

Sensor Magnetik Fluxgate Berkonfigurasi 2×(1000/500/1000)

Mukhlizar¹, Murhaban²

¹Prodi Teknik Industri, FTEKNIK Universitas Teuku Umar ¹Prodi
Teknik Mesin, FTEKNIK Universitas Teuku Umar E-mail:
¹mukhlizar@utu.ac.id , ²murhaban@utu.ac.id

Abstrak

Pengukuran merupakan suatu hal yang tidak dapat dipisahkan dalam kehidupan sehari-hari. Kurangnya alat ukur dengan resolusi tinggi, masih meninggalkan suatu rintangan dalam hal pengukuran medan magnetik lemah. Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk mengukur medan magnet adalah metode fluxgate. Rentang kerja sensor fluxgate untuk mendeteksi medan magnet berkisar antara $10^{-10} - 10^{-4}$ T baik DC maupun AC. Sensor fluxgate memiliki sensitivitas yang tinggi, stabil terhadap suhu tinggi, daya operasi yang rendah, ukuran yang kecil, serta resolusinya hingga 10 pT. Sehingga sensor fluxgate sangat cocok untuk mengukur medan magnetik yang lemah. Telah dilakukan karakterisasi terhadap sensor magnetik fluxgate dengan konfigurasi $2 \times (1000/500/1000)$. Sensitivitas yang diperoleh sebesar 17,793 V/ μ T dan resolusi sensor sebesar 56,2 pT/mV. Kesalahan mutlak sensor yang diperoleh maksimum sebesar 0.0334 μ T dengan kesalahan relatif sebesar 1,5%.

Kata Kunci: Fluxgate, Sensitivitas, Resolusi, Medan magnetik lemah

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi yang berkembang pesat, akhir-akhir ini telah menggeser proses manua- lisasi menjadi otomatisasi. Otomatisasi segala lini tak terlepas dari penggunaan berbagai sensor dalam hal pengawasan dan kontrol terhadap proses tersebut. Sensor merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengkonversikan besaran fisis ke besaran listrik. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan otomatisasi, maka perkembangan sensor pun semakin meningkat sesuai dengan fungsi dan kebutuhan.

Penggunaan alat ukur dengan resolusi tinggi serta mudah dan aman digunakan sangatlah penting dalam hal pengukuran, agar hasil yang diperoleh akurat dan terpercaya. Pengukuran merupakan suatu bagian yang tidak dapat dipisahkan dalam kehidupan sehari-hari, baik itu yang berhubungan dengan aktivitas manusia maupun yang menyangkut dengan fenomena alam. Salah satu gejala yang dapat diukur adalah gejala medan magnetik. Medan magnet adalah suatu besaran fisis dan digunakan dalam banyak bidang ilmu pengetahuan, seperti: geofisika, kedokteran, geologi, oseanografi, ekspedisi luar angkasa dan masih banyak bidang yang lain. Visualisasi medan magnet dalam spasial dapat dilakukan melalui pemetaan medan magnet itu sendiri. Peta medan magnet ini sangat diperlukan untuk proses desain akselerator partikel dan sistem pencitraan resonansi magnetik. Dalam eksplorasi geologi, pemetaan medan magnet dapat diterapkan karena variasi nilai dan arah dari medan magnet dapat menggambarkan permukaan atau keadaan permukaan bumi bagian dalam. Hal ini dapat dilakukan dengan cara mengukur pola medan magnetik menggunakan sensor magnet dengan medan magnet lemah.

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan dalam mengukur medan magnet, diantaranya: metode resonansi magnetik, metode induksi, metode pelat Hall dan metode fluxgate. Metode resonansi magnetik merupakan metode paling akurat diantara metode yang lain, sehingga metode ini sering digunakan untuk tujuan kalibrasi [1].

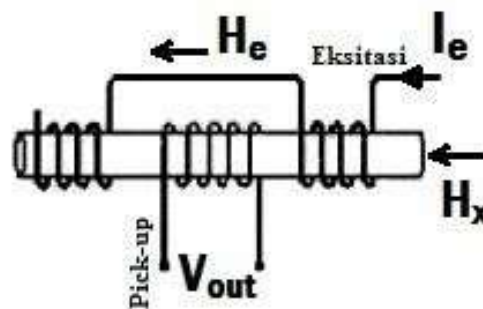
Rentang kerja sensor fluxgate untuk mendeteksi medan magnet berkisar antara 10–10⁻¹⁰–4T baik DC maupun AC. Disamping memiliki sensitivitas yang tinggi, sensor fluxgate juga mempunyai beberapa kelebihan lainnya yaitu stabil terhadap suhu tinggi, daya operasi yang rendah, ukuran yang lebih kecil, serta resolusi hingga 10 pT [7]. Sehingga sensor fluxgate merupakan solusi yang sangat cocok untuk melakukan pengukuran medan magnet yang lemah. Dalam penelitian sebelumnya, sensitivitas yang diperoleh pada penelitian tersebut sebesar 877 mV/ μ T dengan resolusi sebesar 1,14 nT/mV [3].

