

ANALISIS RANGKAIAN ELEKTRONIKA MAGNETOMETER BERBASIS SENSOR FLUXGATE TIGA DIMENSI

Zulhendri Kamus

Staf Pengajar Jurusan Fisika FMIPA UNP, email: zul_unp@yahoo.com

ABSTRACT

Measurement system of magnetic field has an important role, such as security systems, geophysical research, geologic mapping, industry, engineering, medicine, etc. Measurement system of magnetic field is developed depends on the application of measurement. Each measurement system consists of analog and digital signal processing, interfacing system, and display. The electric circuit analysis of magnetic field measurement system is necessary to produce a good equipment. The magnetometer is a device to measure magnetic field. The magnetometer contains 3-D fluxgate sensor and electronics. The circuits of magnetometer contains the 3-D fluxgate sensor system, analog multiplexer, Analog to Digital Converter (ADC) 12 bits, Atmel microcontroller, RS-232 serial interface and computer. Base on testing was founded result as follow: 1). Linear range of output voltage of fluxgate sensor is about -30 mA until 30 mA or magnetic field is about $-60\text{ }\mu\text{T}$ until $60\text{ }\mu\text{T}$; 2). Magnetic field were measured by magnetometer proportional with increase magnetic field were measured by standard measurement with gradient 1,00, 1,00 and 0,99 for each X, Y and Z axis.

Keyword: *electronic circuit analysis, magnetometer, 3-D fluxgate sensor, magnetic field*

PENDAHULUAN

Medan magnet merupakan besaran fisis yang penting dalam berbagai bidang seperti studi geomagnetik, sistem navigasi, proses pabrik, ilmu kedokteran dan lain-lain. Keberadaan medan magnetik dapat diketahui melalui pengaruh yang ditimbulkan terhadap benda-benda disekitarnya (Tauxe, 2002). Karena itu, pengukuran terhadap medan magnetik penting dilakukan untuk mengetahui nilainya.

Instrumen yang dapat mengukur medan magnetik disebut magnetometer (Fraden, J, 1996). Magnetometer merupakan instrumen pokok dalam riset geofisika. Berbagai kajian tentang pengembangan magnetometer dan aplikasi telah dilakukan seperti penerapan khusus dari magnetometer (Breiner dan Coe, 1972; Becker, 1983; Von Frese, 1984; Von Frese dan Noble, 1984; Garrison et al, 1985; Gibson, 1986; Abbott dan Frederick, 1990;

Bevan, 1991; Brock dan Schwartz, 1991; Farnsworth et al, 1992; Larson dan Ambos, 1997) perbandingan antara magnetometer dengan instrumen-instrumen survey geofisika lainnya (Blundell et al, 1974; Parrington, 1979; Farnsworth, 1980, 1982; Tabbagh, 1984; Weymouth dan Woods, 1984; Tabbagh et al, 1988; Martin et al, 1991; Arnold et al, 1997).

Ada dua bagian penting yang perlu diperhatikan dalam pengembangan sebuah magnetometer yaitu sistem sensor dan rangkaian pengolah/pengkondisian sinyal. Sensor yaitu devais yang mendeteksi, mengindera atau sensitif terhadap kuantitas-kuantitas fisika, kemudian mengkonversinya menjadi sinyal listrik tertentu seperti arus, tahanan dan tegangan melalui tahap-tahap konversi (Kissell, T. E, 2000). Sensor magnetik adalah suatu devais yang mengkonversi kuat medan magnetik menjadi sinyal listrik. Pemilihan terhadap

sensor magnetik yang digunakan sangat bergantung pada metoda atau teknik pengukuran. Sementara itu, setiap metoda pengukuran yang dipilih haruslah mempertimbangkan beberapa faktor antara lain kuat medan magnet yang diukur, homogenitas, variasi terhadap waktu dan akurasi yang diinginkan (Henrichsen, K. N, 1992).

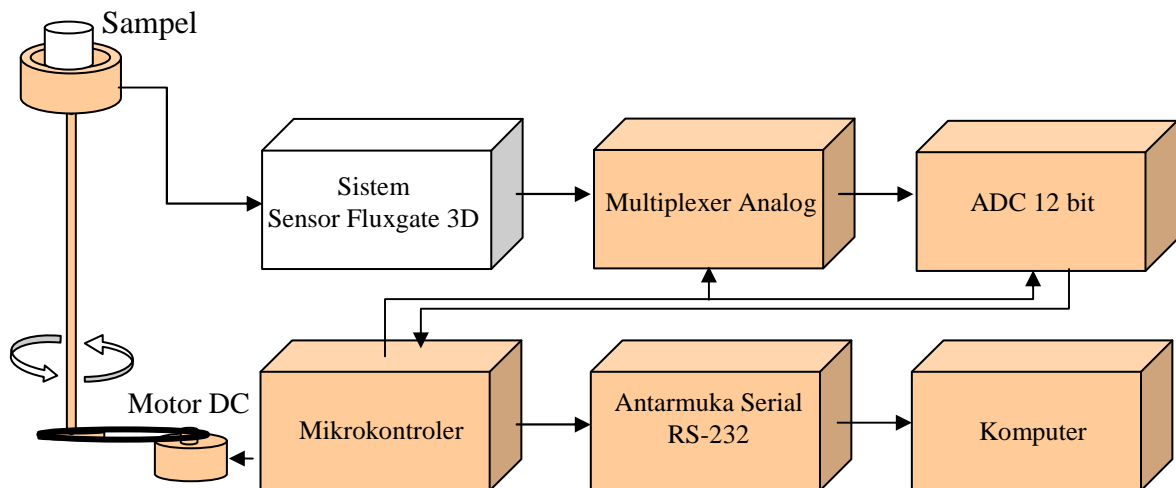
Sensor fluxgate adalah sensor medan magnet yang bekerja berdasarkan perubahan flux magnetic yang terjadi di sekitar elemen sensor. Sensor fluxgate mampu mengukur besar dan arah dari medan magnet dalam range 10^{-10} hingga 10^{-4} T. Karena itu, magnetometer berbasis sensor fluxgate didasarkan rangkaian magnetik tersaturasi.

