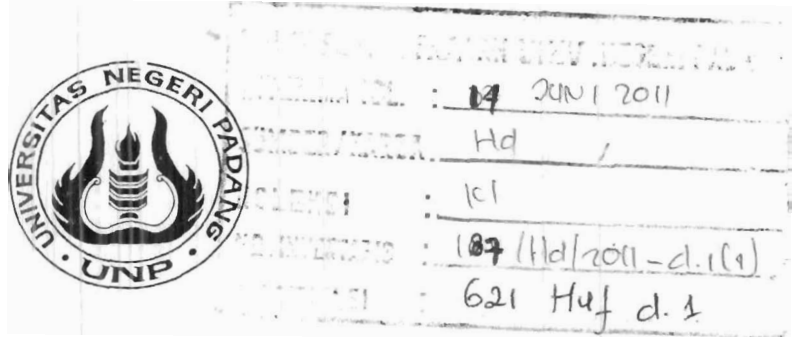


**LAPORAN**  
**PENELITIAN HIBAH BERSAING**  
**(TAHUN KE II)**



**Desain dan Pengembangan Sensor Magnetik *Fluxgate***  
**Sensitivitas Tinggi Menggunakan Model *Ellips-Multicore***  
***Double Pick-up* dan Aplikasinya.**

**Peneliti :**

**Drs. Hufri M.Si. (Ketua)**

**Dr. Yulkifli, S.Pd., M.Si. (Anggota)**

**Prof. Dr.-Ing. Mitra Djamal (Anggota)**

Dibiayai oleh Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat.  
Ditjen Dikti Depdiknas RI Melalui Proyek Peningkatan Perguruan  
Tinggi Universitas Negeri Padang dengan Surat Perjanjian Kerja  
Nomor : 91/H35/KP/ 2010

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS NEGERI PADANG**

**2010**

**HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR**

1. Judul : **Desain dan Pengembangan Sensor Magnetik Fluxgate Sensitivitas Tinggi Menggunakan Model Ellips-Multicore Double Pick-up dan Aplikasinya.**
- 2 Ketua Peneliti
- a. Nama Lengkap : Drs. Hufri M.Si
- b. Jenis Kelamin : Laki-laki
- c. NIP : 19660413 199303 1 003
- d. Jabatan Fungsional : Lektor
- e. Jabatan Struktural : -
- f. Bidang Keahlian : Fisika Instrumentasi dan Elektronika
- g. Fakultas / Jurusan : FMIPA / Fisika
- h. Perguruan Tinggi : Universitas Negeri Padang
- i. Tim Peneliti

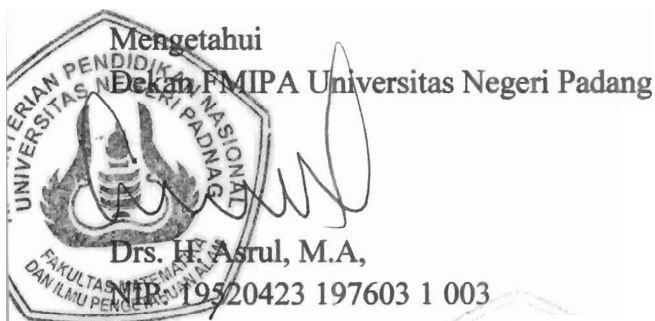
No	Nama dan Gelar Akademik	Bidang Keahlian	Fakultas/ Jurusan	Perguruan Tinggi
1	Yulkifli, S.Pd., M.Si	Fisika Instrumentasi & Elektronika	MIPA/ Fisika	Universitas Negeri Padang
2	Dr.-Ing. Mitra Djamal	Fisika Instrumentasi & Elektronika	MIPA/ Fisika	ITB Bandung

3. Pendanaan dan Jangka waktu penelitian :
- a. Jangka waktu Penelitian yang diusulkan : 2 tahun
- b. Jumlah biaya yang diajukan ke Dikti : RP. 99.922.000,-
- c. Biaya yang disetujui tahun ke II : RP. 51.000.000,-

Padang, 7 Desember 2010  
Ketua Peneliti,



Drs. Hufri, M.Si  
NIP. 19660413 199303 1 003



Mengetahui  
Kepala Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang



Drs. Alwen Bentri, M.Pd.  
NIP. 19610722 198602 1 002

## A. A. LAPORAN HASIL PENELITIAN

### RINGKASAN DAN SUMMARY

**Desain dan Pengembangan Sensor Magnetik *Fluxgate* Sensitivitas Tinggi Menggunakan Model *Ellips-Multicore Double Pick-up* dan Aplikasinya.**

**Hufri<sup>a)</sup>, Yulifli<sup>a)</sup>, Mitra Djamal<sup>b)</sup>**

**<sup>a)</sup> Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang  
<sup>b)</sup> Jurusan Fisika FMIPA Institut Teknologi Bandung**

Telah didesain dan dikembangkan elemen *fluxgate* dan penggunaannya untuk sensor. Pengembangan sensor-sensor ini diawali dengan mendesain elemen sensor *fluxgate* yang memiliki resolusi tinggi. Sensor *fluxgate* merupakan sensor magnetik yang memiliki beberapa keunggulan dibandingkan Hall Effect, GMR, dan AMR, antara lain dapat mengukur medan magnet dalam orde yang sangat kecil (nT). Keunggulan yang dimiliki inilah yang membuka peluang untuk diaplikasikan dalam bentuk sensor-sensor lain. Untuk mencapai tujuan penelitian ini dilakukan secara bertahap yang meliputi: tahap pertama: desain elemen *fluxgate*, karakterisasi berdasarkan geometri elemen sensor, pembuatan rangkaian pengolah sinyal dan *antar muka* untuk peningkatan sensitivitas dan resolusi sensor (Hasil ini sudah dilaporkan pada Tahun I).

Tahun II adalah Optimasi resolusi keluaran *fluxgate* dan aplikasinya. Pada Tahap aplikasi yang dikembangkan adalah: Pengukuran medan magnetik lemah, Pengukuran jarak dalam orde kecil dan pengukuran getaran mesin. Berdasarkan pengukuran terhadap medan magnet lemah sensor dapat mengukur medan dalam rentang pengukuran  $\pm 10 \mu\text{T}$  dengan sensitivitas 101,8 mV/uT (setelah penguatan 25x kali), resolusi 25 nT dan kesalahan relatif 0,13%. Aplikasi terhadap pengukuran jarak dalam orde kecil, sensor dapat mengukur jarak 14 mm dengan sensitivitas 104,5 mV/mm, resolusi 0,17 mm (170  $\mu\text{m}$ ) dan kesalahan relatif 0,035%. Sedangkan aplikasi *fluxgate* terhadap getaran, sensor dapat mengukur getaran sampai 500 Hz.

## PENGANTAR

Kegiatan penelitian mendukung pengembangan ilmu serta terapannya. Dalam hal ini, Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang berusaha mendorong dosen untuk melakukan penelitian sebagai bagian integral dari kegiatan mengajarnya, baik yang secara langsung dibiayai oleh dana Universitas Negeri Padang maupun dana dari sumber lain yang relevan atau bekerja sama dengan instansi terkait.

Sehubungan dengan itu, Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang bekerjasama dengan Pimpinan Universitas, telah memfasilitasi peneliti untuk melaksanakan penelitian tentang *Desain dan Pengembangan Sensor Magnetik Fluxgate Sensitifitas Tinggi Menggunakan Model Ellips-Multicore Double Pick-up dan Aplikasinya*, berdasarkan Surat Keputusan Rektor Universitas Negeri Padang Nomor: Nomor: 91/H35/KP/2010 Tanggal 2 April 2010.


Kami menyambut gembira usaha yang dilakukan peneliti untuk menjawab berbagai permasalahan pembangunan, khususnya yang berkaitan dengan permasalahan penelitian tersebut di atas. Dengan selesainya penelitian ini, Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang telah dapat memberikan informasi yang dapat dipakai sebagai bagian upaya penting dalam peningkatan mutu pendidikan pada umumnya. Di samping itu, hasil penelitian ini juga diharapkan memberikan masukan bagi instansi terkait dalam rangka penyusunan kebijakan pembangunan.

Hasil penelitian ini telah ditelaah oleh tim pembahas usul dan laporan penelitian, serta telah diseminarkan ditingkat nasional. Mudah-mudahan penelitian ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pada umumnya, dan peningkatan mutu staf akademik Universitas Negeri Padang.

Pada kesempatan ini, kami ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang membantu terlaksananya penelitian ini, terutama kepada pimpinan lembaga terkait yang menjadi objek penelitian, responden yang menjadi sampel penelitian, dan tim perview Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang. Secara khusus, kami menyampaikan terima kasih kepada Rektor Universitas Negeri Padang yang telah berkenan memberi bantuan pendanaan bagi penelitian ini. Kami yakin tanpa dedikasi dan kerjasama yang terjalin selama ini, penelitian ini tidak akan dapat diselesaikan sebagaimana yang diharapkan dan semoga kerjasama yang baik ini akan menjadi lebih baik lagi di masa yang akan datang.

Terima kasih.

Padang, Desember 2010  
Ketua Lembaga Penelitian  
Universitas Negeri Padang,



Drs. Alwen Bentri, M.Pd.  
NIP. 19610722 198602 1 002

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	i
<b>A. LAPORAN HASIL PENELITIAN</b>	
<b>RINGKASAN DAN SUMMARY .....</b>	ii
<b>PRAKATA .....</b>	iii
<b>DAFTAR ISI .....</b>	iv
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	vi
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	vii
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	
<b>BAB I. PENDAHULUAN .....</b>	1
<b>A. Latar Belakang .....</b>	1
<b>BAB II. STUDI PUSTAKA .....</b>	3
<b>A. Prinsip Dasar Sistem Sensor <i>Fluxgate</i> .....</b>	3
<b>B. <i>Fluxgate</i> Magnetometer Sebagai Sensor Getaran .....</b>	8
<b>BAB. III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN .....</b>	13
<b>A. Tujuan Penelitian .....</b>	13
<b>B. Manfaat Penelitian .....</b>	13
<b>BAB. IV. METODE PENELITIAN .....</b>	15
<b>BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	17
<b>A. Aplikasi <i>Fluxgate</i> untuk Pengukuran Medan Magnet Lemah .....</b>	17
<b>B. Aplikasi <i>Fluxgate</i> untuk Pengukuran Jarak .....</b>	20
<b>C. Aplikasi <i>Fluxgate</i> untuk Pengukuran Getaran .....</b>	24
<b>BAB. V. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	31
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	33
<b>B. DRAF ARTIKEL ILMIAH .....</b>	35
<b>C. SINOPSIS PENELITIAN LANJUTAN .....</b>	36

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>	
Gambar. 1.	Prinsip pengukuran medan magnet.	3
Gambar. 2.	Bentuk sederhana sensor magnetik fluxgate	4
Gambar. 3.	Bentuk sinyal keluaran sensor fluxgate	5
Gambar. 4.	Skema Diagram Pengolahan Sinyal Sensor	8
Gambar. 5.	Analisis dinamik dan kaji eksperimental ciri getaran akibat kelonggaran pada batang penghubung motor bakar torak	9
Gambar. 6.	Model Mekanik Sensor Getaran	10
Gambar. 7.	Prinsip dasar <i>fluxgate</i> sebagai sensor medan magnet lemah	15
Gambar. 8.	Prinsip pengukuran jarak dengan <i>fluxgate</i>	15
Gambar. 9.	Prinsip kerja sensor fluxgate sebagai sensor getaran	16
Gambar. 10.	Desain elemen sensor kumparan sekunder ganda	17
Gambar. 11.	Respon tegangan keluaran sensor untuk daerah $\pm 200 \mu\text{T}$	18
Gambar. 12.	Daerah linier pengukuran sensor untuk daerah $\pm 10 \mu\text{T}$ .	18
Gambar. 13.	Kesalahan absolut keluaran sensor	19
Gambar. 14.	Kesalahan relatif keluaran sensor	20
Gambar. 15.	Skema pengukuran jarak menggunakan sensor <i>fluxgate</i>	21
Gambar. 16.	Respon Tegangan Keluaran Terhadap Arus	22
Gambar. 17.	Respon Tegangan Keluaran Terhadap Jarak Target	22
Gambar. 18.	Kesalahan Relatif Pengukuran Jarak	23
Gambar. 19.	Kesalahan Absolut Pengukuran Jarak.	23
Gambar. 20.	Prinsip kerja <i>FGM</i> sebagai sensor getaran	24
Gambar. 21.	Diagram alir perangkat lunak	25
Gambar. 22.	Diagram blok LabVIEW 8.0	26
Gambar. 23.	Foto Set-up pengukuran getaran dengan teknik pengukuran langsung	27
Gambar. 24.	Hasil pengukuran karakteristik tegangan keluaran terhadap frekuensi dengan $y$ bervariasi dan amplitudo getaran konstan.	28
Gambar. 25.	Contoh respon keluaran getaran pada frekuensi 160 Hz dengan percepatan amplitudo sumber penggetar 80 mV	28
Gambar. 26.	Hasil pengukuran getaran dengan memvariasikan amplitudo sumber penggetar 10-1000 mV.	29

Gambar. 27. Grafik frekuensi sumber terhadap frekuensi FFT terukur dengan amplitudo sumber penggetar 10-500 mV. 30

## BAB I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Besarnya kompetisi di pasar bebas mengharuskan pengembangan instrumen yang terus menerus baik dari sisi kualitas, harga maupun keandalannya (Traenkler, 2001). Meningkatnya kebutuhan untuk otomatisasi, keamanan dan kenyamanan menggiring orang untuk mengembangkan instrumen dan sistemnya yang baru dengan prinsip dan metoda yang berbeda-beda.

Keberadaan instrumen pengukur dan pengontrol dalam sebuah industri, pembangunan jembatan layang seperti Suramadu, bendungan dan pembangunan lainnya adalah sangat penting agar dapat memberikan peringatan dini atau *early warning* kepada pemakainya. Salah satu instrumen tersebut adalah sensor. Jumlah sensor dan sistem sensor yang diperlukan juga meningkat. Saat ini teknologi sensor telah memasuki bidang aplikasi baru dan pasar yang semakin meluas seperti otomatis, rumah cerdas (*smart home*), penelitian, dan teknologi pengolahan (Intechno, 2008).

Pada waktu yang bersamaan sensor dan sistem sensor juga menempati posisi yang sangat penting untuk penelitian dan pengembangan hampir di semua bidang (Djamal, 2010). Sensor harus memiliki sensitivitas dan resolusi yang baik, mudah dioperasikan dan harganya murah dan mudah untuk diperoleh. Sensor yang ada di pasaran saat ini harganya sangat mahal, hal ini disebabkan karena proses fabrikasinya kompleks dan memerlukan proses yang lama karena didatangkan dari luar negeri.

Sensor *fluxgate* merupakan sebuah sensor yang dapat dibuat dengan proses sederhana memiliki ukuran kecil, kebutuhan daya rendah, rentang pengukuran cukup lebar, dan dapat diaplikasikan secara luas seperti pengukur medan magnetik di dalam ruang, pemetaan, karakterisasi batuan, kompas, navigasi, pencarian bahan tambang, pengukur kuat medan elektromagnetik dan sensor jarak dalam orde kecil. Potensi yang dimiliki oleh sensor *fluxgate* ini, memberikan peluang yang cukup besar untuk diaplikasikan menjadi sensor getaran (*vibration sensor*), terutama untuk getaran dengan perubahan amplitudo yang sangat kecil (orde mikrometer).



Pembuatan sensor magnetik saat ini menggunakan beberapa metode seperti: metode *Efek Hall*, *Magneto-resistif (AMR, GMR)*, *SQUID* dan *Fluxgate* (Fraden, J., 1996; Caruso, M.J., *et al.*, 1998). Kelemahan metode *efek Hall* adalah sensitivitasnya rendah, offset tegangan tinggi dan pengaruh temperatur besar. Kelemahan *magneto-resistif* adalah adanya pengaruh efek histeresis, berubahnya sensitivitas sensor terhadap kenaikan medan magnet  $H$  (Djamal, M., dkk., 2005). Metode *SQUID* memerlukan helium cair dalam pengoperasiannya dan membutuhkan biaya yang mahal sehingga digunakan untuk keperluan khusus saja. Sedangkan pada metoda *fluxgate*, pengukuran kuat medan magnet didasarkan pada hubungan antara kuat medan magnet  $H$  yang diberikan dengan fluks medan magnet induksi  $B$ . Tegangan keluarannya sebanding dengan medan magnet luar yang mempengaruhi inti (core) dan arahnya sebanding dengan arah medan magnet luar tersebut (Djamal, M., dkk., 2006a, Bashiroto, A., dkk., 2006).

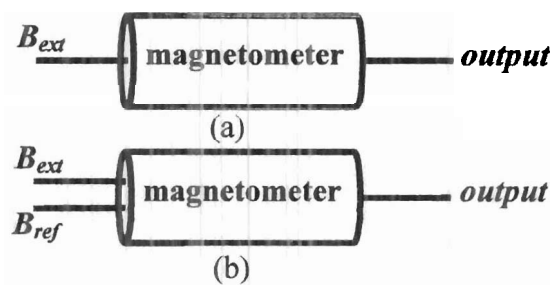
Berbagai usaha telah dilakukan peneliti untuk meningkatkan daya kerja sensor *fluxgate* (sensitivitas, akurasi dll.) seperti perbaikan pada desain struktur sensor, rangkaian pengolah sinyal dan meminiatur ukuran sensor dalam orde yang lebih kecil (Ripka, P., dkk., 2001b; Park, H.S., *et al.*, 2004; Wang, Y., dkk., 2006; Zorlu, O., dkk., 2007). Metode pembuatan yang digunakan mempunyai proses yang kompleks sehingga harga pembuatan menjadi mahal, sensitivitas sensor rendah karena luas penampang (*cross-sectional*) menjadi kecil (Liu, S, dkk., 2006), selain itu sensor dengan resolusi tinggi yang beredar dipasaran harganya sangat mahal. Hal ini berlawanan dengan kebutuhan dilapangan dimana untuk pengukuran dan pengontrolan yang menggunakan konsep perubahan medan magnet dibutuhkan sensor magnetik dengan sensitivitas yang tinggi tentunya dengan harga yang terjangkau (Yulkifli, dkk., 2007).

Berdasarkan permasalahan di atas dan keunggulan yang dimiliki sensor *fluxgate*, maka kami berkeinginan untuk mengembangkan sensor *fluxgate* dan aplikasinya dengan proses sederhana, biaya murah dan ukuran kecil, tentunya dengan kualitas yang dapat bersaing dengan produk luar negeri.

## BAB II. STUDI PUSTAKA

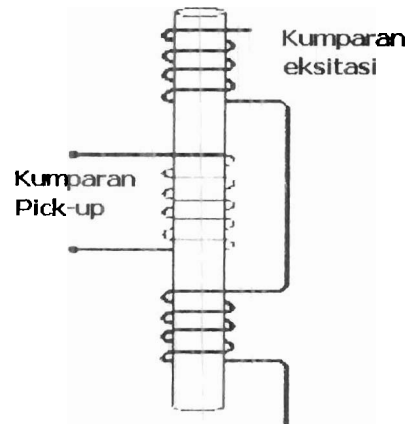
### A. Prinsip Dasar Sistem Sensor *Fluxgate*

Prinsip fungsional yang mendasar dari sistem sensor *fluxgate* adalah perbandingan medan magnet yang diukur  $B_{ext}$  dengan medan magnet referensi  $B_{ref}$ . Perubahan kuat medan magnet yang akan diukur  $B_{ext}$  ke dalam sinyal listrik dapat dilakukan dengan cara langsung, cara ini memang sederhana, tetapi memberikan hasil yang kurang teliti terutama untuk mengukur medan magnet lemah.



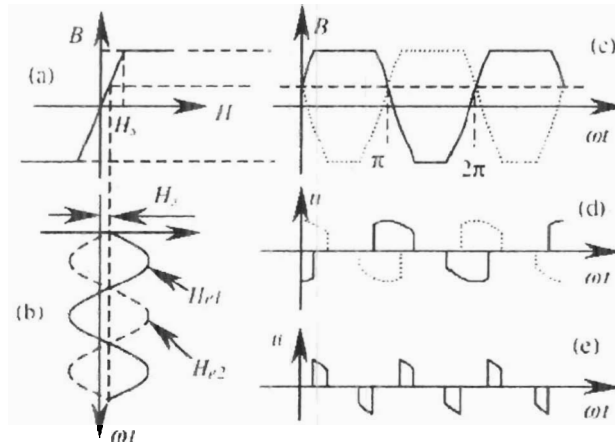
Gambar. 1 Prinsip pengukuran medan magnet: a) dengan cara langsung; b) menggunakan medan magnet referensi  $B_{ref}$  sebagai pembanding terhadap medan magnet yang diukur  $B_{ext}$ . (Göpel, W, dkk., 1989).

Sensor magnetik *fluxgate* tidak menggunakan cara langsung, tetapi menggunakan medan magnet referensi  $B_{ref}$  untuk dibandingkan dengan medan magnet yang akan diukur  $B_{ext}$  menggunakan wadah (probe) yang diisi dengan bahan inti (core). Prinsip ini terlihat pada Gambar 1. 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. Sensitivitas sensor *fluxgate* sangat bergantung pada permeabilitas bahan inti (Ripka 2001a). Sensor magnetik *fluxgate* dibuat berdasarkan karakteristik inti ferromagnetik yang linier. Dalam bentuk yang sederhana, sensor magnetik *fluxgate* terdiri dari inti ferromagnetic dan dua kumparan, yaitu kumparan primer (*excitation coil*) dan kumparan sekunder (*pick-up coil*), seperti ditunjukkan Gambar 2.



Gambar. 2 Bentuk sederhana sensor magnetik fluxgate (B. Ando, 2006).

Prinsip fungsional sensor fluxgate dalam mendekteksi perubahan magnetik eksternal terlihat dalam gambar 3. Inti sensor yang terbuat dari bahan ferromagnetik memiliki sifat material yang dapat tersaturasi (3a), Inti sensor dibawa ke dalam daerah saturasi secara periodik oleh medan eksitasi sinusiodal, medan ini merupakan medan refrensi ( $B_{ref}$ ), yang dihasilkan oleh arus sinusiodal yang mengalir ke dalam kumparan eksitasi, ketika medan magnetik luar sama dengan nol, maka medan magnetik yang timbul oleh kumparan eksitasi akan simetris (3b), saat kondisi ini tidak ada laju perubahan fluk magetik yang tertangkap oleh kumparan pick-up sehingga selisih tegangannya menjadi nol. Sedangkan ketika ada medan magnetik luar yang sejajar terhadap inti, induksi di dalam inti menyebabkan fungsi terangkat dari proyeksi pada kurva magnetisasi, akibatnya sinyal tidak lagi simetris setelah diproyeksikan terhadap sumbu B (3c), saat kondisi ini kumparan pick-up menangkap laju perubahan fluk magnetik (3d), sehingga menyebabkan ada selisih tegangan pada kedua kumparan pick-up (3e).



Gambar 3. Bentuk sinyal keluaran sensor fluxgate( Liu, S., 2006).

Selisih tegangan keluaran ini dianalisa dengan menggunakan prinsip harmonisa kedua melalui pendekatan polinomial dan fungsi transfer.

### **Fungsi transfer**

Asumsikan inti adalah tipe linier, maka inti akan disaturasi oleh medan magnetisasi awal sinusoidal:

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

yang akan disuperposisikan dengan medan magnet luar  $H_{ext}$ . Medan magnet dalam inti akan menjadi

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

dimana N adalah faktor magnetisasi untuk inti linier:

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

Untuk menghitung rapat fluks dalam inti, menormalisasikan kuat medan magnet dalam inti menjadi  $H_0^*$ , yang diberikan

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

Sehingga kuat medan magnet dalam ini 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:

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

dimana b adalah rapat fluks ternormalisasi:

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

dengan

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

Pendekatan ini digunakan baik untuk pencabangan positif maupun negatif dari kurva magnetisasi.

Rapat fluks ternormalisasi menjadi

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

atau

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

Dapat dilihat bahwa komponen harmoniksa kedua sesuai dengan kuat medan magnet luar. Tegangan keluaran kumparan sekunder sesuai dengan diferensiasi rapat fluks dalam inti terhadap waktu, yaitu:

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

dimana  $N$  : jumlah lilitan kumparan sekunder dan  $A$  adalah penampang hamburan dari inti. Tegangan keluaran kumparan sekunder dapat digantikan dengan tegangan keluaran ternormalisasi:

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

dan menjadi

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

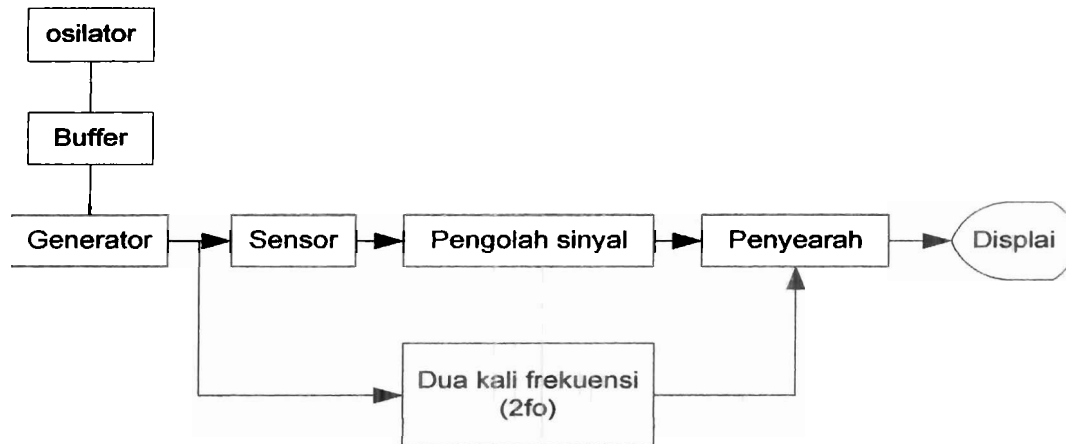
Komponen tegangan keluaran harmonisa kedua dari kumparan sekunder adalah

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

atau

$$U_{out} = h_{ext} K h_{ref\ max}^2 \sin 2\omega t \quad (15)$$

sebagai aproksimasi linier dimana  $K$  adalah sebuah konstanta yang meliputi faktor magnetisasi, nilai puncak arus magnetisasi awal, bentuk inti, koefisien polinomial  $a_3$ , dan rapat fluks saturasi inti.

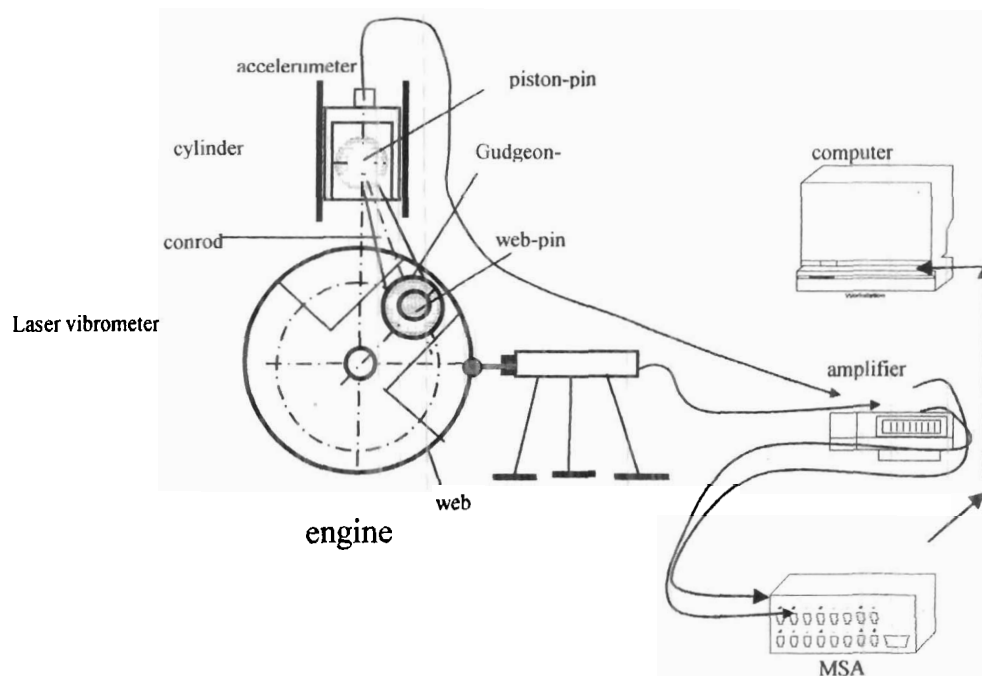


Gambar 4. Skema Diagram Pengolahan Sinyal Sensor

Komponen tegangan keluaran harmonisa kedua dari kumparan sekunder sesuai dengan medan magnet luar yang diukur dan frekuensi arus magnetisasi awal. Tegangan keluaran  $V_{out}$  dari elemen sensor diolah dengan menggunakan rangkaian pengolah sinyal. Pengolah sinyal sensor terdiri dari beberapa bagian, yaitu diffrensiator, detektor, sinkronisasi fasa, integrator, dan penguat akhir. Secara skematik ditunjukkan Gambar 4.

### B. *Fluxgate* Magnetometer Sebagai Sensor Getaran.

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 mendekteksi getaran dikembangkan berbagai alat berupa sensor getaran (*vibration sensor*) (Goldman, S. 200).



Gambar 5. Analisis dinamik dan kaji eksperimental ciri getaran akibat kelonggaran pada batang penghubung motor bakar torak.

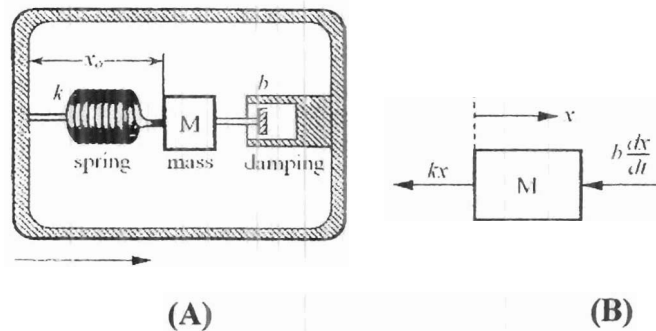
Terdapat banyak metode yang dapat dipakai untuk mendeteksi getaran, misalnya dengan mengukur kapasitansi, perubahan muatan listrik dari material *piezoelectric* atau perubahan posisi dalam *Linear Variable Displacement Transformer (LVDT)* dan *Laser Vibration* (Goldsman, S., 2000), seperti dilukiskan pada Gambar 5. Salah satu cara kerja sensor getaran berdasarkan perubahan posisi dari suatu objek, objek yang bergerak dapat dideteksi dengan perubahan medan magnet yang terjadi padanya. Perubahan medan magnet pada sensor magnet akibat berubahnya posisi dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi suatu benda yang sedang bergetar. *Fluxgate* sebagai sensor mempunyai konsep perubahan medan magnet suatu objek. Berdasarkan kesamaan konsep ini, maka *Fluxgate* dapat dijadikan sebagai sensor getaran. (Hendro, dkk., 2007, Firmansyah, 2006 dan Suyatno, 2007a).

Sensor *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 (Suyatno,



2007a). Perubahan posisi ( $x$ ) dari benda yang bergetar terhadap sensor disebut dengan simpangan, simpangan maksimum disebut dengan amplitudo ( $A$ ).

Untuk meninjau konsep mekanik sebuah benda bergetar dimodelkan seperti Gambar 6. Sebuah benda dengan beban bermassa  $M$  terikat pada sebuah pegas dengan konstanta pegas  $k$  dan massa yang bergerak diredam oleh peredam dengan koefisien redaman  $b$  seperti Gambar 6A. Beban bisa bergeser sejauh  $x$  dari titik setimbang terhadap sensor dengan arah horizontal. Selama bergerak percepatan beban  $M$  bergetar sebesar  $\frac{d^2x}{dt^2}$ , dan sinyal keluaran sebanding dengan defleksi  $x_0$  dari beban  $M$ .



Gambar 6: Model Mekanik Sensor Getaran (A) dan Diagram bebas dari massa (B), (Fraden, J., 1996).

Berdasarkan tinjauan diagram bebas masaa  $M$  seperti Gambar 6B dan menerapkan Hukum kedua Newton (Symon, K.R., 1980), memberikan :

$$Mf = -kx - b \frac{dx}{dt}, \quad (16)$$

dengan  $f$  adalah percepatan dari massa relatif dari bumi dan diberikan oleh :

$$f = \frac{d^2x}{dt^2} - \frac{d^2y}{dt^2} \quad (17)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 16 ke 17 didapatkan :

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = M \frac{d^2y}{dt^2} \quad (18)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan diffrensial orde dua yang mana artinya keluaran percepatan sinyal merupakan bentuk osilasi. Untuk menyelesaikan

persamaan (18) di atas digunakan Transformasi *Laplace* (Boas, L.M, 1984). Berdasarkan Transformasi *Laplace* didapatkan :

$$Ms^2 X(s) + bsX(s) \frac{dx}{dt} + kX(s) = MA(s) \quad (19)$$

dimana  $X(s)$  dan  $A(s)$  adalah Transformasi *Laplace* dari  $x(t)$  dan  $\frac{d^2y}{dt^2}$ . Solusi persamaan (18) untuk  $X(s)$  adalah :

$$X(s) = \frac{-MA(s)}{Ms^2 + bs + k} \quad (20)$$

dengan mendefinisikan variabel  $\omega_o = \sqrt{k/M}$  dan  $2\xi\omega_o = b/M$ , persamaan (20) dapat ditulis :

$$X(s) = \frac{-A(s)}{s^2 + 2\xi\omega_o s + \omega_o^2} \quad (21)$$

Nilai  $\omega_o$  mempresentasikan frekuensi anguler alami percepatan dan  $\xi$  koefisien normalisasi redaman. Misalkan  $G(s) = \frac{-1}{s^2 + 2\xi\omega_o s + \omega_o^2}$ , maka persamaan (21) dapat dituliskan menjadi :  $X(s) = G(s)A(s)$ , solusi dapat diungkapkan dalam bentuk operator inverse transformasi *Laplace* sebagai :

$$X(s) = L^{-1}\{G(s)A(s)\} \quad (22)$$

Dengan menggunakan teorema konvolusi transformasi Laplace dapat ditulis:

$$x(t) = \int_0^t g(t-\tau)a(\tau)d\tau \quad (23)$$

dimana  $a$  adalah impulse bergantung pada percepatan dan  $g(t)$  adalah inverse transform  $L^{-1}\{G(s)\}$ . Jika diambil  $\omega = \omega_o \sqrt{1-\xi^2}$ , maka persamaan di atas mempunyai dua solusi, yaitu :

Solusi I, untuk underdamped mode ( $\xi < 1$ ) :

$$x(t) = -\int_0^t \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_o(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau)a(\tau)d\tau \quad (24)$$

Solusi II, untuk overdamped mode ( $\xi > 1$ ) :

$$x(t) = - \int_0^t \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0(t-\tau)} \sinh \omega(t-\tau) a(t) d\tau \quad (25)$$

dengan  $\omega = \omega_0 \sqrt{\xi^2 - 1}$

Persamaan (25) menunjukkan bahwa perubahan jarak atau simpangan benda berosilasi bergantung pada waktu t.

Perubahan posisi atau jarak antara beban M (target) dengan sensor akan menyebabkan perubahan intensitas medan magnet yang diterima oleh sensor. Objek yang bergetar (target) dipilih yang bersifat magnetik. Material magnetik dapat berasal dari magnet permanen atau material ferromagnetik. Material magnetik ditempatkan pada objek yang akan diukur getarannya. Jika objek bergerak mendekati atau menjauhi detektor, maka medan magnetik disekitar titik setimbang akan mengalami perubahan, perubahan ini disebut fluk magnetik ( $\Phi$ ). Perubahan fluk magnetik bergantung pada posisi sensor terhadap objek.

Jika  $d\vec{A}$  adalah elemen vektor dan  $\vec{B}$  adalah elemen vektor, maka fluk magnetik yang keluar dari permukaan medan adalah:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (26)$$

Jika medan magnetik material adalah B, maka medan magnetik yang dideteksi oleh sensor pada jarak r adalah:

$$B_r \propto \frac{B}{x} \quad (27)$$

Penurunan medan magnetik sebanding dengan  $1/x$ , (Djamal, M., 2006).

### BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

#### A. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan umum penelitian ini adalah mendesain dan mengembangkan sensor magnetik *fluxgate* sensitivitas tinggi menggunakan elemen sensor model *ellip-multicore double pick-up* dengan teknik harmonisa kedua dan aplikasinya. Adapun tujuan khusus penelitian ini adalah :

1. Mendesain elemen sensor menggunakan model *ellip-multicore double pick-up*.
2. Pengaturan rangkaian penapis, rangkaian balikan dan filter pada pengolah sinyal.
3. Pembuatan prototip sensor getaran *fluxgate*
4. Pengujian kehandalan sensor seperti uji reliabilitas, uji kestabilan dll.
5. Aplikasi *fluxgate* untuk sensor getaran .

