

## Pengembangan Sensor Getaran Dua Dimensi Menggunakan Sistem Sensor *Fluxgate*

**Sandijal Putra )\***

MAN Lima Puluh Kota

E-mail: sandhi\_guru@yahoo.co.id

**Raudhatul Jannah)\***

Jurusan Tadris IPA Fisika, Fakultas

Tarbiyah dan Keguruan UIN Imam Bonjol

Padang E-mail:

raudhatuljannah74@yahoo.co.id

**Abstract:** *In this study, Fluxgate made with a design 30 and 20 winding excitation coil pickups. Fluxgate used to measure vibrations in two dimensions. Vibration measurements performed indirectly by using two mechanical pendulum to vibrate in the direction of axis x and y are placed on the source of vibration. Fluxgate sensor working principle is developed when there is vibration, then the magnetic mass at the end of the pendulum arm will come to move in rhythm with the vibration. This will result in the distance between the sensor with a magnetic mass changes. Changes in this distance will lead to changes in magnetic induction at the core of the sensor. Because of the large magnetic field intensity received by the sensor varies with the distance the vibration amplitude changes that occur will result in a change in voltage generated by the sensor. This means that the emf is happening is a function of the distance between the sensor with a magnetic mass. Fluxgate sensor is placed in the direction of axis x and y. Based on analysis of data obtained sensitivity of the sensor x and y with the same value that is  $\pm 39 \text{ mV} / \mu\text{T}$ . The range of frequencies that can be detected by sensors in this study were 0.37 Hz to 1.81 Hz and amplitude range that has been carried out ranging between 0.7 cm to 2.3 cm. Maximum absolute error and maximum relative error in the characterization of the frequency obtained is happening on the sensor y of 0.054 Hz and -2.18%. For amplitude obtained is happening on the sensor x 0,005 volt and 3,28%.*

**Intisari:** Pada penelitian ini, *Fluxgate* yang dibuat dengan desain 30 lilitan eksitasi dan 20 lilitan pick up. *Fluxgate* digunakan untuk mengukur getaran secara dua dimensi. Pengukuran getaran dilakukan secara tidak langsung dengan memakai dua bandul mekanik yang dapat bergetar dalam arah sumbu x dan y yang diletakkan pada sumber getar. Prinsip kerja sensor *Fluxgate* yang dikembangkan adalah ketika terjadi getaran, maka massa magnetik yang berada di ujung lengan bandul akan ikut bergerak seirama dengan getaran. Hal ini akan berakibat jarak antara sensor dengan massa magnetik mengalami perubahan, ini akan mengakibatkan perubahan induksi magnetik pada inti sensor. Perubahan induksi magnetik. Karena besarnya intensitas medan magnet yang diterima oleh sensor berubah terhadap jarak maka perubahan amplitudo getaran yang terjadi akan berakibat pada perubahan tegangan yang dihasilkan oleh sensor. Ini berarti bahwa ggl yang terjadi merupakan fungsi jarak antara sensor dengan massa magnetik. Sensor *fluxgate* ditempatkan dalam arah sumbu x dan y. Berdasarkan analisa data diperoleh sensitivitas sensor x dan y dengan nilai yang sama yaitu  $\pm 39 \text{ mV} / \mu\text{T}$ . Rentang frekuensi yang dapat dideteksi oleh sensor pada penelitian ini adalah 0,37 Hz sampai 1,81 Hz dan rentang amplitudo yang telah dilakukan berkisar antara 0,7 cm sampai 2,3 cm. Kesalahan absolute maksimum dan kesalahan relative maksimum pada karakterisasi terhadap frekuensi yang didapat adalah terjadi pada sensor y sebesar 0,054 Hz dan -2,18%. Pada karakterisasi alat terhadap amplitudo didapat kesalahan absolute maksimum dan kesalahan relative maksimum pada sensor x sebesar 0,005 volt dan 3,28%.

**Keywords:** Fluxgate, getaran, frekuensi, amplitudo, sensitivitas, induksi magnetic

## PENDAHULUAN

Tantangan utama terhadap teknologi sensor masa kini adalah mengukur besaran-besaran yang selama ini sulit atau tidak bisa diukur dan meningkatkan nilai informasi sensor. Untuk mendapatkan kemampuan sensor atau sistem sensor yang optimal perlu dipilih kombinasi yang tepat antara teknologi dengan sistem pengolah sinyal sensor yang digunakan (Djamal, M., 2010).

