akibat perubahan suhu

APLIKASI

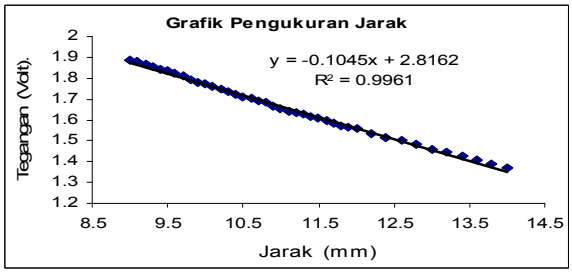
Pengukuran Jarak

Pengukuran jarak dilakukan dengan meletakkan sebuah target dari bahan konduktor sebagai medan pengganggu. Sumber medan magnet yang dihasilkan oleh sensor akan mengenai target. Didalam target, medan magnet yang terjadi akan berubah menjadi listrik induksi (hukum *Faraday*). Akibat adanya arus induksi pada target, maka akan timbul magnet induksi di sekitarnya. Besarnya magnet induksi yang tejadi akan berpengaruh terhadap intensitas medan magnet yang diterima oleh *pick-up coil*. Perubahan intensitas yang terjadi sebanding dengan perubahan jarak antara target dengan sensor. Skema pengukuran yang dilakukan tampak seperti pada Gambar 15.



Gambar 15. Skema pengukuran jarak menggunakan sensor magnetik *fluxgate*

Dari pengukuran yang telah dilakukan didapatkan hasil seperti pada Gambar 16.

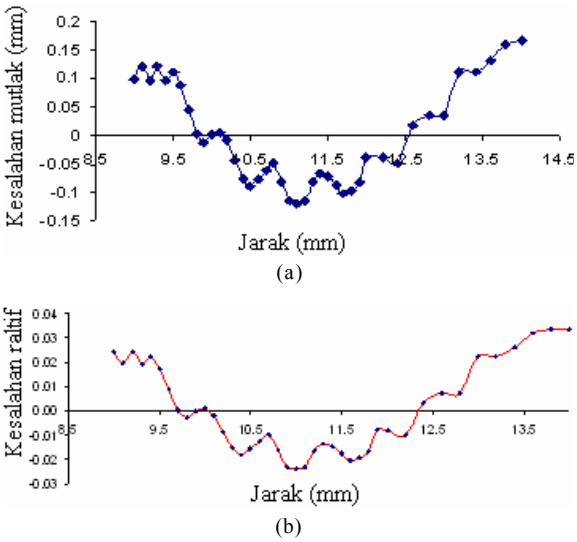


Gambar 16. Respon Keluaran Terhadap Jarak Target

Dari Gambar 16 tampak bahwa perubahan jarak yang terjadi antara target dengan sensor akan berbanding terbalik dengan perubahan tegangan yang dihasilkan. Dengan persamaan pendekatannya adalah

$$y = -0{,}1045x + 2{,}8162 \quad \text{.....} \quad (20)$$

dengan y dalam *volt* dan x dalam *mm*.



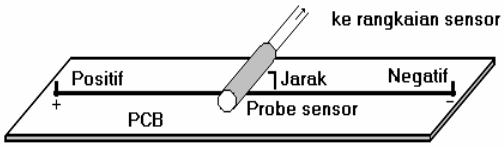
Gambar 17. a).Kesalahan Absolut Pengukuran Jarak b). Kesalahan Relatif Pengukuran Jarak

Hal ini berarti medan magnet yang diterima oleh sensor akan sebanding dengan jarak yang terjadi, karena perubahan medan magnet akan menyebabkan perubahan tegangan keluaran sensor.

Dari data yang didapatkan dapat diketahui besarnya kesalahan absolut pengukuran dan kesalahan relatifnya, yaitu seperti tampak pada Gambar 17 dan Gambar 18. Dari Gambar 17 tampak bahwa kesalahan absolut pengukuran yang terjadi adalah 0,16 mm dan kesalahan relatifnya adalah 3,4 %.