Pengembangan terhadap desain sensor fluxgate dilakukan untuk memperoleh tingkat sensitivitas dan resolusi yang tinggi. Dalam paper ini, akan dijelaskan hasil karakterisasi sensor magnetik fluxgate dengan konfigurasi gulungan eksitasi sebesar 100 lilitan dan gulungan pick-up sebesar litan.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Sensor Fluxgate

Sensor fluxgate adalah suatu alat yang dapat mendeteksi dan mengukur medan magnetik DC maupun AC dalam rentang 100 pT - 1 mT, dengan memanfaatkan karakteristik magnetik non- linier dari bahan feromagnetik sebagai elemen sensingnya. Dengan ukurannya yang kecil, sensor fluxgate merupakan sensor yang handal, mampu stabil pada suhu yang tinggi, konsumsi daya yang rendah membuat sensor fluxgate mudah untuk dioperasikan. Sensitivitas sensor fluxgate sangat tinggi, sehingga sangat cocok dalam penerapan yang membutuhkan resolusi dan presisi yang tinggi. Sensor fluxgate merupakan sensor vektor medan magnetik dimana selain besar medan magnetik yang terukur, sensor fluxgate juga dapat menentukan arah medannya [5].

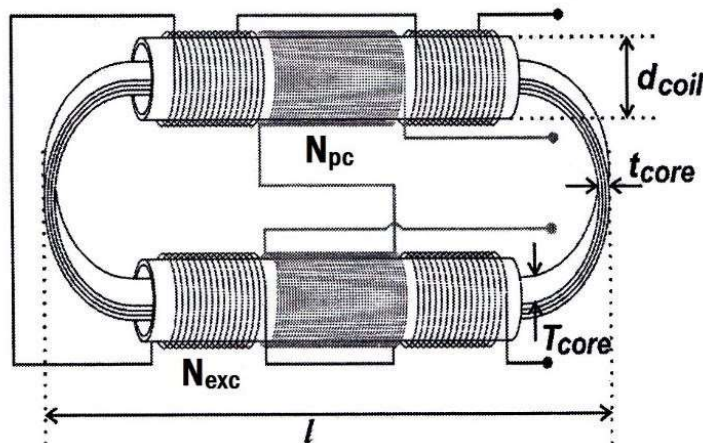


Gambar 1. Bentuk sederhana dari elemen sensor magnetik fluxgate. Dalam bentuk yang sederhana, sensor fluxgate terdiri dari kumparan primer (eksitasi) dan kumparan sekunder (pick-up). Kumparan eksitasi merupakan kumparan yang berfungsi untuk membangkitkan medan magnetik. Pada kumparan eksitasi, timbul medan magnetik yang prinsipnya sama dengan sebuah solenoida. Medan magnetik tersebut muncul karena adanya medan listrik, sesuai dengan Hukum Faraday. Perubahan medan magnetik yang ditimbulkan oleh kumparan eksitasi kemudian ditangkap oleh kumparan sekunder dan akan menghasilkan GGL induksi. Berdasarkan Hukum Ampere, banyaknya garis medan yang diterima oleh penampang kumparan akan menentukan besarnya GGL induksi.

Konversi kuat medan magnet luar yang diukur (B_{ext}) menjadi sinyal listrik tidak dilakukan secara langsung. Sensor fluxgate menggunakan medan magnet referensi (B_{ref}) dalam mengukur kuat medan atau perbedaan kuat medan diantara dua titik dalam inti sensor. Metode ini memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode pengukuran langsung, terutama yang menyangkut dengan pengukuran kuat medan magnetik yang lemah [2].

2.2. Sistem Sensor

Sistem sensor fluxgate terdiri dari rangkaian pengolah sinyal analog sensor serta elemen sensor magnetik fluxgate. Elemen sensor fluxgate terdiri dari dua kumparan eksitasi yang terletak di kedua ujung inti, sedangkan kumparan pick-up berada ditengah inti yang diapit oleh dua kumparan eksitasi saling terhubung. Rangkaian pengolah sinyal analog digunakan untuk memberikan sinyal referensi sekaligus mengubah medan magnetik eksternal menjadi besaran listrik. Selain itu tanpa adanya rangkaian pengolah analog, sensor yang akan digunakan tidak dapat dikalibrasi. Sehingga kedua komponen utama sistem sensor ini dibuat secara terpisah, namun pada waktu yang bersamaan.



Gambar 2. Elemen sensor fluxgate dengan kumparan ganda.

Sensor fluxgate dibuat dengan konfigurasi lilitan yaitu 100 lilitan eksitasi dan 500 lilitan pick-up, sedangkan Vitrovacs 6025Z yang digunakan berdimensi $1,5 \times 0,025$ mm. Pemilihan bahan inti sangat penting karena menentukan batas sensitivitas dan akurasi dari sensor [6], selain itu juga inti harus bersifat robus terhadap pengaruh luar seperti vibrasi dan deformasi mekanik. Pemilihan Vitrovacs 6025Z adalah dikarenakan inti tersebut memiliki permeabilitas magnetik yang tinggi ($\mu_r \approx 105$), memiliki medan koersivitas dan kehilangan daya yang rendah serta lebih tahan terhadap suhu yang tinggi dan pengaruh mekanik dari luar.