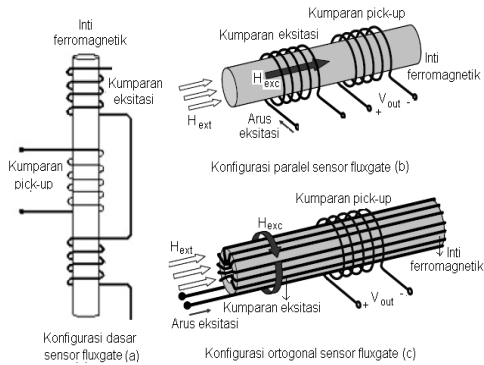
Indonesia sebagai salah satu negara yang memiliki potensi gempa yang cukup besar, perlu mengembangkan suatu sensor yang dapat mendeteksi getaran, terutama getaran yang memiliki amplitudo cukup kecil yang sangat sulit dideteksi dengan menggunakan alat pendeteksi yang sudah ada. Instrumen yang dapat mendeteksi getaran gempa tersebut diharapkan dapat memberikan informasi secepat mungkin ke pusat informasi seperti Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), sehingga korban jiwa akibat gempa dapat diminimalisir.

Berdasarkan permasalahan di atas, maka perlu adanya sensor yang dapat mendeteksi suatu getaran yang sangat kecil yang dapat diaplikasikan pada berbagai bidang terutama untuk mendeteksi gempa bumi. Berdasarkan prinsip dalam mengukur getaran, maka sensor getaran dapat dibedakan sebagai berikut: Proximeters, Seismic-Velocity Pickups, Akselerometer dan Laser Vibration. Sensor ini pada saat mengukur getaran umumnya ditempelkan pada objek yang akan diamati getarannya. *Fluxgate* merupakan salah satu sensor magnetik yang dapat digunakan dalam mendeteksi getaran tanpa harus kontak dengan objek yang bergetar, yang bekerja dengan memanfaatkan perubahan medan magnet yang ditimbulkan (Yulkifli, 2010). Kelebihan lain *fluxgate* adalah ukurannya kecil, kebutuhan daya rendah, dan

mempunyai kestabilan yang tinggi terhadap temperatur dengan koefisien sensitivitas temperatur  $30 \text{ ppm}^{\circ}\text{C}$  dan koefisien offset  $0.1 \text{ nT}$  (Ripka, P., 2001). Dalam penelitian ini kami mencoba mengembangkan aplikasi lain dari sensor *fluxgate* yaitu Pengembangan Sensor Getaran Dua Dimensi Menggunakan Sistem Sensor *Fluxgate*.

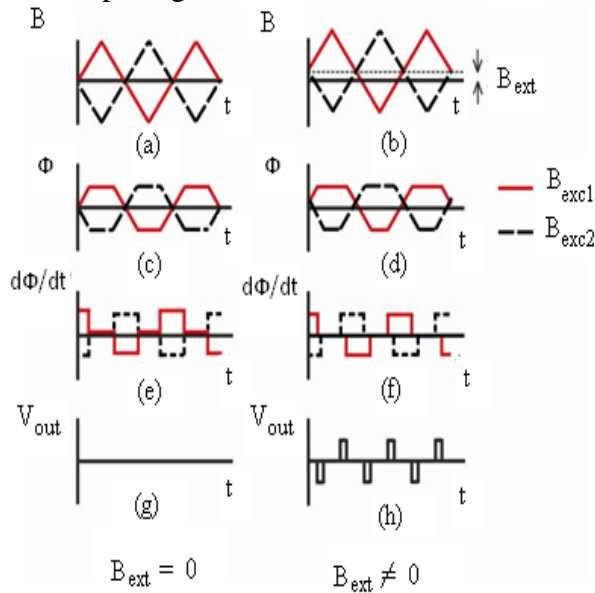
Getaran adalah gejala mekanika dinamik yang mencakup periode gerak osilator di sekitar posisi referensi atau berupa gerakan bolak-balik yang digambarkan sebagai amplitudo atau simpangan terjauh dari titik setimbang. Untuk mendeteksi getaran suatu objek dengan memanfaatkan informasi getaran diperlukan sensor getaran dengan resolusi tinggi (Poyhonen, dkk., 2003). Untuk mendeteksi getaran dikembangkan berbagai alat berupa sensor getaran.

Sensor *fluxgate* adalah sensor magnetik yang bekerja berdasarkan perubahan flux magnetik di sekitar elemen sensor (Zorlu, O. dkk., 2007). Elemen sensor *fluxgate* terdiri dari kumparan primer (*excitation coil*), kumparan sekunder (*pick-up coil*) dan inti ferromagnetik (*core*). Kumparan primer berguna untuk membangkitkan medan eksitasi ( $H_{exc}$ ) yang akan digunakan sebagai medan referensi, medan magnet referensi bisa berbentuk sinyal bolak-balik. Sinusoida, segitiga atau persegi, yang di eksitasikan pada inti ferromagnetik (*core*), sedangkan kumparan sekunder berguna untuk menangkap perubahan flux magnetik yang dihasilkan oleh superposisi medan referensi dengan medan magnet eksternal ( $H_{ext}$ ) dalam bentuk tegangan gaya gerak listrik (ggl).



