



Pengukuran Medan Magnet Lemah Menggunakan Sensor Magnetik Fluxgate dengan Satu Koil Pick-Up

Mitra Djamal^[1] & Rahmondia Nanda Setiadi^[2]

Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi,
Kelompok Keilmuan Fisika Teoretik Energi Tinggi dan Instrumentasi, FMIPA,
Institut Teknologi Bandung

[1]mitra@fi.itb.ac.id

[2]rahmon@planck.fi.itb.ac.id

Abstrak. Telah dikembangkan sensor magnetik yang sangat sensitif untuk mengukur medan magnet yang sangat lemah. Sensor ini terdiri dari dua kumparan primer (*excitation coil*) dan satu kumparan sekunder (*pick-up coil*). Kumparan primer yang dililitkan pada dua inti feromagnetik dibuat simetris. Sedangkan kumparan sekunder dililitkan mengelilingi kedua inti. Kumparan primer menggerakkan inti sampai terjadi saturasi. Medan magnet yang ditimbulkan akibat eksitasi mempunyai arah yang saling berlawanan, sehingga ketika tidak ada medan magnet luar, medan magnet yang berada di dalam kumparan sekunder akan simetris, tetapi jika terdapat medan magnet luar, akan terjadi perubahan-perubahan medan magnet di dalam kumparan sekunder. Perubahan medan magnet ini akan menginduksi kumparan sekunder, akibatnya akan timbul tegangan induksi berupa sinyal pada ujung-ujung kumparan sekunder. Sinyal dari sensor didiferensialkan, diperkuat, dilewatkan pada detektor fasa, diintegrasikan, dan kemudian diperkuat kembali. Dari hasil pengukuran diperoleh bahwa sensor magnetik yang dibuat dapat mengukur medan magnet dalam rentang pengukuran dari $-40\mu\text{T}$ sampai dengan $40\mu\text{T}$, dengan sensitivitas $346.47\text{mV}/\mu\text{T}$ dan dengan kesalahan relatif kurang dari 4%.

Kata kunci: *magnetometer; fluxgate; sensor magnetik; medan magnet lemah.*

Abstract. A magnetic sensor has been developed for measuring a very low magnetic field. The sensor consists of two primary coils (*excitation coil*) and one secondary coil (*pick-up coil*). Primary coil that wound at ferromagnetic core is made symmetry each other. Whereas secondary coil is wound to both of cores. Primary coil drives the core until it saturated. The generated magnetic field from excitation have the contrary direction, so if there is no external magnetic field, the magnetic field inside the secondary coil is symmetry, but if there is an external magnetic field, there will be magnetic field changes inside secondary coil. These changes will induce secondary coil, as a consequence, there will be an induction voltage that acts as signal at the ends of secondary coil. The signal is then differentiated, amplified, inserted to controlled rectifier, integrated, and amplified for the last time. From measurement results, it can be obtained that magnetic sensor can measure magnetic field in the range of measurement from

-40 μT to 40 μT , with sensitivity about 346.47 mV/ μT and relative error less than 4%.

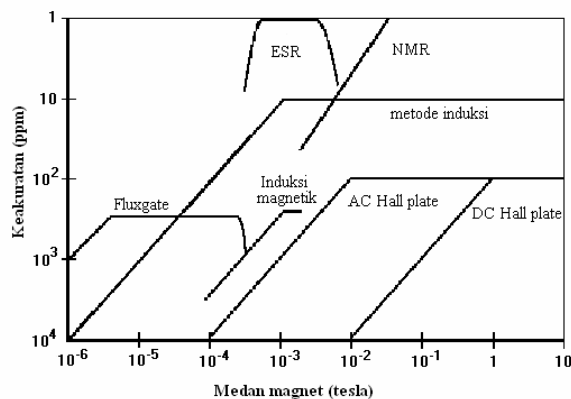
Keywords: *magnetometer; fluxgate; magnetic sensor; low magnetic field.*

1 Pendahuluan

Medan magnet adalah salah satu besaran fisis yang sangat penting dan digunakan dalam banyak bidang, misalnya: geofisika, geologi, kedokteran, oseanografi, ekspedisi luar angkasa dan banyak kegunaan lainnya. Pemetaan medan magnet merupakan hasil dari penggambaran medan magnet dalam ruang. Peta medan magnet diperlukan dalam mendisain akselerator partikel, spektrometer (massa, *nuclear magnetic resonance*, *electron spin resonance*), dan sistem pencitraan resonansi magnetik. Peta medan magnet juga digunakan dalam eksplorasi geologi karena variasi dalam besar dan arah medan magnet bumi memberikan gambaran dari permukaan bumi bagian dalam. Peta medan magnet dibuat dengan mengukur pola medan magnet di sekitar permukaan bumi menggunakan sensor magnetik medan lemah.