#### B. MANFAAT PENELITIAN

Hasil penelitian ini sangat bermanfaat bagi industri-industri dan pembangunan di Indonesia. Pembangunan sarana dan prasarana di masa modern seperti sarana transportasi baik darat maupun udara yang cenderung serba otomatis akan mendorong pemanfaatan dari hasil penelitian ini. Dengan luasnya aplikasi dari sensor *fluxgate*, terbuka peluang untuk penerapan teknologi ke arah komersial untuk diproduksi secara massal di dalam negeri. Penggunaan produksi negeri sendiri dapat memajukan industri dan perekonomian di dalam negeri. Selain itu akan dapat menghemat devisa negara karena kebutuhan akan sensor selama ini di impor dari luar negeri. Disamping memiliki arti ekonomis yang sangat besar, hasil penelitian ini juga memiliki arti kebanggaan nasional karena riset ini sangat memberi peluang kepada Indonesia untuk ikut berbicara dalam tingkat dunia. Selain mengembangkan aplikasi sensor *fluxgate* pada sensor getaran mesin dengan daerah frekuensi tinggi untuk industri manufaktur, kami juga akan mengembangkan sensor *fluxgate* untuk frekuensi rendah. Pengukuran getaran dengan frekuensi rendah sangat diperlukan dalam pendeteksi getaran di alam, seperti deteksi getaran bangunan, bendungan dan jembatan. Berdasarkan letak geografis, Indonesia merupakan negara rawan gempa,

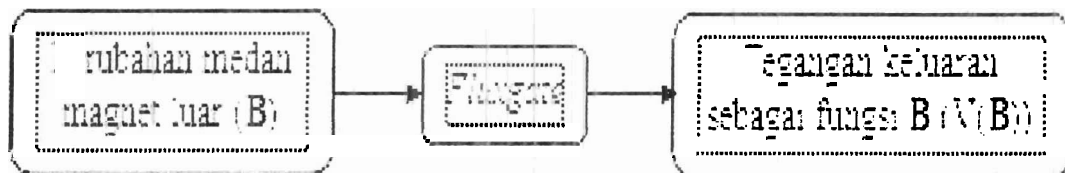
maka dibutuhkan instrumen yang dapat mendeteksi getaran gempa tersebut agar dapat memberikan informasi secepat mungkin ke pusat informasi seperti Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), sehingga korban jiwa akibat gempa dapat diminimalisir. Indonesia yang terdiri dari ribuan pulau yang membentang dari Sabang sampai ke Merauke memerlukan sensor alat pendeteksi gempa dalam jumlah besar. Jarak antara pulau yang berjauhan menuntut penyebaran informasi secepat mungkin mengenai gempa dan bahayanya seperti potensi tsunami. Hasil penelitian ini akan kami kembangkan lebih jauh untuk sistem pengukuran gempa dan monitoring 3 dimensi secara online berbasis sensor *fluxgate*.

## BAB IV. METODE PENELITIAN

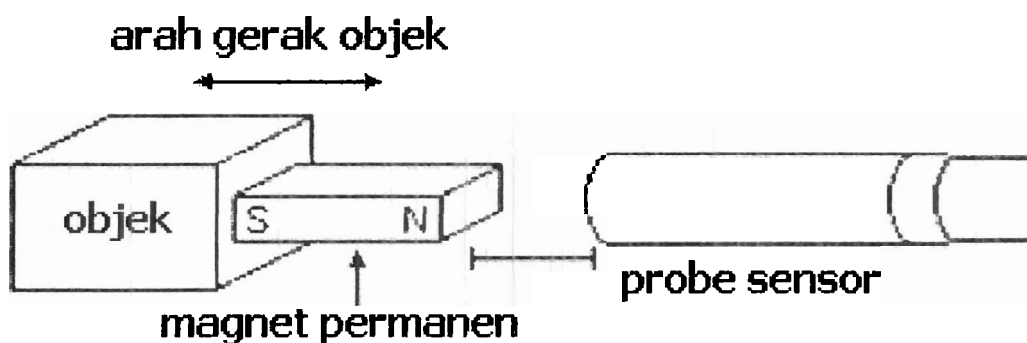
Pada tahun ke II dititikberatkan aplikasi fluxgate untuk mengukur medan magnet lemah, jarak dan getaran, untuk mencapai tujuan di atas dilakukan metoda sebagai berikut :

1. Desain mekanik pengukuran medan magnet lemah, jarak dan getaran
2. Kalibrasi statik sensor terhadap medan magnet dan jarak
3. Pembuatan algoritma akusisi data
4. Kalibrasi dan pengukuran
5. Analisis data medan magnet lemah, jarak dan getaran objek/mesin industri manufaktur.

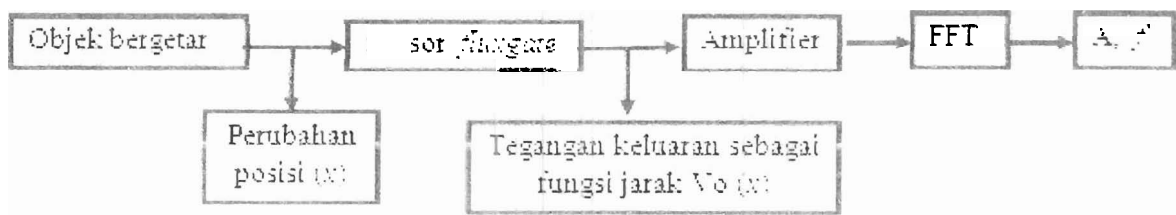
Metode penelitian untuk masing-masing pengukuran di jelaskan pada sub bagian pengukuran. Sistem aplikasi sensor fluxgate terhadap medan magnet lemah, jarak dan getaran ditunjukkan Gambar 7, Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 7. Prinsip dasar *fluxgate* sebagai sensor medan magnet lemah



Gambar 8. Prinsip pengukuran jarak dengan *fluxgate* (Djamal,N., dkk., 2005a)



Gambar 9 Prinsip kerja sensor fluxgate sebagai sensor getaran (Djamal, M., dkk. 2008)

## BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN

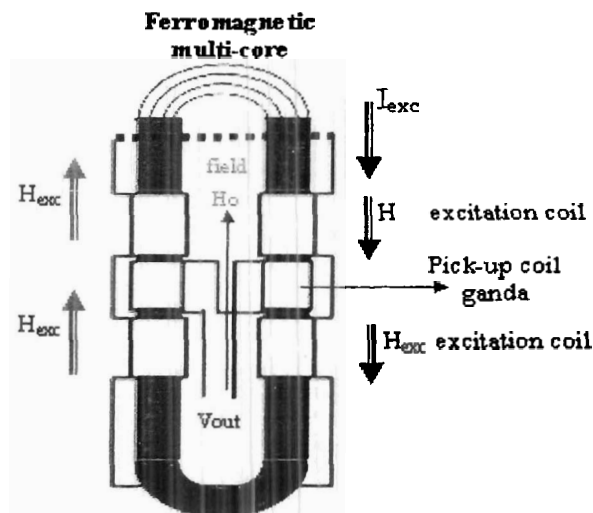
### Hasil-hasil Aplikasi yang sudah dikembangkan pada Tahun II.

#### A. Aplikasi Fluxgate untuk Pengukuran Medan Magnet Lemah.

##### 1. Metode Pengukuran Medan Magnet Lemah

Metoda/rancangan yang akan digunakan dalam penelitian ini berupa eksperimen murni. Untuk melihat pengaruh kumparan sekunder ganda terhadap resolusi sensor magnetik fluxgate dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Mendesain elemen sensor fluxgate menggunakan kumparan double pick-up 2x20 lilitan, sedangkan kumparan eksitasi 2 x 40 lilitan menggunakan kawat email berdiameter 0.09 mm dan inti ferromagnetik sebanyak 4 lapis, Vitrovac 6025X:0.75 x 0.025 mm (Vacuumschmelze GMBH.6450 Hanau), desain elemen sensor ditunjukkan Gambar 10



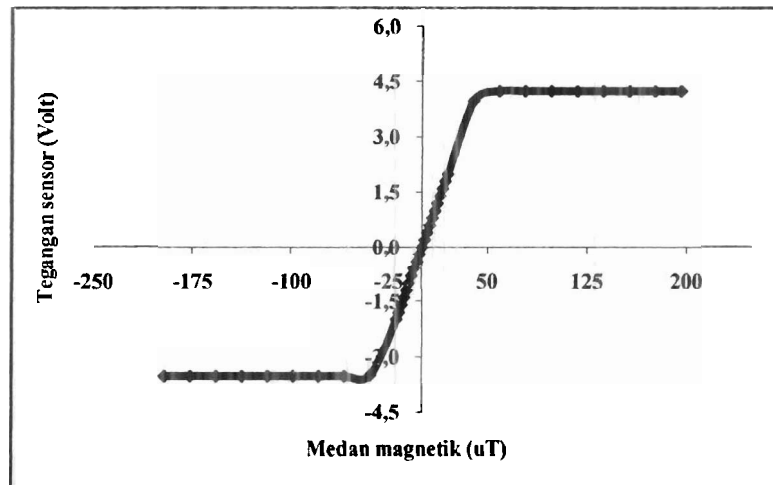
Gambar 10. Desain elemen sensor kumparan sekunder ganda

- b. Melakukan pengukuran tegangan keluaran dengan memberikan sumber arus dc
- c. Menghitung besar medan magnetik yang dihasilkan oleh solenoide sebagai sumber medan magnetik sensor
- d. Mencari nilai resolusi sensor, kesalahan mutlak dan relatif dengan pendekatan regresi polinomial.



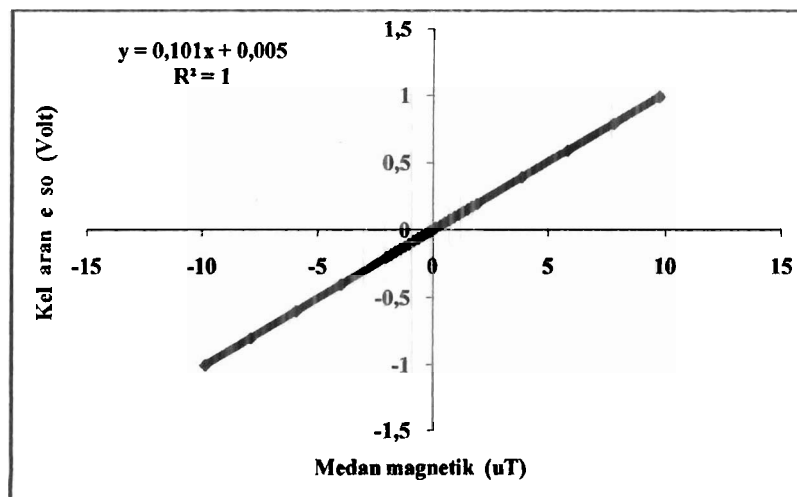
## 2. Hasil dan Analisis Pengukuran Medan Magnet Lemah

Berdasarkan pengukuran dalam rentangan sumber medan magnetik  $\pm 200 \mu\text{T}$  diperoleh tegangan keluaran sensor seperti ditunjukkan Gambar 11. Terlihat daerah saturasi pengukuran berada pada orde puluhan. Daerah saturasi ini merupakan batas daerah pengukuran medan magnetik yang dapat terukur oleh sensor.



Gambar 11. Respon tegangan keluaran sensor untuk daerah  $\pm 200 \mu\text{T}$ .

Untuk mencari daerah kerja sensor dilakukan pemotongan pada daerah tertentu, hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 12.



Gambar 12. Daerah linier pengukuran sensor untuk daerah  $\pm 10 \mu\text{T}$ .

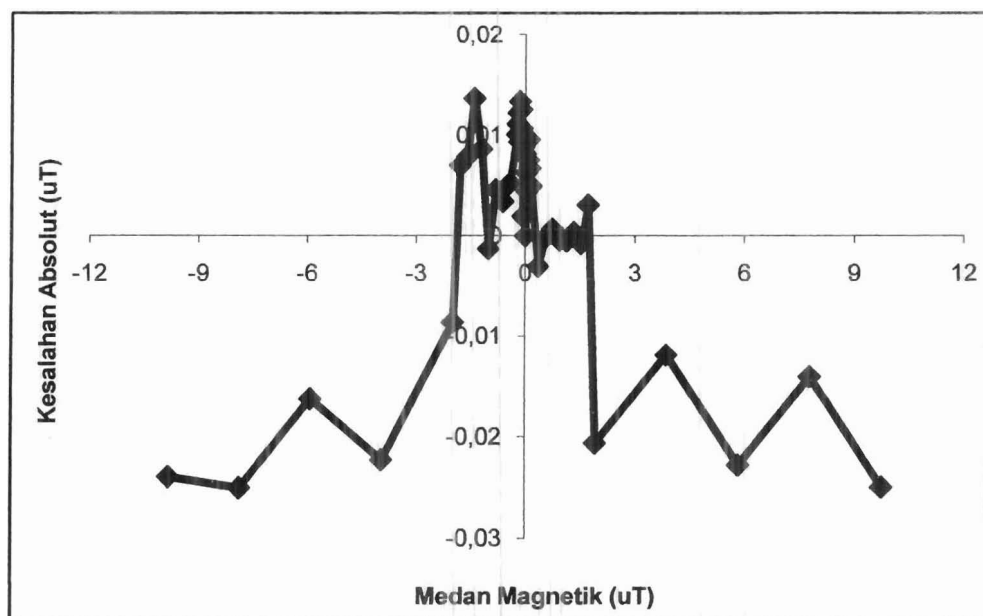
Berdasarkan Gambar 12, terlihat bahwa keluaran sistem sensor sangat linier, hal ini terlihat dari nilai  $R^2 = 1$ . Selain itu grafik juga menunjukkan bahwa medan magnetik eksternal yang terukur sebanding dengan tegangan keluaran sensor, hal ini sesuai dengan persamaan (28).

Sensitivitas sensor diperoleh berdasarkan kemiringan grafik daerah linier tegangan keluaran sensor yang ditunjukkan oleh persamaan regresi linier;

$$V_{out} = 0.1018B + 0.0051, \quad (28)$$

Dimana  $B$  dalam  $\mu\text{T}$  dan  $V_{out}$  dalam  $\text{mV}$ , berdasarkan persamaan (28) diperoleh sensitivitas sensor  $101,8 \text{ mV}/\mu\text{T}$ , artinya tiap  $1 \text{ }\mu\text{T}$  sensor dapat mengukur perubahan tegangan sensor  $101,8 \text{ mV}$ .

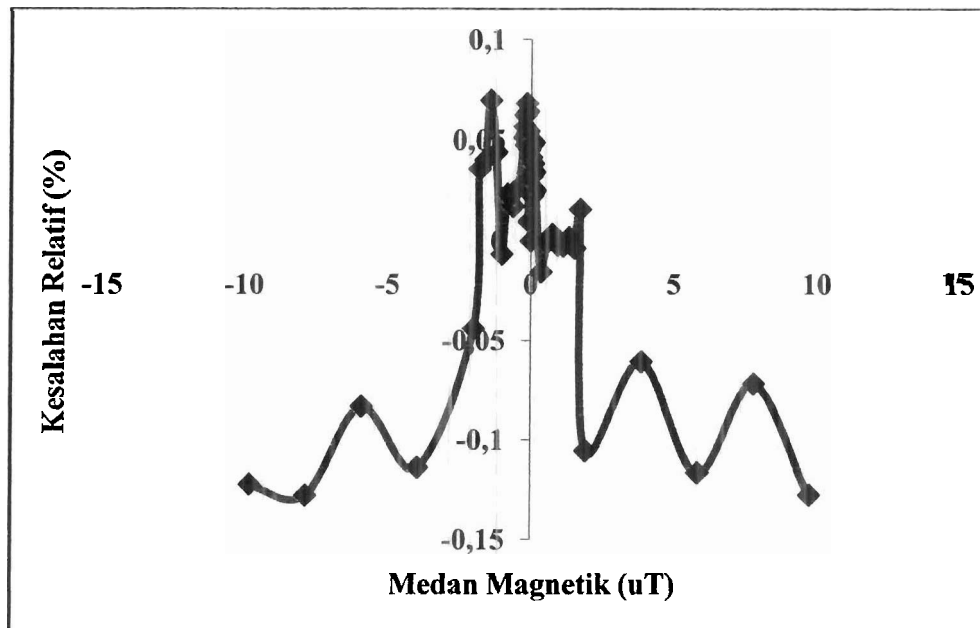
Resolusi sensor dihitung menggunakan kesalahan absolut seperti ditunjukkan Gambar 13.



Gambar 13. Kesalahan absolut keluaran sensor

Terlihat kesalahan maksimum absolut sekitar  $25 \text{ nT}$ , Kesalahan absolut ini mewakili resolusi dari sensor. Kesalahan relatif pengukuran ditunjukkan oleh Gambar 14. Kesalahan relatif keluaran sensor diperoleh  $0.13\%$  terjadi pada medan

magnetik sebesar  $-7.872 \mu\text{T}$ . Kesalahan yang diperoleh sangat kecil sehingga dapat dikatakan sensor ini mempunyai karakteristik tegangan keluaran yang sangat bagus.



Gambar 14. Kesalahan relatif keluaran sensor .

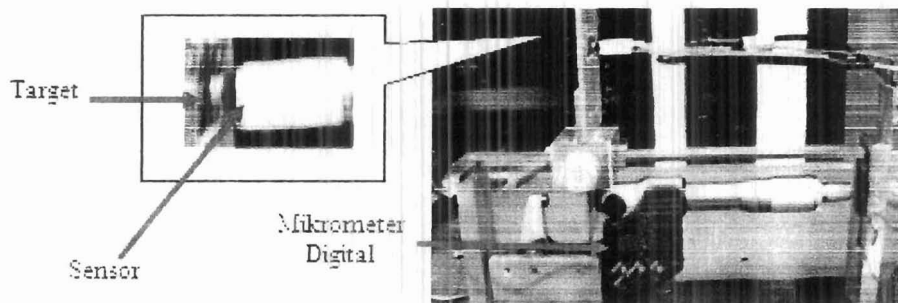
## B. Aplikasi Fluxgate untuk Pengukuran Jarak .

### 1. Metode Pengukuran Jarak Berbasis Fluxgate.

Pada penelitian ini elemen sensor fluxgate didesain menggunakan kumparan kawat email dengan ukuran 0,1 mm, sedangkan bahan inti (core) menggunakan Vitrovac 6025. Vitrovac memiliki permeabilitas  $\mu_r \sim 10^5$ , induksi magnetik saturasi pada 0.55 T, dan medan koersivitas yang rendah, lebih tahan terhadap temperatur tinggi dan pengaruh mekanik dari luar. (Firmansyah, A., 2006, Bashiroto, *dkk.*, 2006). Desain elemen sensor fluxgate terdiri dari 7 inti  $[40 \times 40] \times 2$  lilitan eksitasi,  $60 \times 60$  lilitan pick-up dengan *pick-up coil* ganda.

Setelah desain selesai dilakukan kalibrasi dan pengambilan data pengukuran terhadap jarak. Dalam melakukan pengujian alat, dilakukan dengan beberapa tahapan, antara lain:

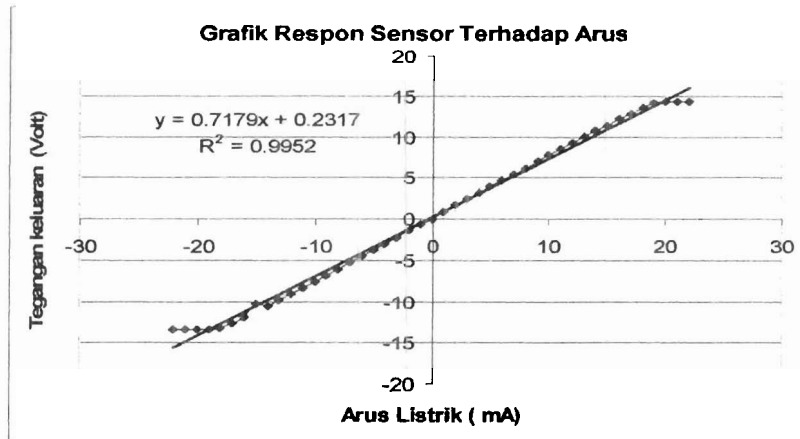
- a. Pengujian respon sensor (kalibrasi): pengujian respon sensor terhadap perubahan medan magnet luar, pengujian terhadap perubahan arus, dengan menggunakan kalibrator magnet dan arus.
- b. Tahap pengambilan data, melakukan pengukuran jarak, dengan menggunakan mikrometer digital. Dari data dan analisa tersebut nantinya dapat ditarik kesimpulan hal ini terkait dengan performa dan kelebihan yang dimiliki oleh *fluxgate magnetometer* dibandingkan dengan yang lainnya. Skema pengukuran yang dilakukan tampak seperti pada Gambar 1.



Gambar 2. Skema pengukuran jarak menggunakan sensor *fluxgate*

## 2. Hasil dan Analisis Pengukuran Jarak Berbasis Fluxgate

Pengukuran respon tegangan keluaran terhadap medan magnet luar dengan memberikan arus terlihat pada Gambar 16. Terlihat Respon pengukuran pengaruh medan luar dengan memberikan arus listrik mengalami saturasi pada  $\pm 20$  mA. Hal ini menunjukkan bahwa linearitas respon sensor terhadap medan luar berada pada arus sumber  $-20$  mA sampai  $+20$  mA.

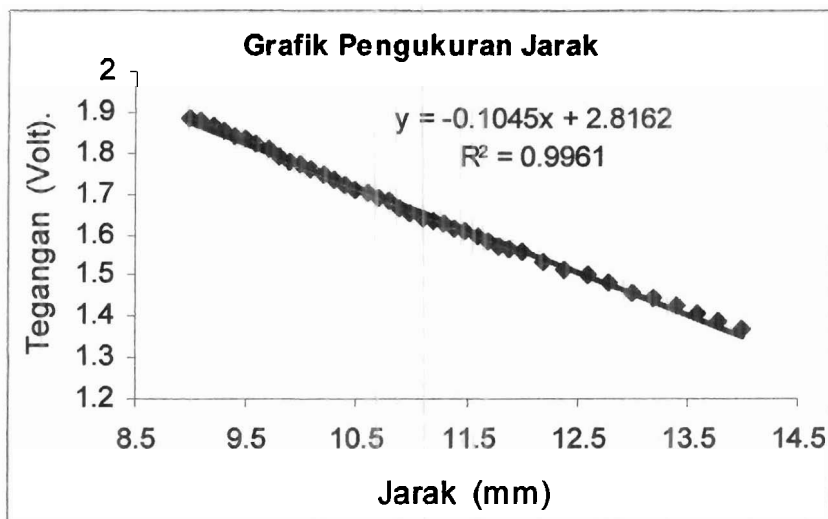


Gambar 16. Respon Tegangan Keluaran Terhadap Arus

Pengukuran Jarak dengan menggunakan mikrometer digital diperlihatkan oleh Gambar 17. Dari pengukuran yang telah dilakukan, maka didapatkan hubungan antara jarak dengan keluaran sensor (tegangan) yang secara matematis dapat dedekati dengan persamaan :

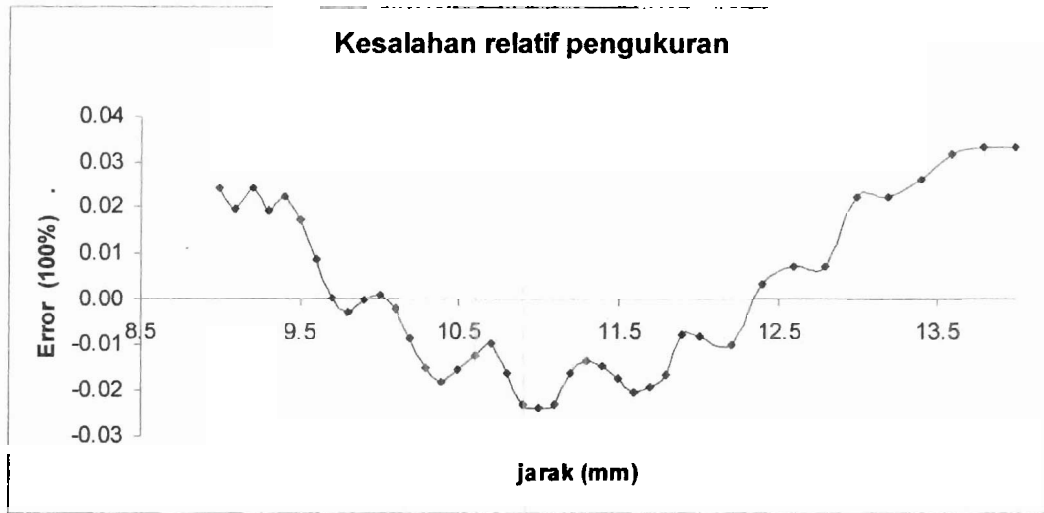
$$V = -0,1045X + 2,8162 \quad (29)$$

x dalam *mm* dan y dalam *volt*. Hal ini berarti bahwa perubahan jarak yang terjadi antara target dengan sensor berbanding terbalik dengan karakteristik keluaran sensor, semakin jauh dari target karakteristik tegangan keluaran makin kecil dan sebaliknya.

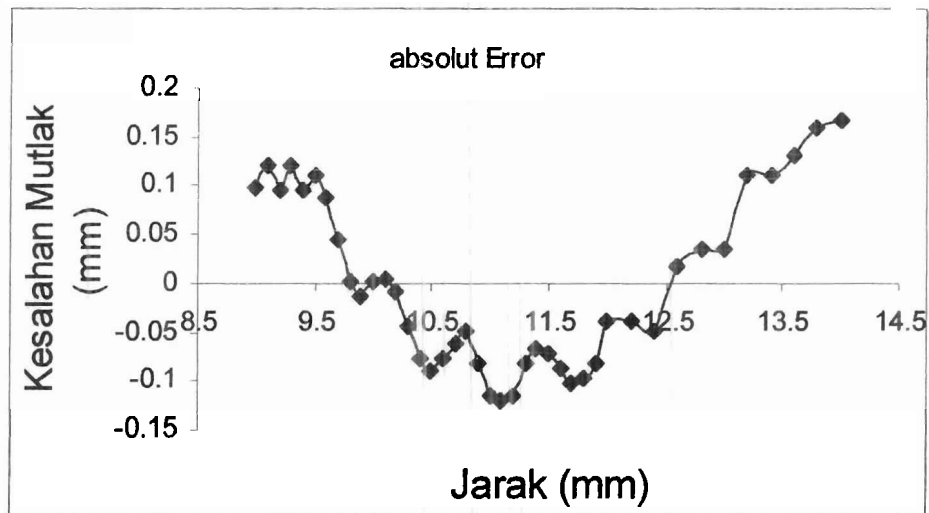


Gambar 17. Respon Tegangan Keluaran Terhadap Jarak Target.

Kesalahan relatif dan absolut terhadap pengukuran jarak diperlihatkan pada Gambar 18 dan Gambar 19.



Gambar 18. Kesalahan Relatif Pengukuran Jarak



Gambar 19. Kesalahan Absolut Pengukuran Jarak.

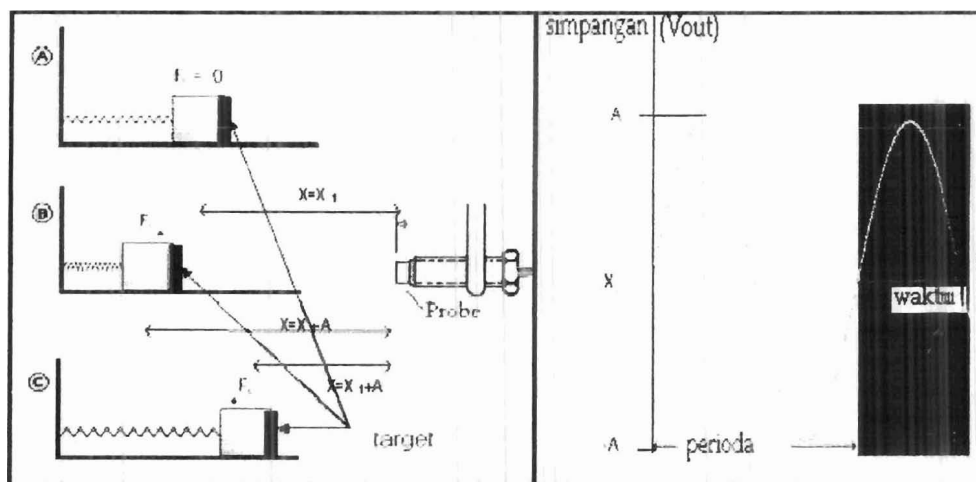
Dari Gambar 18 dan Gambar 19, terlihat bahwa kesalahan relatifnya adalah 0,035% dan kesalahan absolut pengukuran yang dilakukan adalah 0,17 um.

### C. Aplikasi Fluxgate untuk Pengukuran Getaran.

#### 1. Metode dan Realisasi Pengukuran Getaran Berbasis Fluxgate.

Aplikasi *fluxgate* terhadap getaran dilakukan dengan cara menempatkan *fluxgate* dekat objek yang bergetar. Posisi sensor ini tidak bersentuhan dengan objek yang bergetar. Getaran yang terjadi akan menyebabkan perubahan simpangan (amplitudo), Getaran yang terjadi akan menyebabkan perubahan jarak yang terjadi antara target pada ujung penggetar dengan sebuah titik didepannya. Pada kasus ini sebuah sensor diletakkan berhadapan dengan ujung penggetar (target) tampak seperti pada Gambar 20.

Ketika terjadi getaran, maka target yang berada diujung penggetar akan ikut bergetar. Hal ini akan berakibat pada jarak antara target dengan sensor akan mengalami perubahan. Sebuah *fluxgate* akan memancarkan medan magnet dari kumparan eksitasi. Medan magnet yang dipancarkan akan sebagian mengenai target yang merupakan bahan feromagnetik. Medan ini akan diubah menjadi arus induksi sebelum kemudian diubah lagi menjadi medan magnet induksi.



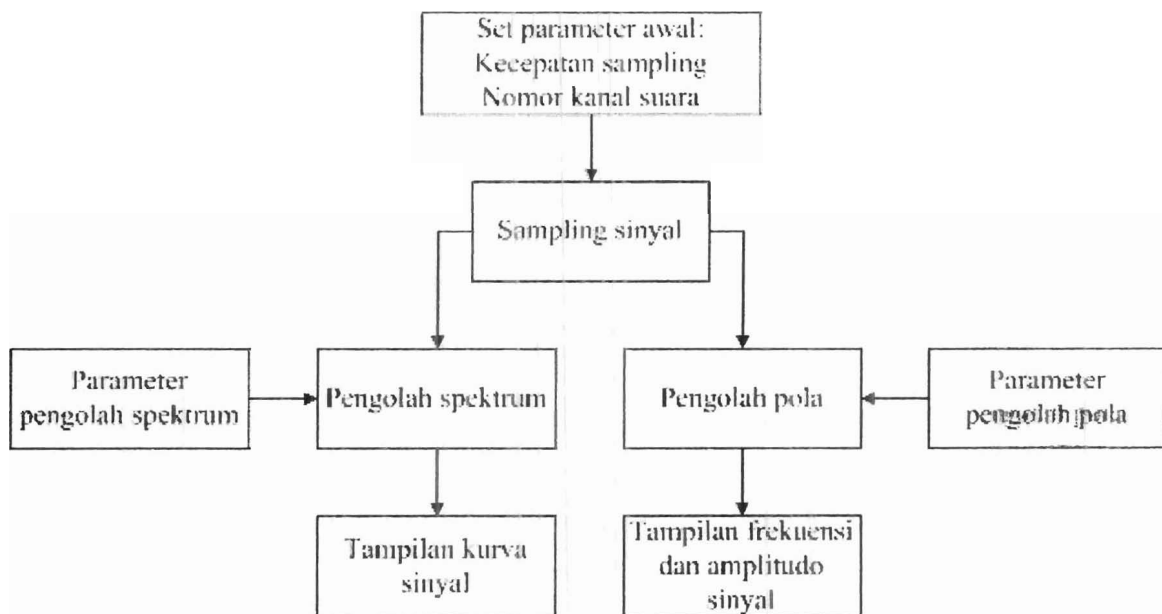
Gambar 20. Prinsip kerja *fluxgate* sebagai sensor getaran.

Medan magnet yang diterima maupun yang dihasilkan akan mengalami perubahan ketika terjadi perubahan jarak. Medan magnet yang dihasilkan oleh target ini nantinya akan disuperposisikan dengan medan magnet referensi. Hasil superposisi tersebut akan diubah menjadi ggl induksi oleh kumparan *pick-up*. 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 target ( $V(x)$ ).

Sinyal getaran yang keluar dari sistem pengolah sinyal merupakan sinyal analog. Sinyal ini merupakan tegangan keluaran sebagai fungsi dari waktu. Tegangan keluaran sensor *fluxgate* berbanding lurus dengan posisi benda sehingga dengan melakukan Transformasi Fourier frekuensi dan amplitudo getaran dapat langsung diketahui. Diagram alir perangkat lunak ini ditunjukkan Gambar 21.

Pengolahan sinyal keluaran dari sensor dilakukan pada komputer dengan menggunakan perangkat lunak. Perangkat lunak yang digunakan adalah LabVIEW 8.0 produk dari National Semiconductor. Sinyal analog dari sensor langsung dihubungkan dengan komputer melalui port audio input. Hal ini dapat dilakukan karena karakteristik sinyal getaran mirip dengan sinyal audio pada umumnya. Perbedaan antara keduanya hanya pada frekuensinya saja.

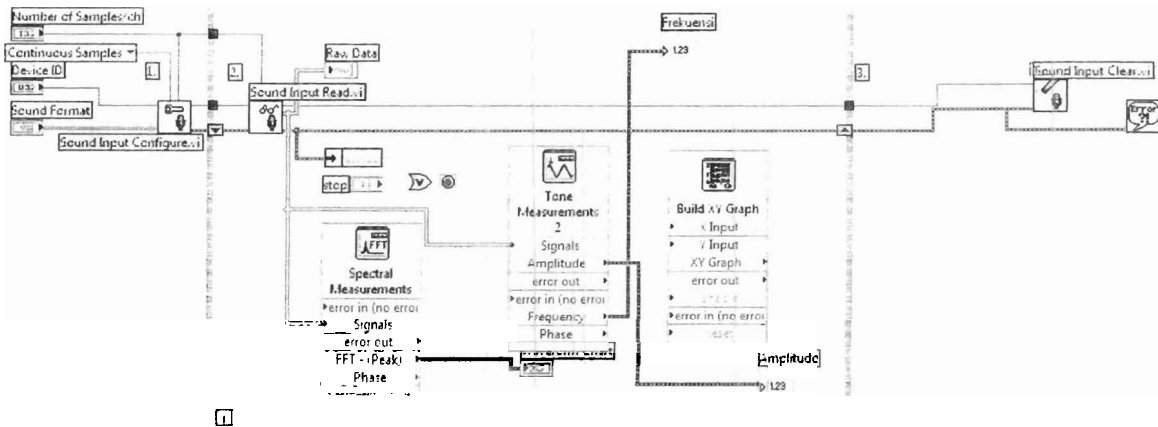


Gambar 21. Diagram alir perangkat lunak.

Perangkat lunak berperan mengolah sinyal yang sudah masuk ke komputer agar dapat dimanfaatkan sesuai dengan kebutuhan. LabVIEW 8.0 sudah memiliki fasilitas



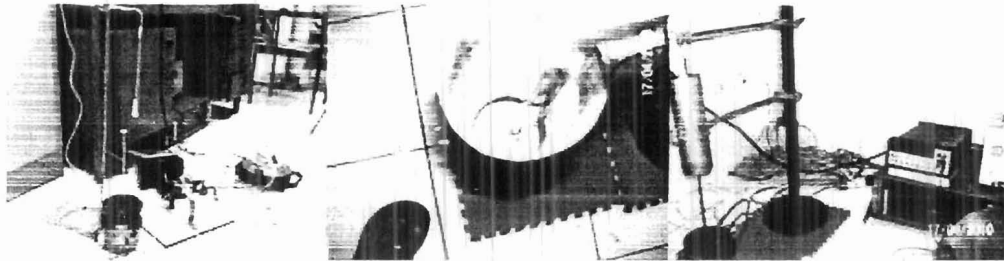
pengolah sinyal, termasuk didalamnya sudah ada algoritma FFT. Implementasi diagram alir tersebut pada LabVIEW 8.0 ditunjukkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Diagram blok LabVIEW 8.0

Antarmuka komputer dengan rangkaian analog sensor *fluxgate* menggunakan komunikasi melalui port audio memiliki kelebihan dibanding dengan menggunakan port serial maupun USB, kelebihan itu adalah: 1) tidak perlu menggunakan rangkaian *analog to digital converter* (ADC), 2) rangkaian sistem sensor lebih hemat daya dan 3) perangkat lunak pada komputer lebih mudah dibangun. Tetapi komunikasi ini juga memiliki kelemahan, yaitu: 1) sinyal analog mudah mengalami gangguan pada kabel, 2) amplitudo maksimum sinyal tergantung pada batas kemampuan *sound card* komputer, dan 3) memerlukan ground yang besar untuk mengurangi pengaruh tegangan jala-jala.

Pengukuran dengan menggunakan sumber pengetar Dynamic exciter dengan sumber pembangkit getaran menggunakan RMS TGA 30 dan Audiogenerator. Pengukuran getaran dilakukan tanpa menggunakan shielding magnetik. Foto set-up pengukuran ditunjukkan Gambar 23.