Medan magnetik yang dihasilkan oleh kumparan eksitasi akan menginduksi inti sensor, sehingga mengakibatkan perubahan fluks magnetik. Besarnya perubahan fluks magnetik yang terjadi, dapat ditentukan dengan Hukum Gauss melalui persamaan:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{enc} \quad (1)$$

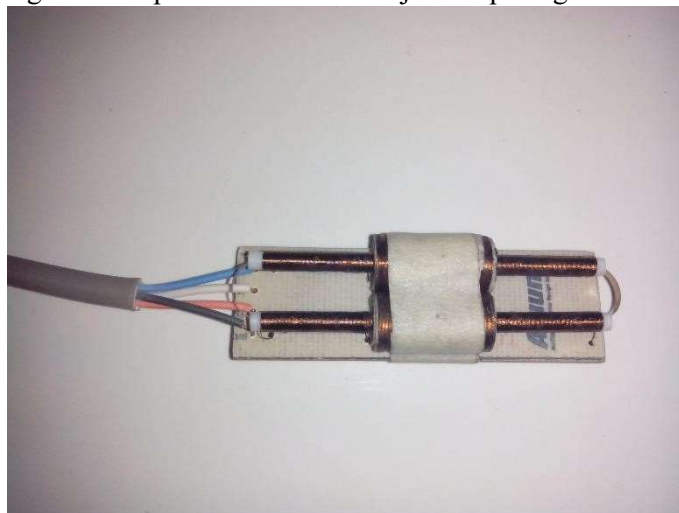
Dengan μ_r adalah permeabilitas relatif bahan inti, A luas penampang inti dan H kuat medan magnetik kumparan eksitasi. Faktor permeabilitas bahan inti sangat berpengaruh terhadap perubahan fluks magnetik di dalam kumparan eksitasi. Efek induksi magnetik yang muncul

ini, menyebabkan interferensi di kumparan pick-up. Permeabilitas relatif inti secara periodik berubah akibat perubahan medan eksitasi, sehingga tegangan induksi pada kumparan pick-up memenuhi persamaan: d

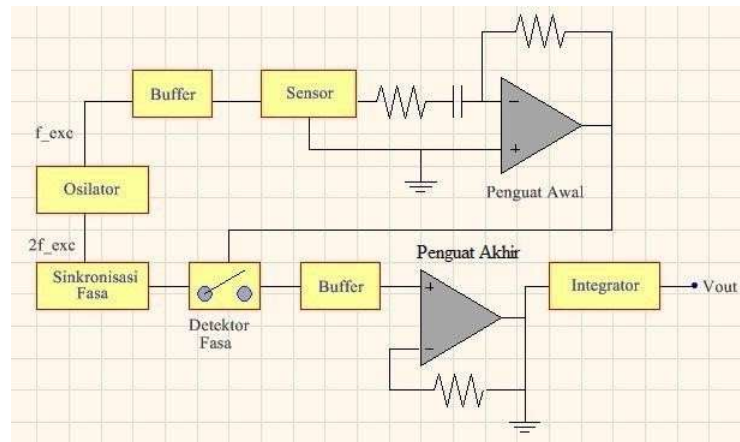
$$V_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

2.3. Rangkaian Pengolah Sinyal

Tegangan yang dihasilkan oleh sensor fluxgate akan diolah menggunakan rangkaian pengolah sinyal. Rangkaian ini terdiri dari dua bagian, yaitu bagian pertama untuk pembangkit medan eksitasi dan bagian kedua untuk kumparan pick-up. Prototipe pengolah sinyal telah diproduksi berdasarkan hasil penelitian sebelumnya [3], sesuai dengan diagram blok pada diatas dan ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 3. Bentuk final sensor.



Gambar 4. Diagram blok rangkaian pengolah sinyal sensor fluxgate.

2.4. Faktor Demagnetisasi

Ketika inti bahan feromagnetik mendeteksi medan eksternal yang homogen (H_{ext}) akan menimbulkan medan internal (H_c), namun besarnya medan internal ini tidak jauh lebih besar dari medan eksternal [3, 4]. Namun pada umumnya arah medan internal tidaklah akan selalu sama dengan arah medan eksternal. Demagnetisasi merupakan faktor yang selalu mempengaruhi output tegangan serta noise sensor. Dalam mendesain sensor, faktor demagnetisasi tidak dapat dihindari. Medan internal yang disertai oleh medan demagnetisasi (MD) ini, berbeda arah dengan medan eksternal mengakibatkan kuat medan pada inti melemah. Medan demagnetisasi yang berbeda arah dengan medan eksternal ini, dapat dirumuskan sebagai berikut:

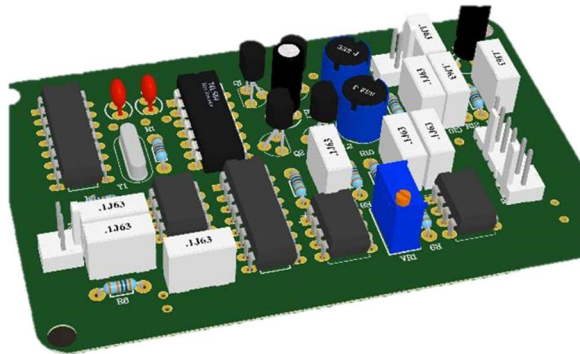
$$H_c = H_{ext} (1 - D \mu_r) \quad (3)$$

Sehingga kerapatan fluks magnetik di dalam inti menjadi:

$$B_c = \mu_0 H_c = \mu_0 H_{ext} (1 - D \mu_r) \quad (4)$$

Dengan D merupakan faktor demagnetisasi dengan nilai $0 < D < 1$, dimana μ_A merupakan permeabilitas semu, maka faktor demagnetisasi dapat dituliskan menjadi:

$$D = \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r \mu_0} \quad (5)$$



Gambar 5. Tampilan 3D rangkaian pengolah sinyal menggunakan Altium Designer.