**Gambar 1.** (a). Konfigurasi dasar kumparan elemen fluxgate, (b) konfigurasi parallel fluxgate (Ando, dkk., 2006) dan (c) konfigurasi orthogonalele men fluxgate (Zorlu, 2008).

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 manetik fluxgate adalah 1-20 kHz. Bentuk tegangan masukan dan keluaran harmonisa kedua terlihat pada gambar di bawah.



**Gambar 2.** Prinsip Kerja Sensor Fluxgate (Grueger, H., 2000)

Prinsip kerja sensor Fluxgate ketika mengukur perubahan medan magnet luar ditunjukkan pada gambar 2. 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 flux terhadap waktu pada  $B_{ext} = 0$ ; (f) Perubahan flux terhadap waktu pada  $B_{ext} \neq 0$ ; (g) Tegangan keluaran sensor pada  $B_{ext} = 0$ ; (h) Tegangan keluaran sensor pada  $B_{ext} \neq 0$ .

Tegangan keluaran  $V_{out}$  dari elemen sensor diolah dengan menggunakan rangkaian pengolah sinyal. Pengolah sinyal sensor terdiri dari beberapa bagian, yaitu differensiator, detektor, sinkronisasi fasa, integrator, dan penguat akhir.

Untuk mengevaluasi tegangan keluaran sensor fluxgate digunakan fungsi transfer. Fungsi transfer suatu sensor magnetik fluxgate menggambarkan hubungan antara tegangan keluaran  $V_0$  dengan medan magnet yang diukur. Fungsi transfer dapat dihitung menggunakan pendekatan polinomial kemudian mencari komponen frekuensi yang ada di dalam kerapatan fluks magnetik inti sensor. Penggunaan pendekatan polinomial teknik harmonisa kedua akan memudahkan untuk menyederhanakan fungsi transfer ke dalam komponen frekuensi (Nielsen, OV. dkk.,1995). Perubahan fluks magnetik yang berasal dari kumparan eksitasi ditangkap oleh kumparan pick-up dalam bentuk tegangan listrik. Komponen tegangan keluaran harmonisa kedua  $V_{out2h}$  dari kumparan pick-up adalah:

$$V_{out2h} = -3B_0NA\omega a_3h_{ext}h_{refmax}^2 \sin 2\omega t \quad (1)$$

Dengan  $B_0$  adalah amplitudo medan eksitasi, N jumlah lilitan pick-up, A luas penampang inti,  $\omega$  frekuensi sudut,  $h_{ext}$  medan eksternal dan  $h_{refmax}$  adalah medan referensi dari eksitasi. Persamaan (1) dapat ditulis dalam bentuk sederhana menjadi persamaan (2)

$$V_{out2h} = h_{ext}Ksin2\omega t \quad (2)$$

Dengan K adalah konstan

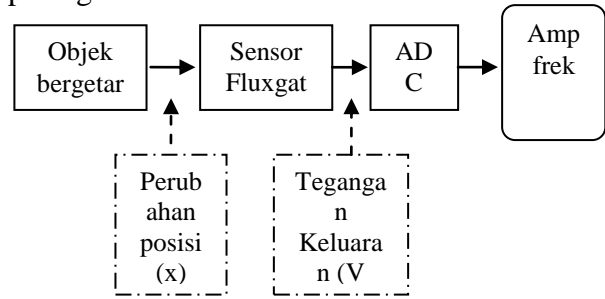
$$K = -3B_0NA\omega a_3h_{refmax}^2 \quad (3)$$

Terlihat dengan jelas pada persamaan (3) bahwa tegangan keluaran harmonisa kedua dari sensor sebanding dengan medan magnet yang diukur ( $h_{ext}$ ) (Djamal, M.,2005).

Kerja sensor *fluxgate* dalam mendeteksi getaran adalah berdasarkan pada perubahan posisi dari suatu objek yang bergetar, perubahan posisi ini disebut amplitudo. Apabila objek yang bergerak itu merupakan bahan magnet maka saat bergerak akan terjadi perubahan fluks magnetik disekitarnya. Perubahan fluks magnetik akibat berubahnya posisi dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi suatu benda yang sedang bergetar. *Fluxgate* sebagai sensor mempunyai konsep perubahan medan magnet dalam mendeteksi suatu objek. Berdasarkan kesamaan konsep ini, maka *Fluxgate* dapat dijadikan sebagai sensor getaran.