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

Gambar 1 menunjukkan beberapa metoda 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 Beberapa metode pengukuran medan magnet: Keakuratan dan daerah pengukuran.

Keuntungan dari metode ini adalah keakuratannya yang sangat tinggi dan ketidaklinierannya yang kecil. Metode NMR dapat mengukur medan magnet sampai $0.1\mu\text{T}$, sedangkan metode ESR dapat mencapai $0.55\text{-}3.2\text{mT}$ 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 temperatur yang rendah.

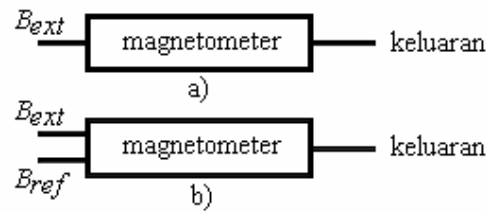
Sensor magnetik fluxgate dibuat berdasarkan karakteristik inti feromagnetik yang linier. Dalam bentuk yang sederhana, sensor magnetik fluxgate terdiri dari dua kumparan, yaitu kumparan primer untuk eksitasi (A) dan kumparan sekunder untuk *pick-up* (B) (lihat gambar 2). Sensor ini mempunyai sifat linieritas 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 $1\text{nT} - 1\text{mT}$ [2].

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*) [3]. Bahan inti biasanya berupa bahan yang dapat dimagnetisasi dengan permeabilitas yang tinggi dan medan koersivitas yang rendah [4].



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, 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.

2 Fungsi Transfer

Fungsi transfer suatu sensor magnetik fluxgate yang mengevaluasi tegangan keluaran sensor dapat dihitung menggunakan pendekatan polinomial [5,6] 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

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

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

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

dengan μ_r adalah permeabilitas relatif dan D adalah faktor demagnetisasi untuk inti linear [7]:

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

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:

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

Disini kuat medan magnet dalam inti menjadi

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

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

$$b(h) = a_1 h - a_3 h^3 \quad (6)$$

b adalah rapat fluks ternormalisasi:

$$b = B/B_0 \quad (7)$$

dengan

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

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

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

atau

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

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 flux di dalam inti :

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

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

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

dan menjadi

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

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

$$V_{out2h} = -3B_0 NA \omega a_3 h_{ext} h_{ref\ max}^2 \sin 2\omega t \quad (14)$$

atau

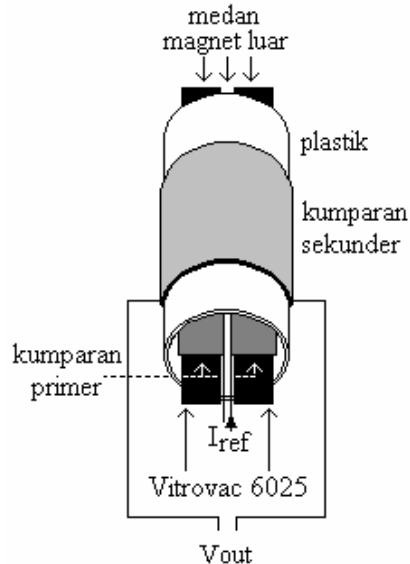
$$V_{out2h} = h_{ext} K \sin 2\omega t \quad (15)$$