2.5. Fungsi Transfer

Salah satu pendekatan yang cocok digunakan untuk menyelesaikan permasalahan ketidaklinieran kurva medan magnetik ialah polinomial, serta dengan mencari komponen frekuensi di dalam rapat fluks magnetik inti sensor. Hal ini akan menyederhanakan pembagian menjadi bentuk komponen frekuensi [2]. Dengan menganggap bahwa inti sensor memiliki tipe linier dan medan eksitasi berbentuk sinusoidal, maka dengan penurunan inti yang disaturasikan terhadap medan eksitasi menghasilkan:

$$H_{ref} = H_{ref\max} \sin \omega t \quad (6)$$

Kemudian disuperposisikan terhadap kuat medan eksternal (H_{ext}). Terjadi perubahan terhadap persamaan (3), dimana kuat medan magnetik di dalam inti menjadi:

$$H_{int} = \frac{H_{ext} + H_{ref\max} \sin \omega t}{1 + D \mu_r \mu_0} \quad (7)$$

maka faktor demagnetisasi untuk inti yang linier [1]:

$$D = \frac{bca_2}{\ln \frac{4a}{bc}} \quad (8)$$

dengan a , b dan c merupakan ketetapan.

Normalisasi kuat medan magnetik internal, perlu dilakukan untuk mengukur rapat fluks di dalam inti. Persamaan tersebut diperoleh melalui:

$$H_0^* = 2 B_{sat} \frac{D \mu_r \mu_0}{1 + D \mu_r \mu_0} \quad (9)$$

$$\frac{1}{r_0}$$

menghasilkan kuat medan magnetik di dalam inti menjadi:

$$\begin{aligned} H_{int} &= h_{ext} + h_{ref\max} \sin \omega t \\ h_{int} &= H_0^* \sin \omega t \end{aligned} \quad (10)$$

Kemudian kurva magnetisasi diaproksimasikan menggunakan pendekatan polinomial orde tiga (3), yaitu:

$$b = h + ah + ah^3 \quad (11) \text{ dengan } b \text{ merupakan rapat fluks magnetik}$$

ternormalisasi $b = BB_0^{-1}$ dan $B_0 = 2B_{sat}\pi^{-1}$.

Pendekatan polinomial ini digunakan untuk kedua cabang positif dan negatif dari kurva magnetisasi. Rapat fluks ternormalisasinya yaitu:

$$b = a h_{1\text{ext}} + a h_{3\text{ext}}^3 - 32 a h_{3\text{ref2max}}^2 \cos^2 \omega t + 1 a h_{3\text{ref3max}} \sin^3 \omega t - 34 a h_{3\text{ref3max}}^2 \sin^2 \omega t \quad (12)$$

$$\frac{1}{2} a h_{3\text{extrfmax}}^2 \cos^2 \omega t + \frac{1}{4} a h_{3\text{ref3max}} \sin^3 \omega t$$

Dari persamaan (13) diketahui bahwa komponen harmonisasi kedua sebanding dengan kuat medan eksternal. Amplitudo tegangan keluaran induksi diperoleh melalui persamaan:

$$V_{out} = N \frac{d\Phi}{dt} = NA \frac{dB}{dt} \quad (13)$$

Dengan N adalah total lilitan kumparan pick-up dan A merupakan luas bidang potong inti sensor. Tegangan keluaran sensor yang ternormalisasi V_{out} yaitu:

$$V_{out} = NA \frac{dB}{dt} \quad (14)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (13) ke persamaan (15), diperoleh:

$$V_{out} = B_0 \cos \omega t \left[a h_{1 \text{ ref max}} \cos^3 \omega t + h_{3 \text{ ext}} \cos^2 \omega t - \frac{1}{3} a h_{3 \text{ ref max}} \cos^4 \omega t \right] \quad (15)$$

$$\cos \omega t$$

$$\frac{1}{3} B_0 a h_{3 \text{ ref max}}$$

$$\sin^2 \omega t \left[B_0 a h_{3 \text{ ref max}} \cos^3 \omega t \right]$$

maka tegangan keluaran harmonisasi kedua pada kumparan pick-up:

$$V_{out} = 3 B_0 N A a h_{0 \text{ ext}} \sin^2 \omega t \quad (16)$$

$$V \quad dB \quad db$$

$$\omega h K_{ext} \sin^2 \omega t$$

Dengan K adalah suatu tetapan. Terlihat bahwa tegangan keluaran harmonisasi kedua berbanding lurus dengan kuat medan serta frekuensi sinyal yang diukur. Sensitivitas sensor merupakan rasio perubahan sinyal keluaran terhadap sinyal masukan [2], secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$S_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{3 B_0 N A a h_{0 \text{ ext}} \sin^2 \omega t}{V_{in}} \quad (17)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = h_{ext}$$

Dapat disimpulkan bahwa nilai sensitivitas sensor akan maksimum apabila memperhatikan beberapa faktor, yaitu jumlah lilitan kumparan sekunder, permeabilitas dan luas penampang inti, serta frekuensi sinyal eksitasi.