Disisi lain, sistem pengukuran medan magnetik yang dikembangkan bergantung kepada aplikasi pengukuran. Setiap sistem

membutuhkan berbagai piranti elektronik pengolah sinyal analog dan digital, antarmuka dan display hasil pengukuran. Analisis terhadap rangkaian dari sistem pengukuran perlu dilakukan untuk menghasilkan fungsi yang diharapkan.

METODE PENELITIAN

Perangkat elektronika dari magnetometer yang dikembangkan terdiri dari lima blok utama yaitu sistem sensor magnetik fluxgate tiga dimensi dengan keluaran analog, multiplexer analog, ADC 12 bit, mikrokontroler, antarmuka serial RS232, dan display personal komputer. Gambar 1 memperlihatkan blok diagram dari sistem elektronika magnetometer untuk memudahkan pemahaman.



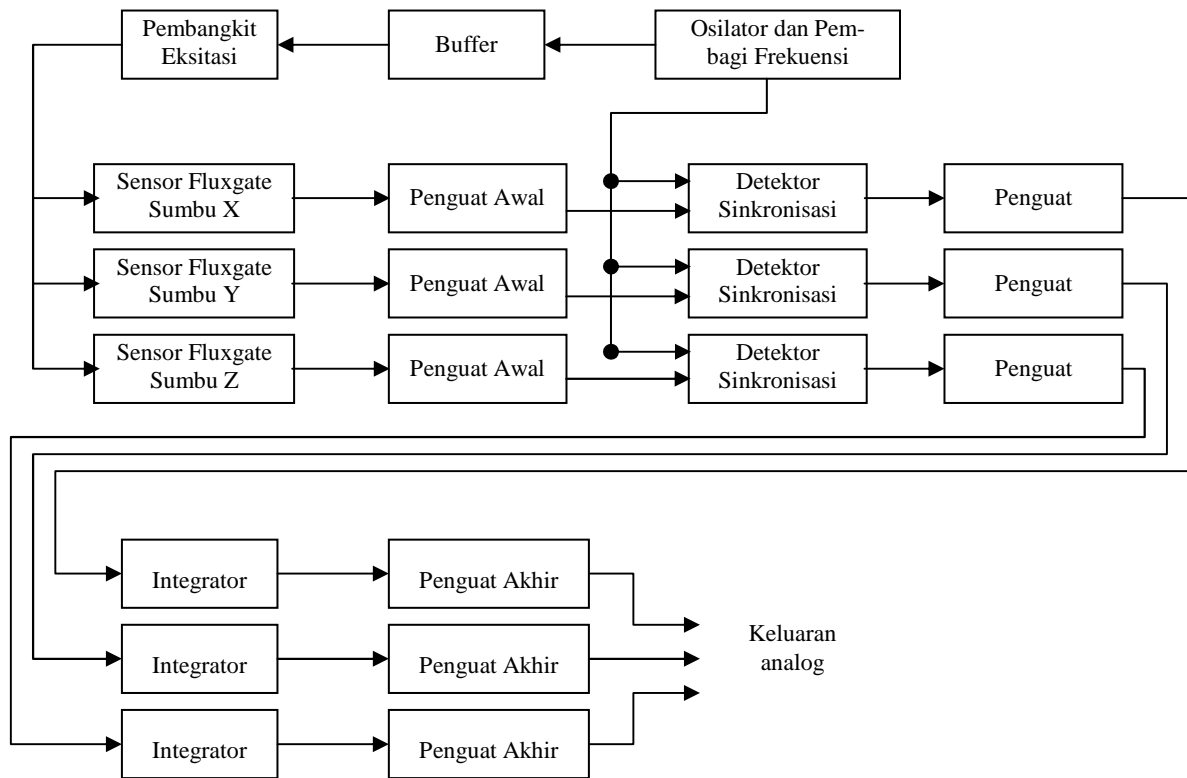
Gambar 1. Blok diagram magnetometer berbasis sensor fluxgate tiga dimensi

Berdasarkan Gambar 1 medan magnetik berupa rapat fluks magnetik yang dihasilkan oleh sampel dideteksi sensor fluxgate tiga dimensi untuk dikonversi menjadi sinyal listrik. Sinyal analog yang dihasilkan dilewatkan ke multiplexer untuk dipilih pada setiap arah sebelum dikonversi oleh ADC 12 bit. Sinyal digital yang dihasilkan ADC masuk ke mikrokontroler untuk diolah dan dikirimkan ke komputer untuk ditampilkan hasil pengukuran. Selain itu, mikrokontroler juga mengatur kerja dari multiplexer, motor dc, dan ADC 12.

Komputer membaca data hasil pengukuran melalui sistem antarmuka serial RS232.