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

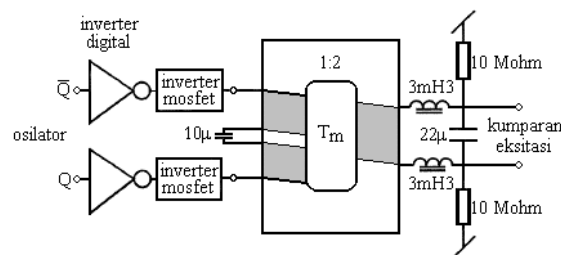
3 Desain sensor magnetik fluxgate

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 [8]. Disamping itu inti harus bersifat robus terhadap pengaruh luar seperti vibrasi akustik dan deformasi mekanik. Bahan yang memenuhi persyaratan tersebut kaca logam $Co_{66.5}Fe_{3.5}Si_{12}B_{18}$ atau secara komersial dikenal sebagai Vitrovac 6025[9]. Oleh karena itu dalam penelitian ini digunakan inti yang terbuat dari bahan Vitrovac 6025 yang berbentuk pita dengan ukuran panjang 30mm, lebar 1mm dan tebal 25 μ m 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 masing-masing inti dililitkan kumparan primer, sedangkan kumparan sekunder dililitkan mengelilingi kedua inti (lihat Gambar 4).



Gambar 4 Desain probe sensor magnetik fluxgate yang dibuat.

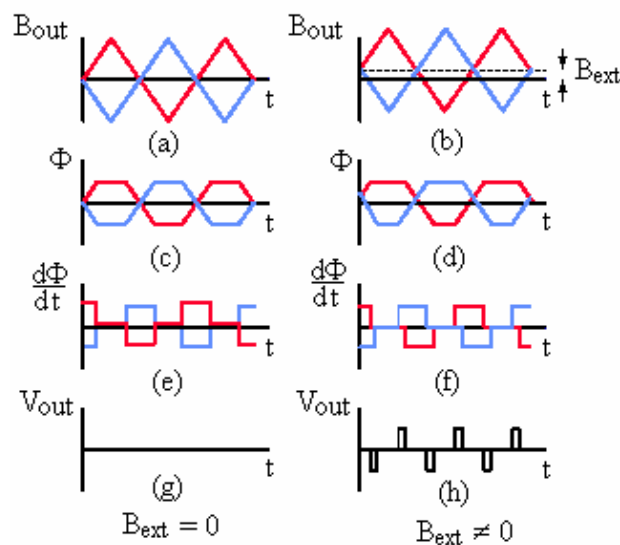


Gambar 5 Rangkaian penghasil sinyal segitiga.

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 [10], 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 5. 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 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 $B_{ext}\neq 0$; 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 $B_{ext}\neq 0$ [12].

Adanya medan magnet luar B_{ext} ($B_{ext}\neq 0$) 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

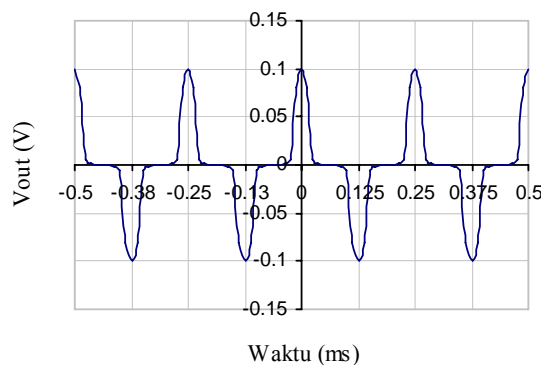
ditunjukkan bahwa tegangan keluaran sensor sebanding dengan besar medan magnet eksternal.

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.

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

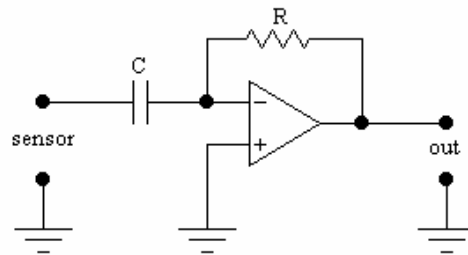
4 Hasil dan Pembahasan

Sinyal yang berasal dari kumparan sekunder probe sensor perlu diolah agar dapat dibaca dan dapat merepresentasikan besar medan magnet itu sendiri. Sinyal dari probe sensor masih berupa pulsa-pulsa dengan lebar sebanding dengan besar medan magnet yang dideteksi oleh sensor, frekuensi pulsa ini sama dengan frekuensi penggerak eksitasi. Keluaran probe sensor akan tampak seperti pada gambar 7, ini terjadi ketika terdapat medan magnet luar. Gambar ini sesuai dengan hasil prediksi teori pada gambar 6h.



Gambar 7 Sinyal keluaran kumparan sekunder probe sensor.