2.6. Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor perlu dilakukan untuk mengetahui karakterisasi sensor fluxgate terhadap medan magnet. Untuk menghindari atau mengurangi pengaruh medan magnet dari lingkungan luar, proses kalibrasi medan magnet dan sensor dilakukan di dalam ruang Faraday. Pada tahap ini, proses kalibrasi sensor menggunakan kalibrator yang berfungsi sebagai medan magnet luar DC. Kalibrator ini terbuat dari kumparan kawat berbentuk solenoida dengan diameter 4 cm dan panjang 30 cm. Jumlah lilitan yang digunakan sebanyak 600 lilitan dengan diameter kawat sebesar 0,7 mm, serta hambatan total sebesar 3,529 Ω dengan posisi Timur ke Barat untuk mengurangi pengaruh medan magnetik bumi.

II. HASIL DAN PEMBAHASAN

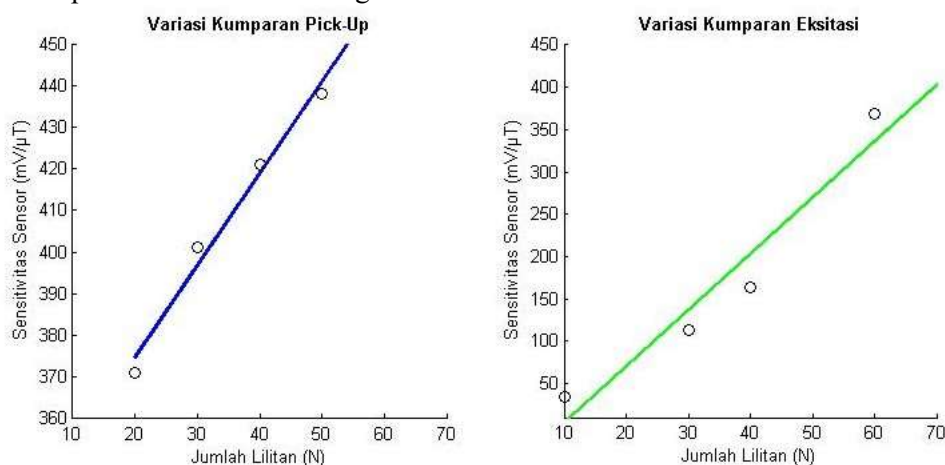
3.1. Pengaruh Jumlah Lilitan Eksitasi dan Pick-Up

Penelitian sebelumnya [3], melakukan karakterisasi terhadap sensor fluxgate dengan variasi jumlah lilitan eksitasi dan lilitan pick-up. Sensitivitas sensor dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (17), yaitu:

$$S_v = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \quad (18)$$

Dari gambar 6 terlihat bahwa dengan penambahan jumlah lilitan eksitasi, maka akan memperbesar rapat fluks magnetik inti sensor sehingga sensitivitas sensor meningkat. Kemudian, dilakukan juga konfigurasi lilitan sensor dengan memvariasikan jumlah lilitan pick-up.

Semakin banyak jumlah lilitan sekunder (pick-up), maka laju perubahan fluks magnetik inti semakin cepat sehingga meningkatkan kemampuan sensor dalam memberikan respon terhadap keberadaan medan magnetik luar.



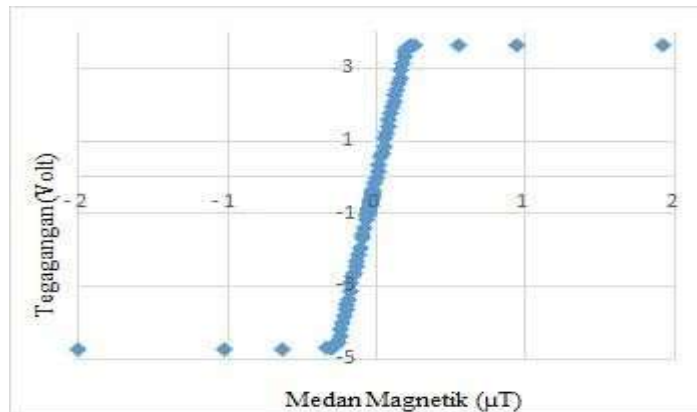
Gambar 6. Hubungan variasi lilitan Eksitasi dan Pick-Up terhadap sensitivitas sensor.

Jika diperhatikan dengan seksama terhadap gambar 6, karakteristik kenaikan sensitivitas sensor terhadap variasi lilitan eksitasi dan pick-up meningkat secara linier. Walaupun dari kedua gambar tersebut, linieritas kurva belumlah sempurna. Hal ini terkait dengan berbagai faktor, dikarenakan sensor dibuat secara konvensional. Linieritas kenaikan sensitivitas sensor tersebut, sesuai dengan teori [2] yang menyatakan bahwa karakteristik sensor meningkat secara linier.

Penambahan jumlah lapisan inti justru akan menurunkan sensitivitas dari sensor. Dengan bertambahnya jumlah lapisan inti akan membuat luas geometri penampang inti menjadi lebih besar, sehingga induktansi sensor menjadi lebih tinggi dan meningkatkan faktor demagnetisasi. Peningkatan faktor demagnetisasi akan menyebabkan inti lebih lama tersaturasi, sehingga sensitivitas sensor semakin menurun.