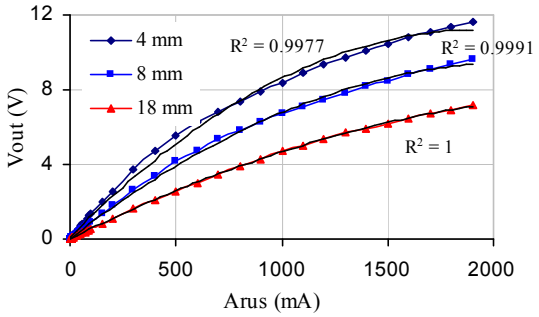
Pengukuran Kuat Arus

Untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mengukur kuat arus, telah dilakukan pengukuran kuat arus pada daerah pengukuran 0 mA hingga 1900 mA [16]. Untuk uji coba dilakukan dengan menghitung arus yang mengalir pada kawat lurus dengan mendeteksi medan magnet yang dipancarkan, sebagai kawat digunakan jalur pada PCB yang panjangnya 20 cm, kemudian sensor medan magnet diletakkan saling memotong di atas jalur tersebut. Pada jalur PCB dilewatkan arus mulai dari 0 sampai 1900 mA dengan interval tertentu. Pengukuran dilakukan dengan jarak sensor yang berbeda-beda. Pada percobaan ini dilakukan pengukuran pada tiga jarak yang berbeda yaitu 4 mm, 8 mm dan 18 mm. Sistem pengukuran ditunjukkan oleh Gambar 18.



Gambar 18. Pengukuran arus pada kawat

Hasil pengukuran terhadap arus listrik ditampilkan dalam dalam Gambar 19. Dari gambar tampak bahwa semakim jauh jarak sensor dari kawat maka medan yang terdeteksi akan semakin kecil, hal ini sesuai dengan persamaan. Pada pengukuran dengan jarak 4 mm tampak bahwa kurva mempunyai tingkat kesalahan paling besar, sedangkan pada pengukuran dengan jarak 18 mm kurva memiliki tingkat kesalahan yang kecil. Ketiga kurva didekati dengan persamaan polinomial order 2.



Gambar 19. Keluaran sensor untuk arus 0 mA hingga 1900 mA

Persamaan berturut-turut untuk kurva atas, tengah dan bawah adalah:

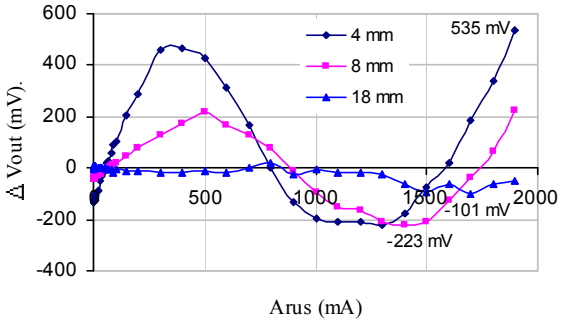
$$y = -0{,}003x^2 + 11{,}454x + 132{,}55 \quad \text{..... (17)}$$

$$y = -0{,}002x^2 + 8{,}7494x + 44{,}342 \quad \text{..... (18)}$$

$$y = -0{,}001x^2 + 5{,}6941x + 1{,}7363 \quad \text{..... (19)}$$

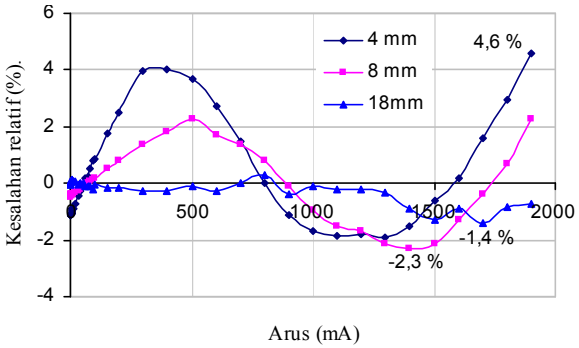
x dalam mA dan y dalam mV.

Untuk mengetahui kesalahan absolut sensor dari persamaan tersebut dapat dilihat dari grafik pada Gambar 20.



Gambar 20. Kesalahan absolut sensor untuk arus 0 mA hingga 1900 mA

Dari Gambar 20 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. Ini disebabkan 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. 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. Sedangkan untuk kesalahan relatif dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21. 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.