Sensor magnetik fluxgate menggunakan sistem dua elemen dan beberapa rangkaian yang terintegrasi. Rangkaian terdiri dari rangkaian penguat awal, detektor fasa, integrator, penguat akhir, dan rangkaian eksitasi. Rangkaian eksitasi terbagi lagi menjadi rangkaian osilator, pembagi frekuensi, dan buffer. Keseluruhan rangkaian dan sensor dengan dua elemen digabungkan hingga membentuk sistem sensor magnetik fluxgate tiga dimensi pada Gambar 2.

Pengujian terhadap rangkaian pengukuran menggunakan instrumen elektronik magnetometer dilakukan melalui seperti



Gambar 2. Skema sistem sensor magnetik fluxgate tiga dimensi

osiloskop dua channel, universal digital multimeter, dan scope meter.

Teknik pengukuran terdiri dari pengukuran secara langsung terhadap variabel yang akan diukur dan pengukuran secara tidak langsung. Pengukuran secara langsung dilakukan terhadap tegangan menggunakan multimeter, medan magnetik dengan alat ukur standart. Pengukuran tidak langsung artinya pengukuran terhadap suatu variabel dengan cara melakukan pengukuran terhadap variabel lain.

Berdasarkan hasil pengukuran dilakukan analisis kesalahan, ketepatan dan ketelitian menggunakan persamaan (Jones, L.D, 1995).

$$e = Y_n - X_n \dots\dots\dots(1)$$

Disini:

Y_n = Nilai yang dipercaya atau nilai sebenarnya.

X_n = Nilai yang diukur atau nilai yang terbaca.

$$\text{Percent error} = \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \times 100 \% \dots\dots\dots(2)$$

$$A = 1 - \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \dots\dots\dots(3)$$

A = akurasi relatif atau ketepatan.

$$\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n X_n \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{Precision} = 1 - \left| \frac{X_n - \bar{X}_n}{\bar{X}_n} \right| \dots\dots\dots(5)$$

Dimana:

X_n = nilai dari pengukuran ke n

\bar{X}_n = rata-rata dari set n pengukuran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Rangkaian Magnetometer

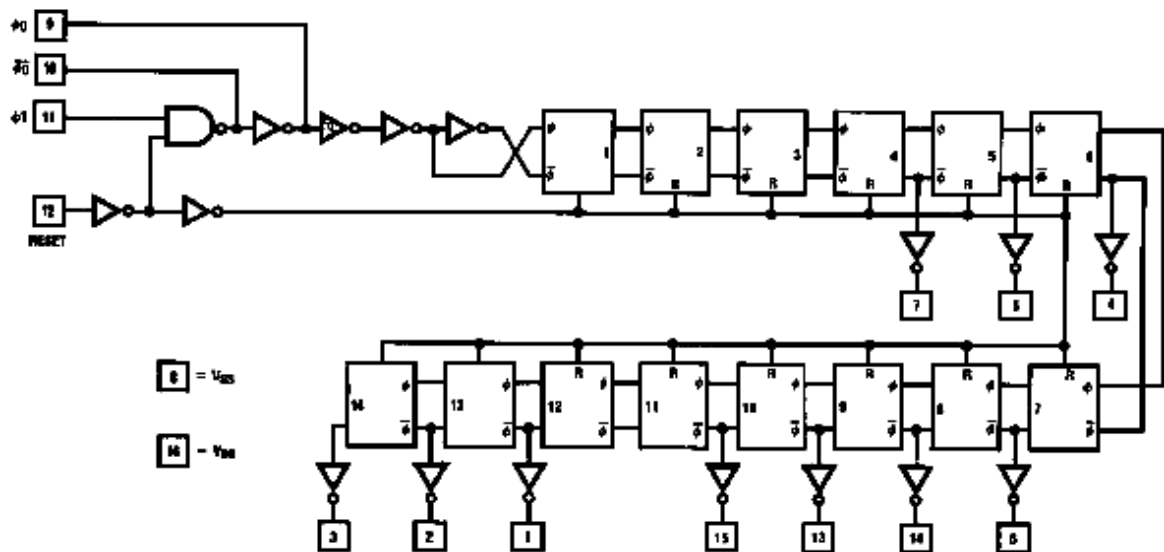
a. Rangkaian Eksitasi Sensor

Rangkaian eksitasi sensor magnetik fluxgate terdiri dari osilator sinyal eksitasi

dengan frekuensi 4 KHz, rangkaian pembagi frekuensi eksitasi dari 4 KHz menjadi 2 KHz, *buffer* untuk memantapkan sinyal eksitasi, dan pembangkit eksitasi. Sinyal eksitasi berbentuk persegi dihasilkan sebuah osilator kristal bersama-sama dengan IC CD4060 yang juga berfungsi sebagai pembagi frekuensi dengan 2^4 , 2^5 , 2^6 , 2^7 , 2^8 , 2^9 , 2^{10} , 2^{12} , 2^{13} , dan 2^{14} . Frekuensi sebesar 4.096 MHz dibagi menggunakan pembagi frekuensi 2^{10} seperti pada Gambar 3. Sinyal gelombang persegi

4 KHz dihubungkan ke rangkaian detektor fasa untuk meloloskan sinyal harmonisasi kedua ($2\omega_0$). Frekuensi gelombang ini dibagi D flip-flop menjadi 2 KHz.

Sinyal gelombang persegi yang frekuensinya telah dibagi menjadi 2 KHz ini dihubungkan ke rangkaian *buffer* eksitasi, untuk menghindari terjadinya jatuh tegangan ketika dialirkan ke rangkaian pembangkit eksitasi.