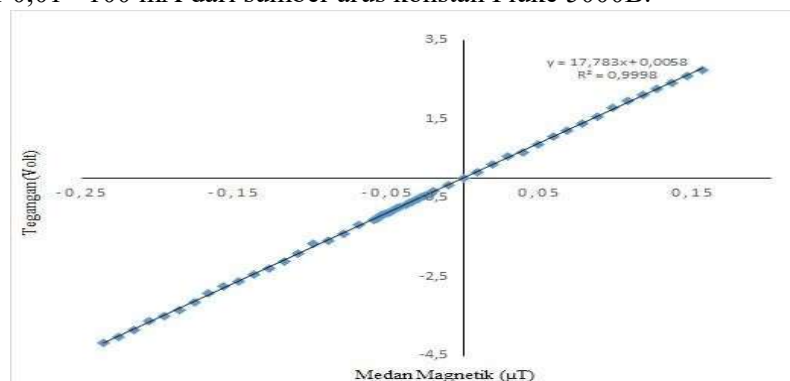
3.2. Pengembangan Sensor dengan Konfigurasi $2 \times (1000/500/1000)$

Telah dilakukan karakterisasi sensor fluxgate dengan konfigurasi kumparan eksitasi sebanyak 100 lilitan dan kumparan pick-up sebanyak 500 lilitan. Lilitan kumparan pick-up dibuat dengan jumlah 5 lapis, dengan konfigurasi tiap lapisan 100 lilitan dan setelah lapisan pertama akan dilapisi menggunakan isolasi berbahan non magnetik. Hasil karakterisasi sensor ditampilkan pada gambar 7.



Gambar 7. Hasil karakterisasi sensor magnetik fluxgate.

Karakterisasi sensor dilakukan di dalam ruang Faraday, dengan mengalirkan arus 80 mA sampai dengan -80 mA pada kumparan kalibrasi. Sedangkan induktansi kumparan diukur menggunakan LCR meter GW Instek seri 829 pada frekuensi 10 kHz. Sebelum proses kalibrasi sensor terhadap kalibrator sebagai medan eksternal, dilakukan kalibrasi terhadap kalibrator terlebih dahulu. Kalibrasi kumparan kalibrator yaitu dengan mengalirkan arus DC sebesar 0,01 - 100 mA dari sumber arus konstan Fluke 5000B.



Gambar 8. Kurva linierisasi keluaran sensor.

Kemudian medan magnet yang timbul akibat arus yang mengalir tersebut, diukur menggunakan Teslameter standar. Karena kumparan kalibrator dibuat cukup panjang dibandingkan dengan elemen sensor, maka induksi magnetik di dalam kalibrator dapat dianggap homogen. Sehingga pada akhir proses kalibrasi, akan didapatkan hubungan kuat medan magnet induksi di dalam kumparan kalibrator (B) terhadap kuat arus dari sumber (I).

Berdasarkan gambar 8, diperoleh persamaan linier untuk kurva keluaran sensor dengan persamaan:

$$y = 17,783x + 0,0058 \quad (19)$$

Secara tidak langsung, persamaan (19) menyatakan hubungan tegangan keluaran terhadap kuat medan, sehingga persamaan tersebut menjadi:

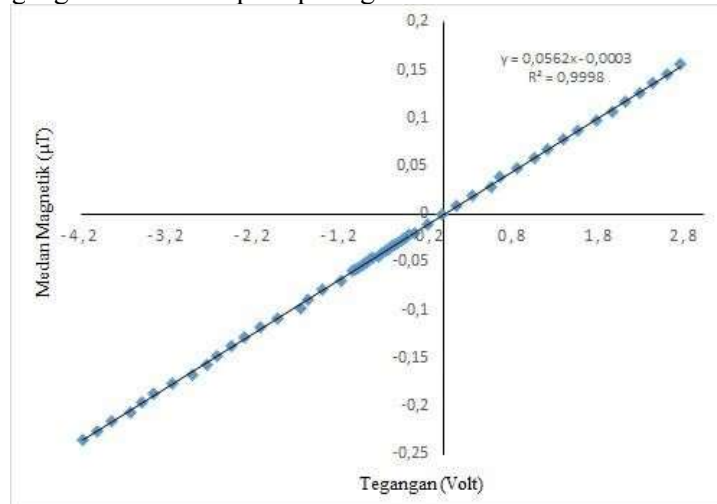
$$V = 17,783B + 0,0058 \quad (20)$$

Dengan menggunakan persamaan (20), dapat diperoleh nilai sensitivitas sensor yaitu

17

dan resolusi sensor sebesar $0,05623 \text{ nT/V}$ atau $0,56,23 \text{ pT/V}$

Dari invers grafik pada gambar 8, diperoleh persamaan medan magnetik terukur berdasarkan tegangan keluaran seperti pada gambar di bawah.



$,783 \text{ V}/\mu\text{T}$

mV .

Gambar 9. Kurva medan magnetik terukur terhadap tegangan keluaran sensor.