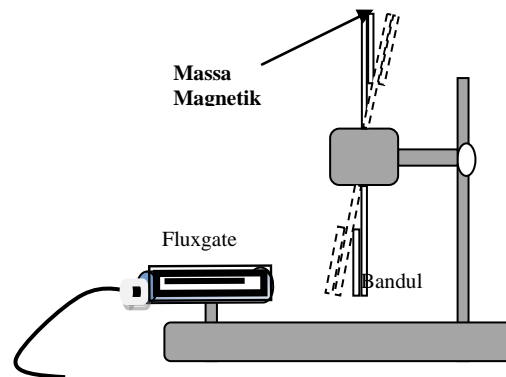
*Fluxgate* bekerja dengan cara membangkitkan medan magnet untuk dirinya sendiri sebagai medan magnet acuan, jika terdapat bahan magnet yang bergetar pada posisi  $x$  maka sensor akan mendeteksi perubahan posisi ( $x$ ) dari getaran tersebut melalui perubahan acuan medan magnetik pada intinya (Hendro, 2007).

Prinsip kerja pengukuran getaran berdasarkan perubahan posisi ini terlihat pada gambar di bawah:



Gambar 3. Prinsip kerja *fluxgate* sebagai sensor getaran

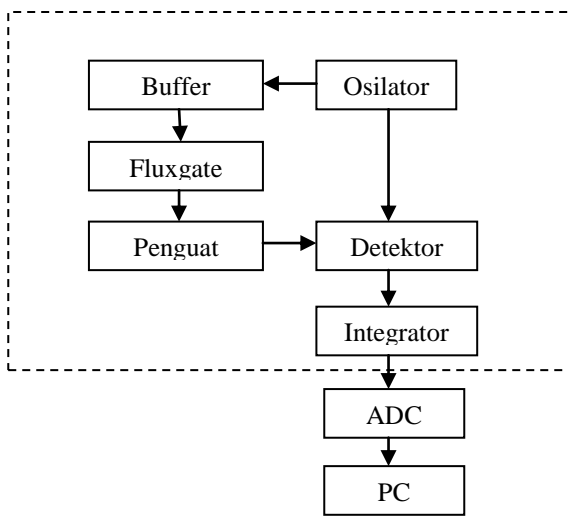
Aplikasi sensor getaran berbasis *fluxgate* yang dilakukan menggunakan teknik tidak langsung. Posisi sensor dengan objek yang bergetar ditempatkan pada satu sistem kesatuan. Objek magnetik ditempatkan pada sebuah bandul mekanik yang berfungsi mengubah getaran pada objek menjadi gerakan massa magnetik yang mengganggu medan magnetik pada inti sensor *fluxgate*. Perubahan posisi atau jarak antara massa magnetik (target) dengan sensor akan menyebabkan perubahan medan magnet yang diterima oleh sensor. Prinsip kerja pengukuran getaran berdasarkan perubahan posisi ini terlihat pada gambar di bawah:



Gambar 4. Model mekanik sistem sensor getaran berbasis *fluxgate* dengan teknik pengukuran tidak langsung.

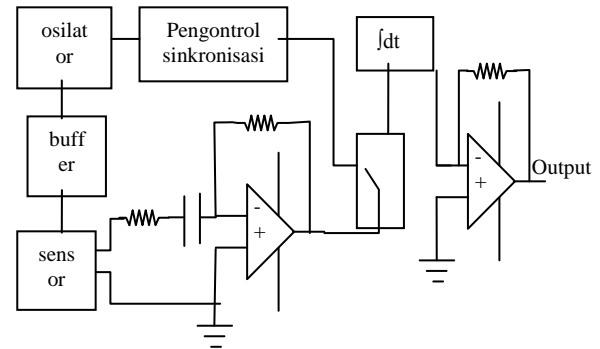
Sensor *Fluxgate* diletakkan dengan jarak tertentu dari ujung bahan magnet yang bergetar. Ketika benda magnet bergetar maka medan eksternal yang ditangkap oleh inti sensor mengalami perubahan. Perubahan ini menunjukkan tingkat frekuensi dan amplitudo getaran dalam bentuk keluaran berupa sinyal listrik.