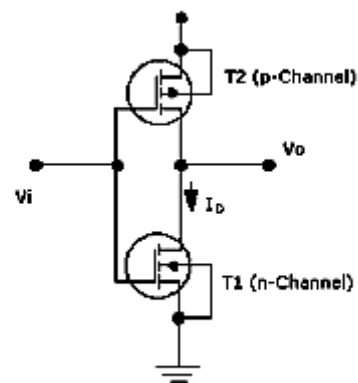


Gambar 3. Rangkaian pembagi frekuensi CD 4060

b. Rangkaian Penyangga (Buffer)

Rangkaian penyangga atau *buffer* berfungsi menghindari jatuh tegangan ketika dihubungkan pada transformator, karena hambatan masukan transformator cukup kecil sekitar 10Ω . Rangkaian penyangga menggunakan transistor MOSFET IRF9510 dan IRF840. Sinyal dilewatkan pada 6 gerbang NOT dari IC 7404 yang dirangkai paralel untuk menguatkan arus sebelum masuk ke MOSFET. Sinyal yang dikuatkan lewat pada dua transistor MOSFET yang berbeda tipe, n-MOS dan p-MOS. Dua MOSFET ini berfungsi sebagai inverter. Gambar 4 memperlihatkan rangkaian inverter CMOS (*Complementary MOS*). Ketika $V_i = V_{cc}$, T1 akan on, dan T2 akan off, maka kaluaran V_o akan sama dengan 0, karena transistor dihubungkan secara seri

dan I_D sangat kecil. Sebaliknya, saat $V_i = 0$, T1 akan off dan T2 dalam keadaan on, pada keadaan ini keluaran bernilai V_{cc} .

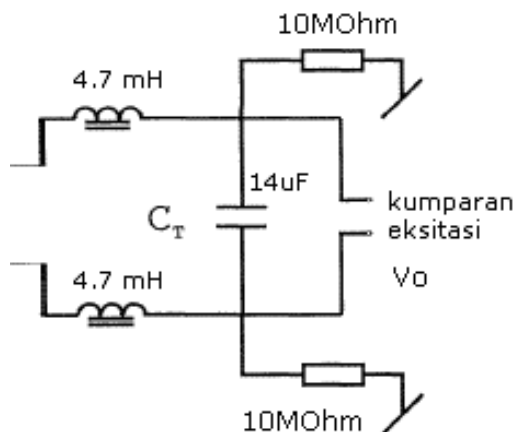


Gambar 4. Inverter MOSFET

Rangkaian buffer pada Gambar 4 memiliki daya disipasi yang rendah dan arus keluaran yang cukup tinggi.

c. Pembangkit Eksitasi

Sinyal yang kuat dan mantap diperlukan untuk membuat inti Vitrovac 6025 mengalami saturasi. Efek memori akan terjadi pada sensor jika inti tidak mengalami saturasi. Pembangkit eksitasi dibutuhkan untuk menguatkan sinyal sebelum masuk ke kumparan eksitasi. Sinyal eksitasi yang kuat dibutuhkan untuk menggerakkan kumparan eksitasi, sinyal eksitasi tidak boleh berkurang ketika masuk ke kumparan eksitasi. Daya pembangkit eksitasi harus diperhatikan agar tidak merusak kumparan eksitasi. Kumparan eksitasi yang terbuat dari kawat email berdiameter 0.1 mm dapat rusak jika daya yang dipakai terlalu besar. Pembangkit eksitasi harus dapat men-saturasikan inti tetapi tidak sampai merusak kumparan eksitasi. Rangkaian eksitasi pada Gambar 5 terdiri dari kapasitor, induktor dan resistor. Tegangan masukan dirubah menjadi arus pada keluaran, rangkaian ini disebut juga rangkaian *tank circuit*.



Gambar 5. Rangkaian pembangkit eksitasi

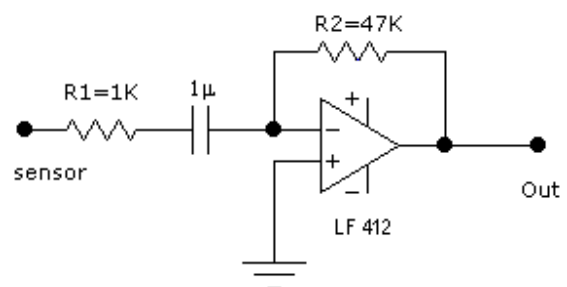
Fungsi transfer rangkaian pembangkit eksitasi pada Gambar 5 merupakan perbandingan antara tegangan keluaran dengan tegangan masukan sebagai fungsi frekuensi.

$$G(\omega) = \frac{1}{1 - 2\omega^2 LC} \dots\dots\dots(6)$$

Berdasarkan nilai komponen diperoleh faktor korelasi antara tegangan keluaran dan tegangan masukan yakni $V_o = -0.0506 V_i$. Tegangan persegi buffer ditingkatkan oleh transformator step-up dan dilewatkan pada induktor agar tegangan konstan dari transformator diubah menjadi arus konstan, C_o berfungsi menjaga arus searah tidak mengalir ke dalam transformator.

d. Penguat Awal

Penguat awal terdiri dari sebuah op-amp, satu kapasitor, dan dua resistor. Sebelum kapasitor diberi resistor penyangga senilai $0.01 R_2 - 0.1 R_2$ untuk menghindari cacat pada frekuensi tinggi. Arus dari kumparan sekunder sensor diubah menjadi tegangan pada resistor. Adanya prinsip hubungan singkat maya pada kaki membalik dan tak membalik op-amp membuat arus pada resistor sama dengan arus pada kapasitor, akibatnya terdapat perbedaan tegangan pada kaki-kaki resistor yang sama dengan keluaran op-amp. Selain itu, kapasitor juga menghambat tegangan DC dari op-amp ke sensor, sehingga tegangan dari op-amp tidak mempengaruhi keluaran sensor. Pada frekuensi tinggi rangkaian yang diperlihatkan oleh Gambar 6 berfungsi sebagai penguat sinyal.