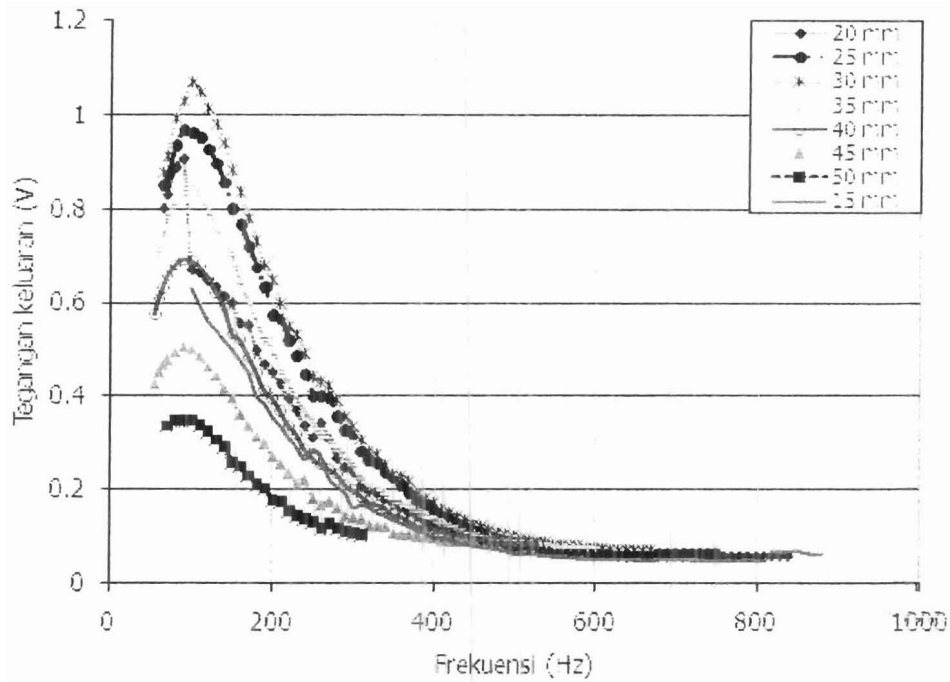
Gambar 23. Foto Set-up pengukuran getaran dengan teknik pengukuran langsung

## 2. Hasil dan Analisis Pengukuran Getaran Berbasis Fluxgate.

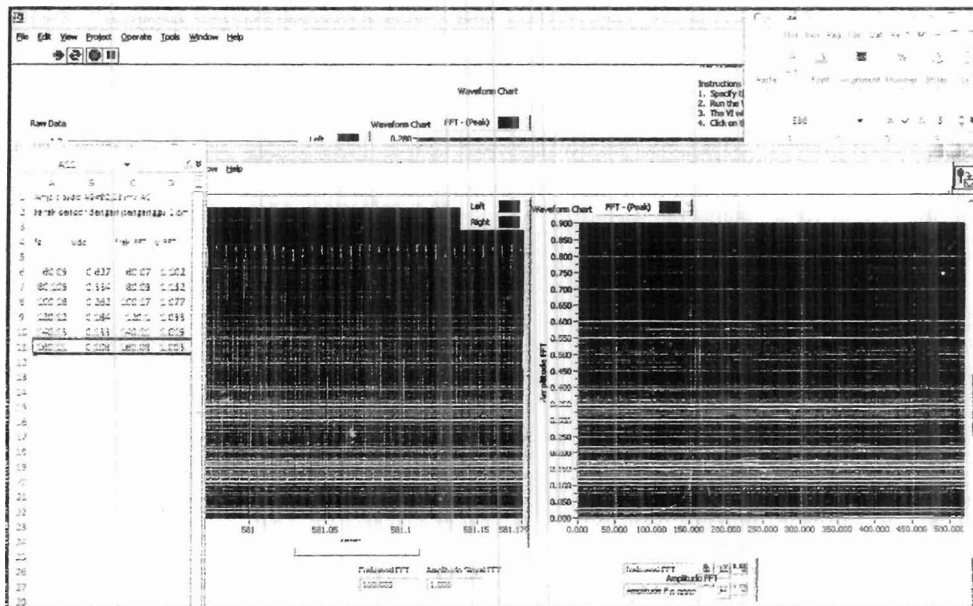
Pengukuran getaran diawali dengan mencari hubungan tegangan keluaran sensor dengan jarak antara probe *fluxgate* dengan objek bergetar. Pengukuran ini dilakukan untuk mendapatkan jarak optimum yang menghasilkan respon tegangan keluaran tertinggi. Pengukuran dilakukan dengan memvariasikan jarak antara probe sensor *fluxgate* ( $y$ ) dengan objek sedangkan amplitudo pengetar dibuat konstan. Hasil respon keluaran sensor terhadap frekuensi dengan variasi jarak ditunjukkan Gambar 24.

Berdasarkan Gambar 24, dapat terlihat bahwa tegangan keluaran terbesar dari diperoleh pada jarak 30 mm, sedangkan untuk jarak lebih besar tegangan keluaran cenderung mengecil.

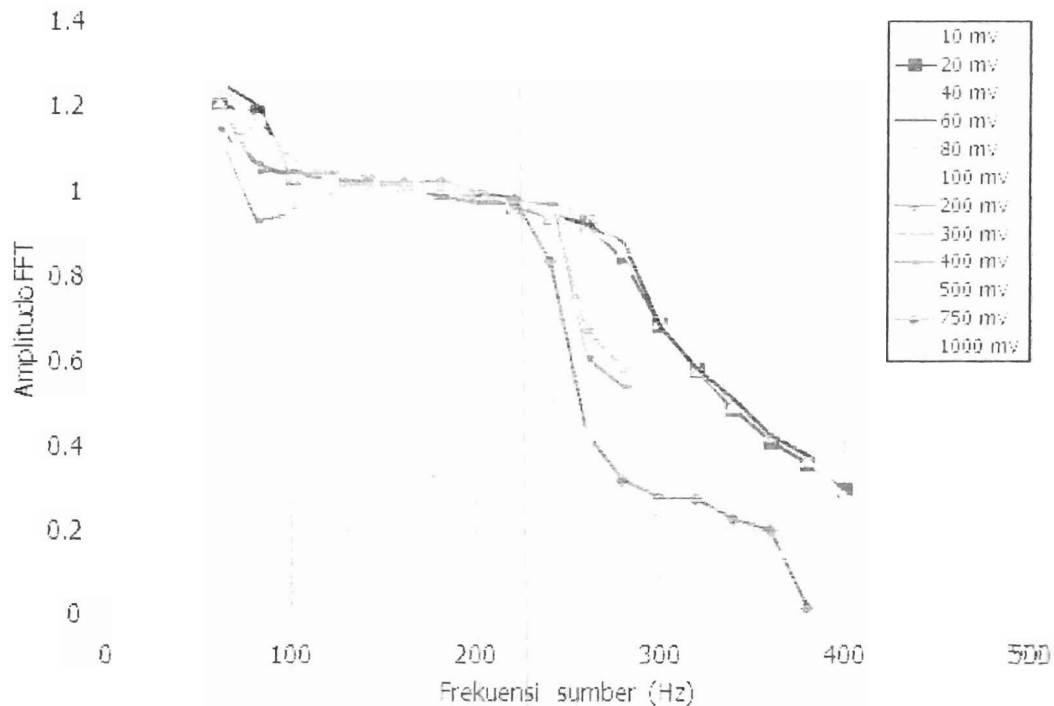
X 12/04/2017 10:00:00  
KEMENTERIAN RI  
PUSAT PENELITIAN DAN PENGUJIAN  
KEMENTERIAN RI



Gambar 24. Hasil pengukuran karakteristik tegangan keluaran terhadap frekuensi dengan  $y$  bervariasi dan amplitudo getaran konstan.



Gambar 25. Contoh respon keluaran getaran pada frekuensi 160 Hz dengan percepatan amplitudo sumber penggetar 80 mV.

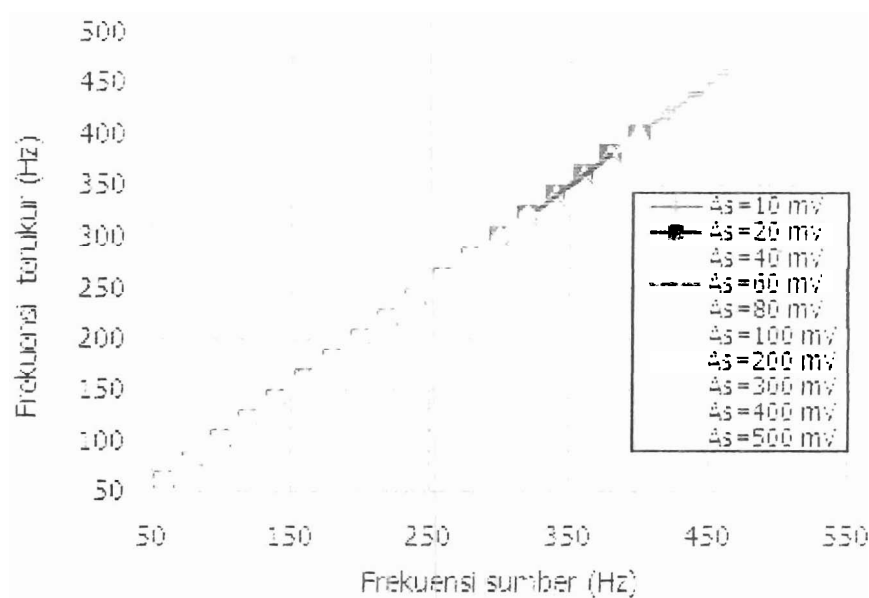


Gambar 26. Hasil pengukuran getaran dengan memvariasikan amplitudo sumber penggetar 10-1000 mV.

Berdasarkan jarak optimum yang diperoleh maka dilakukan pengukuran terhadap variasi amplitudo sumber penggetar. Pengambilan data dilakukan dengan merubah amplitudo sumber penggetar dari 10-1000 mV sedangkan y dibuat tetap sebesar 30 cm. Gambar 25, menunjukkan salah bentuk keluaran respon getaran pada frekuensi 160 Hz dengan percepatan amplitudo penggetar 80 mV. Hasil pengukuran terhadap variasi amplitudo ini ditunjukkan Gambar 26.

Berdasarkan Gambar 26, terlihat bahwa dengan teknik pengukuran langsung daerah kerja sensor adalah sekitar 80-280 Hz untuk amplitudo sumber 10-500 mV, sedangkan untuk amplitudo 750 mV daerah kerja hanya sampai 220 Hz. Ketika amplitudo sumber penggetar 10 mV respon amplitudo FFT berada di bawah yang lainnya, hal ini disebabkan oleh terlalu kecilnya simpangan yang dihasilkan oleh sumber sehingga respon sensor juga kecil. Sedangkan untuk amplitudo sumber penggetar di atas 750 mV respon amplitudo sensor tidak beraturan lagi, ini

disebabkan oleh terlalu besarnya simpangan penggetar sehingga respon sensor tidak stabil lagi bahkan kadang-kadang sensor mengalami saturasi.



Gambar 27. Grafik frekuensi sumber terhadap frekuensi FFT terukur dengan amplitudo sumber penggetar 10-500 mV.

Dari Gambar27, terlihat. respon frekuensi pada daerah kerja untuk masing-masing dengan amplitudo sumber penggetar 10-500 mV, terlihat pada daerah ini respon frekuensi sangat linier tetapi rentang frekuensi yang terukur berbeda-beda. Rentang frekuensi terlebar diperoleh pada saat amplitudo sumber 10 mV, hal ini disebabkan karena simpangan objek bergetar tidak terlalu besar sehingga sensor *fluxgate* masih bisa menangkap respon keluaran. Rentang frekuensi terendah pada saat amplitudo 500 mV karena pada frekuensi lebih tinggi keluaran sensor mengalami saturasi sehingga tidak terukur lagi.

## **BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **VI.1. Kesimpulan**

Telah berhasil dikembangkan elemen fluxgate dengan proses sederhana dan harga murah, namun tetap memberikan hasil yang baik dan ukuran yang kecil. Pengembangan elemen fluxgate telah berhasil digunakan untuk berbagai berbagai pengukuran. Pengukuran medan magnetik lemah, Pengukuran jarak dalam orde kecil dan Pengukuran getaran mesin.

Berdasarkan karakterisasi, kalibrasi dan pengukuran diperoleh hasil-hasil yang baik. Berdasarkan pengukuran terhadap medan magnet lemah sensor dapat mengukur medan dalam rentang pengukuran  $\pm 10 \mu\text{T}$  dengan sensitivitas 101,8 mV/uT (setelah penguatan 25x kali), resolusi 25 nT dan kesalahan relatif 0,13%. Aplikasi terhadap pengukuran jarak dalam orde kecil, sensor dapat mengukur jarak 14 mm dengan sensitivitas 104,5 mV/mm, resolusi 0,17mm (170  $\mu\text{m}$ ) dan kesalahan relatif 0,035%.

Aplikasi terhadap getaran dilakukan dengan dua teknik pengukuran yaitu teknik pengukuran langsung dan tidak langsung. Berdasarkan teknik pengukuran langsung sensor dapat mengukur frekuensi sampai 500 Hz, dengan kesalahan maksimum absolut dan relatif 2,59 Hz dan 0,58%.

### **VI.2. Saran**

Penelitian ini akan bermanfaat jika dilakukan studi lanjut untuk menyempurnakan hasil-hasil yang telah dicapai. Oleh karena itu disampaikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Berdasarkan kemampuan sensor dalam mengukur frekuensi rendah, maka fluxgate dapat digunakan untuk mengukur kondisi/kejadian yang berkerja pada frekuensi rendah seperti getaran gempa, bendungan dan jembatan. Sedangkan kemampuan sensor dalam mendeteksi bahan magnetik di bawah permukaan dapat dikembangkan lebih jauh untuk peralatan dalam kegiatan eksplorasi bahan mineral magnetik.

2. Berdasarkan pengalaman sulitnya mendapatkan material sebagai inti seperti Vitrovac dan Metglas sebaiknya mulai dilakukan pembuatan material ini. Oleh karena itu diharapkan penelitian ini terus dikembangkan baik dalam pembuatan material inti feromagnetik, pembuatan elemen fluxgate maupun dalam aplikasinya. Pembuatan material inti dan elemen fluxgate dapat dilakukan dengan teknologi mikro seperti teknik elektrolis, sputtering, maupun dengan teknik-teknik yang lain.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ando, B., Baglio, S., Caruso, V., Sacco, V., dan Bulsara, A., (2006): Multilayer Based Technology to Bulid RTD *Fluxgate* Magnetometer, *J. Sensor & Transduser Magazine*, (S&T e-Digest), **65** pp. 509-514.
- Baschiroto, A., Dallago, E., Malcovati, P., Marchesi, M., dan Venchi, G., (2006a): Development and Comparative Analysis of *Fluxgate* Magnetic Sensor Structure in PCB Tecnology, *IEEE Transaction on Mangetics*, **42**. No. 6 pp. 1670-1680.
- Caruso, M.J, dan B, Tamara, (1998) : A New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensor Magnazine*, *Magnetic Sensor*, Tersedia di [www.ssec.honeywell.com](http://www.ssec.honeywell.com). 2007.
- Djamal, M., (ed)., (2005): Desain dan Pembuatan Sensor Medan Magnet *Fluxgate* Presisi Tiga Dimensi Menggunakan Metoda Posisi Pulsa, *Laporan Penelitian Hibah Bersaing XII*.
- Djamal, M., dan Setiadi, R.N.,(2005a): Displacement Sensor Based on *Fluxgate* Magnetometer, Proc. on *Asian Physics Symposium (APS)* 7-8 August, Bandung.
- Djamal, M., dan Setiadi, R.N. (2006a): Pengukuran Medan Magnet Lemah Menggunakan Sensor Magnetik *Fluxgate* dengan Satu Kumparan *Pick-up*, *Prosiding ITB Sains & Tek.* Vol.**38A**, No.2, pp. 99-115.
- Djamal, M., Setiadi, R.N., & Yulkifli, (2008), *Preliminary Study of Vibration Sensor Based on Fluxgate Magnetic Sensor*, Proc. of ICMNS, Bandung.
- Djamal, M. (2010): Sensor dan Sistem Sensor: State of the Art, Kontribusi dan Pengembangan di Masa Depan, *Buku Pidato Olmiah Guru Besar Prof. Mitra Djamal*, Institut Teknologi Bandung.
- Firmansyah. A., (2006), *Fluxgate magnetometer sebagai alat ukur Getaran*, Tugas Akhir 2, Fisika ITB, Bandung 2006
- Fraden, J. (1996) : *Handbook of Modern Sensor*. New York, Springer-Verlag New York, Inc.
- Goldman, S. (2000): *Vibration Spectrum Analysis*, edisi 2, Industrial Press Inc, New York.
- Göpel, W., Hesse, J. dan Zemel, J.N. (1989) : *Sensors, A Comprehensive Survey, Magnetic Sensors*, VCH Publishers Inc., Suite.
- Hendro, & Djamal, M., (2007,) *Pembuatan Sensor Getaran Berbasis Fluxgate*, *Berita Utama LPPM ITB*, Bandung,.
- Intechno. (2009): *Sensor Market 2008*, Intechno Consulting, Basle, Switzerland, 05.
- Liu, S. (2006): Studi on the low power consumption racetrack *fluxgate*, *J. Sensor and Actuator A*, **130**, pp. 124-128.



- Park, H.S., Hwang, J.S., Choi, W.Y. dan Shim, D.K. (2004): Development of MicroFluxgate Sensors with Electroplated Magnetic Cores for Electronic Compass, *J. Sensor and Actuator*, **114**, pp 224-229.
- Ripka, P. (2001a) : *Magnetic Sensor and Magnetometers*, Artec House.
- Ripka, P., Kawahito, S., Choi, S.O., Tipek, A. dan Ishida, M. (2001b): Micro-fluxgate Sensor with Close Core, *J. Sensor and Actuator A*, **9**, pp. 65-69
- Symon, K.R., (1980) : *Mechanics*, third edition, Addison Wislye Company.
- Suyatno, , (2007a), *Desain dan Pengembangan Sensor Magnetik Fluxgate dan Aplikasinya untuk Mengukur Getaran*: Tesis S2, ITB, Bandung.
- Traenkler, H.-R.(2001): Core Technologies for Sensor Systems, *Proc. Indonesian German Conference*, pp. 1-9.
- Wang, Y., Liu, G., Xiong, Y., Yang J. dan Tian, Y. (2006): Fabrication of the Three-dimensional Solenoid Type Micro Magnetic Sensor, *J. of Physics: Conference Series*, **34**, pp 880-884.
- Yulkifli, Suyatno, Djamel, M. & Setiadi, R.N., (2007) *Designing and Making of Fluxgate Sensor with Multi-Core Structure for Measuring of Proximity*, Proceedings of The Conference Solid State Ionic (CSSI), Tangerang, pp. 164-170.
- Zorlu, O, Kejik, P. dan Popovic, R.S. (2007): An orthogonal fluxgate-type magnetic microsensor with electroplated Permalloy core, *J. Sensors and Actuator A*, **135**, pp. 43-49.

## B. DRAF ARTIKEL ILMIAH atau ARTIKEL YANG SUDAH TERBIT

1. Yulkifli, Hufri, Setiadi, R.N., Djamel, M., Khairurrijal and Kurniadi, D.: Development of a Fluxgate Sensor for Vibration Sensor Low Frequency, Revisi pembimbing (to be Submitte in *Journal of Instrumentation*).
2. Yulkifli, Hufri dan Mitra Djamel, Desain Sensor Getaran Frekuensi Rendah Berbasis *Fluxgate*, SIBF, 22 Desember 2010, Bandung, (Accepted).
3. Yulkifli, Wahyudi, I., & Djamel, M., *Development of Distance Measuring Instrument of a Metal Expansion Based on a Fluxgate Sensor*, Proc. 3rd International Graduate Conference on Engineering, Science and Humanities (IGCESH )School of Graduate Studies, Universiti Teknologi Malaysia, 2– 4 November, pp. 1-5, 2010.
4. Djamel, M., Yulkifli, Setiadi, A., & Setiadi, R.N., Development of a Low Cost Vibration Sensor Based on Fluxgate Element, International conference of the Institute for Environment, Engineering, Economics and Applied Mathematics ( IEEEAM), Malta, Itali, September, 15-17, pp. 248-251, 2010. Makalah ini juga di terima pada *Journal WEAS Transactions on Circuits, Systems and Signal*, (Accepted).
5. Yulkifli, Setiadi, A., Djamel, M. and Khairurrijal, (2010): Development of Mathematical Model of Vibration Sensor base on Fluxgate Magnetic Sensor. *The 4<sup>th</sup> Asian Physics Symposium (APS)*, Ocktober, 12-13, 2010.
6. Yulkifli, Hufri, Mitra Djamel: Optimasi Resolusi Keluaran Sensor Fluxgate menggunakan Low Pas Filter (LPF) orde kc- n, Semirata UNRI, 2010
7. Hufri, Yulkifli Sensor Magnetik Fluxgate Menggunakan Kumbaran Pick-up Ganda. *Journal Invotek FT UNP Padang*.
8. Hufri, Yulkifli : Analisis Rangkaian Pengolah Sinyal (RPS) Sensor Magnetik Fluxgate, Prosiding Sminar Nasional Fisika Universitas Andalas (SNF-UA) 16 November 2009.
9. Yulkifli, Mitra Djamel, Khairurrijal, Deddy Kurniadi, Pavel Ripka: The Influence of the Tape-core Layer Number of Fluxgate Sensor to the Demagnetization Factor: *Proceedings ICICI-BME*, November, 23-25, 2009, Bandung.
10. Yulkifli, Mitra Djamel, Khairurrijal, Deddy Kurniadi, Pavel Ripka: Demagnetization Factor of a Fluxgate Sensor Using Double Pick-up Coils Configurations. *Proceedings of The 3rd Asian Physics Symposium (APS 2009)* July 22 – 23, 2009, Bandung, Indonesia.

## **C. SINOPSIS PENELITIAN LANJUTAN**

**Penelitian hanya untuk Tahap II.**

**LAMPIRAN LAPORAN EKSEKUTIF**

## LAPORAN EKSEKUTIF

# Desain dan Pengembangan Sensor Magnetik *Fluxgate* Sensitivitas Tinggi Menggunakan Model *Ellips-Multicore Double Pick-up* dan Aplikasinya<sup>1)</sup>

Oleh:

Hufri, Yulkifli, Mitra Djamal<sup>2)</sup>

## I. PERMASALAHAN DAN TUJUAN PENELITIAN

Besarnya kompetisi di pasar bebas mengharuskan pengembangan instrumen yang terus menerus baik dari sisi kualitas, harga maupun keandalannya (Traenkler, 2001). Meningkatnya kebutuhan untuk otomatisasi, keamanan dan kenyamanan menggiring orang untuk mengembangkan instrument dan sistemnya yang baru dengan prinsip dan metoda yang berbeda-beda.

Keberadaan instrumen pengukur dan pengontrol dalam sebuah industri, pembangunan jembatan layang seperti Suramadu, bendungan dan pembangunan lainnya adalah sangat penting agar dapat memberikan peringatan dini atau *early warning* kepada pemakainya. Salah satu instrumen tersebut adalah sensor. Jumlah sensor dan sistem sensor yang diperlukan juga meningkat. Saat ini teknologi sensor telah memasuki bidang aplikasi baru dan pasar yang semakin meluas seperti otomatis, rumah cerdas (*smart home*), penelitian, dan teknologi pengolahan (Intechno, 2008).

Pada waktu yang bersamaan sensor dan sistem sensor juga menempati posisi yang sangat penting untuk penelitian dan pengembangan hampir di semua bidang (Djamil, 2010). Sensor harus memiliki sensitivitas dan resolusi yang baik, mudah dioperasikan dan harganya murah dan mudah untuk diperoleh. Sensor yang ada di pasaran saat ini harganya sangat mahal, hal ini disebabkan karena proses fabrikasinya kompleks dan memerlukan proses yang lama karena didatangkan dari luar negeri.

Sensor *fluxgate* merupakan sebuah sensor yang dapat dibuat dengan proses sederhana memiliki ukuran kecil, kebutuhan daya rendah, rentang pengukuran cukup lebar, dan dapat diaplikasikan secara luas seperti pengukur medan magnetik di dalam ruang, pemetaan, karakterisasi batuan, kompas, navigasi, pencarian bahan tambang, pengukur kuat medan elektromagnetik dan sensor jarak dalam orde kecil. Potensi yang dimiliki oleh sensor *fluxgate* ini, memberikan peluang yang cukup besar untuk diaplikasikan menjadi sensor getaran (*vibration sensor*), terutama untuk getaran dengan perubahan amplitudo yang sangat kecil (orde mikrometer).

Sensor yang ada di pasaran saat ini harganya sangat mahal, hal ini disebabkan karena proses fabrikasinya kompleks dan memerlukan proses yang lama karena didatangkan dari luar negeri. Sensor *fluxgate* merupakan sebuah sensor yang dapat dibuat dengan proses sederhana memiliki ukuran kecil, kebutuhan daya rendah, rentang pengukuran cukup lebar, dan dapat diaplikasikan secara luas seperti pengukur medan magnetik di dalam ruang, pemetaan, karakterisasi batuan, kompas, navigasi, pencarian bahan tambang, pengukur kuat medan elektromagnetik dan sensor jarak dalam orde kecil. Potensi yang dimiliki oleh sensor *fluxgate* ini, memberikan peluang yang cukup besar untuk diaplikasikan menjadi sensor getaran (*vibration sensor*), terutama untuk getaran dengan perubahan amplitudo yang sangat kecil (orde mikrometer). Berdasarkan permasalahan di atas dan keunggulan yang dimiliki sensor *fluxgate*, maka kami berkeinginan untuk mengembangkan sensor *fluxgate* dan aplikasinya dengan proses sederhana, biaya murah dan ukuran kecil, tentunya dengan kualitas yang dapat bersaing dengan produk luar negeri.

Tujuan umum penelitian ini adalah mendesain dan mengembangkan sensor magnetik *fluxgate* sensitivitas dan resolusi tinggi menggunakan elemen sensor model *ellip-multicore double pick-up* dengan teknik harmonisa kedua dan aplikasi untuk sensor.

## **II. INOVASI IPTEKS**

### **a. Kontribusi terhadap pembaharuan dan pengembangan ipteks**

Sensor medan magnetik fluxgate memiliki banyak aplikasi terutama untuk mengukur medan magnetik. Selain itu sensor ini juga dapat digunakan sebagai sensor jarak. Sebagai sensor medan magnetik, aplikasinya antara lain sebagai pengukur medan magnetik di dalam ruang, pemetaan medan magnetik suatu bahan atau suatu wilayah, karakterisasi bahan batuan, kompas elektronik, sistem navigasi pada pesawat udara, pencarian bahan tambang, pengukur kuat medan elektromagnetik. Sedangkan sebagai sensor jarak, sensor medan magnetik fluxgate ini dapat digunakan sebagai sensor getaran, sensor berat, sensor tekanan, sensor ketinggian fluida di dalam tangki, pengukuran posisi pada sensor ultrasonografi. Jika semakin banyak aplikasi baru yang dapat dibuat dengan menggunakan sensor fluxgate ini maka akan banyak pula tercipta pembaharuan-pembaharuan di dalam instrument elektronika khususnya sensor. Dan dengan terus mengembangkan aplikasi-aplikasi baru dengan melakukan penelitian lebih lanjut akan dapat diperoleh aplikasi lain dari sensor ini yang nantinya akan dapat berkontribusi terhadap pembaharuan dan pengembangan ipteks

### **b. Perluasan cakupan penelitian**

Cakupan penelitian dari sensor fluxgate ini sangat luas, mulai dari bidang kesehatan seperti sensor posisi dan scanning medan magnetik pada manusia. Dalam bidang industri seperti sensor magnetik, sensor getaran, sensor jarak, sensor arus, sensor berat, sensor gerak, sensor tekanan, dll. Dalam bidang pertambangan diperlukan sensor pencari bahan tambang, pemetaan daerah potensial bahan tambang, karakterisasi bahan batuan untuk menghitung kadar bahan tambang, dll. Aplikasi lainnya adalah dalam bidang penerbangan dan antariksa, yaitu sebagai sensor navigasi, ketinggian, dan posisi pesawat ruang angkasa. Masih banyak lagi bidang-bidang lain yang dapat menggunakan aplikasi dari sensor medan magnetik ini. Seperti bidang pendidikan sebagai pembelajaran tentang medan magnetik.

### III. KONTRIBUSI TERHADAP PEMBANGUNAN

#### a. Dalam mengatasi masalah pembangunan

Dalam masalah pembangunan sensor ini dapat membantu mengatasi masalah-masalah yang dihadapi seperti mahalnya harga alat sejenis yang harus diimpor. Pengembangan aplikasi sensor dan inovasi-inovasi baru akan dapat memecahkan suatu masalah yang dihadapi di dalam berbagai bidang yang memerlukan sebuah sensor dengan fungsi khusus yang ketersediannya di pasar belum ada. Misalnya dalam membangun sebuah industri yang memerlukan sensor-sensor, hal ini dapat dibuat dengan mengaplikasikan sensor hasil penelitian ini. Penggunaan produksi negeri sendiri dapat memajukan industri dan perekonomian di dalam negeri. Selain itu akan dapat menghemat devisa negara karena kebutuhan akan sensor selama ini di impor dari luar negeri. Disamping memiliki arti ekonomis yang sangat besar, hasil penelitian ini juga memiliki arti kebanggaan nasional karena riset ini sangat memberi peluang kepada Indonesia untuk ikut berbicara dalam tingkat dunia. Selain mengembangkan aplikasi sensor *fluxgate* pada sensor getaran mesin dengan daerah frekuensi tinggi untuk industri manufaktur, kami juga akan mengembangkan sensor *fluxgate* untuk frekuensi rendah. Pengukuran getaran dengan frekuensi rendah sangat diperlukan dalam pendeteksi getaran di alam, seperti deteksi getaran bangunan, bendungan dan jembatan. Berdasarkan karakterisasi awal yang kami lakukan sensor *fluxgate* dapat mendeteksi frekuensi getaran yang sangat kecil ( $<1$  Hz), hasil ini sangat potensial untuk diterapkan menjadi sensor yang dapat mendeteksi gempa karena frekuensi getaran gempa pada umumnya berada di bawah 10 Hz. Berdasarkan letak geografis, Indonesia merupakan negara rawan gempa, maka dibutuhkan instrumen yang dapat mendeteksi getaran gempa tersebut agar dapat memberikan informasi secepat mungkin ke pusat informasi seperti Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), sehingga korban jiwa akibat gempa dapat diminimalisir. Indonesia yang terdiri dari ribuan pulau yang membentang dari Sabang sampai ke Merauke memerlukan sensor alat pendeteksi gempa dalam jumlah besar. Jarak antara pulau yang berjauhan menuntut penyebaran informasi secepat mungkin mengenai gempa dan bahayanya seperti potensi tsunami. Hasil penelitian ini akan kami kembangkan untuk sistem pengukuran gempa dan monitoring 3 dimensi secara online berbasis sensor *fluxgate*.



#### **b. Penerapan teknologi ke arah komersial.**

Dengan banyaknya aplikasi dari sensor fluxgate ini terbuka kemungkinan untuk penerapan teknologi ini ke arah komersial dan diproduksi secara massal. Untuk aplikasi sensor yang sudah ada dan harus diimpor, maka dengan penerapan teknologi sensor ini di dalam negeri tentunya akan dapat menghemat devisa dan menggunakan hasil dari dalam negeri sendiri. Sehingga akan dapat memajukan industri dan perekonomian di dalam negeri. Untuk aplikasi yang belum terdapat di pasar, besar kemungkinan aplikasi dari sensor ini akan dapat dimaksimalkan dengan mengedepankan inovasi-inovasi yang handal dalam menciptakan suatu alat atau sensor yang memiliki tingkat kualitas yang tinggi sehingga mendapat kepercayaan yang tinggi baik kepada calon konsumen maupun konsumen itu sendiri. Juga terbuka peluang komersial tidak hanya di dalam negeri, tetapi juga bersaing dengan produk lainnya dari luar negeri di pasar internasional. Tetapi untuk mencapai ini tentu diperlukan usaha yang maksimal dalam menciptakan produk yang handal dan berkualitas.

#### **c. Alih teknologi**

Dengan penerapan teknologi sensor dan kemampuan akan pengetahuan tentang sensor ini yang cukup baik, maka kita dapat menggantikan penggunaan alat-alat yang cukup mahal dan harus diimpor dengan alat-alat yang yang tidak kalah dalam kualitas. Dan dengan inovasi-inovasi baru, tentunya dapat menggantikan teknologi-teknologi yang menggunakan metoda lain yang jika menggunakan teknologi sensor ini dapat memperoleh banyak keuntungan, seperti harga yang murah, kualitas yang tidak kalah bagus, misalnya sensor getaran menggunakan laser (*laser vibration*) harganya sangat mahal sekitar US\$ 80.000, ([www.lasermotion.com](http://www.lasermotion.com)), sensor tekanan yang biasanya menggunakan strain gauge yang harganya sangat mahal sekitar US\$1,800, dapat digantikan dengan sensor ini yang lebih murah dan kualitas yang cukup baik.

#### **d. Kelayakan memperoleh hak paten/cipta**

Dari penelitian yang telah dilakukan sejauh ini hasilnya cukup baik dan sesuai dengan target yang dicanangkan yaitu memperoleh tingkat resolusi

pengukuran sensor di bawah 10 nT. Hasil ini membuka peluang untuk mendapatkan hasil-hasil lain berupa aplikasi sensor yang dapat memperoleh hak paten/cipta. Banyaknya aplikasi yang dapat dibuat dari sensor ini memungkinkan untuk mendapatkan hak paten atau hak cipta, terutama yang dikembangkan dalam penelitian ini. Setiap aplikasi yang dikembangkan dalam penelitian ini diusahakan untuk memperoleh hak paten/cipta sesuai dengan aplikasinya.

#### **IV. MANFAAT BAGI INSTITUSI**

**a) Keterlibatan unit-unit lain diperguruan tinggi dalam pelaksanaan penelitian**

Pada tahun I belum ada unit-unit lain dalam perguruan tinggi yang terlibat.

**b) Keterlibatan mahasiswa S2/S3**

Untuk tahap I dan II melibatkan mahasiswa S3, (Yulkifli, S.Pd., M.Si pada program studi Fisika Instrumentasi ITB sebagai anggota peneliti) dalam penelitian ini.