Untuk dapat mengukur getaran dalam arah dua dimensi maka Sensor *Fluxgate* dibuat dalam dua koordinat sumbu x dan y dengan rancangan seperti gambar



**Gambar 5.** Rancangan sistem sensor getaran Dua dimensi

Untuk satu sistem sensor *Fluxgate* terdiri dari beberapa rangkaian dasar yang terintegrasi. Rangkaian tersebut adalah bagian osilator, buffer, pengolah sinyal, display dan bagian inti sensornya sendiri. Semua bagian tersebut digabung menjadi suatu bagian yang terintegrasi seperti berikut:

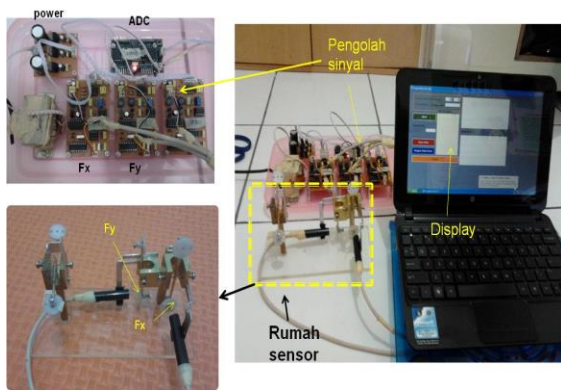


**Gambar 6.** Diagram rangkaian sensor medan magnetik

Osilator akan membangkitkan sinyal yang besarnya disesuaikan dengan keperluan. Disini kita gunakan osilator kristal dengan frekuensi 4.096 MHz. Pembangkit sinyal ini akan mengeluarkan dua keluaran yang diatur oleh sebuah IC CD4060, yang pertama dihubungkan ke bagian buffer dan yang kedua dihubungkan ke bagian pengontrol sinkronisasi. Sinyal yang masuk ke bagian buffer akan diubah menjadi frekuensi 4 KHz, yang kemudian sinyal ini menjadi masukan pada bagian kumparan eksitasi sensor (kumparan sekundernya). Jika terdapat medan magnet luar, maka semua sinyal yang masuk ke kumparan sekunder ini akan dijumlahkan. Selisih sinyal atau medan magnet pada kedua kumparan sekunder akan terbaca pada bagian kumparan pick-up. Kemudiansinyal masuk kebagian penguat awal dan sekaligus sebagai integrator. Sinyal yang masuk ke dalam integrator diteruskan ke detektor fasa. Detektor fasa akan membandingkan sinyal masukan terhadap pengontrol sinkronisasi menghasilkan sinyal harmonik kedua dengan frekuensi dua kali dari semula sekitar 8 KHz, sedangkan sinyal harmonik ganjil akan ditapis. Sinyal diteruskan kebagian integrator, disini semua sinyal

berfrekuensi tinggi dan noise diredam sehingga hanya tinggal sinyal berfrekuensi rendah. Sinyal ac frekuensi lemah di masukan kedalam penyearah dc dan dikuatkan kembali dibagian display.

Sinyal Keluaran dari ADC diolah dengan menggunakan perangkat lunak Visual Basic 2008 untuk didisplay kan di komputer. Dengan menggunakan perangkat lunak akan terlihat bentuk keluaran dari sensor dan data yang di dapat langsung terekam ke dalam komputer dalam format Microsoft excel. Sehingga akan lebih memudahkan pengguna dalam mengolah data yang didapat sesuai dengan keinginan.



Gambar 7. Sistem sensor getaran Dua dimensi

**METODE:**

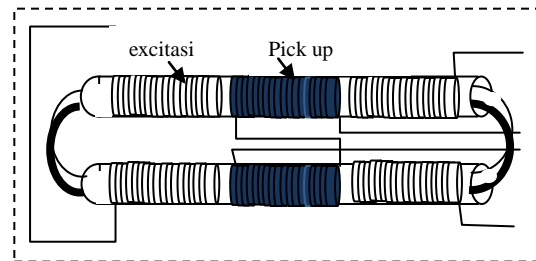
Penelitian dilakukan dengan menggunakan metoda eksperimen, terdiri dari 5 tahap. Adapun langkah-langkah yang diambil adalah; (1) Mendesain probe sensor (2) Mendesain rumah sensor yang dapat mendeteksi dan mengukur getaran secara dua dimensi, (3) Mendesain rangkaian pengolah sinyal, (4) mendesain perangkat lunak untuk membaca hasil keluaran dari sensor ke komputer. (5) melakukan uji kepresisian alat.

Untuk mengetahui karakteristik sistem sensor magnetik dilakukan pengukuran dengan memberikan medan magnet yang berasal dari kumparan kalibrasi dengan cara memberikan arus pada kumparan kalibrasi.