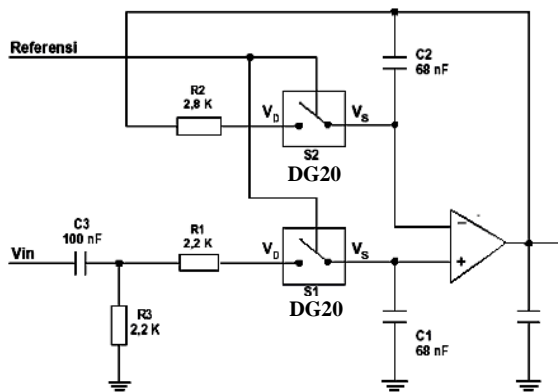


Gambar 6. Penguat awal sensor

e. Detektor Fasa

Detektor fasa dibutuhkan untuk merusak sinyal berfrekuensi harmonisasi kedua dari frekuensi dasarnya. Detektor menggunakan frekuensi referensi osilator sebagai pengendalinya dengan besar 2 kali

dari frekuensi eksitasi. Frekuensi ini langsung dari osilator sebelum masuk ke rangkaian pembagi, tidak perlu diberi buffer sebagaimana frekuensi untuk eksitasi. Besarnya frekuensi detektor fasa 4 KHz yaitu frekuensi yang menghasilkan keluaran yang cukup baik. Rangkaian detektor fasa menggunakan IC DG201 dan berisi 4 buah saklar berkecepatan tinggi hingga 100-150 ns untuk t_{on} dan t_{off} serta mempunyai kinerja baik untuk menolak harmonisa ganjil hingga lebih dari 70 dB. Setiap saklar memiliki 3 terminal yakni untuk input, output, dan driver. Jumlah saklar yang digunakan hanya dua dan setiap driver dihubungkan ke frekuensi 4 KHz, sebagai referensi.



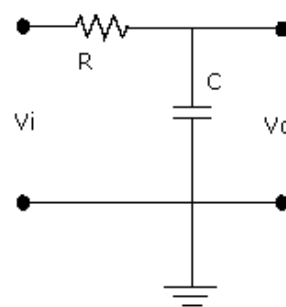
Gambar 7. Rangkaian detektor fasa

Saklar berfungsi sebagai relay. Hambatan saklar sekitar 40 – 150 Ω dalam keadaan terhubung. Harga ini bergantung pada besar tegangan power supply dan tegangan yang terdapat antara tegangan drain V_D dan tegangan source V_S . Hambatan ini juga bergantung secara non-linier terhadap V_D dan V_S . Saklar tambahan S2 diperlukan agar kesalahan tidak terjadi pada keluaran saklar yang mengakibatkan ketidakstabilan. Pada saat keadaan saklar S1 tertutup, op-amp hanya bekerja sebagai penguat tegangan yang sederhana guna menjaga tegangan pada kapasitor C1 tetap stabil dan dikuatkan. Jika saklar dalam keadaan terbuka, terjadi penyerapan oleh kapasitor C1 dan C2 terhadap muatan dari saklar. Pada saat ini C2 dan op-amp membentuk

rangkaian integrator yang menyimpan kesalahan dari peristiwa penyerapan muatan. Kesalahan dapat dihindari karena bentuk rangkaian yang simetri. Sementara itu, R2 berfungsi sebagai penjaga kesimetrian rangkaian dan sebagai pengatur offset.

f. Integrator

Sinyal masukan bolak-balik diubah menjadi tegangan DC saat rangkaian berfungsi sebagai integrator. Keluaran integrator akan nol jika sinyal masukan simetri. Jika sinyal masukan tidak simetri maka keluaran integrator tidak akan nol dan mempunyai harga tertentu. Prinsip kesimetrian inilah yang digunakan pada pembuatan sensor magnetik. Integrator juga berfungsi sebagai tapis lolos rendah, hal ini hanya bergantung dari domain waktu dan frekuensi. Domain waktu menghasilkan fungsi integrator dan domain frekuensi menghasilkan fungsi tapis lolos rendah. Rangkaian integrator pada magnetometer adalah rangkaian integrator pasif.



Gambar 8. Rangkaian integrator dan keluarannya

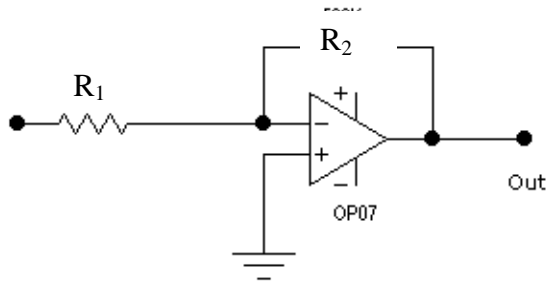
Berdasarkan Gambar 8 arus I dari masukan V_i akan mengalir tahanan R dan kapasitor C, tegangan keluaran rangkaian tergantung pada tegangan ujung-ujung kapasitor C.

$$V_o = \frac{1}{RC} \int V_i dt \dots\dots\dots(7)$$

Persamaan 7 memperlihatkan tegangan keluaran merupakan integrasi dari tegangan masukan sebagai fungsi waktu.

g. Penguat Akhir

Tegangan keluaran integrator relatif masih kecil, maka perlu dikuatkan menggunakan penguat sebelum terhubung dengan ADC. Penguat akhir ini menggunakan IC OP07 sebagai penguat membalik.