Pulsa dari probe sensor yang masih berorde millivolt AC terlebih dahulu dikuatkan dan didiferensialkan dengan pendiferensial op-amp (gambar 8).

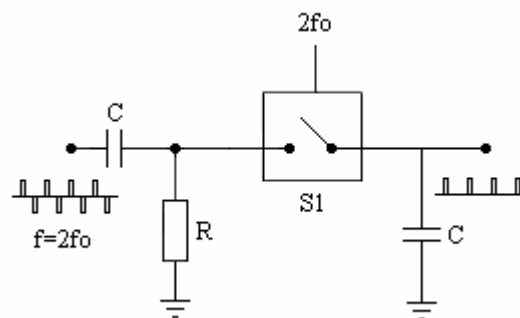


Gambar 8 Diferensiator.

Penguatan pada diferensiator ini sesuai dengan persamaan (16).

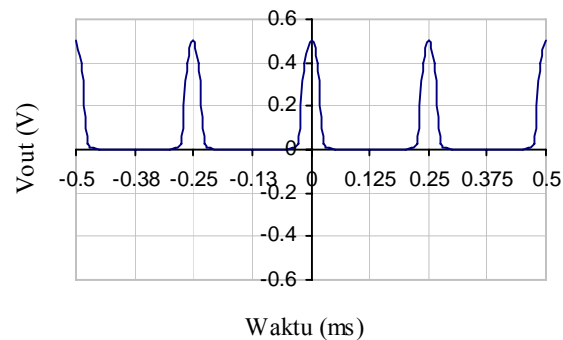
$$V_{out\ diff} = RC \frac{dV_{in\ diff}}{dt} \quad (16)$$

Selanjutnya sinyal dilewatkan pada filter dan detektor fasa (gambar 9) yang merupakan saklar analog.



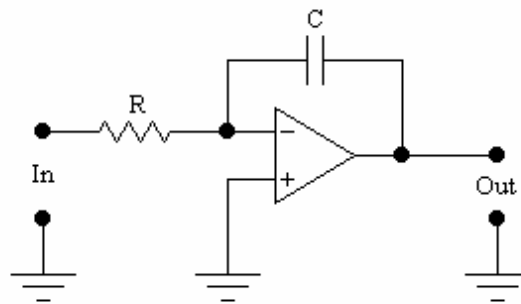
Gambar 9 Detektor fasa.

Detektor fasa digerakkan oleh sinyal osilator penggerak eksitasi sebelum dibagi menjadi dua [13], sehingga frekuensinya dua kali frekuensi sinyal kumparan eksitasi pada probe sensor. Karena frekuensi sinyal yang dihasilkan oleh probe sensor adalah $2f_0$ dan frekuensi detektor fasa juga $2f_0$, maka pulsa dengan beda fasa 0π , 2π , dan seterusnya dengan detektor fasa akan diloloskan dari detektor fasa, sedangkan pulsa dengan beda fasa π , 3π , dan seterusnya akan dibuang, sehingga pada keluaran detektor ini hanya terdiri dari pulsa-pulsa positif atau negatif, tergantung pada arah medan magnet yang dideteksi. Keluaran dari detektor fasa tampak seperti pada gambar 10.



Gambar 10 Keluaran detektor fasa.

Tampak dari gambar 10 bahwa pulsa yang timbul dari sensor memiliki frekuensi $2f_0$ yaitu sebesar 4 kHz. Pulsa-pulsa ini kemudian dilewatkan pada integrator RC (gambar 11).



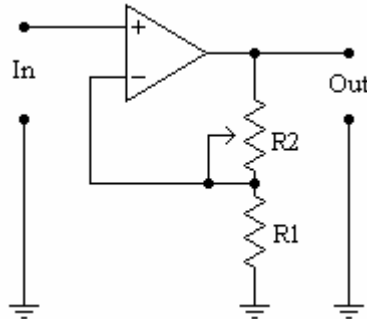
Gambar 11 Integrator RC.

Integrator ini berfungsi sebagai tapis lolos rendah [14,15], di sini terjadi proses perubahan pulsa-pulsa menjadi tegangan DC. Tegangan keluaran integrator ini sesuai dengan persamaan (17).