Dari grafik diatas diperoleh persamaan medan magnetik hasil pengukuran sensor, yaitu:

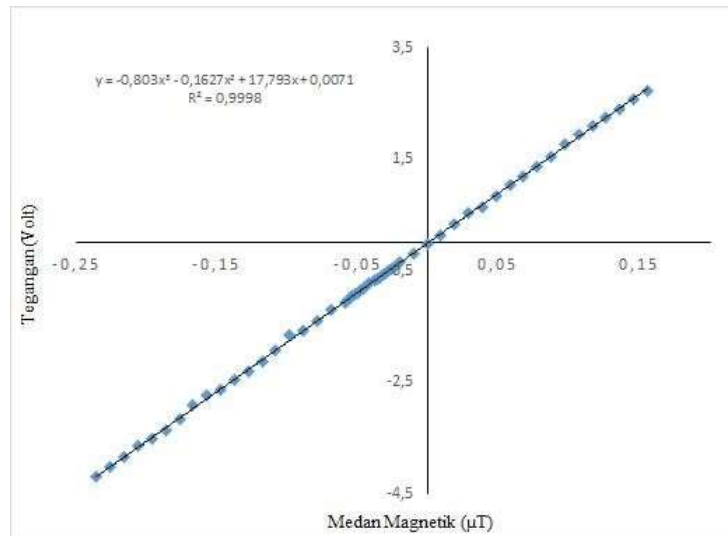
$$B \text{ V} \square \square 0,0562 \text{ V} \square 0,0003 \quad (21)$$

Dari gambar 7 terlihat inti sensor telah tersaturasi dengan ditandai oleh output sensor yang konstan meskipun arus yang dialirkan diperbesar, maka dapat ditentukan bahwa daerah linier kurva terletak pada rentang $\pm 0,15 \mu\text{T}$, pada daerah ini terdapat hubungan linier antara tegangan keluaran sensor terhadap kuat medan yang terukur oleh sensor.

Rentang kerja sensor yang linier dapat dilihat pada gambar 8. Tampak bahwa kurva linierisasi sensor belumlah sempurna. Hal ini disebabkan oleh kurang simetrisnya lilitan pada kumparan eksitasi. Mengingat ukuran inti yang cukup kecil, yaitu panjang kurang dari 4,6 cm, lebar 1,5 mm sangat sulit untuk melilitkan kawat kumparan dengan diameter 0,12 mm dan dengan jumlah 10 lapisan untuk kumparan pick-up secara manual. Kurang rapatnya kawat pada tiap lapisan kumparan pickup, membuat lilitan semakin bergeser dari ukuran yang seharusnya. Akibatnya, kumparan eksitasi pun akan bergeser sehingga membuat lilitan kumparan eksitasi menjadi tidak simetris.

3.3. Pendekatan Polinomial Orde 3

Salah satu pendekatan yang cocok dalam menyelesaikan ketidaklinieran selain persamaan linier adalah menggunakan polinomial. Dengan menggunakan polinomial, sinyal harmonisasi kedua dari sensor fluxgate dapat ditentukan [2].



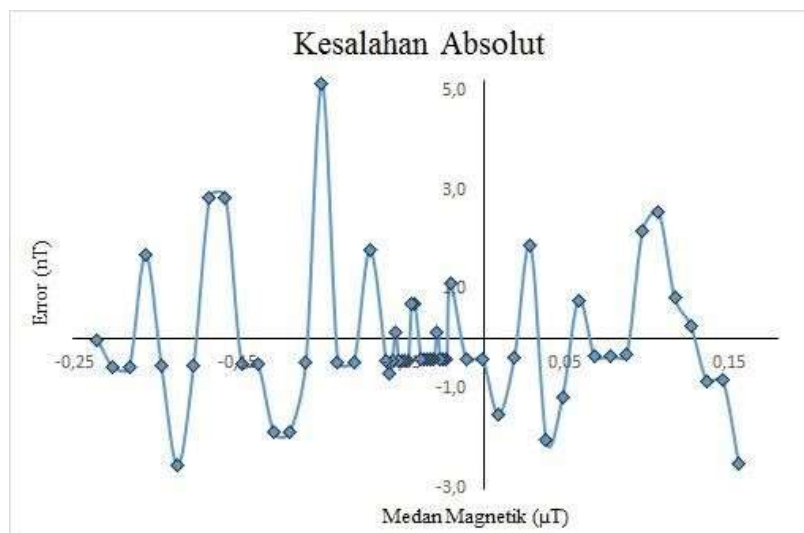
Gambar 8. Kurva keluaran sensor dengan menggunakan pendekatan polinomial orde 3.

Dari Gambar 8 diperoleh persamaan pendekatannya yaitu:

$$y = -0,803x^3 + 0,1627x^2 + 17,793x + 0,0071 \quad (22)$$

Sehingga jika dikonversikan ke hubungan tegangan keluaran sensor terhadap medan magnet menjadi:

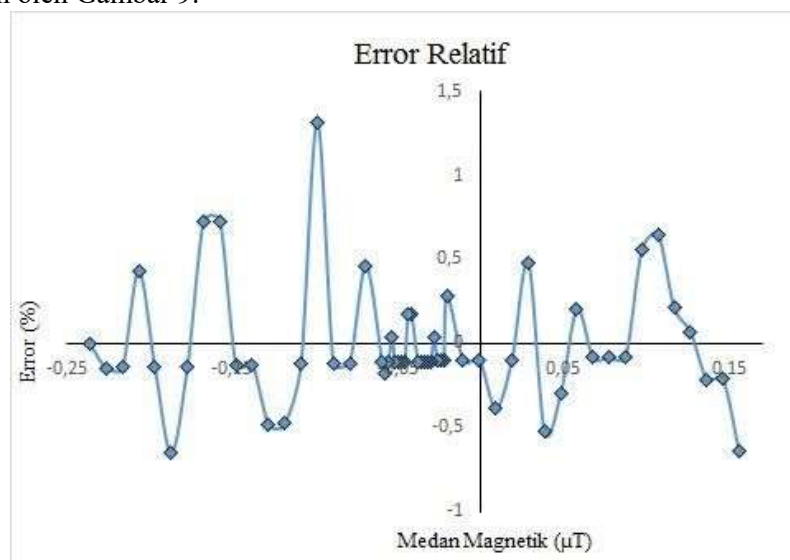
$$V = 17,793B + 0,0071 \text{ dengan } B = 0,0562 \text{ V} / 0,0004 \quad (23)$$