Gambar 9. Penguat akhir

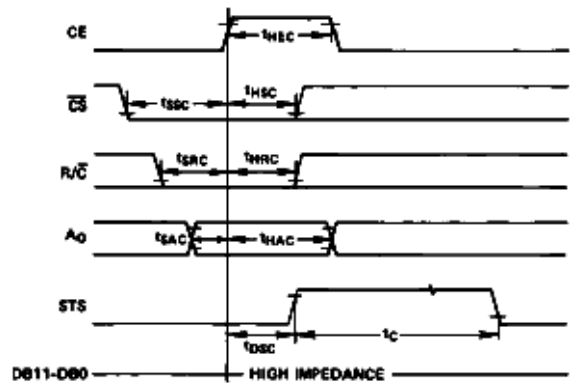
Penguat akhir memiliki penguatan yang ditentukan oleh komponen tahanan eksternal yang dipasang yaitu R_1 dan R_2 .

h. Multiplexer

Sensor fluxgate memiliki tiga keluaran analog yakni komponen x, y dan z. Pemilihan terhadap komponen keluaran sensor yang akan masukan ke ADC perlu dilakukan menggunakan rangkaian multiplexer analog IC DG508 dengan 8 buah masukan dan satu keluaran. Pemilihan masukan dikontrol melalui mikrokontroler.

i. ADC 12 Bit

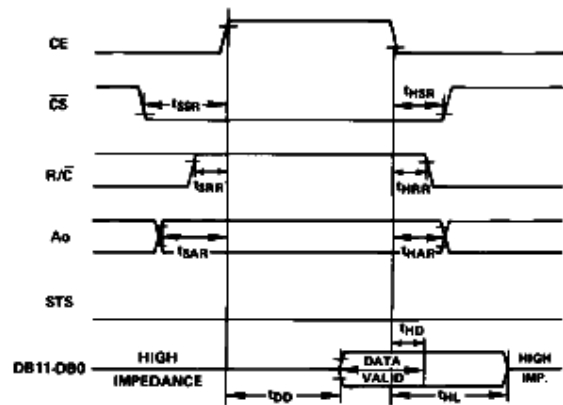
Keluaran analog sensor perlu dikonversi menjadi digital menggunakan ADC sebelum masuk ke mikrokontroler atau komputer. ADC yang digunakan adalah AD574A yang memakai metoda pendekatan berurutan (*Successive Approximation*) dan bekerja dengan umpan balik. Pada perancangan AD574A perlu diperhatikan syarat pewaktuan konversi dan pembacaan data.



Gambar 10. Pewaktu konversi AD574A

Sinyal R/C harus bernilai rendah sebelum sinyal CE dan CS bernilai tinggi. Sinyal R/C bernilai tinggi, maka operasi pembacaan dimulai. Sinyal CE dan CS digunakan sebagai tanda mulai konversi. Setelah konversi ke digital selesai, data berada pada buffer AD574A untuk dibaca.

Gambar 11 memperlihatkan diagram pewaktu pembacaan data dari buffer ke komputer atau mikroprosesor. Pembacaan data dilakukan setelah data terisi ke buffer AD574A. Sinyal CE dan R/C keduanya bernilai tinggi dan CS bernilai rendah, maka data di buffer dilepas ke bus data dari komputer atau mikroprosesor.



Gambar 11. Pewaktu pembacaan data AD574A

j. Mikrokontroler Atmel AT89S52

Pada magnetometer, mikrokontroler berfungsi untuk komunikasi data yang dihasilkan ADC dengan komputer secara serial. Mikrokontroler yang digunakan adalah AT89S52 dengan 8 Kb download able flash memori, 3 level program memori

lock, 256 byte RAM internal, 32 I/O yang dapat dipakai semua, 3 buah timer/counter 16 bit, programmable UART (serial port), SPI serial interface, programmable watchdog timer, dual data pointer, frekuensi kerja 0 sampai 24 MHz, tegangan operasi 2,7 Volt sampai 6 Volt, dan lain-lain.

k. Komunikasi Data Serial RS-232

Pengiriman data dari mikrokontroler ke komputer secara serial dapat dilakukan apabila level TTL diubah menjadi level RS232. Upaya ini dapat digunakan oleh IC MAX 232. Port serial bisa menerima dan mengirim data dalam waktu yang bersamaan. Port serial mulai bisa menerima byte yang kedua sebelum byte yang pertama dibaca oleh register penerima. Penerimaan dan pengiriman data port serial melalui SBUF. Penulisan ke SBUF berarti mengisi register pengiriman SBUF sedangkan pembacaan dari SBUF berarti membaca register penerimaan SBUF yang terpisah secara fisik (secara perangkat lunak namanya satu yaitu SBUF).

l. Display Komputer

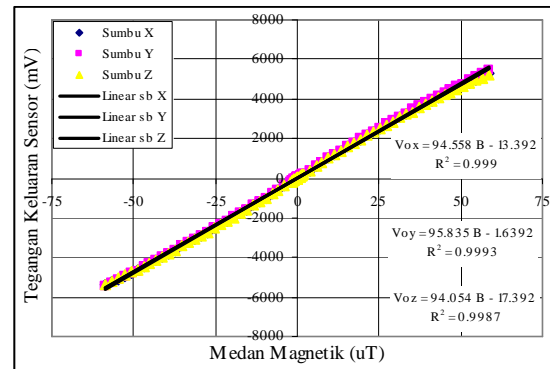
Data yang diterima komputer dari mikrokontroler melalui serial diolah dan ditampilkan menggunakan Delphi 6.0. Delphi merupakan bahasa pemrograman yang mempunyai cakupan kemampuan yang luas dan sangat canggih. Berbagai jenis aplikasi dapat dibuat dengan delphi, termasuk aplikasi untuk mengolah teks, grafik, angka, database dan aplikasi web.