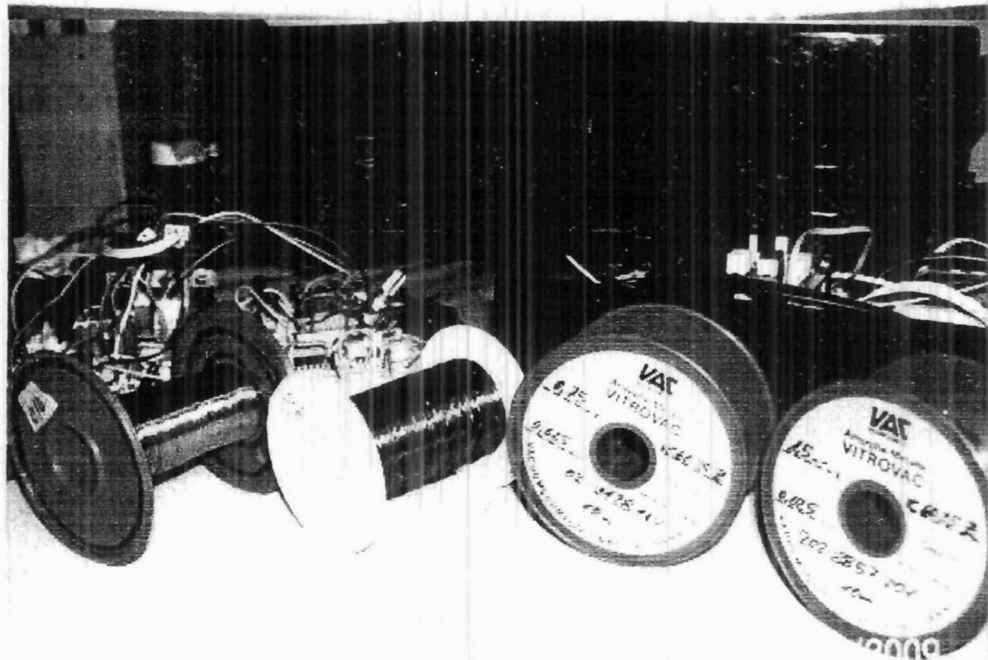
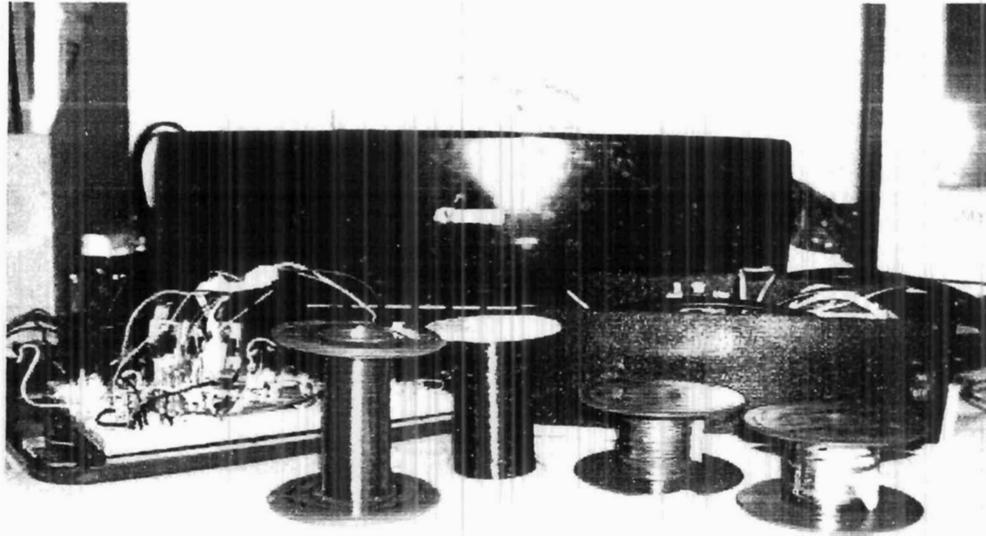
**c) Kerjasama dengan pihak luar**

Pada tahun I pihak luar yang terlibat adalah ITB khususnya laboratorium elektronika dan instrumentasi program studi Fisika untuk karakterisasi dan kalibrasi sensor. Tahap II akan melibatkan Lab. Akustik, divisi getaran KIM LIPI Batan Serpong

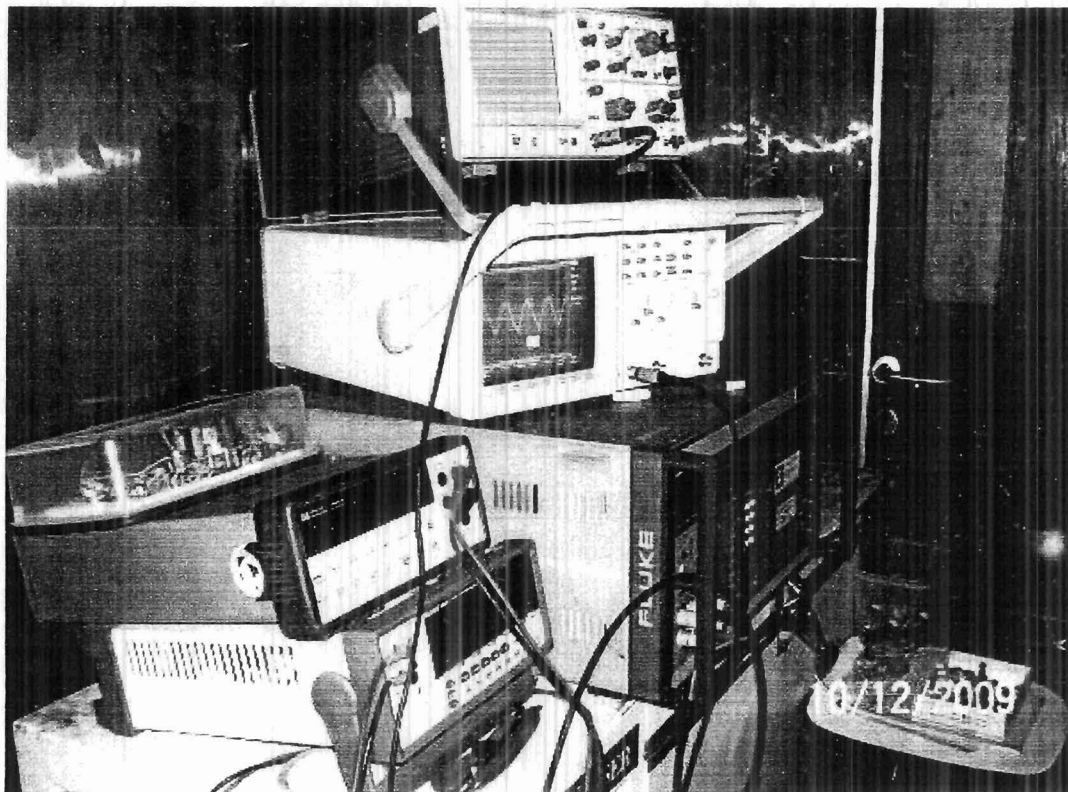
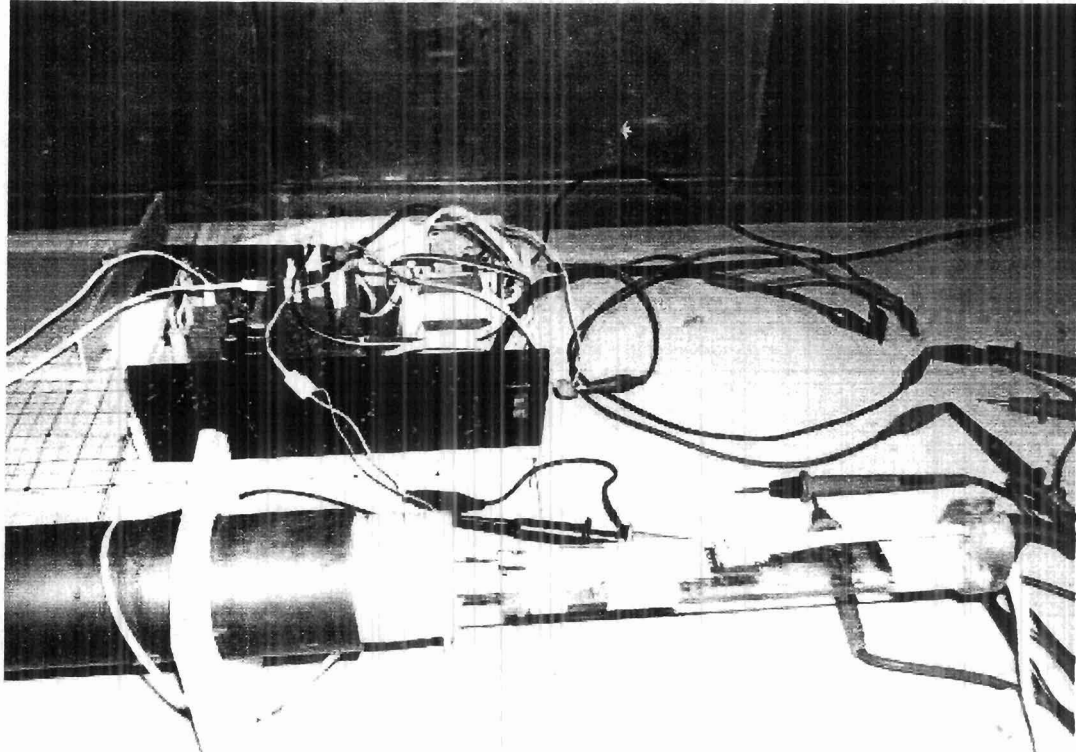
#### **V. PUBLIKASI ILMIAH**

1. Yulkifli, Setiadi, R.N., Djamal, M., Khairurrijal and Kurniadi, D.: Development of a Fluxgate Sensor for Vibration Sensor Low Frequency, Revisi pembimbing (to be Submitte in *Journal of Instrumentation*).
2. Yulkifli, Hufri dan Mitra Djamal, Desain Sensor Getaran Frekuensi Rendah Berbasis *Fluxgate*, SIBF, 22 Desember 2010, Bandung, (Accepted).
3. Yulkifli, Wahyudi, I., & Djamal, M., *Development of Distance Measuring Instrument of a Metal Expansion Based on a Fluxgate Sensor*, Proc. 3rd International Graduate Conference on Engineering, Science and Humanities (IGCESH) School of Graduate Studies, Universiti Teknologi Malaysia, 2– 4 November, pp. 1-5, 2010.
4. Djamal, M., Yulkifli, Setiadi, A., & Setiadi, R.N., Development of a Low Cost Vibration Sensor Based on Fluxgate Element, International conference of the Institute for Environment, Engineering, Economics and Applied

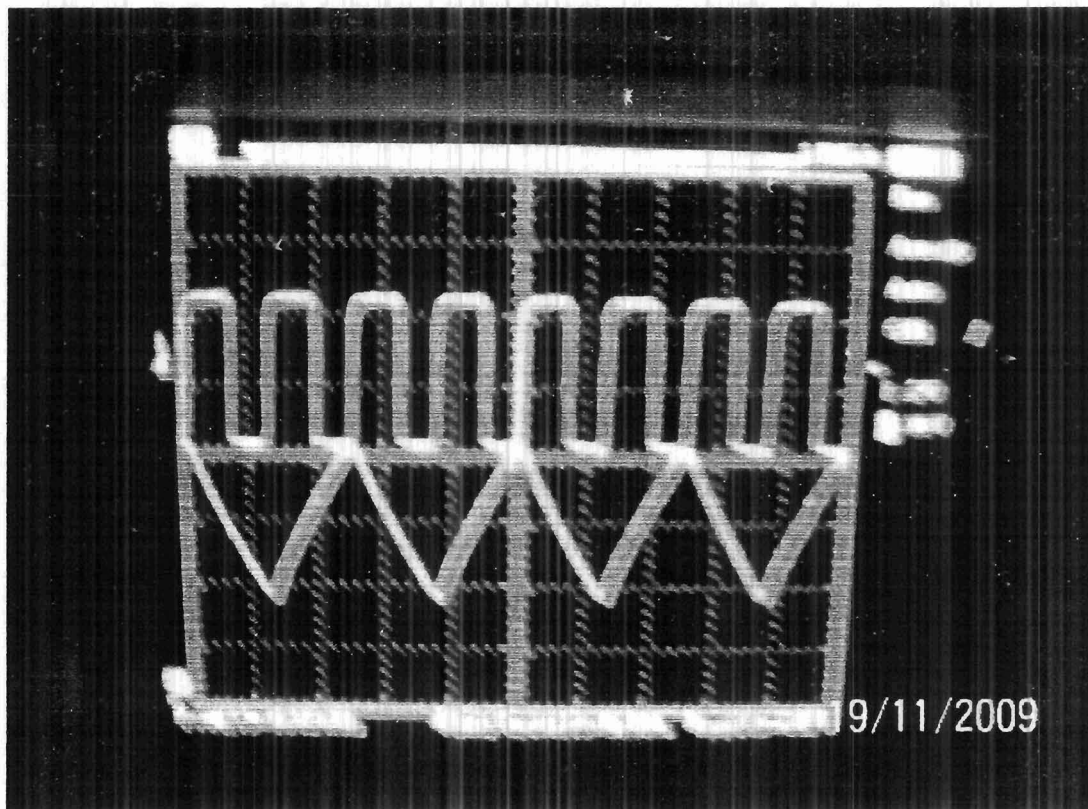
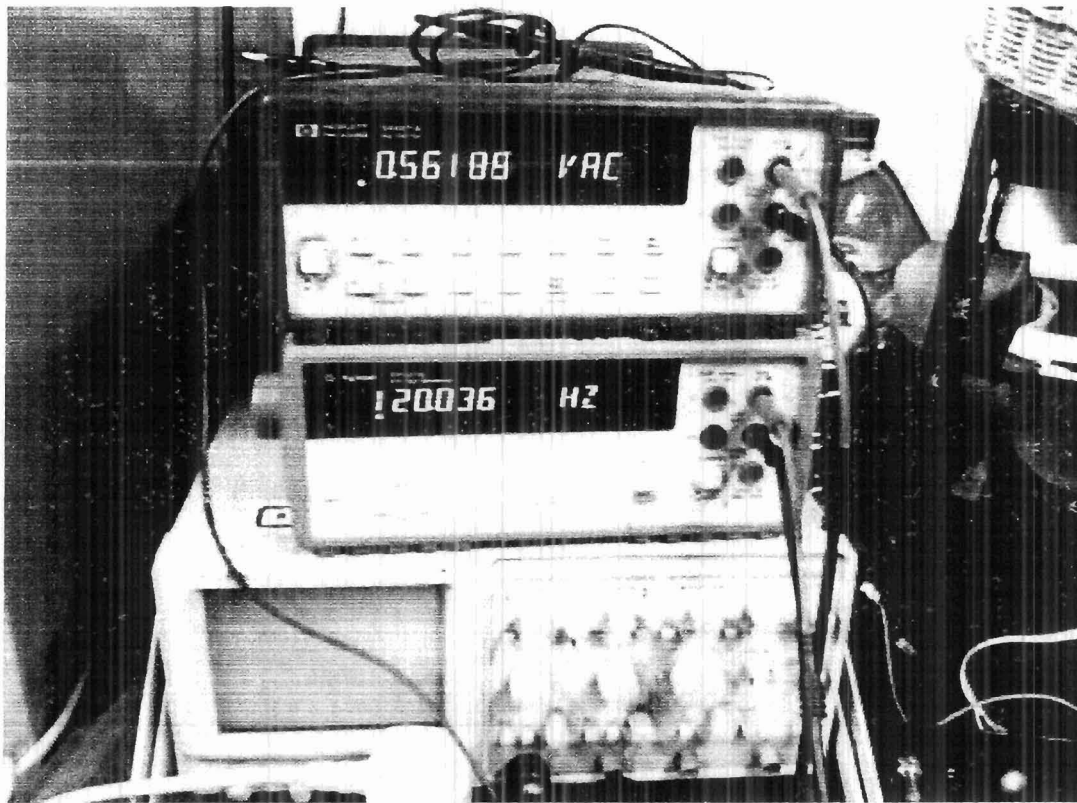
- Mathematics ( IEEEAM), Malta, Itali, September, 15-17, pp. 248-251, 2010. Makalah ini juga di terima pada *Journal WEAS Transactions on Circuits, Systems and Signal*, (Accepted).
5. Yulkifli, Setiadi, A., Djamal, M. and Khairurrijal, (2010): Development of Mathematical Model of Vibration Sensor base on Fluxgate Magnetic Sensor. *The 4<sup>th</sup> Asian Physics Symposium (APS)*, Ocktober, 12-13, 2010.
  6. Yulkifli, Hufri, Mitra Djamal: Optimasi Resolusi Keluaran Sensor Fluxgate menggunakan Low Pas Filter (LPF) orde ke- n, Semirata UNRI, 2010
  7. Hufri, Yulkifli Sensor Magnetik Fluxgate Menggunakan Kumparan Pick-up Ganda. *Journal Invotek FT UNP Padang*.
  8. Hufri, Yulkifli : Analisis Rangkaian Pengolah Sinyal (RPS) Sensor Magnetik Fluxgate, Prosiding Sminar Nasional Fisika Universitas Andalas (SNF-UA) 16 November 2009.
  9. Yulkifli, Mitra Djamal, Khairurrijal, Deddy Kurniadi, Pavel Ripka: The Influence of the Tape-core Layer Number of Fluxgate Sensor to the Demagnetization Factor: *Proceedings ICICI-BME*, November, 23-25, 2009, Bandung.
  10. Yulkifli, Mitra Djamal, Khairurrijal, Deddy Kurniadi, Pavel Ripka: Demagnetization Factor of a Fluxgate Sensor Using Double Pick-up Coils Configurations. *Proceedings of The 3rd Asian Physics Symposium (APS 2009)* July 22 – 23, 2009, Bandung, Indonesia.



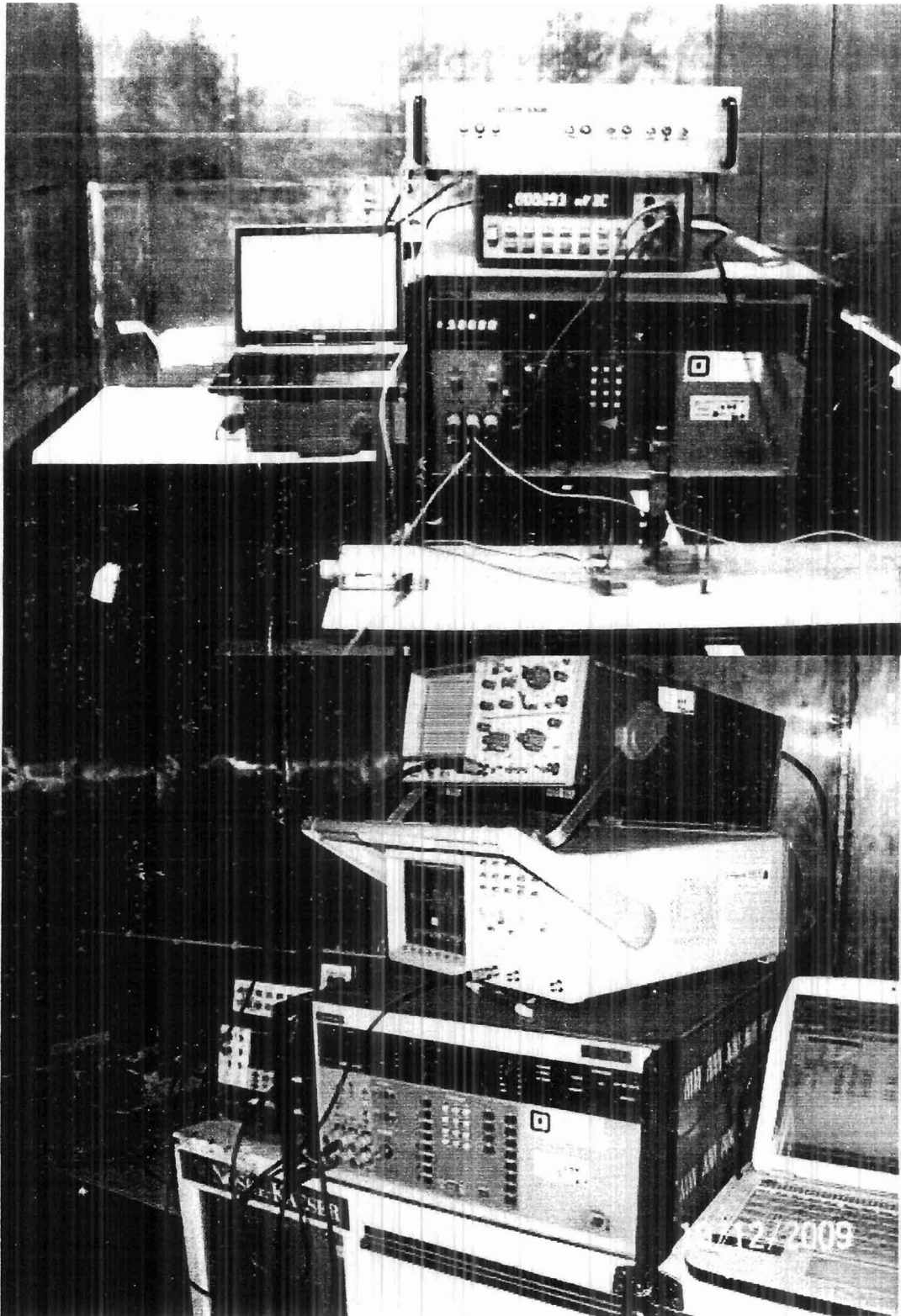
Gambar L1. Foto Rangkaian dan bahan elemen *fluxgate*



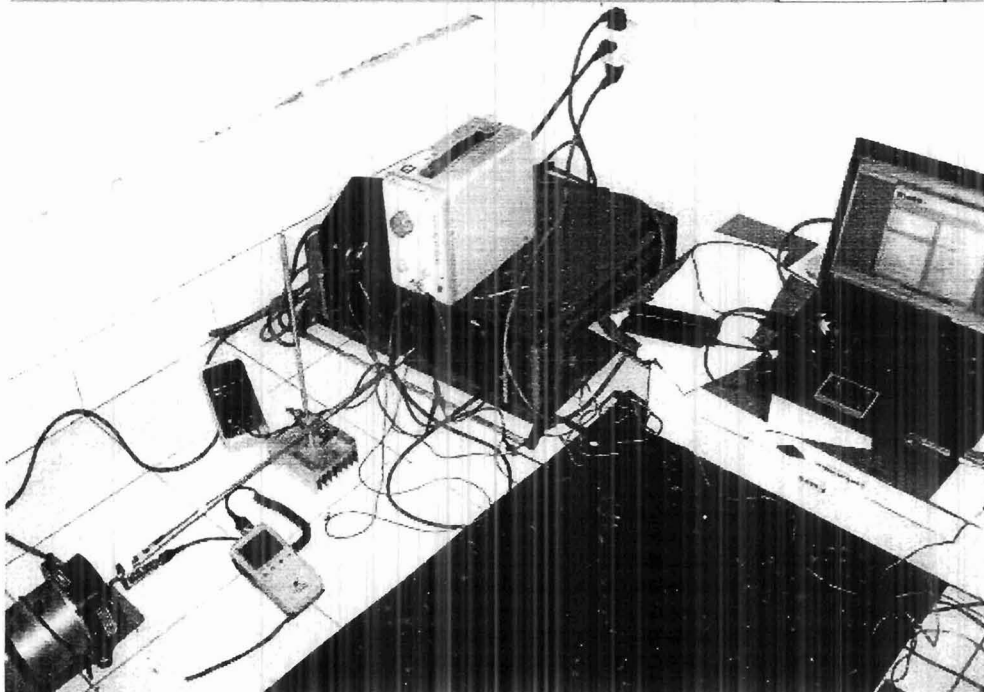
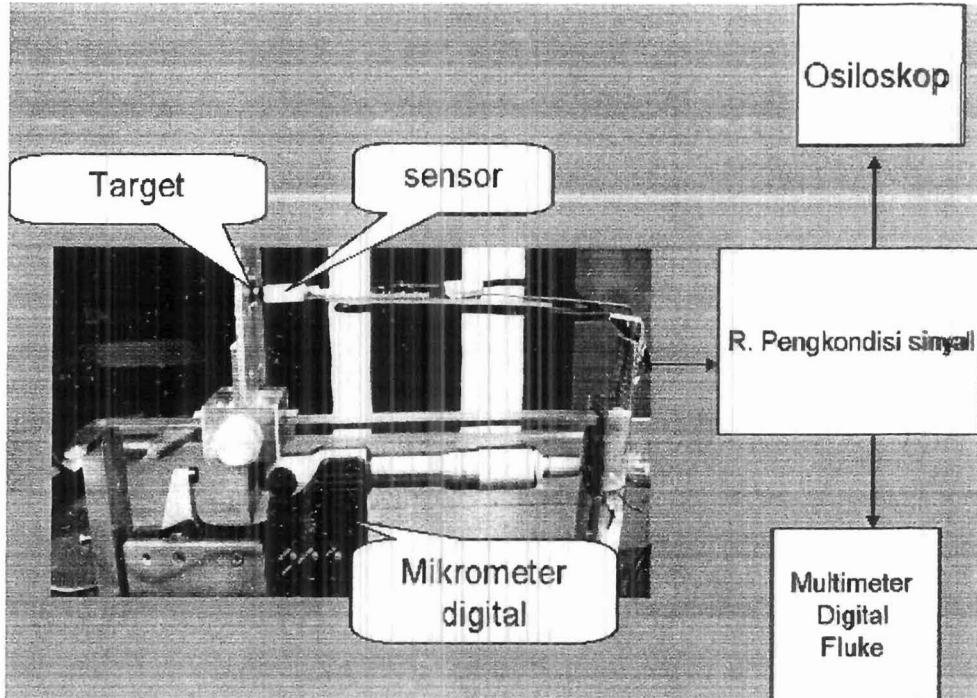
Gambar L2. Foto rangkaian, solenoida sebagai kalibrator dan Instrumen pengukuran



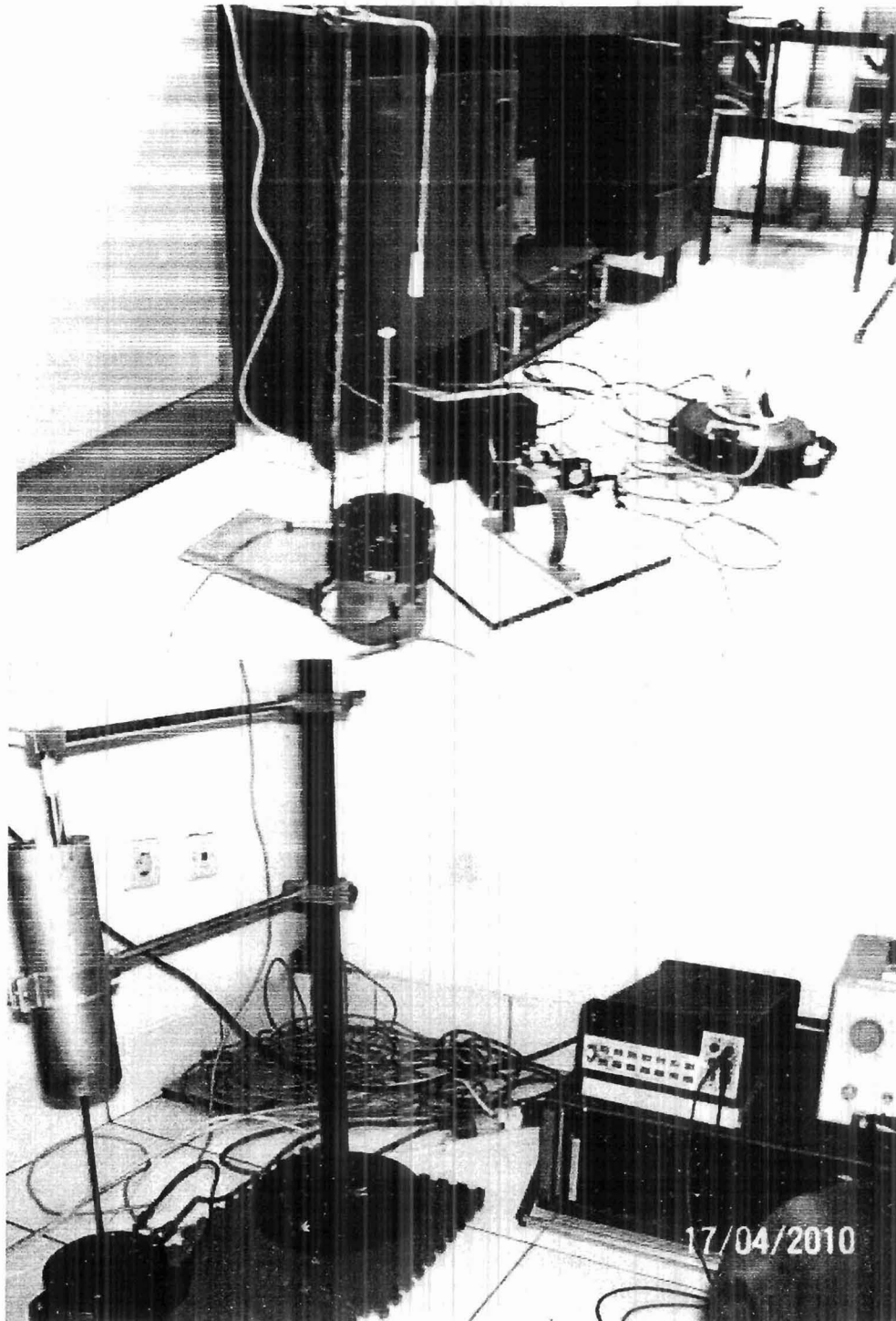
Gambar L3. Photo instrumen dan keluaran rangkaian eksitasi



Gambar L4. Kegiatan Kalibrasi dan Pengukuran Medan Magnet Lemah di Ruang Faraday



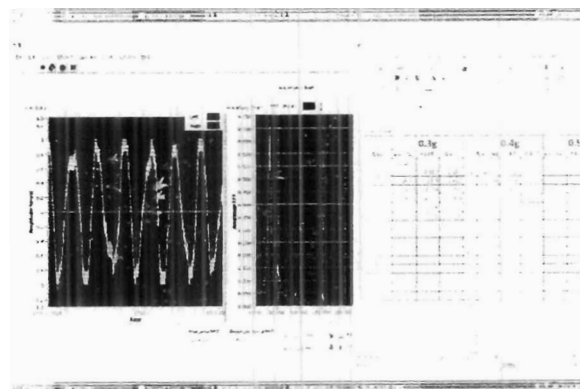
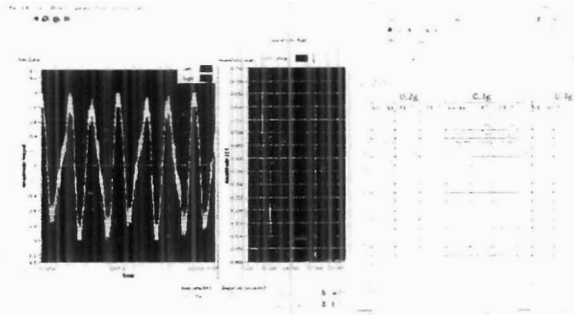




**Kegiatan Pengukuran Jarak dan Getaran**

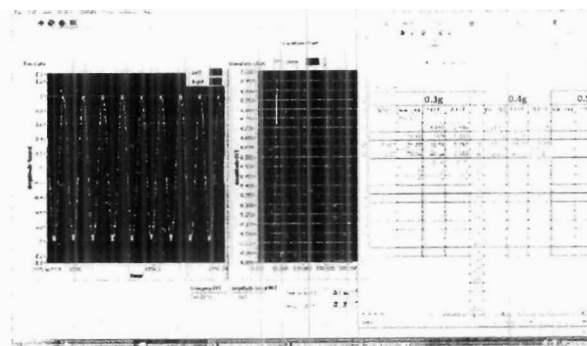
# FOTO HASIL PENGUKURAN GETARAN MENGGUNAKAN LABVIEW

Tampilan FFT pada frekuensi 30 Hz dengan variasi amplitudo



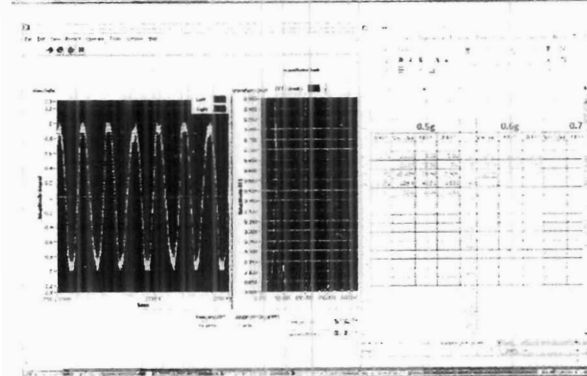
Amplitudo 0.3g

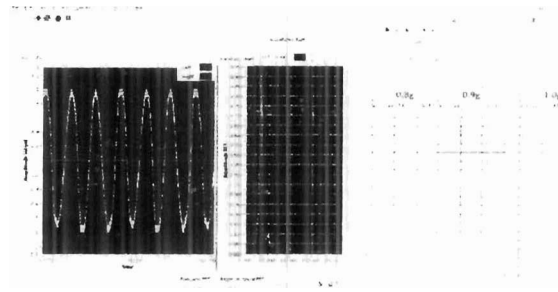
Amplitudo 0.4g



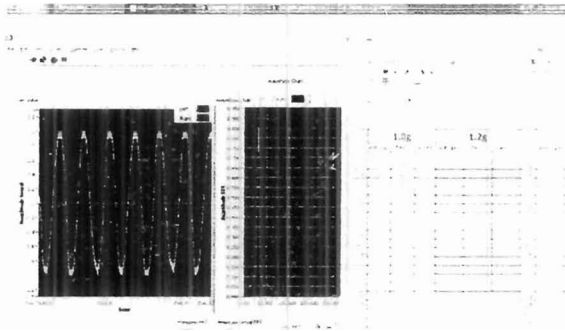
Amplitudo 0.5g

Amplitudo 0.6g





Amplitudo 0.8g



Amplitudo 1.0g

**Personalia Tenaga Peneliti**

No	Nama dan Gelar Akademik	Bidang Keahlian	Instansi
1	Drs. Hufri., M.Si	Fisika Instrumentasi & Elektronika	UNP
2	Dr. Yulkifli, S.Pd., M.Si	Fisika Instrumentasi & Elektronika	UNP
3	Prof. Dr.-Ing. Mitra Djamal	Fisika Instrumentasi & Elektronika	ITB

K. PERPUSTAKAAN I

001

## **LAMPIRAN PUBLIKASI ILMIAH**

# Analisis Rangkaian Pengolah Sinyal (RPS) Sensor Magnetik Fluxgate

Hufri <sup>1)</sup>, Yulkifli <sup>2)</sup>

<sup>1 2)</sup> KK-Instrumentasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Negeri Padang, Jl. Prof. Dr. Hamka Air Tawar Padang, Indonesia

*Hufri\_unp@yahoo.co.id*

## Abstrak

Pembuatan rangkaian pengolah sinyal (RPS) untuk melihat respon sinyal keluaran sensor fluxgate menggunakan metode harmonisa kedua telah dilakukan. RPS dibuat dalam tiga bagian yaitu bagian rangkaian eksitasi, pick-up dan pendukung, ketiga bagian itu dibuat dengan mengkombinasikan beberapa rangkain dasar elektronik antara lain: rangkaian pembangkit sinyal eksitasi (generator), osilator, detektor fasa, penguat, integrator, buffer dan filter (LPF). Keluaran akhir dari RPS berupa tegangan DC diaplikasikan untuk mengukur perubahan medan magnetik eksternal. Berdasarkan karakterisasi keluaran RPS, sensor dapat mengukur medan eksternal  $\pm 10$  uT dengan sensitivitas  $\sim 102$  mV/uT.

## Abstract

The making of signal processor circuit to fluxgate sensor using harmonic second method had been carried out. Signal processor circuits consist of excitation, pick-up and endorser circuits. All circuits are electronic basic circuit combination, i.e. generator circuit (oscillator), phase detector, integrator/differentiator, buffer, amplifier and low pass filter (LPF). The final output is DC signal applied to measure external magnetic field. Based on the characterization of sensor output signal was obtained the range linier  $\pm 10$  uT and sensor's sensitivity  $\sim 102$  mV/uT.

## I. Pendahuluan

Sensor magnetik adalah sebuah sensor yang dapat mengukur nilai medan magnet disuatu area/daerah. Sensor ini memiliki aplikasi yang luas antara lain : untuk penelitian bahan-bahan magnetik, geophysics, gradiometer (Ripka, 2001), sistem navigasi dan transportasi (Kaluza, F., dkk., 2003), pemetaan medan magnet bumi, kompas elektronik (Veclak, J., dkk., 2007), penentuan posisi benda (Proximity) atau sensor jarak dalam orde kecil (Yulkifli, dkk., 2007), ruang angkasa (S,H. Hwang, 2007), pengukuran arus listrik (Djamal, M. 2007).

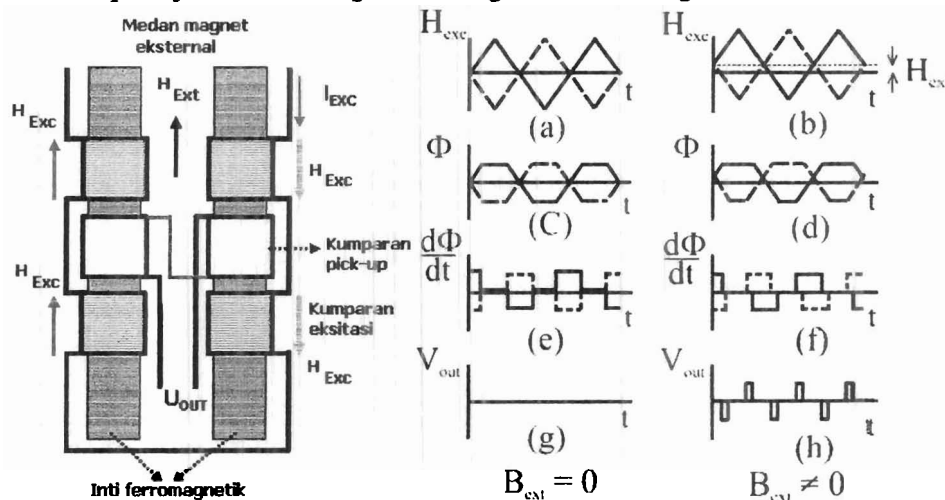
Sensor magnetik yang banyak digunakan saat ini adalah *efek Hall*, *Magnetoresistif (AMR, GMR)*, *SQUID* dan *fluxgate* (Caruso, M.J., dkk., 2007: Smith, C.H., dkk., 2007), ketiga sensor magnetik ini mempunyai kelebihan dan kekurangan. Berdasarkan prinsip kerja ketiga sensor dalam mengukur medan magnet, maka sensor fluxgate mempunyai kelebihan antara lain: mempunyai kestabilan yang tinggi terhadap temperatur dengan koefisien sensitivitas temperatur  $30$  ppm/ $^{\circ}$ C dan koefisien offset  $0.1$  nT, memiliki resolusi dan sensitivitas yang tinggi. Kelebihan lain sensor *fluxgate* adalah ukuran dan kebutuhan

daya kecil (Ripka, P., 2001: Kubik, J. 2006).

Resolusi dan sensitivitas sensor fluxgate ditentukan oleh banyak faktor antara lain: Geometri elemen sensor, jenis material kawat dan inti ferromagnetik yang digunakan, jumlah lilitan skunder dan primer, jumlah inti (core) ferromagnetik (Ripka, P., 2001) dan kualitas rangkaian pendukung baik analog maupun digital (Kubik, J. 2006, Janosek, M., 2009).

