

Desain Sensor Getaran Frekuensi Rendah Berbasis *Fluxgate*

¹Yulkifli , ¹Hufri, ²Mitra Djamal, ³Rahmondia Nanda Setiadi

¹KK Fisika Instrumentasi, Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Padang

Jl. Prof Dr. Hamka Kampus UNP Air tawar Padang 25131, Telp. (0751)51260

²KK FTETI, Prodi Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesa No. 10 Bandung

³KK Fisika Instrumentasi, FMIPA, Universitas Riau

Jl. HR Subrantas km 12,5 Pekanbaru, Riau 28293 – Indonesia

E-mail: yulkifliamir@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.

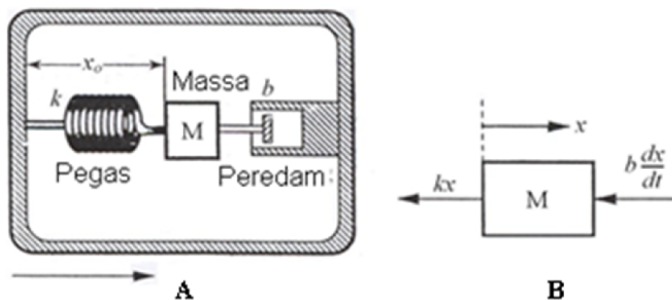
Alat ukur getaran frekuensi rendah saat ini sangat dibutuhkan, seperti deteksi getaran bendungan, jembatan, bangunan dan gempa. Berdasarkan pengembangan *fluxgate* dan aplikasi, *fluxgate* mampu mengukur perubahan medan magnet dan jarak dalam orde yang sangat kecil [4-7]. Selain itu kami juga telah berhasil 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 $\varpi_o = \sqrt{k/M}$ dan $2\xi\varpi_o = b/M$, persamaan (5) dapat ditulis :

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

Nilai ϖ_o mempresentasikan frekuensi anguler alami percepatan dan ξ koefisien normalisasi redaman. Misalkan $G(s) = \frac{-1}{s^2 + 2\xi\varpi_o s + \varpi_o^2}$, 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 beresilasi 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 fluk magnetik (Φ). 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:

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

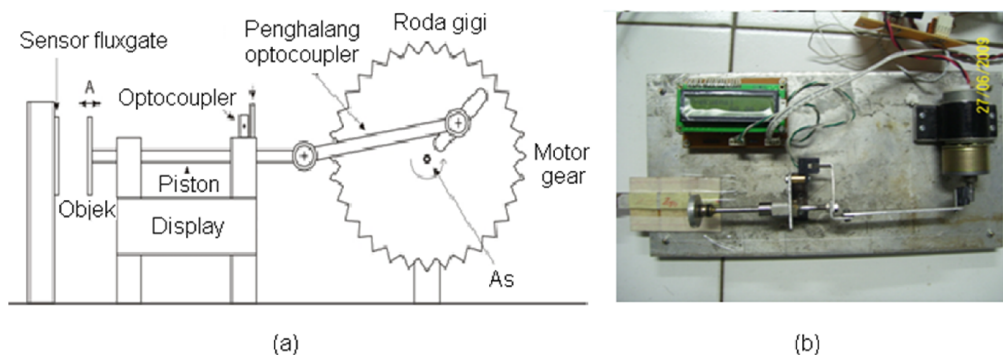
Jika medan magnetik material adalah B, maka medan magnetik yang dideteksi oleh sensor pada jarak r adalah:

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

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.



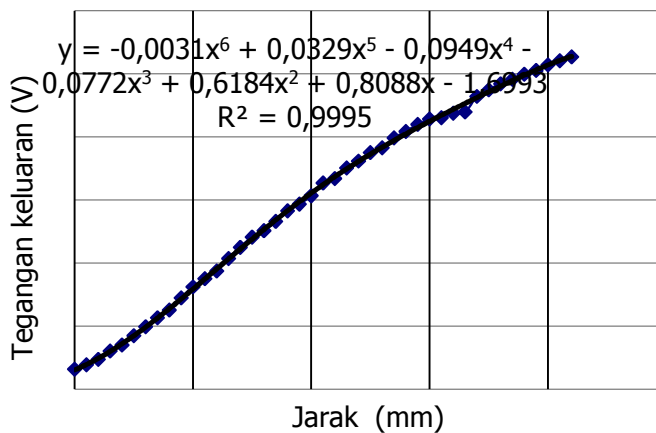
Gambar 3. Desain sistem mekanik (a) dan foto peralatan pengukuran frekuensi rendah (b). [20]

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.