2. Hasil Pengujian

a. Hubungan Tegangan Keluaran Sensor dengan Medan Magnetik

Pengambilan data untuk hubungan tegangan keluaran sensor magnetik fluxgate tiga dimensi dengan medan magnetik dilakukan melalui variasi arus listrik pada kumparan sebagai penghasil medan magnet. Dari data diplot hubungan antara tegangan keluaran sensor untuk ketiga dimensi dengan medan magnetik

kumparan pada daerah linear seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Hubungan tegangan keluaran sensor dengan medan magnetik pada daerah linear

Berdasarkan grafik terlihat bahwa daerah linear sensor berada antara -60 μ T dan 60 μ T. Semakin besar medan magnetik kumparan menyebabkan tegangan keluaran sensor semakin besar. Garis hasil pengukuran berimpit dengan pendekatan garis lurus. Berarti tegangan keluaran sensor berbanding lurus dengan medan magnetik. Melalui pendekatan garis lurus terhadap hasil pengukuran diperoleh persamaan.

$$V_{ox} = 94.558 B - 13.392 \dots\dots\dots(8)$$

$$V_{oy} = 95.835 B - 1.6392 \dots\dots\dots(9)$$

$$V_{oz} = 94.054 B - 17.392 \dots\dots\dots(10)$$

Pada persamaan, V_{ox} , V_{oy} , V_{oz} dalam satuan Volt dan B dalam satuan μ T. Angka 94,558 menunjukkan gradien atau kemiringan garis lurus untuk sumbu X, kemudian nilai tegangan sensor akan nol pada saat medan magnetik sebesar 0,14 μ T. Koefisien determinasi didapatkan 0,999 artinya 99,9 % perubahan tegangan keluaran sensor disebabkan perubahan arus listrik. Selanjutnya persamaan 9 dan 10 mengemukakan bahwa kemiringan garis lurus 95,835 untuk sumbu Y dan 95,054 untuk sumbu Z, sedangkan nilai tegangan sensor akan nol pada saat medan magnetik sebesar 0,01 μ T untuk sumbu Y dan 0,18 μ T untuk sumbu Z. Koefisien determinasi

didapatkan 0,9993 untuk sumbu Y dan 0,9987 untuk sumbu Z.

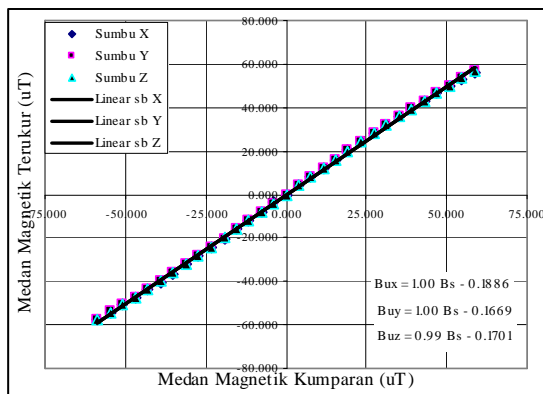
b. Pengukuran Medan Magnetik oleh Magnetometer

Data pengukuran medan magnetik kumparan menggunakan magnetometer diambil secara berulang. Dari data diplot hubungan antara medan magnetik yang terukur magnetometer dengan medan magnetik menggunakan alat standar. Gambar 13 menunjukkan hasil pengukuran medan magnetik kumparan berarus oleh magnetometer sebanyak tiga kali pengukuran. Dari grafik yang ditampilkan terlihat bahwa medan magnetik rata-rata yang terukur magnetometer untuk sumbu X, Y dan Z sebanding dengan nilai yang terukur alat standar. Melalui pendekatan garis lurus dapat diekspresikan hubungan antara medan magnetik yang terukur magnetometer dengan alat standar.

$$B_{ux} = 1.00 B_s - 0.1886 \dots \dots \dots (11)$$

$$B_{uy} = 1.00 B_s - 0.1669 \dots \dots \dots (12)$$

$$B_{uz} = 0.99 B_s - 0.1701 \dots \dots \dots (13)$$



Gambar 13. Hasil pengukuran medan magnetik kumparan oleh magnetometer

Berdasarkan persamaan dapat diungkapkan bahwa kemiringan dari garis lurus masing-masing 1,00, 1,00 dan 0,99 secara berurutan untuk sumbu X, Y dan Z. Harga-harga ini menunjukkan derajat korelasi antara medan magnetik yang terukur magnetometer dengan alat standar.