Ketika terjadi getaran, maka massa magnetik yang berada di ujung lengan bandul akan ikut bergerak seiring dengan getaran. Hal ini akan berakibat jarak antara sensor dengan massa magnetik mengalami perubahan. Perubahan jarak ini akan mengakibatkan perubahan induksi magnetik pada inti sensor. Hasil dari perubahan induksi magnetik ini akan diubah menjadi ggl induksi oleh kumparan *pick-up*. Karena besarnya intensitas medan magnet yang diterima oleh sensor berubah terhadap jarak maka perubahan amplitude getaran yang terjadi akan berakibat pada perubahan tegangan yang dihasilkan oleh sensor. Ini berarti bahwa ggl yang terjadi merupakan fungsi jarak antara sensor dengan massa magnetik.

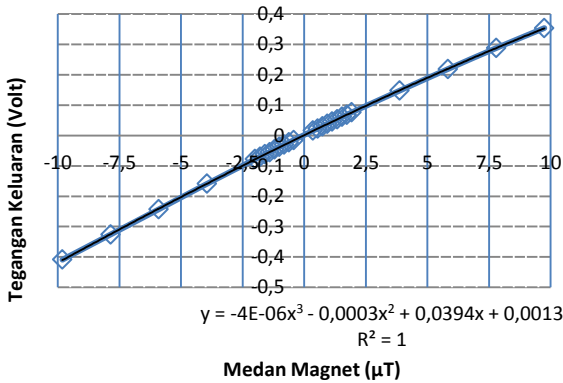
**HASIL DAN PEMBAHASAN:**

Produk dari penelitian ini adalah sebuah prototipe alat ukur getaran dua dimensi berbasis *fluxgate*, dengan desain elemen sensor menggunakan dua kumparan primer (*excitation coil*) yang dililitkan pada inti ferromagnetik secara simetris, dan satu kumparan sekunder.

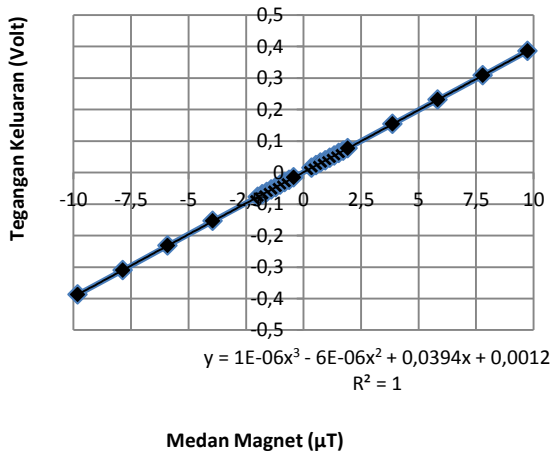


Gambar 8. Desain sensor *fluxgate*

Tiga buah Sensor *fluxgate* yang dibuat memiliki sensitivitas sebesar  $\pm 39$  mV/ $\mu$ T daerah kerja dari -10  $\mu$ T sampai +10  $\mu$ T. Kesalahan mutlak dan relatif maksimum untuk masing-masing sensor Fx adalah -0,229  $\mu$ T dan -1,172 % dan Fy adalah 0,0168  $\mu$ T dan 0,086 %. Konfigurasi sensor *fluxgate* yang dibuat adalah 30 lilitan eksitasi dan 20 lilitan pick-up.



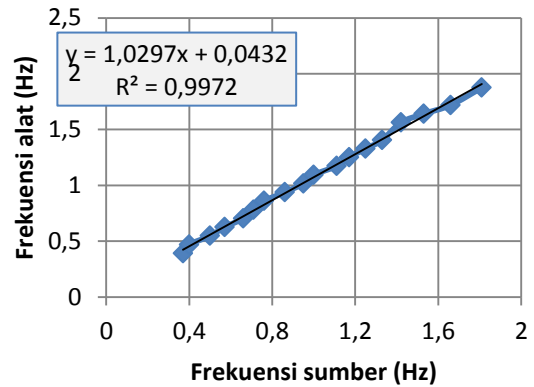
Gambar 9. Kurva uji kalibrasi sensor Fx di dalam ruang Faraday



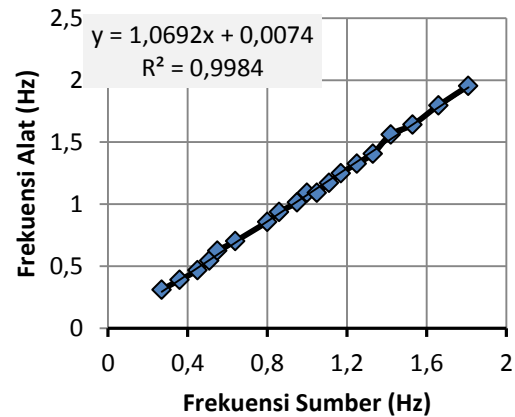
Gambar 10. Kurva uji kalibrasi sensor Fy di dalam ruang Faraday

Berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan bahwa alat yang dibuat mampu merespon perubahan frekuensi rendah mulai dari 0.37 Hz sampai 1.81 Hz. Pengukuran dilakukan dengan bervariasi frekuensi

getar sumber. Langkah ini dimaksudkan untuk mengetahui seberapa besar frekuensi getar sumber yang mampu di respon sensor dengan baik. Dari pengukuran yang telah dilakukan didapatkan respon sensor terhadap frekuensi cukup baik dengan penyimpangan terbesar adalah -2,18 % pada sensor Fy.