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

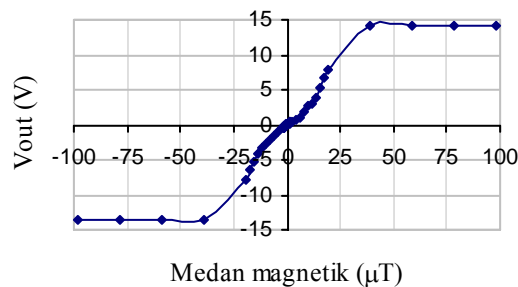
Tegangan keluaran dari integrator ini dikuatkan lagi dengan penguat op-amp tidak membalik (gambar 12) [16], di sini digunakan penguat tidak membalik karena sinyal telah sama dengan fasa awal karena telah mengalami dua kali pembalikan yaitu pada diferensiator dan integrator. Penguatannya sesuai dengan persamaan (18).

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



Gambar 12 Penguat akhir.

Dengan menggunakan $R_1 = 2,2k$ dan $R_2 = VR\ 20k$, maka diperoleh penguatan maksimum pada penguat ini yaitu 10,09 kali. Setelah ditambah penguatan sebelumnya, keluaran sensor ini dapat mencapai $< \pm V_{cc}$ op-amp. Grafik keluaran sensor tampak seperti pada gambar 13.

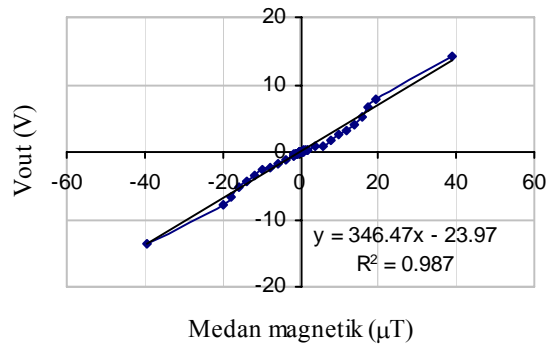


Gambar 13 Karakteristik keluaran sensor magnetik fluxgate yang dibuat.

Dari gambar 13 tampak bahwa daerah linier terdapat pada daerah medan magnet antara $-40\mu T$ hingga $40\mu T$. Pada daerah ini terdapat hubungan linier antara tegangan keluaran sensor dengan kuat medan magnet yang diukur.

Daerah kerja sensor magnetik ini dapat dilihat pada gambar 14. Tampak dari gambar bahwa kurva linierisasi sensor masih kurang linier, hal ini dapat disebabkan oleh lilitan pada kumparan primer yang kurang simetris. Karena ukuran inti yang cukup kecil, yaitu panjang 30mm, lebar 1mm dan ketebalan 0,1 mm, sangat sulit untuk melilitkan kawat email dengan diameter 0.1mm pada

inti tersebut secara manual. Sampai saat ini belum diketahui cara lain yang lebih mudah dan presisi dalam membuat sensor tersebut selain cara manual tersebut.

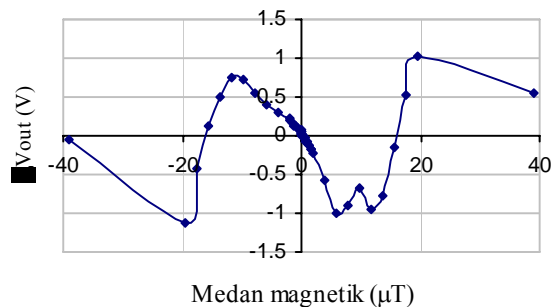


Gambar 14 Keluaran medan magnet pada daerah kerja antara $-40\mu\text{T}$ hingga $40\mu\text{T}$.

Untuk mengetahui kesalahan sensor, keluaran daerah kerja sensor didekati dengan persamaan linier. Dari gambar 14 terlihat bahwa keluaran sensor dapat didekati dengan persamaan linier (19) :

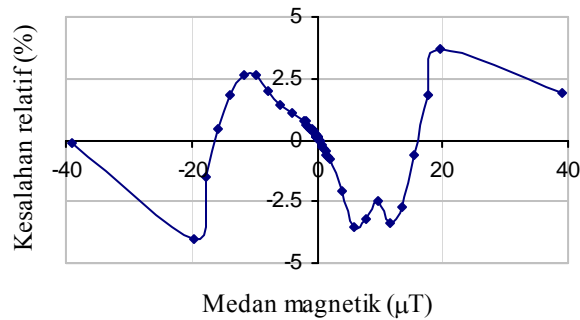
$$y = 346,47x - 23,97 \tag{19}$$

dari persamaan di atas dapat diketahui sensitivitas sensor $346,47\text{mV}/\mu\text{T}$. Kesalahan absolut sensor tampak pada gambar 15. Kesalahan absolut maksimum sensor adalah 1134mV pada medan magnet $-20\mu\text{T}$.