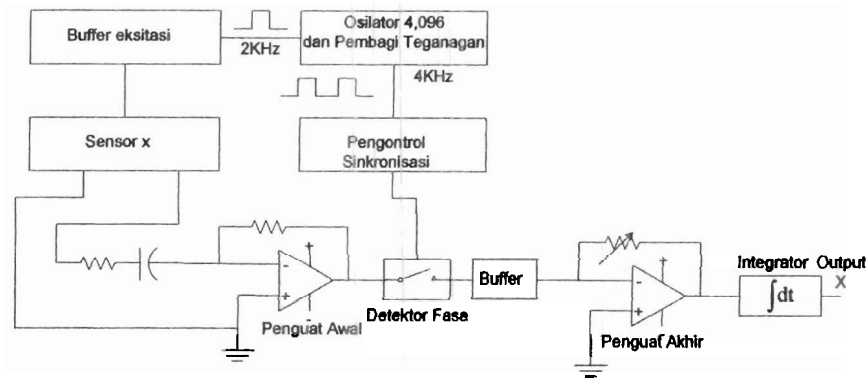
## II. Kajian Teori

Sensor *fluxgate* adalah sensor magnetik yang bekerja berdasarkan perubahan flux magnetik disekitar elemen sensor. Elemen sensor *fluxgate* terdiri dari kumparan primer (*excitation coil*), kumparan sekunder (*pick-up coil*) dan inti ferromagnetik (*core*). Kumparan primer berfungsi sebagai pembangkit medan magnet internal dan kumparan sekunder sebagai mengukur medan magnet (*sensing*). Medan magnet dalam kumparan sekunder akan nol ketika tidak ada medan magnet luar, tetapi tidak nol jika terdapat medan magnet luar. Prinsip kerja sensor fluxgate ini tergambar dalam gambar 1.



**Gambar. 1.** Konstruksi elemen sensor dan prinsip kerja sensor *fluxgate* (Gruger, H., 2000)

Untuk mendeteksi perubahan medan magnetik diperlukan rangkaian rangkaian analog yang dapat merubah gejala mekanik menjadi sinyal listrik. Secara garis besar rangkaian pengolah sinyal sensor magnetik fluxgate terdiri dari tiga bagian, yaitu: a) rangkaian eksitasi (excitation circuit), b) rangkaian pengolah sinyal pick-up (pick-up circuit) dan c) rangkaian pendukung. Ketiga bagian ini dapat terlihat dalam gambar 2



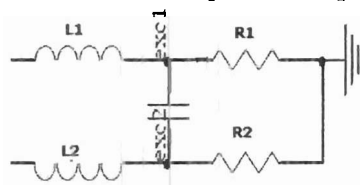
**Gambar 2.** Blok diagram rangkaian analog sensor magnetik fluxgate 1 dimensi

**a. Rangkaian pembangkit sinyal eksitasi**

Rangkaian eksitasi sering juga disebut rangkaian pembangkit sinyal eksitasi (Generator eksitasi). Bagian ini yang berfungsi sebagai pembangkit medan magnetik referensi. Pembangkit sinyal eksitasi terdiri dari Generator eksitasi, buffer dan osilator.

**a.1. Rangkaian penghasil sinusiodal eksitasi**

Bagian ini adalah bagian yang mendasar dari semua rangkaian sensor fluxgate karena berfungsi sebagai penghasil sinusiodal selain itu juga berfungsi sebagai filter. Generator akan menghasilkan sinyal yang mampu membangkitkan medan magnetik referensi pada sensor melalui lilitan eksitasi. Sinyal eksitasi harus memiliki tegangan yang cukup untuk menggerakkan lilitan eksitasi, ini diperlukan agar sinyal dapat mensaturasi inti ferromagnetik (core). Sinyal eksitasi bergantung pada arus dan frekuensi eksitasi. Arus eksitasi adalah arus yang digunakan untuk membangkitkan (mendrive) rangkaian eksitasi. Frekuensi eksitasi adalah frekuensi yang digunakan dalam gelombang eksitasi yang dihasilkan oleh arus eksitasi. Arus eksitasi dapat berupa gelombang sinus, segitiga atau persegi dimana arus eksitasi akan mempengaruhi besar/kecilnya medan eksitasi. Untuk mengoptimalkan medan eksitasi yang dihasilkan maka diperlukan arus eksitasi optimum. Syarat utama dari arus eksitasi adalah kedalaman saturasi (deep saturation) dari inti sensor dan penekanan pada komponen frekuensi harmonik genapnya (Kubik, J., 2006). Karena deep saturation sangat berhubungan dengan kebutuhan daya sensor. Menurut Tipek, A., 2005: sensitivitas sensor fluxgate sangat bergantung pada arus eksitasi. Rangkaian sinyal eksitasi ini terdiri dari induktor, resistor dan kapasitor, seperti pada gambar 3.



**Gambar 3.** Rangkaian Generator Sinyal sinusiodal eksitasi

Hal lain yang harus diperhatikan adalah besarnya daya yang dihasilkan. Sebagai pembangkit medan referensi digunakan lilitan kawat. Lilitan ini memiliki diameter yang relatif kecil (0.1 mm). Pembangkit eksitasi harus dapat mensaturasi inti eksitasi tapi tidak sampai merusak kumparan eksitasi karena pemberian daya yang terlalu besar.

Kualitas keluaran sinyal eksitasi ini dapat ditinjau melalui fungsi tranfer seperti ditunjukkan persamaan (1).

$$G(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1/j\omega C}{1/j\omega C + 2j\omega L} \quad (1)$$

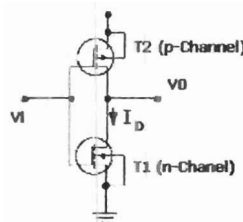
Dari persamaan (1) diperoleh hubungan tegangan keluaran dan masukan.

$$V_o = \frac{1}{1 - 2(2\pi f)^2 LC} V_i \quad (2)$$

Kapasitor C digunakan sebagai penghalang arus searah yang mungkin mengalir ke dalam rangkaian eksitasi. Hal ini dimungkinkan karena sifat kapasitor yang hanya melewatkan arus bolak-balik tetapi menghalangi arus searah yang akan melewatinya.

### a.2. Buffer eksitasi.

Bagian ini berfungsi sebagai buffer terhadap sinyal yang dihasilkan oleh generator eksitasi. Salah satu komponen yang cocok dan sesuai dengan kebutuhan sensor fluxgate adalah Mosfet, seperti ditunjukkan gambar 4.



**Gambar 4.** Rangkaian MOSFET Sebagai Inverter

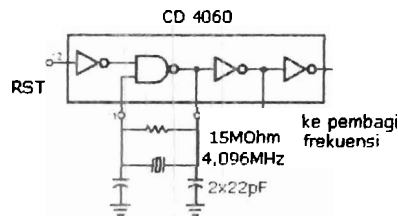
Dalam sistem bertahap kadang kala memiliki impedansi masukan yang kecil, atau impedansi keluarannya besar. Sehingga diperlukan rangkaian *buffer*. Rangkaian *buffer* yang ideal memiliki penguatan satu dengan impedansi masukan yang sangat besar dan impedansi keluaran yang sangat kecil.

Ada beberapa rangkaian *buffer* yang dapat dibuat misalnya dengan penguat kolektor ditanahkan, penguat tolak-tarik (*push pull amplifier*) atau menggunakan MOSFET. Untuk menguatkan arus sebelum sinyal masuk ke dalam MOSFET, terlebih dahulu sinyal dilewatkan pada 6 gerbang NOT dari IC 7404 yang dirangkai secara paralel. Selanjutnya sinyal tersebut dilewatkan pada dua transistor MOSFET yang berbeda tipe, n-MOS dan p-MOS, dimana dua MOSFET ini berfungsi sebagai CMOS *inverter*. Pada rangkaian CMOS (*Complementary MOS*), ketika  $V_i = V_{cc}$ , T1 dalam keadaan On, dan T2 dalam keadaan Off. Keluaran  $V_o$  akan sama dengan 0, karena transistor terhubung secara seri. Sebaliknya ketika  $V_i$  sama dengan 0, T1 dalam keadaan Off dan T2 dalam keadaan On. Pada keadaan ini keluaran sama dengan  $V_{cc}$ . Rangkaian logika seperti ini memiliki kelebihan dibandingkan TTL karena memiliki daya disipasi yang lebih rendah serta arus keluaran yang lebih tinggi, sehingga rangkaian ini cocok sebagai *buffer*.



### a.3. Osilator

Osilator berfungsi sebagai sinyal eksitasi yang akan diberikan pada lilitan eksitasi. Dalam pembuatan sensor magnetik fluxgate osilator merupakan rangkaian dasar yang sangat penting. Hal ini disebabkan karena stabilitas dari frekuensi medan yang dihasilkan tergantung kepada stabilitas osilator. Untuk mendapat kestabilan maka digunakan kristal. Gambar 5. menunjukkan rangkaian osilator kristal.



**Gambar 5.** Rangkaian Osilator Kristal dan IC CD 4060

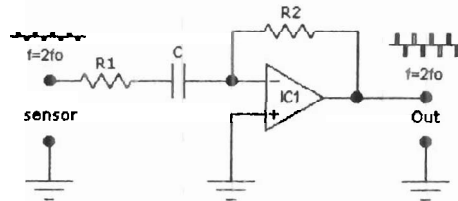
Frekuensi osilator ditentukan oleh frekuensi kristal, kristal yang digunakan di sini adalah 4.096 MHz, dengan pembagi frekuensi yang terdapat di dalam IC CD4060.

### b. Rangkaian pengolahan sinyal Pick-up

Bagian kedua adalah pengolahan sinyal lilitan pick-up. Rangkaian ini berfungsi untuk mengolah sinyal yang diterima oleh lilitan pick up sensor menjadi tegangan listrik yang dapat merepresentasikan medan magnet yang diukur. Bagian ini terdiri dari *penguat awal dan , detektor fasa (sinkronisasi)*.

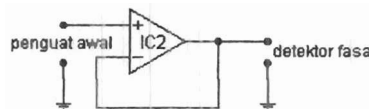
#### b.1. Penguat awal.

Bagian ini berfungsi untuk memperkuat sinyal diterima oleh lilitan pick-up. Lilitan pick-up akan menangkap medan magnetik referensi serta medan magnetik eksternal. Dalam keadaan tanpa adanya medan magnetik luar, penjumlahan arus yang melewati lilitan pick-up sensor akan sama dengan nol karena arahnya berlawanan. Ketika diganggu dengan medan magnetik luar, maka terdapat perbedaan arus diujung-ujung lilitan pick-up. Selisih arus pada ujung-ujung pick-up koil, kemudian dirubah menjadi tegangan oleh penguat awal yang berbentuk integrator sekaligus diperkuat. Penguat awal terdiri dari sebuah op-amp, sebuah kapasitor, dan dua buah resistor. Penguat ini berfungsi sebagai pendiferensial sinyal yang keluar dari elemen sensor. Arus yang berasal dari kumparan sekunder sensor dirubah menjadi tegangan pada resistor, arus pada resistor sama besarnya dengan arus yang melewati kapasitor, karena adanya prinsip hubungan singkat maya pada kaki inverting dan non-inverting pada op-amp, akibatnya terdapat perbedaan tegangan pada kaki-kaki resistor, besar tegangan ini sama dengan keluaran op-amp. Kapasitor juga berfungsi menghambat tegangan DC yang berasal dari op-amp ke sensor, sehingga tegangan dari op-amp tidak mempengaruhi keluaran dari sensor. Pada frekuensi tinggi rangkaian berfungsi sebagai penguat sinyal. Bagian penguat awal ini dapat dilihat pada gambar 6. Harga komponen-komponen ditentukan oleh kutub dari diferensiator yang dikehendaki.



**Gambar 6.** Penguat awal sensor yang juga berfungsi sebagai pendiferensial.

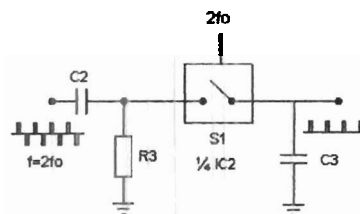
Untuk menjaga kestabilan sinyal sensor yang masuk ke detektor fasa, maka keluaran dari penguat awal sensor ditambahkan sebuah *buffer*. Dengan adanya *buffer* ini, keluaran dari detektor fasa akan stabil dan hambatan yang terdapat di dalam detektor fasa tidak akan mengurangi besar tegangan sinyal yang keluar dari detektor tersebut. Pada akhirnya penambahan *buffer* akan menjadikan keluaran sistem sensor menjadi lebih stabil dari yang dibuat sebelumnya. Susunan *buffer* sama seperti pada gambar 7.



**Gambar 7.** Op-amp yang berfungsi sebagai *buffer* sinyal.

#### b.2. Detektor fasa (sinkronisasi).

Bagian berfungsi untuk mendeteksi fasa dari sinyal yang masuk dari penguat awal, detektor ini akan meneruskan sinyal dengan frekuensi harmonisasi kedua dengan menggunakan frekuensi referensi osilator sebelum dibagi dua oleh pembagi frekuensi, sementara itu harmonisasi ganjil dan yang lain tidak diteruskan. frekuensi detektor fasa ini sebesar 4 KHz, dua kali dari frekuensi eksitasi. Sinyal masukan pada rangkaian detektor fasa berbentuk pulsa sehingga rangkaian ini cukup meneruskan pulsa yang hanya sefasa, atau yang memiliki fasa kelipatan  $2\pi$  dan seterusnya. Rangkaian detektor fasa ini terdiri dari sebuah diferensiator dan sebuah saklar analog. Saklar analog ini akan meneruskan sinyal yang masuk sesuai dengan frekuensi dari osilator yaitu  $2f_0$ . Gambar rangkaian detektor fasa dapat dilihat pada gambar 8. Rangkaian detektor fasa ini terdiri dari sebuah diferensiator dan sebuah saklar analog. Saklar analog ini akan meneruskan sinyal yang masuk dengan frekuensi dari osilator yaitu  $2f_0$ .



**Gambar 8.** Rangkaian detektor fasa, ketika keluaran sensor positif.

Kemudian keluaran dari detektor fasa dimasukkan ke dalam *buffer* kembali agar sinyal tidak lemah. Susunan *buffer* sama seperti pada gambar 7.

### c. Rangkaian pendukung

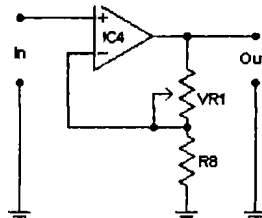
Rangkaian pendukung terdiri penguat akhir dan tapis lolos rendah.

#### c.1. Penguat akhir

Pada penguat akhir, keluaran dari tapis lolos rendah diatur penguatannya. Rangkaian ini diperlukan untuk mengkalibrasi keluaran sensor magnetik agar sesuai dengan medan magnet yang dideteksi oleh sensor. Penguat ini merupakan penguat tak membalik, dimana penguatannya diatur dengan resistor variabel 1 ( $VR_1$ ). Penguatan minimal sama dengan 1. Faktor penguatan penguat akhir dapat dihitung dari persamaan

$$G = \frac{R_8 + VR_1}{R_8} \quad (3)$$

Gambar rangkaian penguat akhir sensor dapat dilihat pada gambar 9

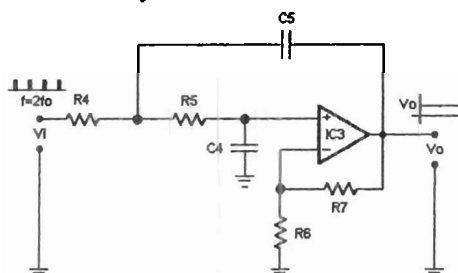


Gambar 9. Penguat akhir sensor.

Keseluruhan bagian yang telah dirangkai ini bekerja secara analog. Keluaran yang diperoleh dari rangkaian ini berupa tegangan analog yang merepresentasikan besar medan magnetik yang dideteksi.

#### c.2. Tapis lolos rendah

Tapis lolos rendah *Sallen Key* tipe *Butterworth* merupakan tapis lolos rendah aktif dan juga merupakan pengembangan dari penggunaan tapis lolos rendah pasif. Penggunaan tapis lolos rendah *Sallen-Key* tipe *Butterworth* orde dua ini memiliki keunggulan dibanding tapis lolos rendah pasif, diantaranya adalah penguatan sinyal pada frekuensi di atas frekuensi kutub adalah -20 dB, dan keluaran yang stabil. Dalam hal ini kutub dari tapis ini dibuat rendah, sekitar 1 Hz, ini sangat kecil dibandingkan frekuensi pulsa  $f_0$ , sehingga pada kondisi ini rangkaian tapis ini berfungsi sebagai integrator. gambar 10 menunjukkan rangkaian tapis lolos rendah *Sallen-Key*.



Gambar 10. Rangkaian tapis lolos rendah *Sallen-Key*.

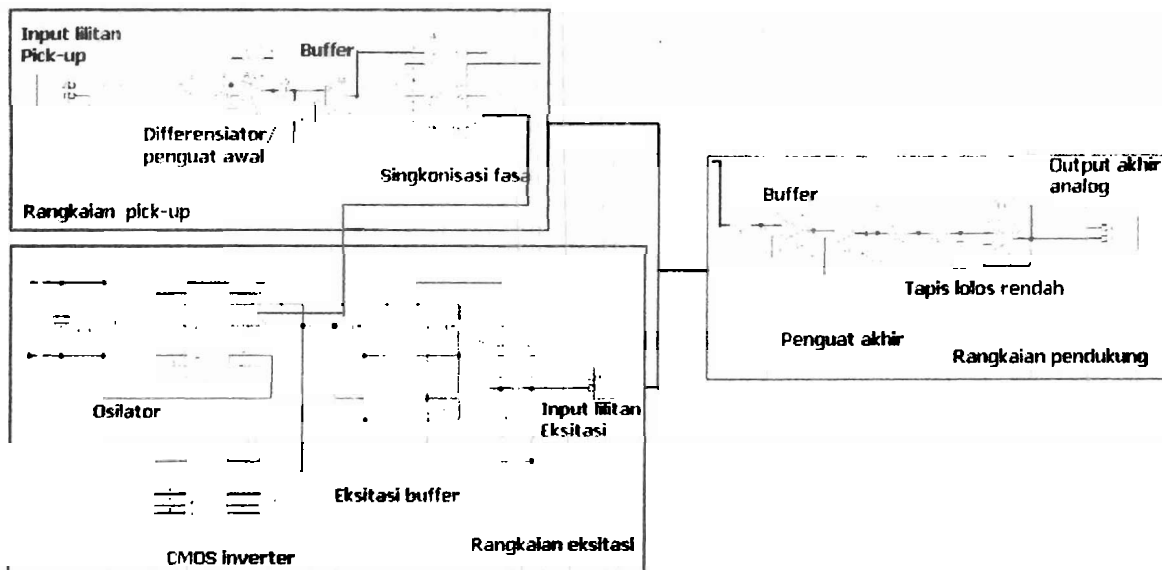
### III. Metode Penelitian

Untuk memperoleh tegangan keluaran sensor yang diinginkan dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

- Membuat elemen sensor fluxgate, dalam ini dipilih desain inti berbentuk oval dengan lilitan pick-up ganda.
- Optimasi komponen rangkaian eksitasi, dalam hal ini dilakukan optimasi terhadap komponen dan model rangkaian pembangkit gelombang eksitasi
- Optimasi rangkaian pengolah sinyal, seperti buffer, tapis dan penguat
- Pengambilan respon keluaran pada masing blok rangkaian
- Pengukuran respon keluaran sensor terhadap medan magnet luar

### IV. Hasil dan Pembahasan

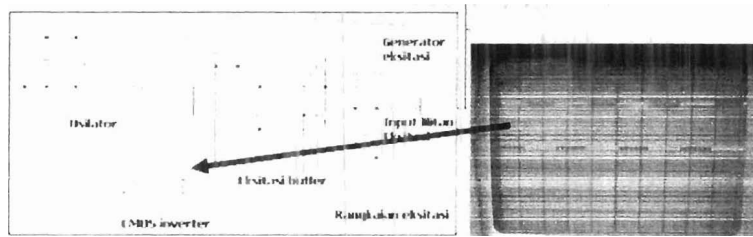
Setelah optimasi semua komponen dibuat skematik rangkaian analog seperti ditunjukkan gambar 11



**Gambar 11.** Hasil Skematik rangkaian analog

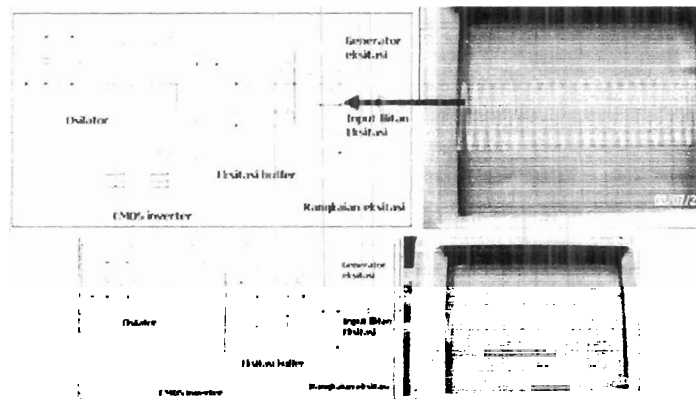
#### a. Respon keluaran CMOS Inverter

Berdasarkan pengamatan di osciloskop, sinyal masukan padarangkaian detektor fasa berbentuk pulsa sehingga rangkaian ini cukup meneruskan pulsa yang hanya sefasa, atau yang memiliki fasa kelipatan  $2\pi$  dan seterusnya. Rangkaian detektor fasa ini terdiri dari sebuah diferensiator dan sebuah sakelar analog. Sakelar analog ini akan meneruskan sinyal yang masuk sesuai dengan frekuensi dari osilator yaitu  $2f_0$  atau 4KHz.



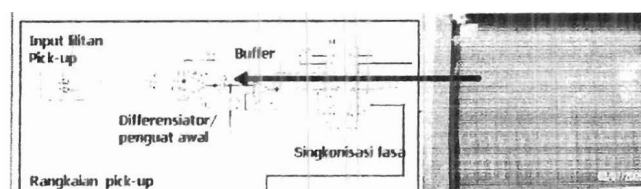
**Gambar 12.** Frekuensi referensi osolator berbentuk gelombang persegi dengan  $f = 4 \text{ kHz}$

Gelombang persegi 4 KHz dihubungkan ke rangkaian pengatur fasa untuk meloloskan sinyal dengan harmonisasi kedua ( $2\omega_0$ ). Selain itu frekuensi gelombang ini juga dibagi dua dengan pembagi D flip-flop dan menghasilkan frekuensi 2 KHz. Gelombang persegi dengan frekuensi 2 KHz ini dihubungkan ke rangkaian penyangga eksitasi, untuk menguatkan daya sinyal agar tidak terjadi drop tegangan ketika dialirkan ke dalam transformator. Berdasarkan pengamatan di osiloskop sebagaimana ditunjukkan gambar gambar 12. dapat dibuktikan bahwa frekuensi yang terbaca adalah 4 kHz.



**b. Respon keluaran penguat awal dari lilitan pick-up**

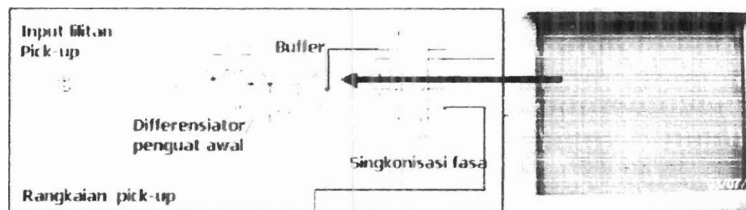
Setelah melalui penguatan dengan menggunakan ICLF412, sinyal diperkuat 50 kali lebih besar  $f = 4 \text{ kHz}$  Gain = 50 kali output input 154 dibandingkan sinyal yang masuk. Dari hasil pemotretan di osiloskop, tampak bentuk sinyal merupakan sinyal sinusoida, yang berarti sinyal tersebut merupakan sinyal tegangan listrik AC. Hasil ini sesuai harapan, yang menandakan blok rangkaian penguat awal dapat berfungsi sebagai penguat, dan kapasitor yang dirangkai di blok penguat awal ini dapat menghambat tegangan listrik DC dari Op-Amp sehingga tidak mempengaruhi keluaran sensor.



**Gambar 13.** Respon keluaran penguatan awal

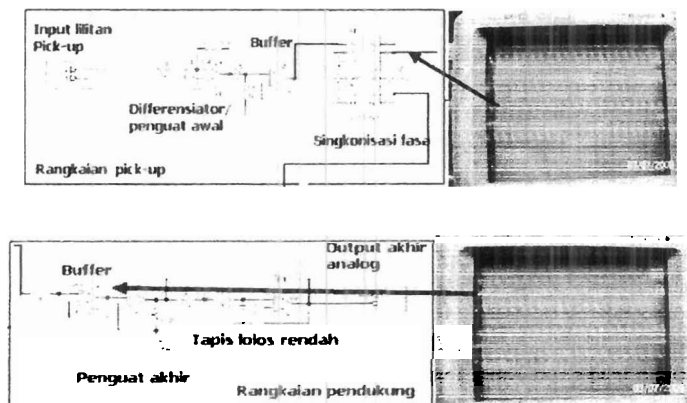
c. Respon keluaran buffer rangkaian pick-up.

Tegangan keluaran dari sensor akan mengalami perbesaran amplitudo sebagai bentuk penguatan dari penguat awal. Untuk menjaga kestabilan sinyal sensor yang masuk ke detektor fasa, maka keluaran dari penguat awal sensor ditambahkan sebuah buffer. Gelombang persegi 4Khz dihubungkan ke rangkaian sinkronisasi untuk meloloskan sinyal harmonisasi kedua( $2\omega_0$ )



**Gambar 14.** Sinyal yang diamati pada osiloskop ketika melewati op amp LF412 yang berfungsi sebagai buffer

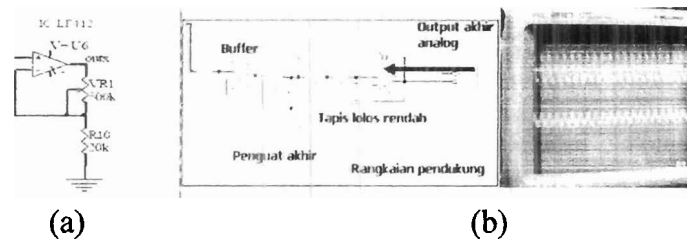
Pada gambar 14. terlihat bahwa amplitudo sinyal antara input dan output memiliki amplitudo yang sama, sehingga bila dibandingkan terlihat penguatannya 1. Keadaan ini memiliki arti fisis bahwa dengan adanya buffer ini, keluaran dari detektor fasa akan stabil dan hambatan yang terdapat di dalam detektor fasa tidak akan mengurangi besar tegangan sinyal yang keluar dari detektor tersebut. Pada akhirnya penambahan buffer akan menjadikan keluaran sistem sensor menjadi lebih stabil dari yang dibuat sebelumnya. Setelah sinyal melewati rangkaian detektor sinkronisasi yang berfungsi meneruskan sinyal yang masuk sesuai dengan frekuensi dari osilator yaitu  $2f_0$ , sinyal pun akan kembali masuk rangkaian buffer (IC LF412), buffer ini dipasang untuk menjaga kestabilan respon keluaran detektor fasa. Dari hasil pengamatan melalui osiloskop seperti pada gambar 15. terlihat bahwa sinyal output tidak mengalami perubahan karakteristik dan merupakan sinyal murni dari sensor.



**Gambar 15.** Respon sinyal ketika melewati op-amp LF412 yang berfungsi sebagai buffer

#### d. Penguat akhir

Sinyal yang keluar dari integrator masih lemah dan perlu diperkuat agar dapat diukur. Penguat yang digunakan disini adalah penguat *inverting* atau penguat membalik. Keluaran yang diperoleh dari rangkaian ini berupa tegangan analog yang merepresentasikan besar medan magnetik yang dideteksi. Rangkaian penguat akhir yang digunakan ditunjukkan oleh gambar 16a. Besar penguatan akhir menurut persamaan (3) adalah adalah 26 kali. Sedangkan berdasarkan pengukuran dengan menggunakan osiloskop (gambar 165b) diperoleh penguatan sebesar 25 kali. Hasil ini tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan secara matematis. Adapun perbedaan ini mungkin diakibatkan oleh keadaan fisis komponen elektronika yang nilainya tidak terlalu tepat sesuai dengan sfesifikasinya serta akbiat dari disipasi panas timbul pada rangkaian elektronika. Namun hal ini menunjukkan bahwa rangkaian penguat akhir bekerja dengan baik.



**Gambar 16.** Penguat akhir (a), Sinyal ketika melewati op amp LF412 yang berfungsi penguat akhir (b)

#### d. Respon keluaran integrator

Tapis lolos rendah *Sallen Key* tipe *Butterworth* merupakan tapis lolos rendah aktif. Tapis ini dipakai agar penguatan sinyal pada frekuensi di atas frekuensi kutub -20 dB, dan keluaran yang stabil. Pada gambar 17. dapat dilihat bahwa amplitudo input dan outputnya sama, dengan bentuk sinyal yang *smooth*.



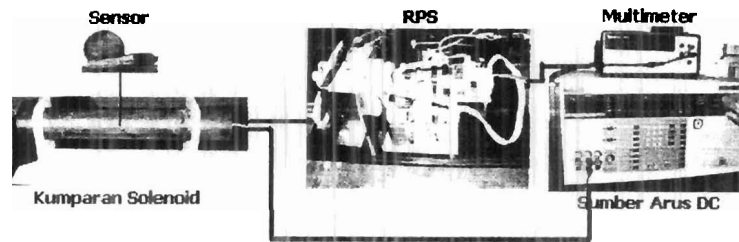
**Gambar 17.** Sinyal keluaran pada rangkaian tapis lolos rendah

Rangkaian low pass filter juga berfungsi sebagai integrator, sinyal AC dari sensor dirubah menjadi sinyal DC. Dengan demikian tapis ini berfungsi dengan baik untuk meloloskan sinyal berfrekuensi rendah dan meredam sinyal berfrekuensi tinggi serta meredam noise yang dihasilkan dari sensor dengan keluaran yang stabil. Ciri bahwa sinyal keluaran sensor merupakan sinyal DC adalah pada osiloskop terlihat berbentuk garis lurus.

#### e. Pengukuran respon sensor terhadap medan magnet luar

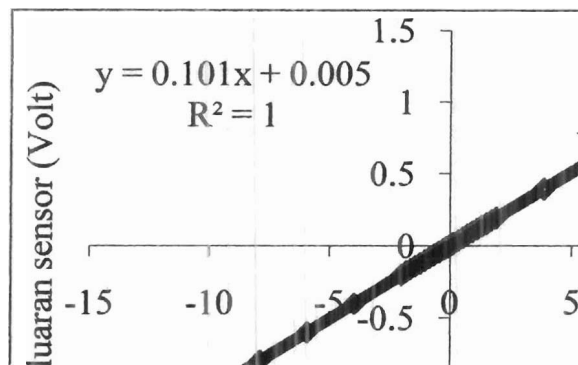
Untuk melihat respon keluaran sensor dilakukan pengukuran dengan memberikan

medan eksternal dengan sumber arus DC. Set-up pengukuran ini ditunjukkan gambar 18.



**Gambar 18.** Set-up karakterisasi keluaran sensor

Solonoide diberi arus DC  $\pm 10\text{mA}$ , sehingga solonoide dapat menghasilkan medan eksternal sekitar  $20\text{ uT}$  (perhitungan  $20\text{ uT}$  diperoleh dari peneliti sebelumnya). Berdasarkan pengukuran dalam rentangan sumber medan magnetik  $\pm 20\text{ }\mu\text{T}$  diperoleh daerah linier pengukuran  $\pm 10\text{ }\mu\text{T}$  seperti ditunjukkan gambar 19.



**Gambar 19.** Daerah linier pengukuran sensor untuk daerah  $\pm 10\text{ }\mu\text{T}$ .

Berdasarkan gambar 19 terlihat bahwa keluaran sistem sensor sangat linier, hal ini terlihat dari nilai  $R^2 = 1$ . Selain itu grafik juga menunjukkan bahwa medan magnetik eksternal yang terukur sebanding dengan tegangan keluaran sensor. Sensitivitas sensor diperoleh berdasarkan kemiringan grafik daerah linier tegangan keluaran sensor yang ditunjukkan oleh persamaan regresi linier;

$$V_{out} = 0.1018B + 0.0051 \quad (4)$$

dimana  $B$  dalam  $\text{uT}$  dan  $V_{out}$  dalam  $\text{mV}$ , berdasarkan persamaan (4) diperoleh sensitivitas sensor  $101,8\text{ mV/uT}$ , artinya tiap  $1\text{ uT}$  sensor dapat mengukur perubahan tegangan sensor  $101,8\text{ mV}$ . Sensitivitas yang dilaporkan ini setelah penguat 25 kali (lihat gambar 15), sehingga sensitivitas tanpa penguat adalah  $\sim 4\text{ mV/uT}$ .



## V. Kesimpulan

Dari analisis data dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Pemilihan jenis rangkaian dan nilai komponen sangat menentukan respon keluaran
2. Rangkaian analog yang dikembangkan telah berhasil digunakan sebagai rangkaian pengolah sinyal sensor magnetik fluxgate
3. Berdasarkan karakterisasi keluaran sensor diperoleh daerah linier sensor  $\pm 20 \mu\text{T}$  dengan sensitivitas  $101,8 \text{ mV/uT}$

## Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai dari dana Hibah Bersaing DIKTI N0. 080/H35.2/PG/HB/2009

## Referensi

- A. Baschiroto, E. Dallago, P. Malcovati, M. Marchesi, G. Venchi, 2006: Development and Comparative Analysis of *Fluxgate* Magnetic Sensor Structure in PCB Technology, *IEEE Transaction on Mangetics*, **42** No. 6 pp. 1670-1680.
- Caruso, M.J, Tamara B., 1998: A New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensor Magazine, Magnetic Sensor*, Tersedia di [www.ssec.honeywell.com](http://www.ssec.honeywell.com). 2007.
- Djamal, M., 2007: Sensor Magnetik Fluxgate dan Aplikasinya untuk Pengukuran Kuat Arus, *J. Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, III, pp. 51-69
- 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 (2000), pp. 35-38.
- Janosek, M., Ripka, P., 2009: PCB sensors in fluxgate magnetometer with controlled excitation, *Sen & Actuator A*, **151**, pp 141-144
- Kub'ik, J., 2006, *PCB fluxgate sensors*, Dissertation Thesis, CTU in Prague.
- Kaluza, F., Angelika Gruger, Heinrich Gruger, 2003: New and Future Applications of Fluxgate Sensors, *Sensor and Actuator*, **106**, pp. 48-51.
- Ripka, P., 2001, *Magnetic Sensor and Magnetometers*, Artec House.
- Smith, C.H, Robert Scheneider, 1998: A New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensor Magazine, Magnetic Sensor*, Tersedia di [www.nve.com](http://www.nve.com). 2007.
- S.H. Hwang, 2007: Overview of Scientific Payloads Onboard the KSR-III Rocket, *J. Acta Astronautica*, **60**, pp. 880-888.
- Tipek, A., T. O'Donnell, A. Connel, P. McCloskey, S.C. O'Mathuna, 2006: PCB Fluxgate Current Sensor with Saturable Inductor, *J. Sensor and Actuator*, **132**, pp. 21-24.
- Vcelak, J., Petruca, V., Kaspar, P., 2007: Electronic compass with Miniature Fluxgate sensors, *Sensors Letter*, Vol 5, pp. 279-282
- Yulkifli, Rahmondia Nanda S., Suyatno, Mitra Djamal, 2007b: Designing and Making of Fluxgate Sensor with Multi-Core Structure for Measuring of Proximity, CSSI 2007, Serpong Tangerang- Indonesia.

## Desain Sensor Getaran Frekuensi Rendah Berbasis *Fluxgate*

<sup>1</sup>Yulkifli , <sup>1</sup>Hufri, & <sup>2</sup>Mitra Djamal

<sup>1</sup>KK Fisika Instrumentasi, Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Padang, Jl. Prof Dr. Hamka  
Kampus UNP Air tawar Padang 25131, Telp. (0751)51260

<sup>2</sup>KK FTETI, Prodi Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No. 10 Bandung

<sup>1</sup>yulkifliamir@yahoo.com

<sup>1</sup>hufri\_unp@yahoo.co.id

<sup>2</sup>mitradjamal@yahoo.com

### Abstrak

Makalah ini menjelaskan kemampuan *fluxgate* untuk mengukur getaran dalam rentang frekuensi rendah. Getaran diukur berdasarkan perubahan medan magnet luar terjadi karena adanya perubahan jarak antara probe sensor *fluxgate* dengan objek yang bergetar. Berdasarkan prinsip harmonisa kedua untuk *fluxgate*, besarnya intensitas medan magnet luar yang terukur sebanding tegangan keluaran sensor dan berbanding terbalik dengan jarak. Optimasi statik terhadap jarak maksimum (amplitudo) antara probe *fluxgate* dengan objek bergetar diperoleh ketika jarak 2 cm. Sebagai sumber getaran digunakan peralatan mekanik frekuensi rendah mekanik yang dikembangkan oleh KK FTETI di Labor Elektronika dan Instrumentasi Fisika ITB. Berdasarkan pengukuran terhadap getaran frekuensi rendah, *Fluxgate* mampu mendeteksi frekuensi 0.14 sampai 1.15 Hz dengan kesalahan absolut 0.017 Hz dan kesalahan relatif 1.3 %.