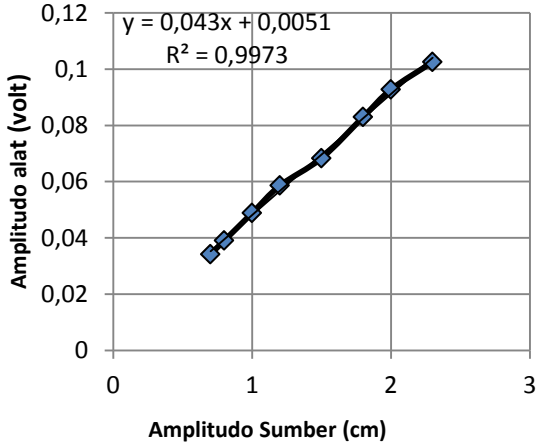
Gambar 10. Kurva respon frekuensi FFT alat terhadap frekuensi sumber getar pada sensor Fx



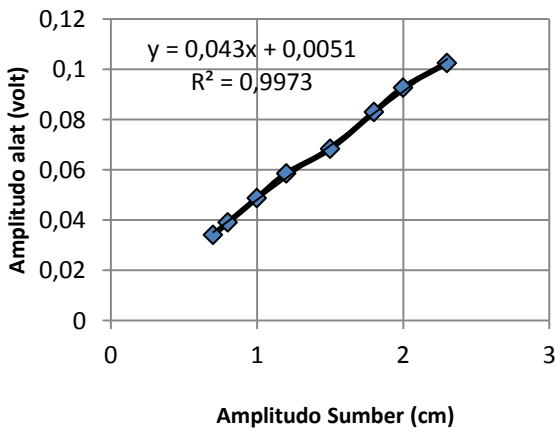
Gambar 11. Kurva respon frekuensi FFT alat terhadap frekuensi sumber getar pada sensor Fy

Selanjutnya pengukuran dilakukan dengan bervariasi amplitudo getar sumber. Langkah ini dimaksudkan untuk mengetahui hubungan antara amplitudo sumber getar dengan amplitudo yang dihasilkan alat. Dari pengukuran yang telah

dilakukan didapatkan respon sensor terhadap amplitudo dengan penyimpangan terbesar adalah 3,28 % pada sensor x.

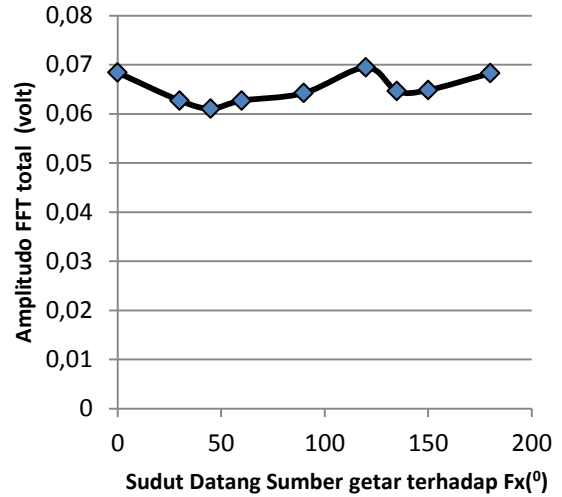


**Gambar 12.** Kurva respon amplitude FFT alat terhadap amplitude sumber getar pada sensor Fx



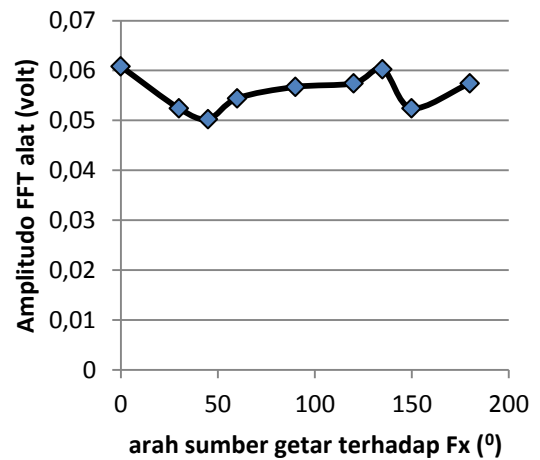
**Gambar 13.** Kurva respon amplitude FFT alat terhadap amplitude sumber getar pada sensor Fy

Selanjutnya dilakukan pengujian dengan cara bervariasi arah datang getaran pada kedua sensor. Pada eksperimen ini frekuensi dan amplitude sumber getar diatur tetap.