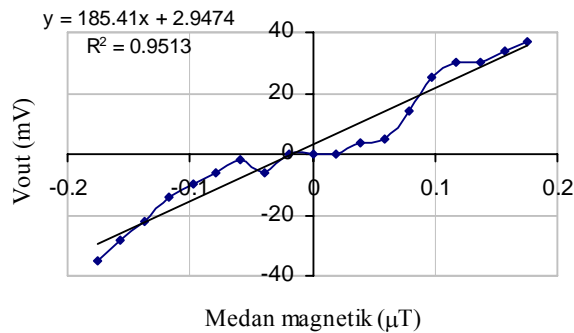
Gambar 15 Kesalahan absolut sensor magnetik yang dibuat pada daerah antara $-40\mu\text{T}$ hingga $40\mu\text{T}$.

Kesalahan relatif maksimum sensor adalah sebesar 4% pada medan magnet $-20\mu\text{T}$. Grafik kesalahan relatif sensor dapat dilihat pada gambar 16.



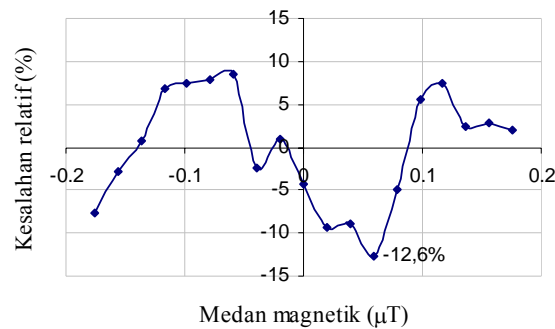
Gambar 16 Kesalahan relatif sensor magnetik pada daerah ukur $\pm 40\mu\text{T}$.

Untuk medan magnet lemah (gambar 17), sensor mampu mendeteksi medan magnet pada daerah ukur antara -150 nT sampai dengan 150 nT dengan kesalahan relatif $< 13\%$.



Gambar 17 Pengukuran medan magnet lemah pada daerah ukur $\pm 150\text{nT}$.

Kesalahan yang cukup besar pada daerah ukur ini terjadi karena ketidakstabilan dari keluaran akhir sensor. Keluaran yang kurang stabil menyebabkan kesulitan dalam pembacaan tegangan keluaran akhir tersebut, karena perbandingan noise dengan harga sebenarnya cukup besar. Untuk itu diperlukan perbaikan pada sistem filter dan integrator sinyal yang digunakan agar sinyal keluaran lebih stabil.



Gambar 18 Kesalahan relatif sensor magnetik untuk medan magnet lemah pada daerah ukur $\pm 150\text{nT}$.

Dari hasil di atas (lihat gambar 13) terlihat bahwa keluaran sensor masih mengandung komponen kesalahan sistematis yang cukup besar. Dengan desain yang lebih baik, misalnya penggulangan kawat/koil pada bahan *core* yang lebih merata, baik dari sisi kerapatan maupun tegangan kawat, resolusi sensor dapat ditingkatkan. Hal lain yang dapat dilakukan untuk meningkatkan daya resolusi sensor adalah dengan menggunakan *pick-up coil* ganda [17]. Inovasi ini sedang kami lakukan dan tampaknya memberikan peningkatan hasil pengukuran yang cukup signifikan.

5 Kesimpulan

Dari uraian di atas dapat ditunjukkan bahwa sensor magnetik dengan menggunakan metode fluxgate dapat digunakan untuk mengukur medan magnet lemah dalam orde μT . Dengan menggunakan inti batang yang simetris, sensitivitas sensor dapat lebih ditingkatkan. Kumparan *pick-up* pada probe sensor akan mendeteksi resultan medan magnet yang berada di dalamnya. Pengolahan sinyal yang baik juga faktor yang menentukan sensitivitas sensor, di sini sinyal sensor diupayakan agar noise sensor ditekan sampai serendah mungkin hingga tidak mengganggu keluaran dengan batas pengukuran terkecil. Jika noise sangat kecil dibandingkan dengan keluaran sensor, maka keluaran sensor akan stabil.