Gambar 9. Kurva kesalahan mutlak sensor

Maka dari persamaan (IV.11), dapat ditentukan sensitivitas sensor yang diperoleh sebesar $17,793 \text{ V} / \mu\text{T}$ dengan resolusi $0,0562 \text{ nT} / \mu\text{T}$ atau $56,2 \text{ pT} / \mu\text{T}$. Untuk mengetahui kesalahan absolut sensor menggunakan pendekatan polinomial orde 3, maka perlu dicari persamaan invers untuk mengetahui hubungan medan magnetik terhadap output sensor.

Berdasarkan persamaan (IV.12), diperoleh kesalahan absolutnya sebesar 5,152 nT pada daerah medan magnetik $-0,0987 \mu\text{T}$. Rentang kesalahan absolut sensor menggunakan pendekatan polinomial orde 3 adalah sebesar 7,692 nT. Grafik kesalahan absolut sensor ditunjukkan oleh Gambar 9.



Gambar 10. Kurva kesalahan relatif sensor.

Gambar 10 menunjukkan kesalahan relatif dari sensor. Kesalahan relatif dari sensor menggunakan polinomial orde 3 ditunjukkan oleh gambar 10, dimana kesalahan relatif maksimum sebesar 1,32% pada daerah medan $-0,0987 \mu\text{T}$.

Kesalahan relatif yang diperoleh dari sensor menggunakan dua metode pendekatan diatas 1%, disebabkan oleh ketidaksimetrisan sensor sehingga mengakibatkan tidak stabilnya pembacaan nilai sensor. Dengan menggunakan pendekatan linier diperoleh kesalahan relatif maksimum sebesar 1,3% dan menggunakan polinomial orde 3 sebesar 1,32%. Untuk itu diperlukan pengembangan lebih lanjut mengenai teknik penggulungan kumparan agar diperoleh kesalahan relatif yang lebih kecil.

IV. KESIMPULAN

Pengembangan sensor fluxgate dengan konfigurasi lilitan $2 \times (1000/500/1000)$ dibuat dengan cara konvensional, yaitu penggulungan kumparan dilakukan secara manual. Kumparan pick-up terdiri dari lima lapisan, dimana tiap lapisan terdiri dari 100 lilitan dan dipisahkan oleh suatu lapisan isolatif. Sensor fluxgate ini menggunakan inti ferromagnetik Vitrovacs 6025Z berbentuk oval, dikarenakan Vitrovacs 6025Z memiliki permeabilitas magnetik sangat tinggi ($\mu_r \approx 105$), tersaturasi pada induksi magnetik sebesar 0,55 T, koersivitas dan kehilangan daya rendah, serta tahan terhadap suhu tinggi dan pengaruh deformasi mekanik dari luar.

Sensitivitas sensor yang diperoleh menggunakan pendekatan polinomial orde 3 sebesar 1,8 V dan resolusi sebesar 0,56 nT dimana kesalahan absolut maksimum sebesar 0,0334 μT serta kesalahan relatif sensor sebesar 0,85%. Dengan resolusi sensor magnetik fluxgate tersebut, sangat dimungkinkan penggunaan sensor ini untuk mengukur medan magnetik lemah.

V. SARAN

Adapun saran yang perlu diperhatikan untuk pengembangan selanjutnya adalah:

1. Menambah jumlah lilitan kumparan sekunder, untuk memperoleh resolusi yang lebih tinggi.
2. Membuat gulungan kumparan secara pabrikasi, agar diperoleh kesimetrisan kumparan yang lebih baik.
3. Menganalisa kembali rangkaian pengolah sinyal, agar didapatkan pembacaan hasil yang lebih stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Djamal and R. N. Setiadi. Pengukuran medan magnet lemah menggunakan sensor magnetik fluxgate dengan satu koil pick-up. *ITB Sains & Teknologi*, 38:100, 2006.
- [2] W. Gopel, J. Hesse, and J. N. Zemel. *Sensors A Comprehensive Survey*, volume 5. VCH, Germany, 1989.
- [3] W. Indrasari. Pengembangan sistem pengukuran medan magnet material magnetik di bawah permukaan tanah dengan metode induksi elektromagnetik berbasis sensor fluxgate. Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2014.
- [4] J. Kubik and P. Ripka. Racetrack fluxgate sensor core demagnetization factor. *Sensor & Actuators*, (143):237 – 244, 2008.
- [5] J. Kubik, J. Vcelak, T. O'Donnell, and P. McCloskey. Triaxial fluxgate sensor with electroplated core. *Sens. Actuators, A*, 152:139–145, 2009.
- [6] O. V. Nielsen, J. R. Petersen, F. Primdahl, O. Brauert, B. Hernando, A. Fernandez, J. M. G. Merayo, and P. Ripka. Development, construction and analysis of the 'oersted' fluxgate mag- netometer. *J. of Meas. Sci. Technol*, 6:1099–1115, 1991.
- [7] P. Ripka. Advances in fluxgate sensors. *Sens. Actuators, A*, 106: hal 8–14, 2003.