**Keyword:** *Desain, sensor, Getaran, frekuensi rendah, fluxgate.*

### 1. Pendahuluan

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. Getaran atau vibrasi adalah salah satu aspek pengoperasian yang sangat diperhatikan pada mesin-mesin industri. Amplitudo dan frekuensi vibrasi yang tinggi dapat mengakibatkan kerusakan mesin [1]. Kondisi ini selain membutuhkan waktu perbaikan cukup lama dan biaya yang mahal, juga mengakibatkan kerugian karena mesin tidak beroperasi. Mesin-mesin industri vital memerlukan instrumen pengukuran amplitudo dan laju perubahan yang mampu memperingatkan operator mesin untuk mencegah pengoperasian mesin pada daerah kerja yang tidak aman serta dapat menghentikan operasi mesin bila daerah kerja aman terlewati [2]. Untuk mendeteksi getaran suatu objek dengan memanfaatkan informasi getaran diperlukan sensor getaran dengan resolusi tinggi [3].

Untuk mendeteksi getaran dikembangkan berbagai alat berupa sensor getaran. Terdapat banyak metode atau teknik yang dipakai untuk mendeteksi getaran, misalnya dengan teknik perubahan kapasitansi, perubahan muatan listrik dari material *piezoelectric* atau perubahan posisi dalam *Linear Variable Displacement Transformer (LVDT)*, menggunakan laser, dan lain-lain [1]. Sensor-sensor tersebut biasanya harus ditempelkan ke objek yang akan diamati getarannya, tetapi sensor *fluxgate* tidak perlu kontak dengan objek yang diamatinya.

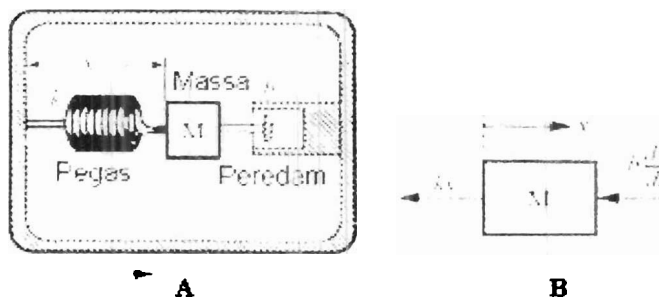
Alat ukur getaran frekuensi rendah saat ini sangat dibutuhkan, seperti deteksi getaran bendungan, jembatan, bangunan dan gempa. Berdasarkan pengembangan *fluxgate* dan aplikasi, *fluxgate* mampu mengukur perubahan medan magnet dan jarak dalam orde yang sangat kecil [4-7]. Selain itu kami juga telah berhasil mengembangkan aplikasi *fluxgate* untuk mengukur arus dc [8], getaran frekuensi tinggi [9-11], kecepatan sudut [12] dan alat ukur muai panjang [13]. Berdasarkan hasil-hasil ini, dikembangkan aplikasi lain dari *fluxgate* yaitu sebagai alat ukur getaran frekuensi rendah.

Permasalahan yang muncul di lapangan adalah tidak tersedianya peralatan kalibrasi yang dapat bekerja pada frekuensi rendah. Rata-rata *Exciter* hanya mampu bekerja di atas 20 Hz, sedangkan kebutuhan di lapangan untuk frekuensi rendah seperti getaran gempa dan bangunan adalah di bawah 10 Hz.

## 2. Fluxgate Sebagai Sensor Getaran

Salah satu cara kerja sensor getaran adalah berdasarkan perubahan posisi dari suatu objek, objek yang bergerak dapat dideteksi dengan perubahan medan magnet yang terjadi padanya. Perubahan medan magnet pada sensor magnet akibat berubahnya posisi dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi suatu benda yang sedang bergetar. *Fluxgate* sebagai sensor mempunyai konsep perubahan medan magnet suatu objek. Berdasarkan kesamaan konsep ini, maka *Fluxgate* dapat dijadikan sebagai sensor getaran [14-16].

Sensor *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 [16]. Perubahan posisi ( $x$ ) dari benda yang bergetar terhadap sensor disebut dengan simpangan, simpangan maksimum disebut dengan amplitudo ( $A$ ). Untuk meninjau konsep mekanik sebuah benda bergetar dimodelkan seperti Gambar 1.



Gambar 1: Model Mekanik Sensor Getaran (a) dan Diagram bebas dari massa (b) [17].

Sebuah benda dengan beban bermassa  $M$  terikat pada sebuah pegas dengan konstanta pegas  $k$  dan massa yang bergerak diredam oleh peredam dengan koefisien redaman  $b$  seperti Gambar (A). Beban bisa bergeser sejauh  $x$  dari titik setimbang terhadap sensor

dengan arah horizontal. Selama bergerak percepatan beban  $M$  bergetar sebesar  $\frac{d^2x}{dt^2}$ ,

dan sinyal keluaran sebanding dengan defleksi  $x_0$  dari beban  $M$ . Berdasarkan tinjauan diagram bebas masaa  $M$  seperti Gambar (B) dan menerapkan Hukum kedua Newton [18], memberikan :

$$Mf = -kx - b \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

dengan  $f$  adalah percepatan dari massa relatif dari bumi dan diberikan oleh :

$$f = \frac{d^2x}{dt^2} - \frac{d^2y}{dt^2} \quad (2)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 1 ke 2 didapatkan :

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kX = M \frac{d^2y}{dt^2} \quad (3)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan diffrensial orde dua yang mana artinya keluaran percepatan sinyal merupakan bentuk osilasi. Untuk menyelesaikan persamaan (3) di atas digunakan Transformasi Laplace [19]. Berdasarkan Transformasi Laplace didapatkan :

$$Ms^2 X(s) + bsX(s) \frac{dx}{dt} + kX(s) = MA(s) \quad (4)$$

dimana  $X(s)$  dan  $A(s)$  adalah Transformasi Laplace dari  $x(t)$  dan  $\frac{d^2y}{dt^2}$ . Solusi persamaan (4) untuk  $X(s)$  adalah :

$$X(s) = \frac{-MA(s)}{Ms^2 + bs + k} \quad (5)$$

dengan mendefinisikan variabel  $\omega_o = \sqrt{k/M}$  dan  $2\xi\omega_o = b/M$ , persamaan (5) dapat ditulis :

$$X(s) = \frac{-A(s)}{s^2 + 2\xi\omega_o s + \omega_o^2} \quad (6)$$

Nilai  $\omega_o$  mempresentasikan frekuensi anguler alami percepatan dan  $\xi$  koefisien normalisasi redaman. Misalkan  $G(s) = \frac{-1}{s^2 + 2\xi\omega_o s + \omega_o^2}$ , maka persamaan (6) dapat dituliskan menjadi :  $X(s) = G(s)A(s)$ , solusi dapat diungkapkan dalam bentuk operator inverse transformasi Laplace sebagai :

$$X(s) = L^{-1}\{G(s)A(s)\} \tag{7}$$

Dengan menggunakan teorema konvolusi transformasi Laplace dapat ditulis:

$$x(t) = \int_0^t g(t-\tau)a(\tau)d\tau \tag{8}$$

dimana  $a$  adalah impulse bergantung pada percepatan dan  $g(t)$  adalah inverse transform  $L^{-1}\{G(s)\}$ . Jika diambil  $\omega = \omega_o\sqrt{1-\xi^2}$ , maka persamaan di atas mempunyai dua solusi, yaitu :

Solusi I, untuk underdamped mode ( $\xi < 1$ ):

$$x(t) = -\int_0^t \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_o(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau)a(\tau)d\tau \tag{9}$$

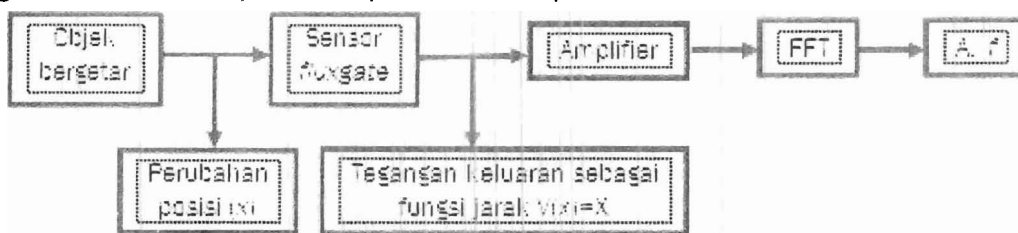
Solusi II, untuk overdamped mode ( $\xi > 1$ ):

$$x(t) = -\int_0^t \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_o(t-\tau)} \sinh \omega(t-\tau)a(\tau)d\tau \tag{10}$$

dengan  $\omega = \omega_o\sqrt{\xi^2 - 1}$

Persamaan (10) menunjukkan bahwa perubahan jarak atau simpangan benda berosilasi bergantung pada waktu t.

Perubahan posisi atau jarak antara beban M (target) dengan sensor akan menyebabkan perubahan intensitas medan magnet yang diterima oleh sensor. Prinsip kerja pengukuran getaran berdasarkan perubahan posisi ini terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Prinsip Kerja Fluxgate Sebagai Sensor Getaran [9].

Objek yang bergetar (target) dipilih yang bersifat magnetik. Material magnetik dapat berasal dari magnet permanen atau material ferromagnetik. Material magnetik ditempatkan pada

objek yang akan diukur getarannya. Jika objek bergerak mendekati atau menjauhi detektor, maka medan magnetik disekitar titik setimbang akan mengalami perubahan, perubahan ini disebut fluks magnetik ( $\Phi$ ). Perubahan fluks magnetik bergantung pada posisi sensor terhadap objek.

Jika  $d\vec{A}$  adalah elemen vektor dan  $\vec{B}$  adalah elemen vektor, maka fluks magnetik yang keluar dari permukaan medan adalah:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (11)$$

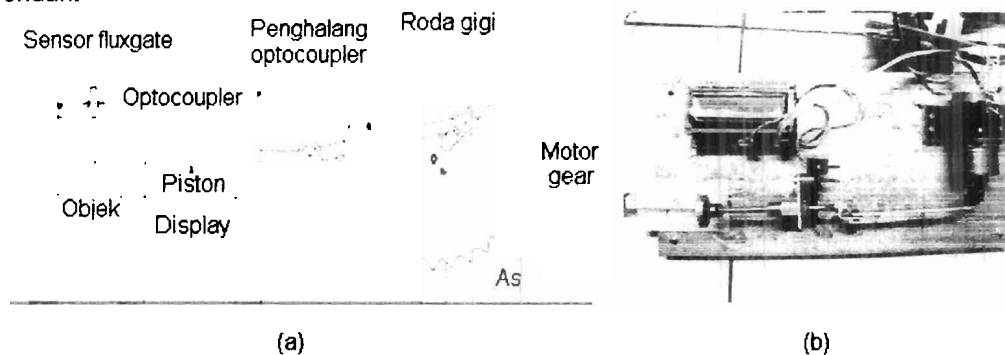
Jika medan magnetik material adalah B, maka medan magnetik yang dideteksi oleh sensor pada jarak r adalah:

$$B_r \propto \frac{B}{x} \quad (12)$$

Penurunan medan magnetik sebanding dengan  $1/x$  [5].

### 3. Metodologi

Untuk mengatasi permasalahan kalibrator frekuensi rendah telah didesain peralatan seperti Gambar 3, kalibrator ini dapat menjadi sumber penggetar dengan frekuensi rendah.



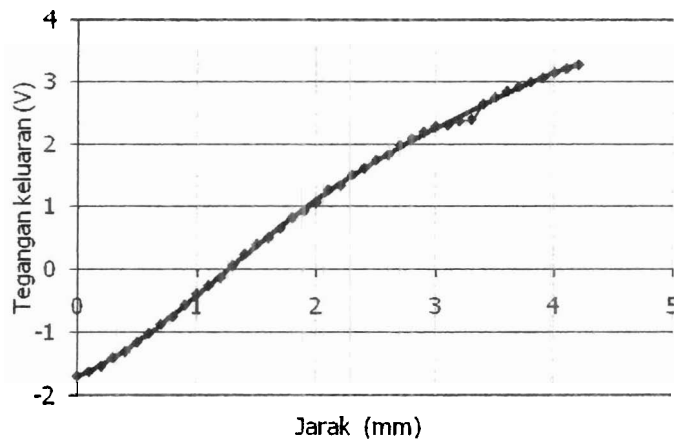
Gambar 3. Desain sistem mekanik (a) dan foto peralatan pengukuran frekuensi rendah (b). [20]

Mekanik sumber penggetar ini terdiri dari sumbu penggetar yang salah satu ujung dipasang objek bermuatan magnet, lengan penggetar yang berfungsi sebagai pendorong sumbu penggetar, roda gigi untuk memutar lengan penggetar dan sebuah motor DC 12 V yang berfungsi sebagai sumber untuk memutar roda gigi. Lengan penggetar dapat menghasilkan gerakan maju mundur pada objek, sehingga objek akan bergerak menjauhi dan mendekati fluxgate. Gerakan maju mundur ini di deteksi oleh sensor *autocoupler* kemudian banyaknya gerakan yang terjadi di cacah dengan bantuan mikrokontroler dan ditampilkan oleh LCD. Sumber penggetar yang dibuat hanya mampu bergetar dengan frekuensi maksimum 1,15 Hz.

Sebelum melakukan pengukuran getaran dilakukan kalibrasi untuk mencari hubungan jarak antara objek bergetar dengan tegangan keluaran *fluxgate*. Panjang sumbu penggetar yang dipasang pada piston adalah 8,4 cm. Mula-mula ujung sumbu yang sudah ditempelkan objek bermuatan magnet ditempatkan menempel pada *fluxgate* kemudian sumbu ditarik menjauhi *fluxgate* secara perlahan-lahan sejauh 4,2 cm. Jarak 4,2 cm ini dijadikan titik tengah sumbu penggetar. Perubahan tegangan keluaran *fluxgate* dicatat setiap perubahan jarak.

#### 4. Hasil dan pembahasan

Hasil kalibrasi jarak ini di tunjukkan pada Gambar 3. dapat terlihat bahwa respon sensor cukup linier. Untuk mendapatkan nilai simpangan nol maka grafik Gambar 3. dikonversi menjadi grafik Gambar 4.

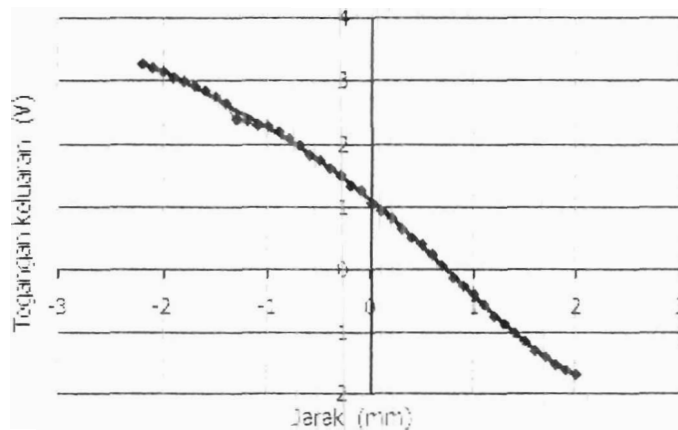


Gambar 4. Grafik optimasi jarak objek dengan *fluxgate*.

Berdasarkan grafik Gambar 4 dapat ditentukan hubungan jarak terhadap simpangan, seperti ditunjukkan persamaan (13).

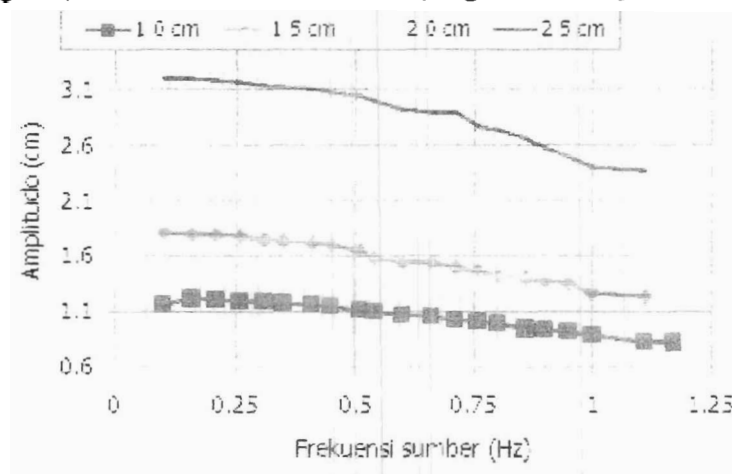
$$V_{out} = -0,003x^6 + 0,004x^5 + 0,047x^4 + 0,018x^3 - 0,237x^2 - 1,353x + 1,109 \quad (13)$$

Sebelum melakukan pengukuran getaran maka persamaan (13) dimasukkan kedalam program mikrokontroler sehingga nilai yang terbaca pada display LCD dalam bentuk simpangan maksimum atau amplitudo.



Gambar 5. Grafik untuk mendapatkan simpangan nol.

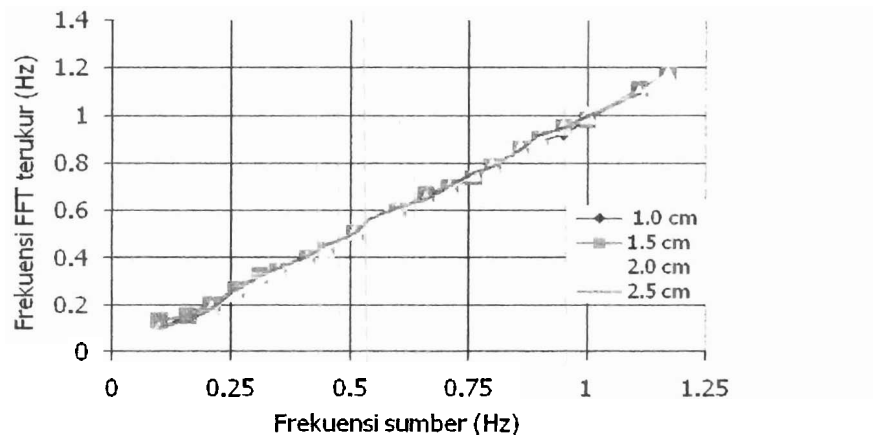
Pengukuran amplitudo getaran terhadap frekuensi dilakukan dengan memvariasikan simpangan maksimum getaran yaitu 1,0; 1,5; 2,0; dan 2,5 cm dengan cara merubah posisi lengan penggetar pada sumbu roda motor. Hasil pengukuran ditunjukkan Gambar 6.



Gambar 6. Respon frekuensi terhadap amplitudo.

Berdasarkan Gambar 6 dapat terlihat bahwa jika lengan digeser menjauhi sumbu roda motor maka semakin dekat objek bergetar ke *fluxgate*, hal ini terlihat dengan membesarnya amplitudo terukur ketika sumbu penggetar mendekati *fluxgate*. Sedangkan terhadap kenaikan frekuensi keseluruhan variasi simpangan mengalami penurunan. Hubungan frekuensi terukur dengan frekuensi sumber penggetar ditunjukkan Gambar 7

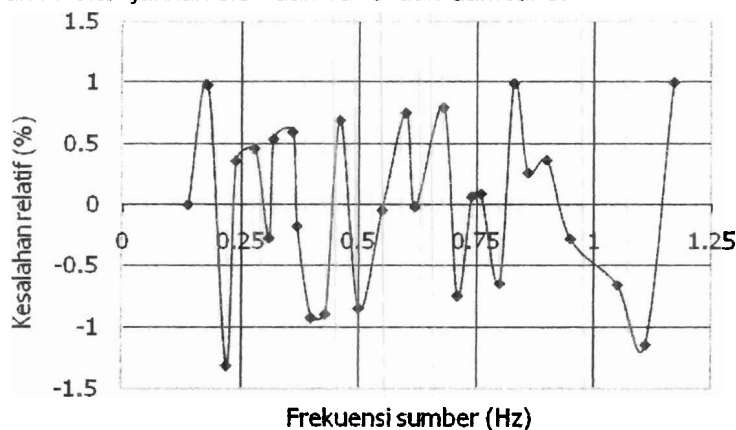




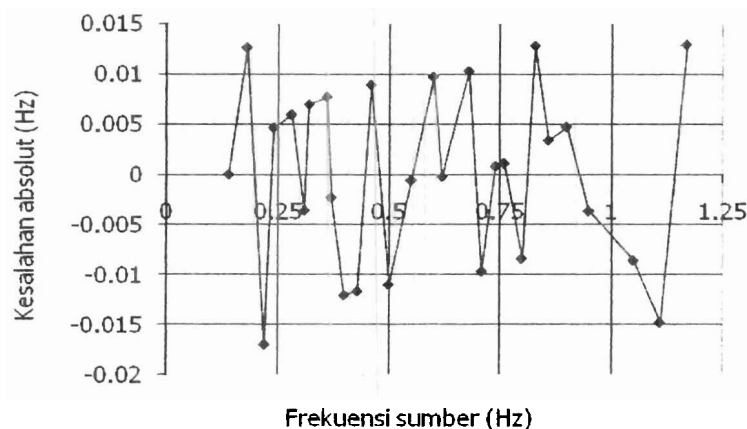
Gambar 7. Respon frekuensi terukur terhadap frekuensi sumber.

Terlihat dari Gambar 7, bahwa hubungannya linier untuk semua variasi simpangan. Hal ini menunjukkan *fluxgate* sebagai sensor getaran frekuensi rendah mampu mendeteksi frekuensi sumber 0.14 sampai 1.15 Hz.

Untuk mencari kesalahan penyimpangan frekuensi terukur dengan frekuensi sumber dilakukan analisis kesalahan absolut dan kesalahan relatif. Karena hasil pengukuran frekuensi terukur untuk semua variasi simpangan hampir sama maka analisis kesalahan diambil salah satu yaitu pengukuran dengan jarak amplitudo 2,0 cm. Berdasarkan analisis diperoleh kesalahan absolut dan relatif maksimum masing-masing 0.017 Hz dan 1.3 %. Hasil kesalahan ini ditunjukkan oleh Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Grafik kesalahan relatif pengukuran frekuensi rendah.



Gambar 9. Grafik kesalahan absolut pengukuran frekuensi rendah.

## 5. Kesimpulan

Telah berhasil di kembangkan aplikasi *fluxgate* sebagai sensor getaran dan sumber penggetar yang dapat bekerja pada frekuensi rendah. Aplikasi ini dikembangkan berdasarkan kemampuan *fluxgate* dalam mendeteksi perubahan medan magnet dan jarak dalam orde yang sangat kecil. Berdasarkan pengukuran *fluxgate* mampu mengukur frekuensi 0.14 sampai 1.15 Hz dengan kesalahan absolut 0.017 Hz dan kesalahan relatif 1.3 %. Berdasarkan hasil ini, *fluxgate* dapat dikembangkan lebih jauh sebagai alat ukur getaran yang memiliki frekuensi rendah seperti: getaran jembatan, bendungan, gempa dan lain-lain. Untuk mendapatkan rentang frekuensi yang lebih lebar, saat ini penelitian masih terus kami lakukan terutama memperbaiki sumber penggetar yang dapat menghasilkan frekuensi rendah hingga 10 Hz.

## Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih pada Departemen Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah memberikan dana penelitian melalui Program Hibah Bersaing No. 080/H35.2/PG/HB/2009, Hibah Penelitian Doktor No. 551/K01.12.2/KU/2010 dan Riset PRI ITB 2010.

## Daftar Pustaka

- [1] Goldman, S., *Vibration Spectrum Analysis*, New York, Industrial Press Inc., 1999.
- [2] Azhar, D., Jusan Q., & Parsaulian S., *Analisis kerja "Vibration Monitor" Bently Nevada tipe 5250*, Prosiding SIBF, Bandung, 31 Agustus 2006.
- [3] Pöyhönen, S., Jover, P. & Hyötyniemi, H., *Independent Component Analysis of Vibrations for Fault Diagnosis of Induction Motor*, Proc. of the IASTED International Conference Circuit, Sinyal and System, Cancun, Mexico, May 19-21, 2003.
- [4] Djamel, M., & Setiadi, R.N., *Pengukuran Medan Magnet Lemah Menggunakan Sensor Magnetik Fluxgate dengan Satu Kumparan Pick-up*, Prosiding ITB Sains & Tek. Vol.38A, No.2, pp. 99-115, 2006.
- [5] Djamel, M., & Setiadi, R.N., *Displacement Sensor Based on Fluxgate Magnetometer*, Proc. on Asian Physics Symposium (APS), Bandung, 7-8 August 2005.

- [6] Suyatno, & Djamal, M, *Development fluxgate magnetometer for proximity sensor*, Prosiding Seminar Fisika dan Aplikasinya , ITS, Surabaya, 2007
- [7] Yulkifli, Suyatno, Djamal, M. & Setiadi, R.N., *Designing and Making of Fluxgate Sensor with Multi-Core Structure for Measuring of Proximity*, Proceedings of The Conference Solid State Ionic (CSSI), Tangerang, pp. 164-170, 2007.
- [8] Djamal, M. & Yulkifli, *Fluxgate Sensor and Its Application*, Proceedings of ICICI-BME, Bandung, 2009.
- [9] Djamal, M., Setiadi, R.N., & Yulkifli, *Preliminary Study of Vibration Sensor Based on Fluxgate Magnetic Sensor*, Proc. of ICMNS, Bandung, 2008.
- [10] Yulkifli, Setiadi, A., Djamal, M. & Khairurrijal, *Development of Mathematical Model of Vibration Sensor base on Fluxgate Magnetic Sensor*. The 4<sup>th</sup> Asian Physics Symposium (APS), Ocktober, 12-13, 2010.
- [11] Djamal, M., Yulkifli, Setiadi, A., & Setiadi, R.N., *Development of a Low Cost Vibration Sensor Based on Fluxgate Element*, International conference of the Institute for Environment, Engineering, Economics and Applied Mathematics ( IEEEAM), Malta, Itali, September, 15-17, pp. 248-251, 2010
- [12] Yulkifli, Anwar, Z., & Djamal,M., *Desain Alat Hitung Kecepatan Sudut Berbasis Sensor Magnetik Fluxgate*, Jurnal Sainstek, vol. 1, , pp. 79-90, 2009.
- [13] Yulkifli, Wahyudi, I., & Djamal, M., *Development of Distance Measuring Instrument of a Metal Expansion Based on a Fluxgate Sensor*, Proc. 3rd International Graduate Conference on Engineering, Science and Humanities (IGCESH )School of Graduate Studies, Universiti Teknologi Malaysia, 2- 4 November, pp. 1-5, 2010.
- [14] Firmansyah. A., *Fluxgate magnetometer sebagai alat ukur Getaran*, Tugas Akhir 2, Fisika ITB, Bandung 2006
- [15] Suyatno, *Desain dan Pengembangan Sensor Magnetik Fluxgate dan Aplikasinya untuk Mengukur Getaran: Tesis S2*, ITB, Bandung, 2007.
- [16] Hendro, & Djamal, M., *Pembuatan Sensor Getaran Berbasis Fluxgate*, Berita Utama LPPM ITB, Bandung, 2007.
- [17] Fraden, J., *Handbook of Modern Sensor*. New York, Springer-Verlag New York, Inc, 1996.
- [18] Symon, K.R., *Mechanics*, third edition, Addison Wislye Company, 1980.
- [19] Boas, M.L., *Mathematical Methods in the Physical Sciences*, Second Edition, Jhon Wiley & Sons New York, 1984.
- [20] Yulkifli, *Pengembangan Elemen Fluxgate dan Penggunaannya untuk Sensor-sensor Berbasis Magnetik dan Proksimiti*, Disertasi Program Studi Doktor Fisika, ITB, Bandung, 2010.

# Optimasi Peningkatan Sensitivitas Sensor Fluxgate Menggunakan Rangkaian Low Pas Filter Orde-n

Hufri<sup>1</sup>, Yulkifli<sup>1</sup>, Mitra Djamal<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*KK-Instrumentasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Padang, Jl. Prof. Dr. Hamka Air Tawar Padang, Indonesia*

<sup>2</sup>*KK-FTETI, FMIPA, Institut Teknologi Bandung*

## ABSTRAK

Peningkatan sensitivitas sensor *fluxgate* telah dilakukan dengan menggunakan rangkaian pengolah sinyal dengan cara menambahkan orde yang lebih tinggi terhadap bagian Low Pas Filter (LPF), LPF yang sebelumnya hanya orde dua (2<sup>th</sup> orde) ditambah menjadi orde enam (6<sup>th</sup> orde). Rangkaian Low Pas Filter Orde enam (6<sup>th</sup> orde) mempunyai kurva filter yang sangat tajam, artinya filter yang digunakan akan semakin baik jika ordenya semakin tinggi karena akan mendekati keideal filter. Penambahan LPF orde-6 dapat menurunkan nilai kesalahan absolut sensor lebih kecil, berarti resolusi sensor juga makin tinggi yaitu 7.6 nT. Hasil ini telah sesuai dengan tujuan yang diharapkan yaitu dibawah 10 nT.

**Kata kunci :** *sensor fluxgate, low pas filter*

## 1. PENDAHULUAN

Sensor magnetik yang banyak digunakan saat ini adalah *efek Hall*, *Magnetoresistif (AMR, GMR)*, *SQUID* dan *fluxgate* (Caruso, M.J., dkk., 2007; Smith, C.H., dkk., 2007), ketiga sensor magnetik ini mempunyai kelebihan dan kekurangan. Berdasarkan prinsip kerja ketiga sensor dalam mengukur medan magnet, maka sensor *fluxgate* mempunyai kelebihan antara lain: mempunyai kestabilan yang tinggi terhadap temperatur dengan koefisien sensitivitas temperatur 30 ppm/°C dan koefisien offset 0.1 nT, memiliki resolusi dan sensitivitas yang tinggi. Kelebihan lain sensor *fluxgate* adalah ukuran dan kebutuhan daya kecil (Ripka, P., 2001; Kubik, J. 2006).

Sensitivitas dan resolusi sensor *fluxgate* ditentukan oleh banyak faktor antara lain: Geometri elemen sensor, jenis material kawat dan inti ferromagnetik yang digunakan, jumlah lilitan sekunder dan primer, jumlah inti (core) ferromagnetik (Ripka, P., 2001) dan kualitas rangkaian pendukung baik analog maupun digital (Kubik, J. 2006, Janosek, M., 2009). Untuk memperbaiki sensitivitas dan resolusi sensor maka dilakukan upaya terhadap rangkaian pengolah sinyal dengan cara menambahkan orde yang lebih tinggi terhadap bagian Low Pas Filter (LPF), LPF yang sebelumnya hanya orde dua (2<sup>th</sup> orde) ditambah menjadi orde enam (6<sup>th</sup> orde).

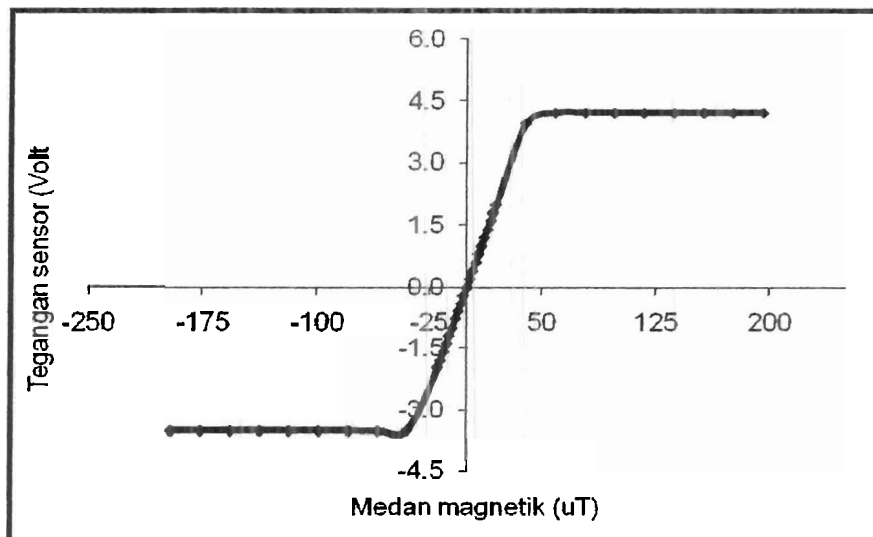
## 2. METODE DAN BAHAN

Langkah-langkah untuk memperoleh tegangan keluaran sensor yang diinginkan adalah sebagai berikut:

- Membuat elemen sensor fluxgate, dalam ini dipilih desain inti berbentuk oval dengan lilitan pick-up ganda.
- Optimasi komponen rangkaian eksitasi, dalam hal ini dilakukan optimasi terhadap komponen dan model rangkaian pembangkit gelombang eksitasi
- Optimasi rangkaian pengolah sinyal, seperti buffer, tapis dan penguat
- Pengambilan respon keluaran pada masing blok rangkaian
- Pengukuran respon keluaran sensor terhadap medan magnet luar

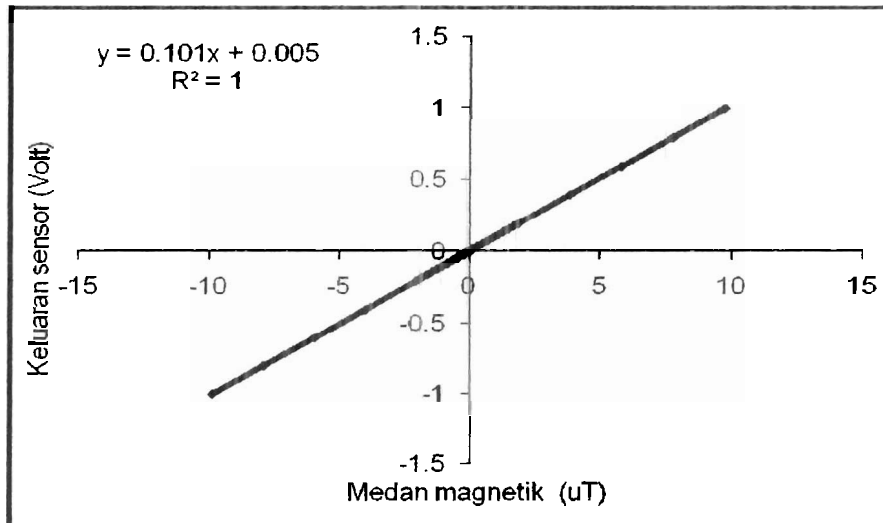
## 3. HASIL DAN DISKUSI

Pada pengukuran dalam rentangan sumber medan magnetik  $\pm 200 \mu\text{T}$  diperoleh tegangan keluaran sensor seperti ditunjukkan gambar 1. Terlihat daerah saturasi pengukuran berada pada orde puluhan. Daerah saturasi ini merupakan batas daerah pengukuran medan magnetik yang dapat terukur oleh sensor.



Gambar 1. Respon tegangan keluaran sensor untuk daerah  $\pm 200 \mu\text{T}$ .

Untuk mencari daerah kerja sensor dilakukan pemotongan pada daerah linier, hasilnya ditunjukkan oleh gambar 2.



Gambar 2. Daerah linier pengukuran sensor untuk daerah  $\pm 10 \mu\text{T}$ .

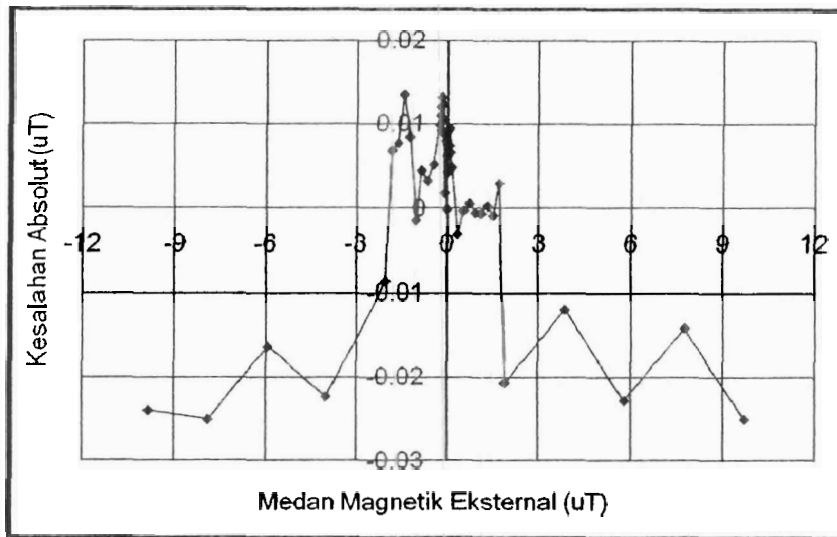
Berdasarkan gambar 2 terlihat bahwa keluaran sistem sensor sangat linier, hal ini terlihat dari nilai  $R^2 = 1$ . Selain itu grafik juga menunjukkan bahwa medan magnetik eksternal yang terukur sebanding dengan tegangan keluaran sensor, hal ini sesuai dengan persamaan (1).