KESIMPULAN

Ada tiga kesimpulan yang dapat dikemukakan yaitu:

1. Perangkat elektronik dari magnetometer terdiri dari rangkain sistem sensor fluxgate, multiplexer, ADC 12 bit, mikrokontroler, pengubah level TTL menjadi RS232, dan catu daya teregulasi.
2. Daerah linear tegangan keluaran sistem sensor fluxgate tiga dimensi yang digunakan untuk magnetometer diperoleh dari rentang arus antara -30 mA sampai 30 mA, atau medan magnetik pada rentang antara -60 μ T dan 60 μ T.
3. Medan magnetik kumparan yang terukur oleh magnetometer berbanding lurus dengan medan magnetik yang terukur oleh alat standar dengan kemiringan garis lurus masing-masing 1,00, 1,00 dan 0,99 secara berurutan untuk sumbu X, Y dan Z. Nilai-nilai ini menunjukkan derajat korelasi yang tinggi antara medan magnetik yang terukur magnetometer dengan alat standar.

Sementara itu, ada beberapa saran yang dapat dikemukakan berdasarkan hasil yang diperoleh yaitu

1. Untuk mengurangi pengaruh medan magnetik luar yang tidak diinginkan diperlukan perancangan sistem isolasi yang lebih baik agar kesalahan pengukuran relatif kecil.
2. Hasil analisis rangkaian magnetometer ini dapat dijadikan untuk acuan pengembangan aplikasi yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

Abbott, James T, Charles D. Frederick. (1990). **Proton Magnetometer Investigations of Burned Rock Middens in West-Central Texas; Clues to Formation Processes**. Journal of Archaeological Science 17(5):535-545.

Arnold et al. (1997). **Geophysical Surveys of Stratigraphically Complex Is**

- land California Sites: New Implications for Household Archaeology.** *Antiquity* 71(271):157-168.
- Becker, Helmut. (1983). **Magnetometer Survey (Rural Economy in the Early Iron Age).** *Bulletin of the American School of Prehistoric Research* 36:79-82.
- Bevan, Bruce. (1991). **Technical Report: "Selecting a Magnetometer"**. *Society for Archaeological Sciences Bulletin* 14(4):2-5.
- Blundell et al. (1974). **Geophysical Surveys Across the Centre of the Roman Fort at Watercrock, Kendal.** *Prospezioni Archeologiche* 9:35-45.
- Breiner, Sheldon and Michael D. Coe. (1972). **Magnetic Exploration of the Olmec Civilization.** *American Scientist* 60(5):566-575.
- Brock, James and Steven J. Schwartz. (1991). **A Little Slice of Heaven: Investigations at Rincon Cemetery.** *Prado Basin, California. Historical Archaeology* 25(3):78-90.
- Barrow, Hayes, Horowitz, Rizzoni. (2003). **Linear Amplifiers and OpAmps.** *Lecture Notes.*
- Caruso, M.J., Bratland, T., Smith, C.H., Schneider, R. (1998). **A New Perspective on Magnetic Field Sensing.** Honeywell, SSEC, State Highway, Plymouth.
- Farnsworth et al. (1992). **Magnetometer Surveys.** Louisiana State University, Baton Rouge.
- Frederick, Charles D and James T. Abbott. (1992). **Magnetic Prospection of Prehistoric Sites in an Alluvial Environment: Examples from NW and West-Central Texas.** *Journal of Field Archaeology* 19(2):139-153.
- Garrod, Susan, A.R. (2000). **D/A and A/D Converters.** Purdue University, CRC Press LLC, New York.
- Gopel, W. (1989). **Sensors: A Comprehensive Survey Volume 5 Magnetic Sensor.** VCH, Weinheim.
- Cooper, W.D. (1985). **Electronic Instrumentation and Measurement Techniques.** Prentice Hall, inc, New Jersey.
- Fraden, Jacob. (1996). **Handbook of Modern Sensors.** Springer-Verlag, New York.
- Graff, Rudolf, F. (...). **Crystal Oscillators and Circuits.** Bill Sheets, K2MQJ.
- Henrichsen, K. N. (1992). **Magnetic Field Imaging.** Geneva, Switzerland
- Jones, L.D. (1995). **Electronic Instruments and Measurements.** Prentice Hall International, inc
- Ki Dong, O. (1997). **Optical Fiber Fabry-Perot Interferometer based Sensor Instrumentation System for Low Magnetic Field Measurement.** The Hanyang University, Korea.
- Kissell, T. E. (2000). **Industrial Electronics: Applications for Programmable Controllers, Instrumentations and Process Control and Electrical Machines and Motor Controls.** Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
- Loewenstein, E.B. (1999). **Analog to Digital Converter.** National Instrument, CRC Press LLC, New York
- MacLeod, A.M., Martin, P.F., Gillespie, W.A. (1999). **Computer.** University of Abertay Dundee, CRC Press LLC, New York.
- Macintyre, Steven, A. (1999). **Magnetic Field Measurement.** CRC Press LLC, New York.
- MacKenzie, I.S. (1995). **The 8051 Microcontroller.** Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
- Rudiger, G. (2004). **The Magnetic Universe: Geophysical and Astrophysical**

cal Dynamo Theory. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Simanjuntak, Henri, S.V. (2001). **Dasar-dasar Mikroprosesor.** Kanisius, Yogyakarta.

Soliman, S., Yuan, F., Raahemifar, K. (2002). **An Overview of Design Techniques for CMOS Phase Detectors.** Ryerson University, Toronto, Canada.

Sutrisno. (1986). **Elektronika Teori dan Penerapannya Jilid 1.** Penerbit ITB, Bandung.

Tauxe, Lisa. (2002). **Rock and Paleomagnetism.** Scripps Institution of Oceanography.

Technical Note. (2004). **Using Crystal Oscillators.** ChipX Inc.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. A. (1978). **Applied Geophysics.** Cambridge University Press, Cambridge.