KESIMPULAN

Dari karakteristik statik sensor dapat ditunjukkan bahwa sensor magnetik *fluxgate* yang dibuat dapat digunakan untuk mengukur kuat medan magnet yang sangat lemah, yakni pada daerah pengukuran -20μT

sampai 20 μT dengan kesalahan relatif < 2,76% dan sensitivitas 466,44mV/mT. Pada daerah pengukuran yang lebih kecil resolusi bisa mencapai 20 nT.

Sensitivitas sensor dapat dinaikkan dengan menambah jumlah lilitan kumparan sekunder (*pick-up coil*). Hal ini sejalan dengan hukum induksi *Faraday*. Walaupun sensor sudah didesain bekerja menggunakan prinsip diferensial, yang artinya pengaruh suhu dapat saling menghilangkan, tetapi ternyata perubahan suhu juga mempengaruhi sensitivitas sensor. Walaupun tidak besar, kenaikan suhu terlihat dapat meningkatkan sensitivitas sensor. Hal ini kemungkinan disebabkan karena jumlah lilitan primer dan sekunder yang tidak sama.

Sensor magnetik *fluxgate* dapat digunakan untuk mengukur jarak yang sangat kecil tanpa sentuh. Dari hasil yang didapat terlihat bahwa sensor magnetik *fluxgate* yang dibuat dapat mengukur jarak pada daerah 9 mm sampai dengan 14 mm dengan resolusi <0,2 mm dan kesalahan relatif < 3,4%.

Sensor magnetik *fluxgate* dapat juga digunakan untuk mengukur kuat arus listrik tanpa mengganggu aliran listriknya. Tergantung pada jarak antara sensor dengan kawat sumber arus diperoleh hasil dengan resolusi yang berbeda-beda. Untuk pengukuran arus antara 0 mA hingga 1900 mA, diperoleh hasil pengukuran yang cukup baik dengan kesalahan relatif < 4,6%.

DAFTAR ACUAN

[1]. M. DJAMAL dan R. N. SETIADI, Pengukuran Medan Magnet Lemah Menggunakan Sensor Magnetik Fluxgate dengan Satu Koil Pick-Up, *Proc. ITB Sains & Tek*, **38** (2) (2006) 99-115

[2]. http://media.wiley.com/product_data/ excerpt/63/ 04713327/0471332763.pdf

[3]. http://measure.feld.cvut.cz/usr/staff/ripka/ Ripka20.pdf

[4]. W. GOPEL, *Sensor a Comprehensive Survey Volume 5 Magnetic Sensor*, VCH, Weinhein, 1989

[5]. J. FRADEN, *Handbook of Modern Sensor, Physics, Design and Application*, 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, (1996)

[6]. H. ASCHENBRENNER, et.all., *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik,* **47** (6) (1936) 117-181

[7]. W. KERTA, *Einfuhrung in die Geophysik*, in BI-Hochshultaschen bücher, Manheim, BI-Wissenschaftsverlag, **275** (1969) 171

[8]. I. A. OSBORNE, *Physical Review,* **67** (1945) 351-357

[9]. O. V. NIELSEN, et all, *J. of Meas. Sci. Technol*., **6** (1995) 1099-1115.

[10]. O. V. NIELSEN, et all, *Anales de Fisica*, B **86** (1991) 271-276

[11]. E. B. PEDERSEN, Fritz., *Meas. Sci. Technol.,* **10** (1999) N124-N129

[12]. PIIL-HENRIKSEN P.and G. MERAYO, et.all, *Meas. Sci. Technol.*, **7** (1996) 897-903

[13]. SUYATNO, et all, Influence of Winding Number of Turn Pick-Up Coils to Sensitivity of Fluxgate Magnetometer, *Proc. ICICI 2007*, 411-414

[14]. YULKIFLI, et all, Temperature Effect on Output Voltage Stability of Fluxgate Magnetic Sensor, *Proc. ICICI 2007*, 406-410

[15]. H-R. TRAENKLER, *Taschenbuch der Mektechnik 2.A*, R. Oldenbourg Verlag München Wien, (1990)

[16]. M. DJAMAL, *J. Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, **III** (2007) 51-69