**Gambar 14.** Kurva respon amplitude FFT total kedua sensor terhadap arah datang sumber getar

Untuk mengetahui pengaruh arah datang sumber getar terhadap keluaran sensor secara dua dimensi maka dilakukan pengukuran dengan cara mengatur frekuensi dan amplitude konstan, sedangkan arah sumber getar di bervariasi mulai dari sudut 0° sampai dengan 180° terhadap sensor X (Fx). Dari pengukuran di dapatkan hasil seperti gambar



**Gambar 15.** Kurva hubungan antara amplitude FFT alat dengan arah sumber getar pada saat frekuensi dan amplitude sumber konstan.

Dapat dilihat bahwa amplitudo total dari kedua sensor pada saat arah getaran



divariasikan hampir mendekati konstan. Kesalahan relative maksimum terdapat pada sudut datang sumber getar  $120^{\circ}$  sebesar 6,4 %.

Penyimpangan yang terjadi menurut analisa penulis disebabkan karena pengaruh noise dari kalibrator dan rumah sensor alat itu sendiri.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Telah berhasil dibuat dua buah Sensor *fluxgate* yang memiliki sensitivitas sebesar  $\pm 39 \text{ mV}/\mu\text{T}$  daerah kerja dari  $-10 \mu\text{T}$  sampai  $+10 \mu\text{T}$ . Kesalahan mutlak dan relatif maksimum untuk masing-masing sensor  $F_x$  adalah  $-0,229 \mu\text{T}$  dan  $-1,172 \%$ ,  $F_y$  adalah  $0,0168 \mu\text{T}$  dan  $0,086 \%$ . Konfigurasi sensor *fluxgate* yang dibuat adalah 30 lilitan eksitasi dan 20 lilitan pick-up.

Pada pengujian karakterisasi sensor terhadap frekuensi hanya dapat dilakukan pada range frekuensi 0,37 Hz sampai dengan 1,81 Hz karena keterbatasan alat kalibrator yang digunakan. Dari hasil karakterisasi terhadap frekuensi, sensor yang dibuat hanya mampu mendeteksi dengan baik pada range frekuensi 0,37 Hz sampai 1,81 Hz. Dan dari karakterisasi sensor terhadap perubahan amplitude maksimum sumber telah dilakukan pada range 0,7 cm sampai dengan 2,3 cm sesuai dengan ketersediaan pada alat kalibrator yang digunakan telah mampu di deteksi oleh sensor dengan cukup baik.

Untuk penelitian lebih lanjut, dapat dilakukan kajian ulang untuk sensor getaran dalam arah sumbu z. Juga daerah frekuensi

dan amplitude kalibrator bisa ditingkatkan agar diketahui daerah maksimal kerja sensor. Selain itu, penggunaan sensor juga bisa dikembangkan untuk mengukur frekuensi getaran gempa untuk mengevaluasi getaran gempa yang memiliki frekuensi rendah.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan kepada Dosen Pembimbing serta ITB yang telah memberikan fasilitas kepada penulis dalam melakukan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Djamal, M. (2010): *Sensor dan Sistem Sensor: State of the Art, Kontribusi dan Perspektif Pengembangannya di Masa Depan*, Pidato Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung.
- Djamal, Mitra. R. N. Setiadi. (2006) : Pengukuran Medan Magnet Lemah Menggunakan Sensor Magnetik Fluxgate dengan satu kumparan pick-up, *Journal Proceedings ITB*.
- Djamal, Mitra., Setiadi, R.N., Yulkifli. (2008): Preliminary study of Vibration Sensor Based on Fluxgate Magnetic Sensor, *Proc. ICMNS*, Indonesian.
- Gopel, W., Hesse, J., Zemel, J.N. (1989): *Sensors A Comprehensive Survey Volume 5 Magnetic Sensor*. VCH., Weinheim. 154-201.
- Yulkifli. (2010) : *Pengembangan Elemen Fluxgate dan Penggunaannya untuk Sensor-sensor Berbasis Magnetik dan Proksimiti*. Disertasi S3 Program Studi

Doktor Fisika Institut Teknologi  
Bandung.