Sensitivitas sensor diperoleh berdasarkan kemiringan grafik daerah linier tegangan keluaran sensor yang ditunjukkan oleh persamaan regresi linier;

$$V_{out} = 0.1018B + 0.0051, \quad (1)$$

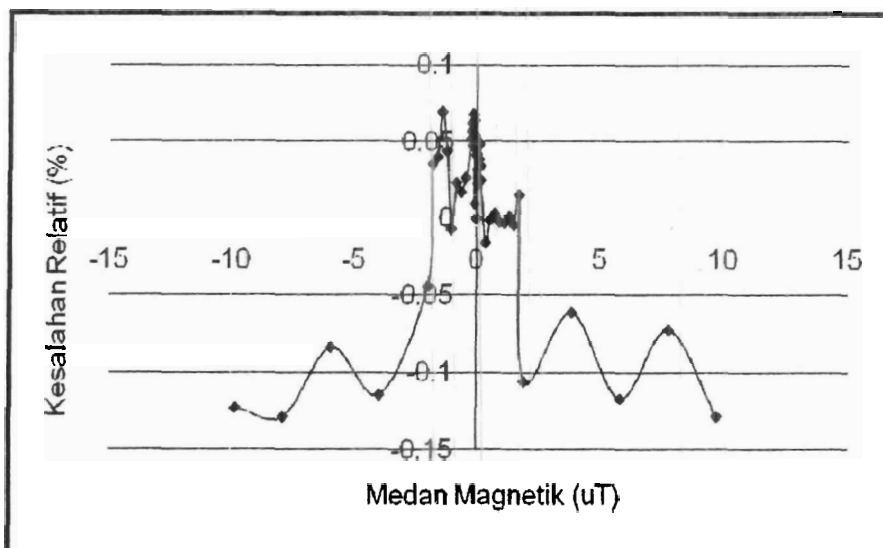
Dimana  $B$  dalam  $\mu\text{T}$  dan  $V_{out}$  dalam  $\text{mV}$ , berdasarkan persamaan (1) diperoleh sensitivitas sensor  $101,8 \text{ mV}/\mu\text{T}$ , artinya tiap  $1 \mu\text{T}$  sensor dapat mengukur perubahan tegangan sensor  $101,8 \text{ mV}$ .

Kesalahan pengukuran dihitung menggunakan pendekatan persamaan linier (1). Berdasarkan pendekatan matematika ini diperoleh kesalahan absolute dan relative pengukuran seperti ditunjukkan gambar 3 dan 4



Gambar 3. Kesalahan absolut keluaran sensor

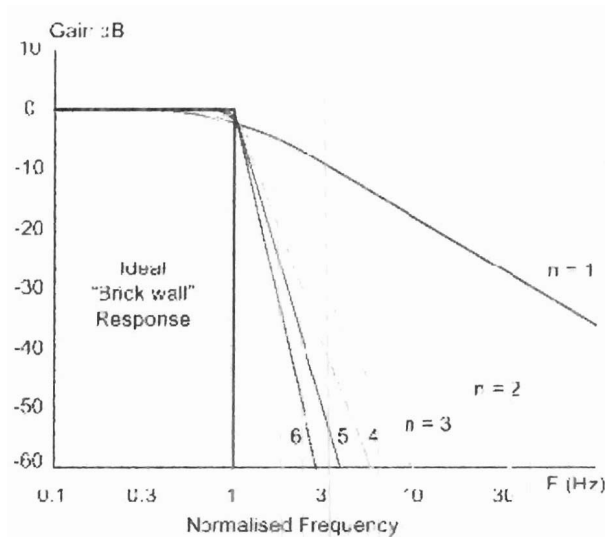
Terlihat kesalahan maksimum absolut sekitar 25 nT. Kesalahan absolut ini mewakili resolusi dari sensor. Kesalahan relatif keluaran sensor diperoleh 0.13% terjadi pada medan magnetik sebesar -7.872  $\mu$ T. Kesalahan yang diperoleh sangat kecil sehingga dapat dikatakan sensor ini mempunyai karakteristik tegangan keluaran yang sangat bagus.



Gambar 4. Kesalahan relatif keluaran sensor .

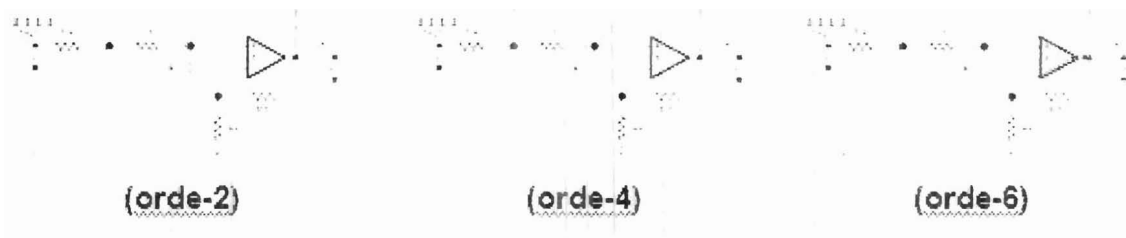
Berdasarkan hasil di atas terlihat resolusi sensor masih di atas 10 uT, untuk memperbaiki resolusi sensor maka dilakukan upaya terhadap rangkaian pengolah sinyal dengan cara menambahkan

orde yang lebih tinggi terhadap bagian Low Pas Filter (LPF). LPF yang sebelumnya hanya orde dua ( $2^{\text{th}}$  orde) ditambah menjadi orde enam ( $6^{\text{th}}$  orde). Model respon untuk LPF orde ke-6 ditunjukkan gambar 5



Gambar 5. Respon LPF untuk orde ke-n

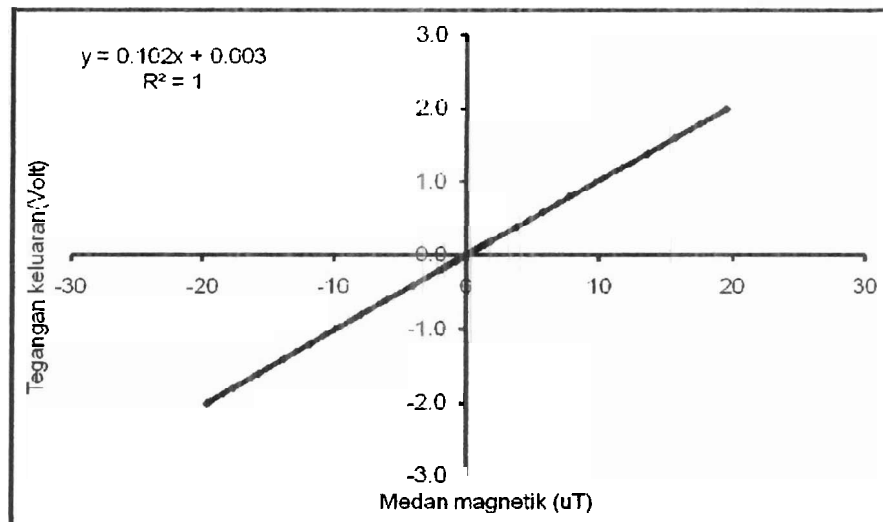
Terlihat dari gambar 5 bahwa orde enam ( $6^{\text{th}}$  orde) mempunyai kurva filter yang sangat tajam, artinya filter yang digunakan akan semakin baik apabila ordenya semakin tinggi karena akan mendekati keidealan filter. Untuk membangun suatu filter orde 6, bisa dilakukan dengan memasang filter orde kecil secara serial seperti ditunjukkan gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian seri Stallen Key orde enam ( $6^{\text{th}}$  orde)

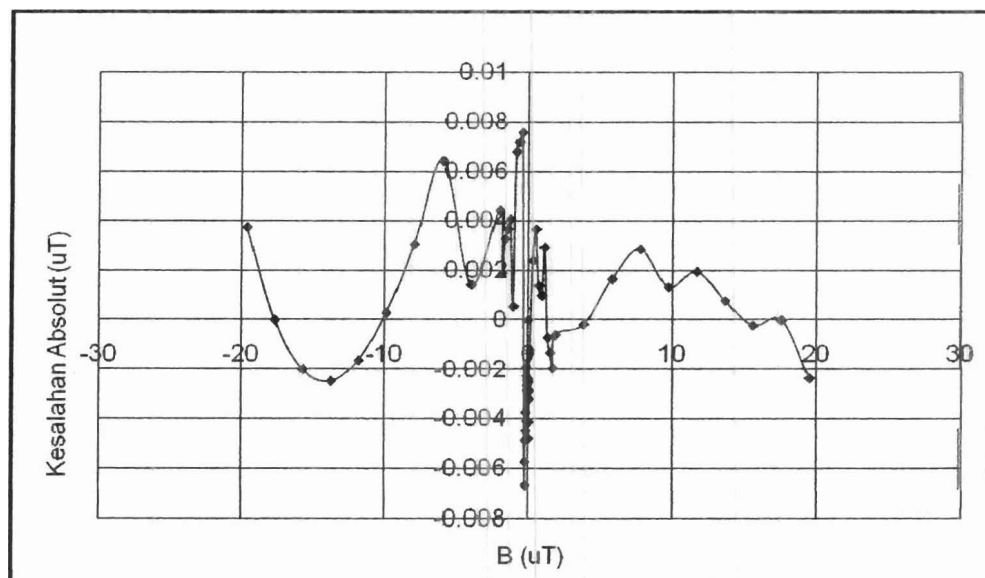
Hasil pengukuran keluaran sensor dengan menggunakan LPF orde enam ditunjukkan gambar 7.





Gambar 7. Daerah linier pengukuran sensor untuk daerah  $\pm 20 \mu\text{T}$ .

Terlihat dengan menambahkan LPF orde enam daerah linier lebih panjang dari sebelumnya tetapi sensitivitas sensor tidak mengalami perubahan. Berdasarkan pendekatan matematika melalui persamaan linier orde-3, seperti ditunjukkan gambar 8.



Gambar 8. Kesalahan absolut keluaran sensor

Terlihat dengan pada gambar 8 kesalahan maksimum absolut lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan LPF orde-6 dapat menurunkan nilai kesalahan absolut sensor lebih kecil

artinya resolusi sensor juga makin tinggi yaitu 7.6 nT. Hasil ini telah sesuai dengan tujuan yang diharapkan dimana dibawah 10 nT.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas dapat diambil kesimpulan bahwa untuk meningkat daerah linier dan resolusi sensor telah dilakukan optimasi terhadap RPS dengan cara menambahkan LPF orde yang lebih tinggi (6<sup>th</sup> orde), Berdasarkan karakterisasi diperoleh daerah linier lebih lebar yaitu  $\pm 20 \mu\text{T}$  dengan resolusi 7.6 nT

#### 5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai dari dana Hibah Bersaing DIKTI N0. 080/H35.2/PG/HB/2009

#### DAFTAR PUSTAKA

Caruso, M.J, Tamara B., 1998: A New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensor Magazine, Magnetic Sensor*, Tersedia di [www.ssec.honeywell.com](http://www.ssec.honeywell.com). 2007.

Janosek, M., Ripka, P., 2009: PCB sensors in fluxgate magnetometer with controlled excitation, *Sens & Actuator A*, 151, pp 141-144

Kub'ík, J., 2006, *PCB fluxgate sensors*, Dissertation Thesis, CTU in Prague.

Ripka, P., 2001, *Magnetic Sensor and Magnetometers*, Artec House.

Smith, C.H, Robert Scheneider, 1998: A New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensor Magazine, Magnetic Sensor*, Tersedia di [www.rve.com](http://www.rve.com). 2007.

# Sensor Magnetik Fluxgate Berbasis Elemen Sensor Teknologi Printed Circuit (PCBs)

Yulkifli

KK Fisika Instrumentasi, FMIPA, Univ. Negeri Padang  
Jl. Prof Dr. Hamka Kampus UNP Air tawar Padang 25131, Telp. (0751)51260  
E-mail: yulkifliamir@yahoo.com

## Abstrak

Telah dibuat alat ukur magnetik berbasis sensor magnetik fluxgate menggunakan elemen sensor model printed circuit boards (PCBs). Susunan elemen sensor fluxgate terdiri dari kumparan primer (excitation coil) dan kumparan sekunder. Kumparan primer akan membangkitkan medan magnet internal yang berfungsi sebagai medan magnet referensi sedangkan kumparan sekunder berfungsi untuk mengukur medan magnet eksternal (sensing) sehingga sensitivitas sensor fluxgate sangat ditentukan oleh desain kumparan sekunder. Berdasarkan analisa data diperoleh sensitivitas sensor PCBs yaitu  $392.1 \text{ mV}/\mu\text{T}$ . Kesalahan absolut maksimum yang diperoleh dari pendekatan fungsi polinomial adalah  $0.075 \mu\text{T}$ . Tingkat kesalahan relatif maksimum sistem sensor pada pendekatan ini adalah  $0.38\%$ .

**Kata kunci :** sensor magnetik, fluxgate ,PCBs, kumparan sekunder, kumparan primer

## Abstract

An instrument to measure magnetic field based on Fluxgate magnetic sensor using element of model sensor printed circuit boards (PCBs) was presented. Fluxgate sensor element consisted of excitation coils and pick-up coils. Excitation coils generates magnetic field that functions as reference magnetic field whereas pick-up coils is used as a sensing of external magnetic field, so the sensitivity of fluxgate sensor depends on the design of secondary coils element. Based on the analysis of the experiment data, the sensor's sensitivity of the PCBs was  $392.1 \text{ mV}/\mu\text{T}$ . The maximum absolute error from the polinomial function approached was  $0.0751 \mu\text{T}$ . The maximum relative error of the sensor system in this approach was  $0.38\%$ .

**Keywords :** magnetic sensor, fluxgate ,PCBs, excitation coils, pick-up coils

## I. Pendahuluan

Bahan magnet dan magnetisme merupakan salah satu cabang dari ilmu bahan yang terus berkembang sesuai dengan tuntutan kemajuan science dan teknologi. Kemajuan yang sangat pesat dan kebutuhan yang sangat besar dalam kehidupan menuntut suatu instrumen yang dapat menentukan kualitas bahan magnet itu sendiri. Instrumen untuk menguji kualitas dan kuantitas kandungan material bahan magnetik tersebut salah satunya adalah sensor magnetik.

Sensor magnetik adalah alat ukur medan magnet yang banyak digunakan orang untuk berbagai keperluan, antara lain untuk penelitian bahan-bahan magnetik, keamanan penerbangan (mendeteksi barang bawaan), pemetaan medan magnet bumi,

penentuan posisi benda, pengesanan kebocoran medan magnet dari suatu alat penghasil medan magnet seperti pengeras suara, magnetron dan peralatan magnetik lainnya (Ripka, P., 2001a).

Beberapa sensor magnetik yang banyak digunakan saat ini adalah *efek Hall*, *Magneto-resistif (AMR, GMR)*, *SQUID* dan *fluxgate* (Caruso, M.J., et al., 2007; Smith, C.H., et al., 2007). Prinsip kerja berdasarkan *efek Hall*, kelemahan metode ini adalah sensitivitasnya yang rendah, offset tegangan yang cukup tinggi dan pengaruh temperatur yang cukup besar (Caruso, M.J., et al., 2007). *Magneto-resistif* prinsip kerja Berdasarkan perubahan resistansi bahan akibat pengaruh medan magnet luar, Kelemahan sensor magnetik model ini adalah adanya pengaruh efek histeresis, berubahnya sensitivitas sensor terhadap kenaikan medan magnet H. Fluxgate berkerja berdasarkan pada hubungan antara kuat medan magnet H yang diberikan dengan fluks medan magnet induksi B. Besarnya sebanding dengan medan magnet luar yang mempengaruhi inti (core) dan arahnya sebanding dengan arah medan magnet luar tersebut (Göpel, W., 1996, Djamal, M., et al., 2007, Bashiroto, A., et al., 2006). Kelebihan lain sensor *fluxgate* adalah ukurannya kecil, kebutuhan daya kecil, dan mempunyai kestabilan yang tinggi terhadap temperatur dengan koefisien sensitivitas temperatur 30 ppm/°C dan koefisien offset 0.1 nT (Ripka, P., et al., 2001a; L, Shibin., et al., 2006).

Untuk meningkatkan efektifitas dan efisiensi sensor *fluxgate* dilakukan berbagai upaya oleh para peneliti seperti perbaikan pada desain struktur sensor, rangkaian pengolah sinyal dan meminiatur ukuran sensor dalam orde yang lebih kecil (Ripka, P., et al., 2001, Wang, Y., et al., 2006; Zorlu, O., et al., 2007). Selain itu teknik pembuatan sensor juga makin berkembang mulai dari metode konvensional sampai metode dalam bentuk printed circuit board (PCB) (Tipek, A., 2004, Kubik, J., et al., 2006, Bashiroto, A., et al., 2006, O'Donnell, T., 2006, B. Ando, 2008, Janosek M. 2009) dan teknologi microfluxgate, seperti: *electroplated/electroplating*, *chemical etching*, *flex-foil*, *photolithography*, evaporasi dan sputtering (Ripka, P., 2001b, Park, H. S. 2004, Fan., J., et al., 2006, Zorlu, O., et al., 2007, 2008), kombinasi dari beberapa metode tersebut disebut hybrid technology (Dezuari, O., et al., 1999; Belloy, E., et al., 2000)

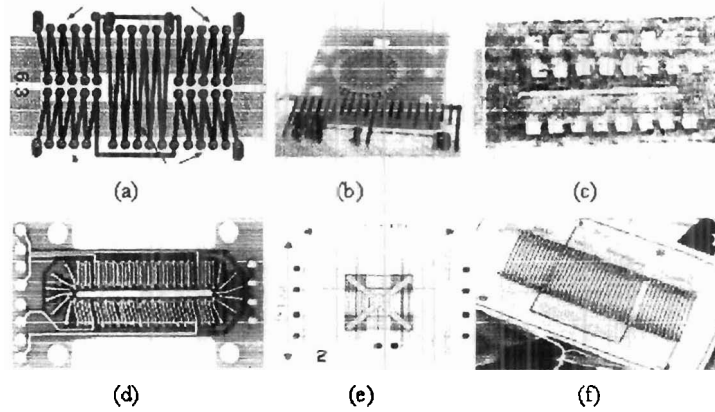
Teknologi PCBs merupakan teknologi terkini dalam pembuatan elemen sensor Fluxgate, karena memiliki kelebihan antara lain luas penampang besar sehingga sensitivitas sensor lebih tinggi, proses pembuatan mudah, untuk jumlah massal tentunya biaya pembuatan rendah, akibatnya harganya lebih murah (Dezuari, O., 1999, Tipek, A., 2004, Baschiroto, A., 2006, Kubik, J. et al., 2006).

Paper ini akan membahas penggunaan sensor magnetik fluxgate berbasis elemen sensor PCBs dan karakteristiknya.

## II. Kajian Pustaka

### a. Teknologi Printed Circuits (PCBs) dalam Pembuatan Elemen Sensor Fluxgate

Proses pembuatan elemen sensor fluxgate menggunakan teknologi PCBs memiliki keuntungan antara lain luas penampang besar sehingga sensitivitas sensor lebih tinggi, proses pembuatan mudah, tentunya biaya pembuatan rendah, akibatnya harganya lebih murah (Baschiroto, A., 2006). Beberapa contoh elemen sensor fluxgate yang dibuat dengan teknologi PCB dapat terlihat pada gambar 1.

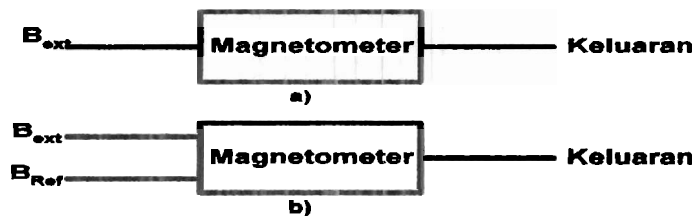


**Gambar 1.** Photograph desain elemen sensor fluxgate dengan teknologi PCB ( Dezuari, O, 2000(a), Tipek, A., 2004(b), O'Donnell, T., 2006(c), Kubik, J., 2006 (d) , Baschiroto, A. 2006 (e), B. Ando, 2008(f).

Dalam pembuatan elemen sensor dengan teknik PCBs memiliki tiga tahapan proses, yaitu (1). Desain engineering, (2). Desain fisik PCBs, (3), Pencetakan ke PCBs. Setiap tahap memerlukan perangkat lunak tertentu. Ketiga perangkat lunak tersebut adalah Computer Aided Engineering (CAE), Computer Aided Design (CAD) dan Computer Aided Manufacturing (CAM). (SELC,2008). Agar mendapatkan hasil yang diharapkan semua proses mempunyai keterkaitan yang sangat erat dan tidak dapat dipisahkan. Untuk pembuatan elemen sensor fluxgate dengan teknik PCBs yang sangat menentukan adalah: *footprint* dan *track* (jalur) yang mengantikan sistim gulungan kawat yang dilakukan selama ini.

### b. Konsep Sensor Fluxgate

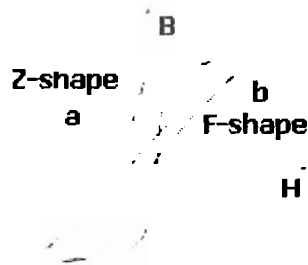
Rapat fluks  $B_{ext}$  dalam sebuah medan magnet dapat diukur secara langsung menggunakan koil rangkaian elektronika. Namun metode ini memberikan hasil yang tidak baik jika medan magnet tersebut kecil. Sensor *fluxgate* tidak menggunakan metode langsung seperti ini namun menggunakan suatu medan magnet referensi  $B_{ref}$  untuk dibandingkan dengan medan magnet  $B_{ext}$  dengan menggunakan bahan yang merupakan bahan yang dapat dimagnetisasi seperti pada gambar 2b. Pada umumnya medan referensi menggunakan sinyal sinusoidal, sinyal persegi, maupun sinyal segitiga yang diberikan pada kumparan primer.



**Gambar 2.** Prinsip pengukuran medan magnet: (a) metode langsung; (b) perbandingan rapat fluks yang hendak diukur  $B_{ext}$  dengan rapat fluks referensi  $B_{ref}$ . (Gopel, W 1996, Djamal, M. 2007).

Hasil dari perbandingan kedua medan tersebut berdasarkan pada rapat fluks di dalam inti yang dideteksi oleh kumparan sekunder di sekeliling inti. Bahan inti sensor *fluxgate* biasanya menggunakan bahan paramagnetik dengan permeabilitas yang tinggi.

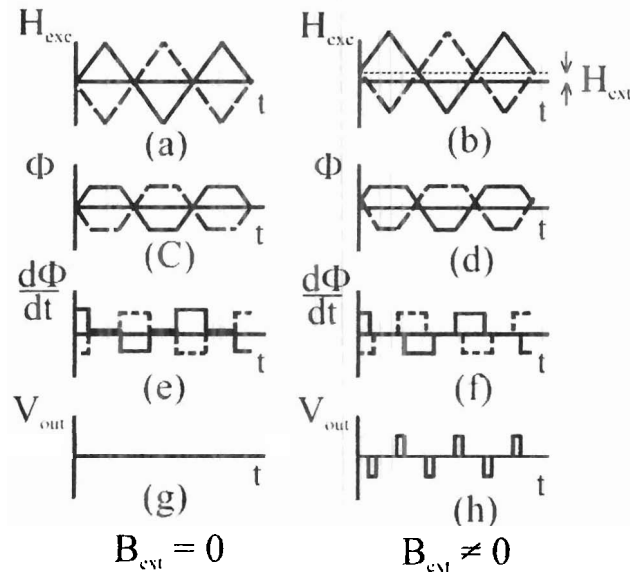
Perbedaan pendekatan matematis dihubungkan dengan fungsinya dan arus yang diberikan telah membuat prinsip yang berbeda untuk sensor *fluxgate*. Pendekatan yang dilakukan antara lain dengan fungsi polinomial, fungsi pemotong linier, dan fungsi trigonometri. Kedua pendekatan pertama digunakan untuk kurva magnetisasi dengan karakteristik Z sedangkan pendekatan ketiga digunakan untuk kurva magnetisasi dengan karakteristik F. Gambar kurva magnetisasi ditunjukkan oleh gambar 3.



Gambar 3. Bentuk Kurva Magnetisasi (a) Karakteristik Z; (b) Karakteristik F.

Prinsip kerja sensor *fluxgate* ketika mengukur perubahan medan magnet luar ditunjukkan pada gambar 4. 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  $B_{ext}\neq 0$  (Djamal, M. *et al.*, 2007).

Tegangan keluaran  $V_{out}$  dari elemen sensor diolah dengan menggunakan rangkaian pengolah sinyal. Untuk mengevaluasi tegangan keluaran sensor *fluxgate* digunakan fungsi transfer. Fungsi transfer suatu sensor magnetik *fluxgate* menggambarkan hubungan antara tegangan keluaran  $V_o$  dengan medan magnet yang diukur. Fungsi transfer dapat dihitung menggunakan pendekatan polinomial dan dengan mencari komponen frekuensi yang ada di dalam kerapatan fluks magnetik inti sensor. Penggunaan pendekatan polinomial menyederhanakan pembagian ke dalam komponen frekuensi (Göpel, W, *et al.*, 1989).



Gambar. 4. Prinsip kerja sensor *fluxgate* (Gruger, 2000)

Dengan asumsi bahwa inti (core) sensor bertipe linear dan medan eksitasi berbentuk sinusoida, maka berdasarkan penurunan 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  $\mu_r$  adalah permeabilitas relatif dan  $D$  adalah faktor demagnetisasi untuk inti linear :

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

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 diaproksimasi dengan pendekatan polinomial ternormalisasi orde 3:

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

$b$  adalah rapat fluks ternormalisasi:

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

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

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

$$b = a_1 h_{ext} - a_3 h_{ext}^3 - \frac{3}{2} a_3 h_{ext} \cdot h_{ref \max}^2 + \left( a_1 h_{ref \max} - 3a_3 h_{ext}^2 h_{ref \max} - \frac{3}{4} a_3 h_{ref \max}^3 \right) \sin \omega t - \frac{3}{2} a_3 h_{ext} h_{ref \max}^2 \cos 2\omega t + \frac{1}{4} a_3 h_{ref \max}^3 \sin 3\omega t \quad (9)$$

Dari persamaan (9) 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, amplitudo tegangan keluran induksi dilukiskan dengan hukum varaday (Bashiroto, A., *et al.*, 2006):

$$V_{out} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} \quad (10)$$

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

$$v_{out} = -\frac{V_{out}}{NA} = \frac{dB}{dt} = B_0 \cdot \frac{db}{dt} \quad (11)$$

$$v_{out} = B_0 \omega \left( a_1 h_{ref \max} - 3a_3 h_{ext}^2 h_{ref \max} - \frac{3}{4} a_3 h_{ref \max}^3 \right) \cos \omega t + 3B_0 \omega a_3 h_{ext} h_{ref \max}^2 \sin 2\omega t + \frac{3}{4} B_0 \omega a_3 h_{ref \max}^3 \cos 3\omega t \quad (12)$$

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

$$V_{out2h} = -3B_0 NA \omega a_3 h_{ext} h_{ref \max}^2 \sin 2\omega t \quad (13)$$

$$V_{out2h} = h_{ext} K \sin 2\omega t \quad (14)$$

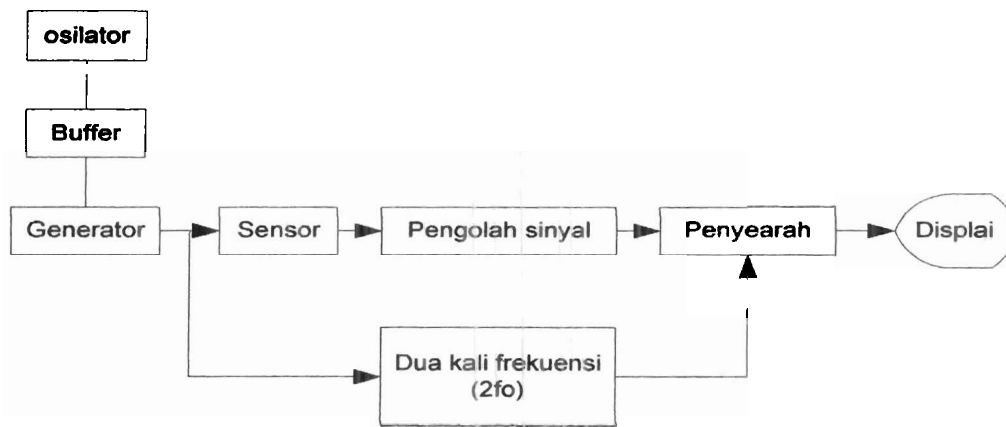
dengan  $K$  adalah tetapan. Terlihat bahwa tegangan keluaran harmonisa ke dua adalah berbanding lurus dengan kuat medan yang diukur (Djamal, M., *et al.*, 2005,2007, Bashiroto, A., *et al.*, 2006).

### III. Metodologi Penelitian

Metoda/rancangan yang akan digunakan dalam penelitian ini berupa eksperimen murni. Untuk pengukuran medan magnetik menggunakan sensor fluxgate berbasis PCBs dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Pembuatan rangkaian analog sebagai rangkaian pengolah sinyal. Blok diagram rangkaian pengolah sinyal ditunjukkan gambar 5.

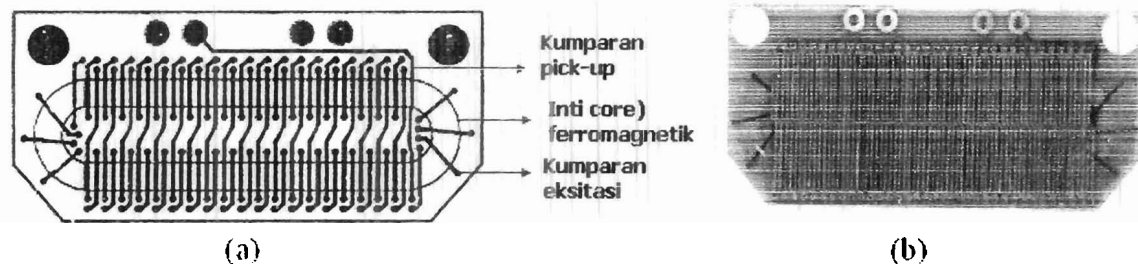




Gambar 5. Skema Diagram Pengolahan Sinyal Sensor

Pengolah sinyal sensor terdiri dari beberapa bagian, yaitu differensiator, detektor, sinkronisasi fasa, integrator, dan penguat akhir.

- Menggunakan elemen sensor seperti ditunjukkan gambar 6. Jumlah lilitan dan nilai hambatan untuk kumparan eksitasi dan pick-up ditunjukkan tabel 1. Elemen sensor ini mempunyai jumlah lilitan pick-up 48 lilitan, sedangkan sebagai inti ferromagnetik digunakan Vitrovac 6025X:0.75 x 0.025 mm (Vacuumschmelze GMBH.6450 Hanau).



Gambar 6. Elemen sensor Fluxgate PCB: Desain elemen sensor (a),

PCB sensor (b) (Janosek, M., 2009)

Tabel 1. jumlah lilitan dan resistance elemen sensor PCB :

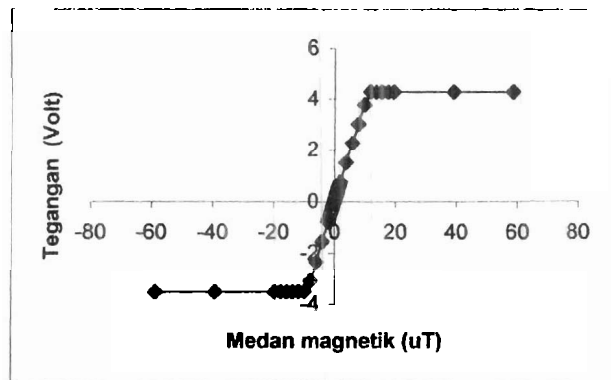
PCB Coil	N (lilitan)	R ( $\Omega$ )
Exc. Coil	46	0,6
Pick-up Coil	68	4.9

- Melakukan pengukuran tegangan keluaran dengan memberikan sumber arus dc
- Menghitung besar medan magnetik yang dihasilkan oleh solenoide sebagai sumber medan magnetik sensor.
- Mencari nilai resolusi sensor, kesalahan mutlak dan relatif dengan pendekatan regresi polinomial.

#### IV. Hasil dan Pembahasan

Untuk mengetahui karakteristik sistem sensor magnetik PCBs dilakukan pengukuran dengan memberikan medan magnet yang berasal dari kumparan kalibrasi

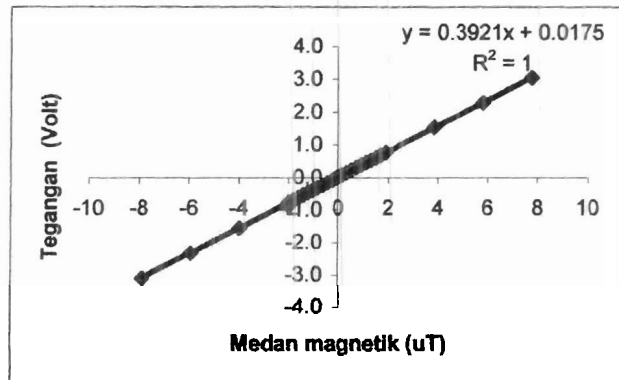
dengan cara memberikan arus pada kumparan kalibrasi. Dari data hasil pengukuran, diperoleh respon tegangan terhadap medan magnetik, seperti pada gambar 7.



Gambar 7. Kurva keluaran sensor PCBs pada daerah ±59μT.

Dari gambar 7 dapat dilihat terdapat bagian kurva yang linier dan konstan, kurva bersifat linier pada medan magnetik ±12 μT, setelah melewati daerah ± 12 μT, kurva tampak konstan, tidak ada perubahan tegangan keluaran ketika arus diperbesar, pada daerah ini inti kumparan sensor telah mengalami saturasi.

Untuk menganalisis daerah linier pada kurva karakteristik keluaran sistem sensor diambil pendekatan linier untuk daerah kerja sensor . Kurva linier sistem sensor PCBs dapat dilihat pada gambar 8, untuk daerah kerja ±8μT.



Gambar 8. Kurva linier sensor PCBs pada daerah kerja ±12μT.

Untuk mengetahui sensitivitas, kesalahan absolut dan kesalahan relatif maka keluaran daerah kerja sensor didekati dengan persamaan linier. Dari gambar 8. terlihat bahwa keluaran sensor dengan pendekatan persamaan linier adalah:

$$y = 0.3921x - 0.0175 \tag{15}$$

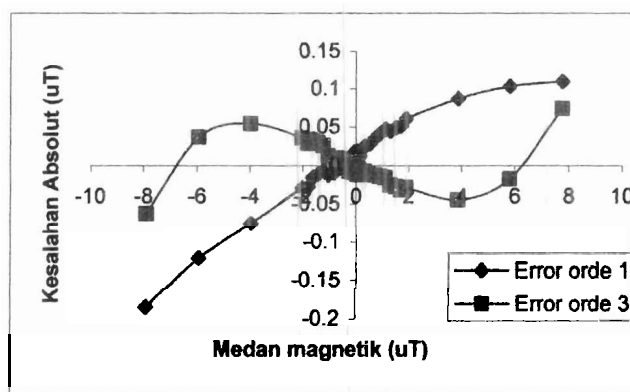
dimana  $y = V_{out}$ , dan  $x =$  medan magnet ( $B$ ), maka persamaan (15) menjadi:

$$V_{out} = y = 0.3921B - 0.0175 \tag{16}$$

Dari gambar 8 tampak bahwa daerah linier keluaran sensor berada dalam daerah  $\pm 8\mu\text{T}$ , tingkat kesalahannya cukup kecil jika dilihat dari harga  $R^2$  sama dengan 1. Persamaan (16) menggambarkan secara umum hubungan antara keluaran sensor dengan medan magnet yang dideteksi oleh sensor. Sensitivitas ( $S$ ) adalah perbedaan rasio dari perubahan sinyal keluaran terhadap perubahan sinyal input. Dimana nilainya dapat diukur :

$$S = \frac{\Delta \text{keluaran}}{\Delta \text{masukan}}, \text{ sehingga dari persamaan (16) diperoleh sensitivitas sensor } 392.1 \text{ mV}/\mu\text{T}.$$

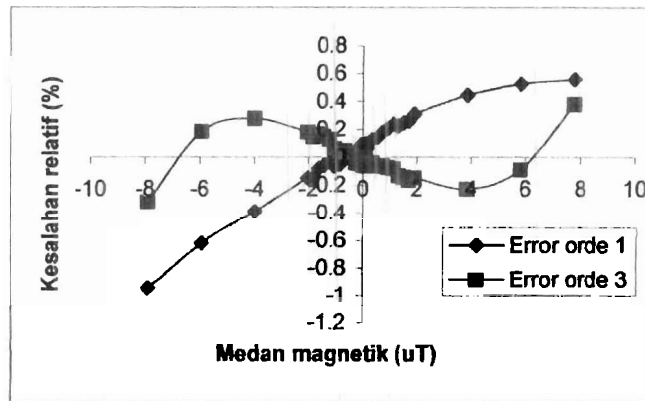
Bila persamaan (16) diaplikasikan terhadap besar medan magnet dan dibandingkan dengan hasil yang terukur maka akan diperoleh kesalahan linieritas dari sistem sensor tersebut. Kesalahan nilai medan magnet yang dihasilkan sensor magnetik dinyatakan oleh selisih nilai medan magnetik keluaran ( $\Delta B$ ). Selisih ini menyatakan selisih antara respon medan magnet keluaran dengan fungsi linier. Respon kesalahan linieritas (kesalahan absolut) medan magnetik keluaran dari sensor magnetik ditunjukkan pada gambar 9 Kesalahan absolut maksimum sensor untuk masing pendekatan persamaan regresi orde 1 dan orde 3 adalah  $0.184$  dan  $0.0751 \mu\text{T}$ .



Gambar 9. Kurva kesalahan absolut sensor PCBs pada daerah kerja  $\pm 8\mu\text{T}$  dengan pendekatan linier.