Penggunaan bahan inti dari pita logam Vitrovac 6025 memungkinkan pembuatan sensor dengan ukuran yang lebih kecil (diameter sensor $< 5\text{mm}$ dan panjang 30mm), lebih teliti dan robus terhadap gangguan (dibandingkan dengan ref [18] diameter sensor 10mm dengan ketelitian $< 5\%$).

Dari hasil pengukuran diperoleh daerah linier sensor atau disebut juga daerah kerja sensor yaitu pada rentang $-40\mu\text{T} \sim 40\mu\text{T}$, sensitivitas sensor pada daerah ini cukup besar yaitu $346.47\text{mV}/\mu\text{T}$ atau sekitar $346\text{kV}/\text{T}$ (jauh lebih besar dibandingkan dengan efek Hall $0,5\text{V}/\text{T}$ atau Magnetoresistif $100\text{V}/\text{T}$) dengan kesalahan relatif kurang dari 4%.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung oleh dana riset dari Hibah bersaing XII dengan nomor kontrak 012/P4T/DPPM/PHBXII/III/2004

Daftar Pustaka

1. http://media.wiley.com/product_data/excerpt/63/04713327/0471332763.pdf.
2. <http://measure.feld.cvut.cz/usr/staff/ripka/Ripka20.pdf>.
3. Gopel, W., *Sensor a Comprehensive Survey Volume 5 Magnetic Sensor*, VCH, Weinheim (1989).
4. Fraden, Jacob., *Handbook of Modern Sensor: physics, design, and application*, 2nd edition., Springer-Verlag, New York (1996).
5. Aschenbrenner, H. et.al., *Eine Anordnung zur Registrierung rascher magnetischer Storungen*, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 47, No. 6, 117 – 181 (1936).
6. Kerta, W., *Einführung in die Geophysik*, in *BI – Hochshultaschen bücher*, Mannheim : BI – Wissenschaftsverlag, Vol. 275, pp. 171 ff (1969).
7. Osborne, I. A., *Demagnetization Factors of General Ellipsoid*, Physical Review 67, 351 – 357 (1945).
8. Nielsen, O. V., Petersen, J. R., Primdahl, F., Brauert, O., Hernando, B., Fernandez, A., Merayo, J. M. G. & Ripka, P., *Development, construction and analysis of the ‘Oersted’ fluxgate magnetometer*, J. of Meas. Sci. Technol. 6, 1099-1115 (1995).
9. Nielsen, O. V., Petersen, J. R., Hernando, B., Spisak, P., Primdahl, F. & Moser N., *Metallic glasses for fluxgate applications*, Anales de Fisica B 86 271-6 (1991).
10. Pedersen, Erik, B., Primdahl, Fritz., *Digital fluxgate magnetometer for the Astrid-2 satellite*, Meas. Sci. Technol. 10, N124–N129., UK (1999).
11. Piil-Henriksen, P., Merayo, J.M.G., dkk., *Digital detection and feedback fluxgate magnetometer*, Meas. Sci. Technol. 7, 897–903., UK (1996).
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, p. 35-38 (2000).
13. Bish., A., Fraser, B. J., Menk, F. W., Waters, C. L., Means, J. D. & Russell, C. T., *Magnetic Field Measurements in Space: The New Mag*

- Magnetometer*, Department of Physics, University of Newcastle, Callaghan (2000).
14. A. P. Malvino, *Electronic Principles 6th ed.*, The McGraw-Hill Book Companies, Inc. (1999).
 15. Sutrisno, *Elektronika Teori dan Penerapannya Jilid 1*, Penerbit ITB, Bandung (1986).
 16. Sutrisno, *Elektronika Teori dan Penerapannya Jilid 2*, Penerbit ITB, Bandung (1986).
 17. F. Primdahl, *The fluxgate magnetometer*, J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. **12** (1979).
 18. Technical Specification, *Magnetoscopy 1.068 3/82*, Institut D. Förster.