Untuk merepresentasikan kesalahan fungsi sistem sensor dalam daerah kerjanya, digunakan besaran kesalahan relatif yaitu  $\frac{\Delta \bar{B}}{\bar{B}_{\text{kerja}}}$ , dimana  $\Delta B$  adalah selisih antara

medan magnetik yang diberikan pada kumparan kalibrasi dengan medan magnet keluaran hasil perhitungan dari fungsi linier dan  $B_{\text{kerja}}$  adalah daerah kerja medan magnet yang dihasilkan sistem sensor. Kesalahan relatif dari sistem sensor ditampilkan pada gambar 10. Kesalahan relatif maksimum untuk pendekatan regresi orde 1 dan 3 masing-masing adalah  $0.94\%$  pada medan magnet  $0.38\%$ .



Gambar 10. Kurva kesalahan relatif sensor PCBs pada daerah kerja  $\pm 8\mu\text{T}$  dengan pendekatan linier.

Berdasarkan gambar 9 dan 10, terlihat bahwa kesalahan absolut dan kesalahan relatif cukup kecil. Kesalahan juga dapat diperkecil dengan menggunakan pendekatan persamaan regresi dengan orde lebih tinggi.

## V. Kesimpulan

Dari hasil pengukuran yang diperoleh dari pengujian sensor magnetik fluxgate menggunakan elemen sensor model *printed circuit boards* (pcbs), ternyata didapatkan kurva yang linear sebelum mencapai daerah saturasinya. Pada daerah saturasi keluaran sensor magnetik konstan walaupun medan magnetik diperbesar.

Beberapa hal yang telah berhasil dicapai dengan dalam penelitian ini antara lain :

1. Diperoleh kurva tegangan keluaran yang linear terhadap medan magnetik yang diukur sampai harga medan magnetik  $\pm 8 \mu\text{T}$ , dan untuk medan magnetik lebih besar dari  $\pm 8 \mu\text{T}$  terdapat daerah saturasi.
2. Sensitivitas pada daerah kerja  $\pm 8\mu\text{T}$  untuk elemen sensor model *printed circuit boards* (PCBs) diperoleh  $392.1 \text{ mV}/\mu\text{T}$ . Dengan menggunakan pendekatan linieritas.
3. Kesalahan absolut maksimum sensor untuk masing pendekatan persamaan regresi orde 1 dan orde 3 adalah  $0.184$  dan  $0.0751 \mu\text{T}$ . Kesalahan relatif maksimum untuk pendekatan regresi orde 1 dan 3 masing-masing adalah  $0.94\%$  pada medan magnet  $0.38 \%$ .

## ACKNOWLEDGEMENTS

The author wishes to thank the Indonesian Government, Department of National Education, for its financial support in a form Sandwich Program 2008 and Hibah Bersaing Program No. 080/H35.2/PG/HB/2009. I would like to take this opportunity to express my gratitude to Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc, for his support during my visit in CTU (CVUT, Czech Republic).

## Daftar Pustaka

- B. Ando, A., Ascia, S. Baglio, A.R. Bulsara, J.D. Neff, V. In, 2008: Towards an Optimal Readout of a Residence Times Difference (RTD) Fluxgate Magnetometer, *J. Sensors and Actuators A*, 142, pp. 73-79.
- Belloy, E., S.E. Gilbert, O. Dezuari, M. sancho, M.A.M. Gijs, 2000: A Hybrid Technology for Miniaturised Inductive Device Applications, *J. Sensor and Actuator*, 85, pp 304-309.

- Caruso, M.J, Tamara B., 1998: A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Sensor Magazine, Magnetic Sensor, Tersedia di [www.ssec.honeywell.com](http://www.ssec.honeywell.com). 2007.
- Dezuari, O., Eric Belloy, Scott E., Gilbert, Martin A., M. Gijs, 1999: New Hybrid Technology for Planar Fluxgate Sensor Fabrication, IEEE Transaction on Magnetics, 35, pp. 2111-2117.
- Djamal, M., 2007: Sensor Magnetik Fluxgate dan Aplikasinya untuk Pengukuran Kuat Arus , J. Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, III, pp. 51-69
- Djamal, M., et al., 2005: Desain dan Pembuatan Sensor Medan Magnet Fluxgate Presisi Tiga Dimensi Menggunakan Metoda Posisi Pulsa, Laporan Penelitian Hibah Bersaing XII.
- Fan, J., X.P Li, P. Ripka, 2006: Low Power Orthogonal Sensor with Electroplated Ni80Fe20/Cu Wire. J. of Applied Physics, 99, pp. 08B3111-08B3113
- Göpel, W., et al., 1989: Sensors, A Comprehensive Survey, Magnetic Sensors, VCH Publishers Inc., Suite.
- Grueger, H., Gottfried-Gottfried, R., 2000 “CMOS Integrated Two Axes Magnetic Field Sensors – Miniaturized Low Cost System With Large Temperature Range”, Fraunhofer Institute for Microelectronic Circuits and Systems IMS, pp. 35-38.
- Janosek, M, P. Ripka, 2009: PCB sensors in fluxgate magnetometer with controlled excitation, J. Sensors and Actuator A, 151, pp. 141-144,
- Kubík, J., 2006, PCB fluxgate sensors, Dissertation Thesis, CTU in Prague, pp. 56–58.
- L. Shibin, 2006.: Studi on the low power consumption racetrack fluxgate, J. Sensor and Actuator, 130, pp. 124-128.
- O'Donnell, T., A. Tipek, A. Connel, P. McCloskey, S.C. O'Mathuna, 2006: Planar Fluxgate Sensor Integrated in PCB, J. Sensor and Actuator, 129, pp. 20-24.
- Park, H.S., Jun, S.H., Won Y.C., Dong S.S., Kyoung W.N., Sang O.C., 2004: Development of MicroFluxgate Sensors with Electroplated Magnetic Cores for Electronic Compass, J. Sensor and Actuator, 114, pp 224-229.
- Ripka, P., 2001a: Mangetic Sensor and Magnetometers, Artec House.
- Ripka, P., 2001b: Micro-fluxgate Sensor with Close Core, J. Sensor and Actuator, A 9. pp. 65-69
- SELC, 2008: Penuntun Layanan PCB Purwarupa, SELC Sumber elektronik, Bandung
- Smith, C.H, Robert Scheneider, 1998: A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Sensor Magazine, Magnetic Sensor, Tersedia di [www.nve.com](http://www.nve.com). 2007.
- Tipek, A., P. Ripk, Terence O, J. Kubik, 2004: PCB Technology Used Fluxgate Sensor Construction, J. Sensor and Actuator, 115, pp. 286-292.
- Wang, Y., Gang Liu, Yin X., Jianzhong Y., Yangchao T., 2006: Fabrication of the Three-dimensional Solenoid Type Micra Magnetic Sensor, J. of Physics: Conference Series 34, pp 880-884.
- Zorlu, O., P. Kejik, R.S. Popovic, 2007: An Orthogonal Fluxgate-type Magnetic Microsensor with Electroplated Permalloy Core, J. Sensor and Actuator, 135, pp. 43-49
- Zorlu, O, 2008: Orthogonal Fluxgate Type Mangetic Microsensors With Wide Linier Operation range, Disertation, Ellectrical and electronic engineering, Midle East University, Turki.

# Sensor Magnetik Fluxgate Menggunakan Kumputan Pick-up Ganda

*Hufri, Yulkifli*

*Kelompok Kajian Fisika Instrumentasi  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Negeri Padang*

*Hufri\_unp@yahoo.com*

## **ABSTRACT**

*The output voltage of fluxgate sensor depend on pick-up coil. Magnetic field in the pick-up coil will be zero while no external magnetic field, moreover if external magnetic field exist so that exchange of magnetic field will take place in the pick-up coil. The paper explains fluxgate magnetic sensor using double pick-up coil. The sensor element is built with configurations of 40x2x2 turns for excitation coil and 2x20 turns of double pick-up coils. Based on the measurement of sensor output was received by the sensor's sensitivity and resolution that was good that is 101.8 mV/ $\mu$ T, 25 nT, respectively. The maximum relative error of the sensor system in this approach was 0.13%.*

**Keywords :** *sensor fluxgate, double pick-up, resolution, sensitivity*

## **PENDAHULUAN**

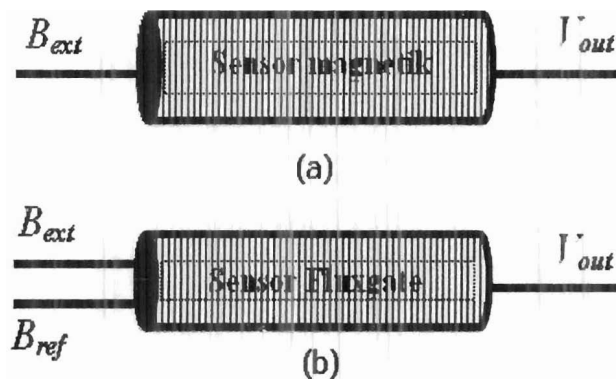
Beberapa sensor magnetik yang sering digunakan adalah sensor Efek Hall, Sensor Magnetoresistif dan Fluxgate. Berdasarkan efek Hall, medan magnet **B** yang datang tegak lurus dengan penampang bahan yang dialiri arus listrik akan menimbulkan polarisasi muatan, yang akhirnya menimbulkan tegangan Hall  $V_H = h_i B \sin \alpha$ . Dengan  $h$  suatu tetapan dan  $\alpha$  sudut yang dibentuk antara **B** dengan penampang bahan (W. Goepel, 1989). Kelemahan dari sensor magnetik efek Hall adalah sensitivitasnya yang rendah, offset tegangan yang cukup tinggi dan pengaruh temperatur yang cukup besar. Prinsip kerja sensor magnetik magnetoresistif adalah perubahan resistansi bahan akibat pengaruh medan magnet luar. Kelemahan sensor magnetik model ini adalah adanya pengaruh efek histeresis, berubahnya sensitivitas sensor terhadap kenaikan medan magnet **H**, sedangkan pada metoda fluxage, Pengukuran kuat medan magnet didasarkan pada hubungan antara kuat medan magnet **H** yang diberikan dengan fluks medan magnet induksi **B** yang timbul, dalam hubungan  $B = mH$ , dengan  $m$  adalah permeabilitas bahan. Sensor magnetik dengan prinsip fluxgate mempunyai sensitivitas yang sangat tinggi, sehingga banyak digunakan untuk mengukur kuat medan magnet yang lemah (Kawahito, dkk., 1996, M. Djamal, dkk. 2007).

Penggunaan sensor magnetik seperti untuk penelitian bahan-bahan magnetik, *geophysics*, ruang angkasa, sistem navigasi (mendeteksi barang bawaan transportasi), pemetaan medan magnet bumi, kompas elektronik (Kaluzza, F., dkk., 2003), penentuan

posisi benda atau sensor jarak dalam orde kecil (Yulkifli, dkk., 2007), pengukuran arus (M. Djamil 2000), medan magnetik lemah (M. Djamil, dkk., 2007). Untuk pengontrolan dan pengukuran yang sensitif terhadap lingkungan dibutuhkan sebuah sensor magnetik dengan resolusi dan sensitivitas yang tinggi. Salah sensor yang memiliki peluang untuk itu adalah sensor fluxgate (P. Ripka 2001, M. Djamil, dkk. 2006).

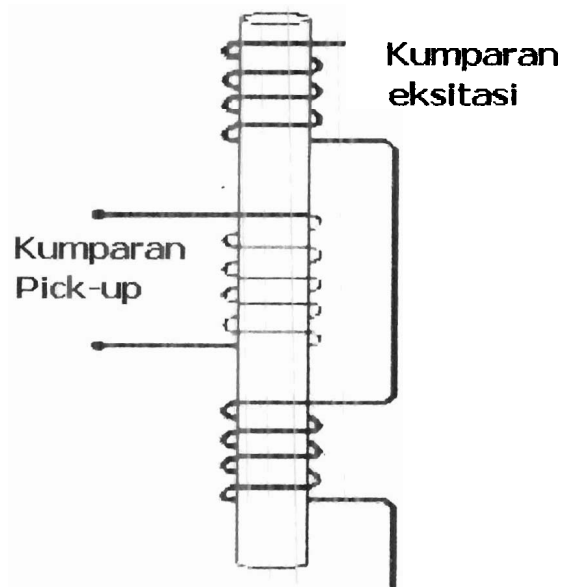
Resolusi dan sensitifitas sensor fluxgate ditentukan oleh beberapa faktor antara lain geometri elemen sensor, sifat material bahan ferromagnetik yang digunakan sebagai inti dan rangkaian elektronik yang digunakan sebagai pengolah sinyal analog keluaran sensor fluxgate. Hubungan inti ferromagnetik dengan keluaran sensor telah di publikasikan oleh Li, X.P., 2006 dan Yulkifli, 2007. Dalam makalah ini akan dijelaskan pengaruh geometri elemen sensor fluxgate yang berkaitan dengan kumparan sekunder ganda (double pick-up) terhadap sensitivitas dan resolusi sensor fluxgate.

Metode pengukuran medan magnetik ada dua macam, yaitu: 1) metode pengukuran langsung, metoda ini sangat mempunyai noises yang sangat besar (W. Gopel, 1989, P. Ripka 2001, M.Djamil, dkk. 2002). 2) metode pengukuran tidak langsung, metode ini menggunakan medan magnetik pembanding sebagai referensi sehingga pengaruh lingkungan dapat dikurangi, metode inilah yang dipakai dalam sistem pengukuran perubahan medan magnetik eksternal oleh sensor fluxgate. Kedua metode pengukuran ini ditunjukkan dalam gambar 1.



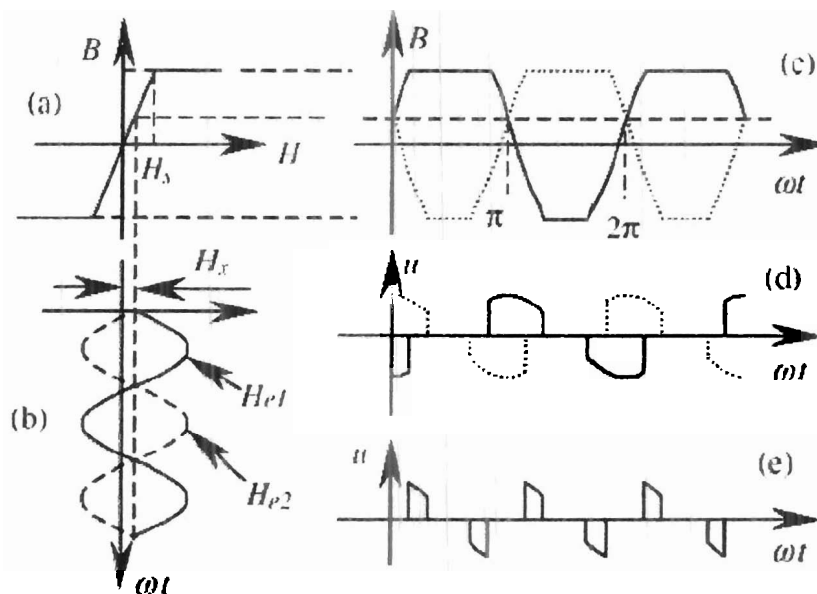
Gambar. 1 Prinsip pengukuran medan magnet: a) dengan cara langsung; b) menggunakan medan magnet referensi  $B_{ref}$  sebagai pembanding terhadap medan magnet yang diukur  $B_{ext}$ .

Sensor magnetik fluxgate dibuat berdasarkan karakteristik inti ferromagnetik yang linier. Dalam bentuk yang sederhana, sensor magnetik fluxgate terdiri dari dua kumparan, yaitu kumparan primer (*excitation coil*) dan kumparan sekunder (*pick-up coil*), seperti ditunjukkan Gambar 2.



Gambar. 2 Bentuk sederhana sensor magnetik fluxgate (B. Ando, 2006).

Prinsip fungsional sensor fluxgate dalam mendeteksi perubahan magnetik eksternal terlihat dalam gambar 3.



Gambar 3. Bentuk sinyal keluaran sensor fluxgate( S. Liu, 2006).

Inti sensor yang terbuat dari bahan ferromagnetik memiliki sifat material yang dapat tersaturasi(a), Inti sensor dibawa ke dalam daerah saturasi secara periodik oleh medan eksitasi sinusiodal, medan ini merupakan medan refrensi ( $B_{ref}$ ), yang dihasilkan oleh arus sinusiodal yang mengalir ke dalam kumparan eksitasi, ketika medan magnetik luar sama dengan nol, maka medan magnetik yang timbul oleh kumparan eksitasi akan simetris (b), saat kondisi ini tidak ada laju perubahan fluk magetik yang tertangkap oleh



kumparan pick-up sehingga selisih tegangannya menjadi nol. Sedangkan ketika ada medan magnetik luar yang sejajar terhadap inti, induksi di dalam inti menyebabkan fungsi terangkat dari proyeksi pada kurva magnetisasi, akibatnya sinyal tidak lagi simetris setelah diproyeksikan terhadap sumbu B (c), saat kondisi ini kumparan pick-up menangkap laju perubahan fluk magnetik (d), sehingga menyebabkan ada selisih tegangan pada kedua kumparan pick-up (e).

Selisih tegangan keluaran ini dianalisa dengan menggunakan prinsip harmonisa kedua melalui pendekatan polinomial dan fungsi transfer.

### ***Fungsi transfer***

Asumsikan inti adalah tipe linier, maka inti akan disaturasi oleh medan magnetisasi awal sinusoidal:

$$H_{ref} = H_{ref\ max} \sin \omega t \quad (5)$$

yang akan disuperposisikan dengan medan magnet luar  $H_{ext}$ . Medan magnet dalam inti akan menjadi

$$H_{int} = \frac{H_{ext} + H_{ref\ max} \sin \omega t}{1 + N(\mu_r - 1)} \quad (6)$$

dimana N adalah faktor magnetisasi untuk inti linier:

$$N = \frac{bc}{a^2} \left[ \ln \left( \frac{4a}{b+c} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

Untuk menghitung rapat fluks dalam inti, menormalisasikan kuat medan magnet dalam inti menjadi  $H_0^*$ , yang diberikan

$$H_0^* = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{B_{sat} [1 + N(\mu_m - 1)]}{\mu_m \mu_0} \quad (8)$$

Sehingga kuat medan magnet dalam ini menjadi

$$h_{int} = \frac{H_{int}}{H_0^*} = h_{ext} + h_{ref\ max} \sin \omega t \quad (9)$$

Kurva magnetisasi akan diaproksimasi dengan pendekatan polinomial ternormalisasi orde 3:

$$b(h) = a_1 h - a_3 h^3 \quad (10)$$

dimana b adalah rapat fluks ternormalisasi:

$$b = B/B_0 \quad (11)$$

dengan

$$B_0 = 2B_{sat}/\pi \quad (12)$$

Pendekatan ini digunakan baik untuk pencabangan positif maupun negatif dari kurva magnetisasi.

Rapat fluks ternormalisasi menjadi

$$b = a_1 h_{ext} + a_1 h_{ref \max} \sin \omega t - a_3 (h_{ext} + h_{ref \max} \sin \omega t)^3 \quad (13)$$

atau

$$b = a_1 h_{ext} - a_3 h_{ext}^3 - \frac{3}{2} a_3 h_{ext} \cdot h_{ref \max}^2 + \left( a_1 h_{ref \max} - 3 a_3 h_{ext}^2 h_{ref \max} - \frac{3}{4} a_3 h_{ref \max}^3 \right) \sin \omega t - \frac{3}{2} a_3 h_{ext} h_{ref \max}^2 \cos 2\omega t + \frac{3}{4} a_3 h_{ref \max}^3 \sin 3\omega t \quad (14)$$

Dapat dilihat bahwa komponen harmonik kedua sesuai dengan kuat medan magnet luar. Tegangan keluaran kumparan sekunder sesuai dengan diferensiasi rapat fluks dalam inti terhadap waktu, yaitu:

$$U_{out} = -N \frac{d\phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} \quad (15)$$

dimana  $N$  : jumlah lilitan kumparan sekunder dan  $A$  adalah penampang hamburan dari inti. Tegangan keluaran kumparan sekunder dapat digantikan dengan tegangan keluaran ternormalisasi:

$$u_{out} = -\frac{U_{out}}{NA} = \frac{dB}{dt} = B_0 \cdot \frac{db}{dt} \quad (16)$$

dan menjadi

$$b = B_0 \omega \left( a_1 h_{ref \max} - 3 a_3 h_{ext}^2 h_{ref \max} \right) \cos \omega t + 3 B_0 \omega a_3 h_{ext} h_{ref \max}^2 \sin 2\omega t + \frac{3}{4} B_0 \omega a_3 h_{ref \max}^3 \cos 3\omega t \quad (17)$$

Komponen tegangan keluaran harmonik kedua dari kumparan sekunder adalah

$$U_{out} = -3 B_0 N A \omega a_3 h_{ext} h_{ref \max}^2 \sin 2\omega t \quad (18)$$

atau

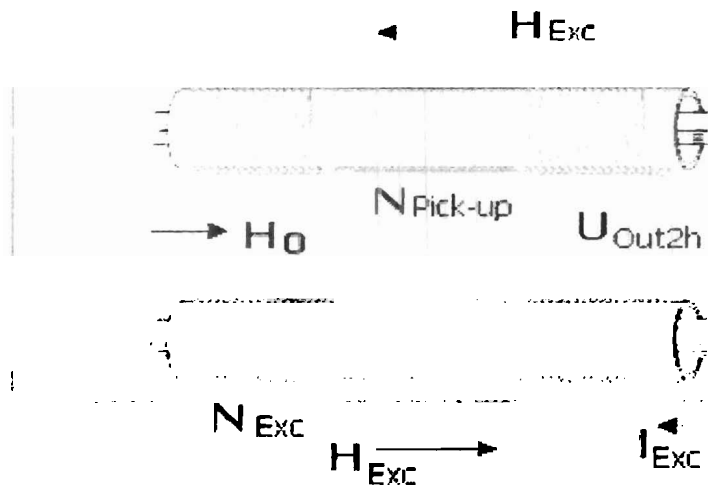
$$U_{out} = h_{ext} K h_{ref \max}^2 \sin 2\omega t \quad (19)$$

sebagai aproksimasi linier dimana K adalah sebuah konstanta yang meliputi faktor magnetisasi, nilai puncak arus magnetisasi awal, bentuk inti, koefisien polinomial  $a_3$ , dan rapat fluks saturasi ini. Komponen tegangan keluaran harmonisa kedua dari kumparan sekunder sesuai dengan medan magnet luar yang diukur dan frekuensi arus magnetisasi awal.

## METODE PENELITIAN

Metoda/rancangan yang akan digunakan dalam penelitian ini berupa eksperimen murni. Untuk melihat pengaruh kumparan skunder ganda terhadap resolusi sensor magnetik fluxgate dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Mendesain elemen sensor fluxgate menggunakan kumparan double pick-up 2x20 lilitan, sedangkan kumparan eksitasi 2x40 lilitan menggunakan kawat email berdiameter 0.09 mm dan inti ferromagnetik sebanyak 4 lapis, Vitrovac 6025X:0.75 x 0.025 mm (Vacuumschmelze GMBH.6450 Hanau), desain elemen sensor ditunjukkan gambar 4.



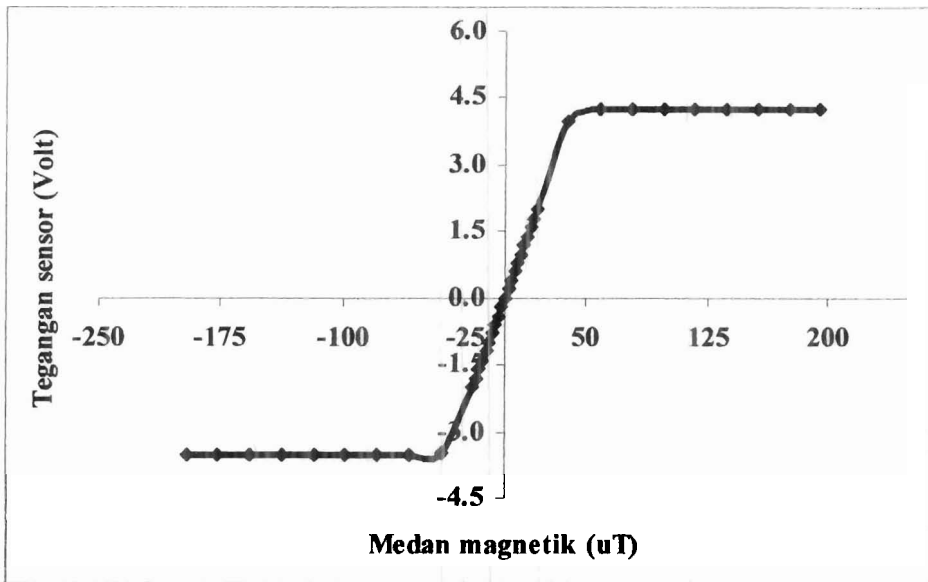
Gambar 4. Desain elemen sensor kumparan sekunder ganda

2. Melakukan pengukuran tegangan keluaran dengan memberikan sumber arus dc
3. Menghitung besar medan magnetik yang dihasilkan oleh solenoide sebagai sumber medan magnetik sensor.
4. Mencari nilai resolusi sensor, kesalahan mutlak dan relatif dengan pendekatan regresi polinomial.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

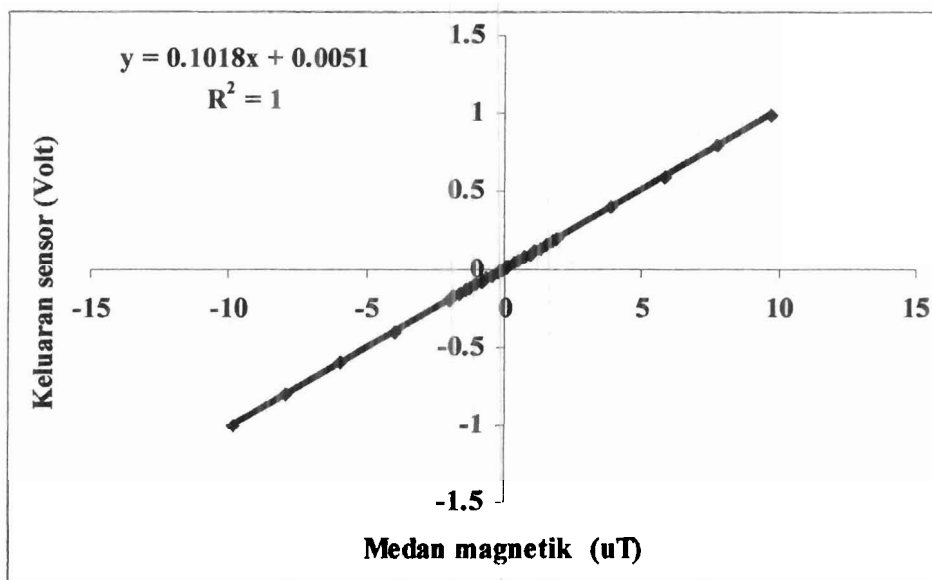
Berdasarkan pengukuran dalam rentangan sumber medan magnetik  $\pm 200 \mu\text{T}$  diperoleh tegangan keluaran sensor seperti ditunjukkan gambar 5. Terlihat daerah

saturasi pengukuran berada pada orde puluhan. Daerah saturasi ini merupakan batas daerah pengukuran medan magnetik yang dapat terukur oleh sensor.



Gambar 5. Respon tegangan keluaran sensor untuk daerah  $\pm 200 \mu\text{T}$ .

Untuk mencari daerah kerja sensor dilakukan pemotongan pada daerah tertentu, hasilnya ditunjukkan oleh gambar 6.



Gambar 6. Daerah linier pengukuran sensor untuk daerah  $\pm 10 \mu\text{T}$ .

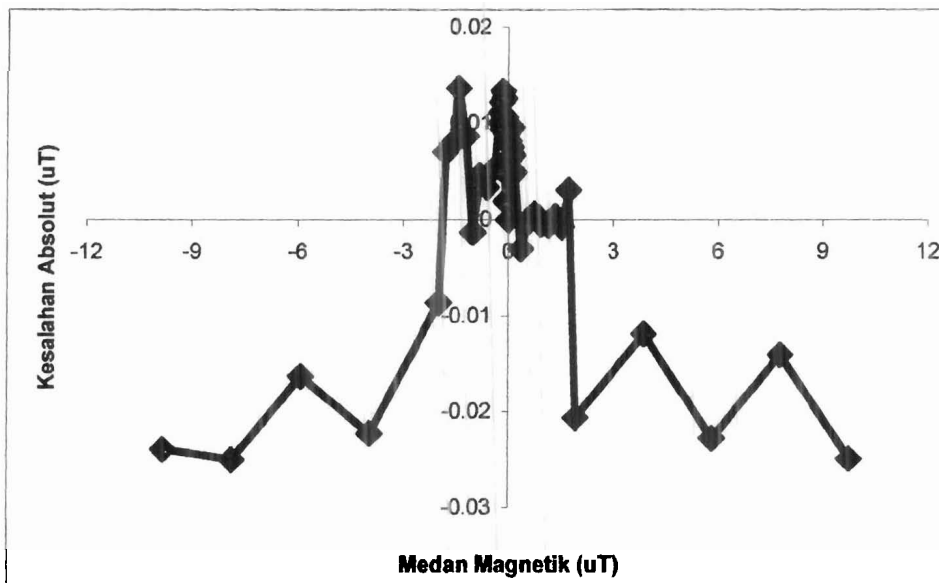
Berdasarkan gambar 6 terlihat bahwa keluaran sistem sensor sangat linier, hal ini terlihat dari nilai  $R^2 = 1$ . Selain itu grafik juga menunjukkan bahwa medan magnetik eksternal yang terukur sebanding dengan tegangan keluaran sensor, hal ini sesuai dengan persamaan (19).

Sensitivitas sensor diperoleh berdasarkan kemiringan grafik daerah linier tegangan keluaran sensor yang ditunjukkan oleh persamaan regresi linier;

$$V_{out} = 0.1018B + 0.0051, \quad (20)$$

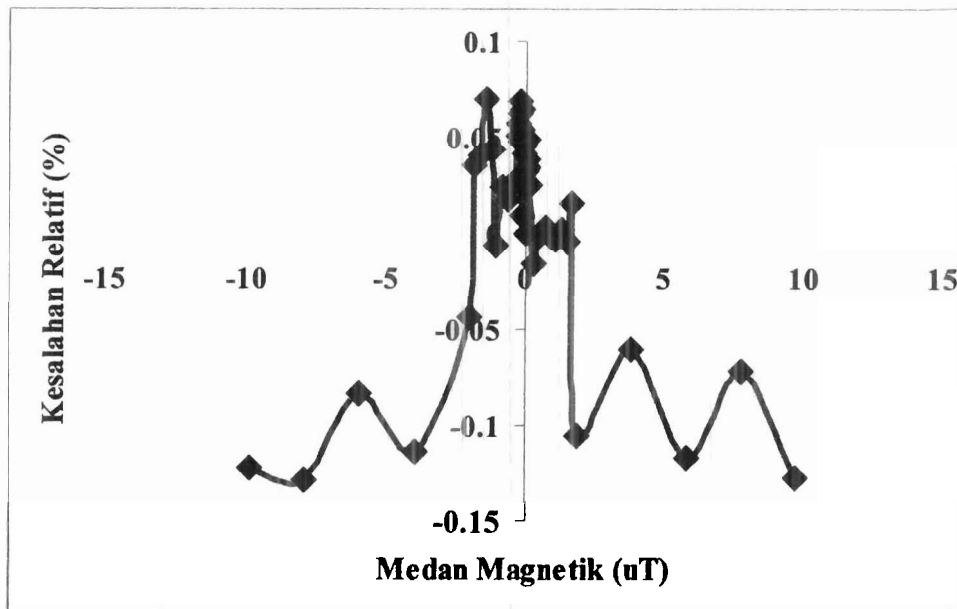
Dimana  $B$  dalam  $\mu\text{T}$  dan  $V_{out}$  dalam  $\text{mV}$ , berdasarkan persamaan (20) diperoleh sensitivitas sensor  $101,8 \text{ mV}/\mu\text{T}$ , artinya tiap  $1 \text{ }\mu\text{T}$  sensor dapat mengukur perubahan tegangan sensor  $101,8 \text{ mV}$ .

Resolusi sensor dihitung menggunakan kesalahan absolut seperti ditunjukkan gambar 7.



Gambar 6. Kesalahan absolut keluaran sensor

Terlihat kesalahan maksimum absolut sekitar  $25 \text{ nT}$ , Kesalahan absolut ini mewakili resolusi dari sensor. Kesalahan relatif pengukuran ditunjukkan oleh gambar 7.



Gambar 7. Kesalahan relatif keluaran sensor .

Kesalahan relatif keluaran sensor diperoleh 0.13% terjadi pada medan magnetik sebesar  $-7.872 \mu\text{T}$ . Kesalahan yang diperoleh sangat kecil sehingga dapat dikatakan sensor ini mempunyai karakteristik tegangan keluaran yang sangat bagus.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Telah berhasil didesain elemen sensor fluxgate dengan kumparan double pick-up.
2. Berdasarkan pengukuran diperoleh sensitivitas sensor  $101.8 \text{ mv/uT}$  dan resolusi  $25 \text{ nT}$
3. Berdasarkan pendekatan persamaan linier orde satu diperoleh kesalahan relatif maksimum 0.13% terjadi pada  $-7,782 \mu\text{T}$ .

Untuk peningkatan sensitivitas sensor dapat dilakukan penambahan rangkaian penguat diakhir rangkaian analog, sedangkan untuk meningkatkan resolusi sensor tambahkan rangkain tapis lolos rendah (LPF) sehingga frekuensi yang berasal dari lingkungan seperti frekuensi gelombang elektromagnetik dapat di kurangi.

### Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai dari dana Hibah Bersaing DIKTI No: 080/H35.2/PG/HB/2009.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ando, B., S. Baglio, V. Caruso, V. Sacco, A. Balsara: 2006: Multilayer Based Technology to Build RTD Fluxgate Magnetometer, *J. Sensor & Transducer Magazine, (S&T e-Digest)*, **65** pp. 509-514.
- Kaluza, F., Angelika Gruger, Heinrich Gruger, 2003: New and Future Applications of Fluxgate, *J. Sensors, Sensor and Actuator*, **106**, pp. 48-51.
- Kawahito, S., Y. Tadakoro, 1996: High-Performance Micro Fluxgate Magnetics Sensors, *International Conference on Microelectronics ICME*, H.R., P. 85-89., 16-17 Januari Bandung, Indonesia
- Li, X.P., J. Fan, J., Ding, X.B. Qian, 2006: Multi-core Orthogonal Fluxgate Sensor, *J. Magnetism and Magnetic Material*, **300**, pp. 98-103
- M. Djamal., 2002: Pembuatan dan Pengembangan Sensor Medan Magnet Fluxgate, *Laporan Penelitian Hibah Bersaing IX*.
- M. Djamal, R. N. Setiadi, 2006: Pengukuran Medan Magnet Lemah Menggunakan Sensor Magnetik Fluxgate dengan Satu Koil Pick-Up, *Jurnal Proceedings ITB*.
- M. Djamal, Rahmondia, N., S., 2007: Sensor Magnetik Fluxgate dan Aplikasinya untuk Pengukuran Kuat Arus, *J. Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, **III**, pp. 51-69
- P. Ripka, 2001: *Magnetic Sensor and Magnetometers*, Artec House.
- S. Liu, 2006: Study on the low power consumption of racetrack fluxgate, *Sensors and Actuators A* **130-131**. pp. 124-128.
- W. Göpel, 1989: *Sensors, A Comprehensive Survey, Magnetic Sensors*, VCH Publishers Inc., Suite.
- Yulkifli, Rahmondia Nanda S., Suyatno, Mitra Djamal: 2007a: Designing and Making of Fluxgate Sensor with Multi-Core Structure for Measuring of Proximity, *Procd. On CSSI 2007*, Serpong Tangerang- Indonesia
- Yulkifli, M. Djamal, Rahmondia, N., S., Khairurrijal, Deddy Kurniady, 2007b, The Influence of Ferromagnetic core, Pick-up Coil Winding Number and Environmental Temperature to the Output Signal of a Fluxgate Magnetic Sensor, *Indonesian Journal of Physics* Vol. **18** No. 3, (2007).

### **Identitas Penulis:**

**Drs. Hufri., M.Si**, Lahir di Ampang Padang, 13 April 1966. Menyelesaikan sarjana pendidikan (S1) di Pendidikan Fisika FPMIPA IKIP Padang tahun 1992, dan Magister Sciences (S2) di Fisika FMIPA UGM Yogyakarta tahun 1998, Staf pengajar Jurusan Fisika UNP.

**Yulkifli, S.Pd., M.Si**, Lahir di Kotosani 2 Juli 1973. Menyelesaikan sarjana pendidikan (S1) di Pendidikan Fisika FPMIPA IKIP Padang tahun 1997, dan Magister Sciences (S2) di Fisika Instrumentasi FMIPA ITB tahun 2002, Staf pengajar Jurusan Fisika UNP dari tahun 2003- sekarang. Semenjak 2006 sampai tulisan ini dibuat, penulis sedang mengikuti pendidikan S3 di Fisika instrumentasi ITB dalam konsentrasi sensor magnetik.