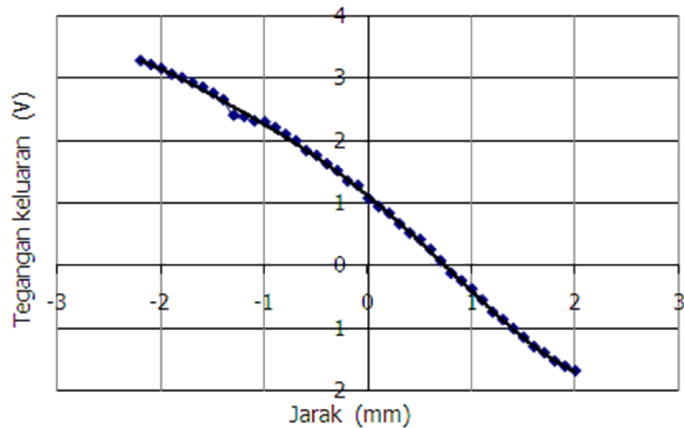


Gambar 4. Grafik optimasi jarak objek dengan *fluxgate*.

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

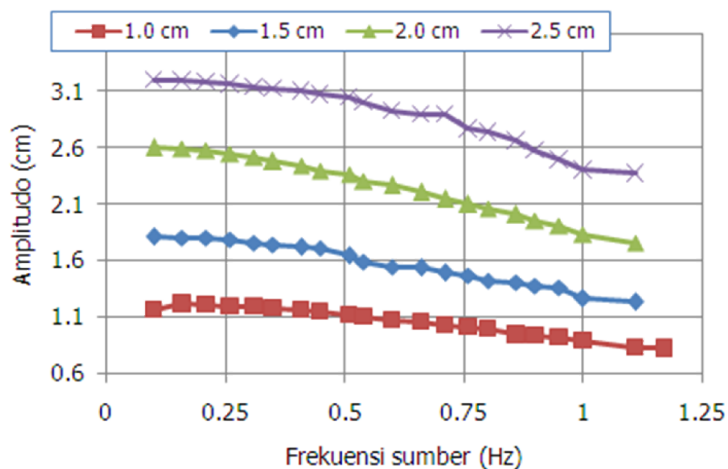
$$V_{out} = -0,003x^6 + 0,004x^5 + 0,047x^4 + 0,018x^3 - 0,237x^2 - 1,353x + 1,109 \quad (13)$$

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



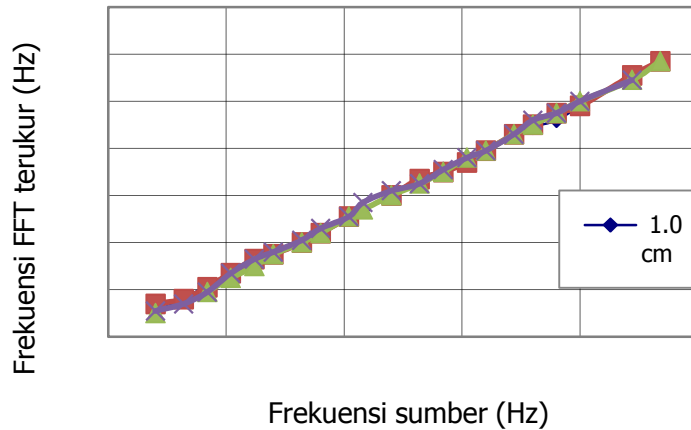
Gambar 5. Grafik untuk mendapatkan simpangan nol.

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.

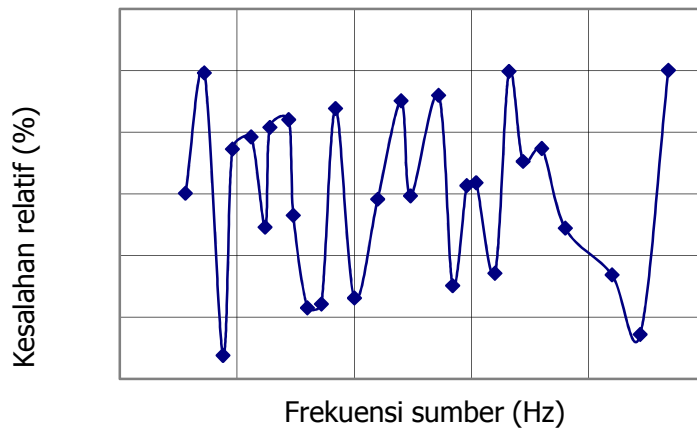
Berdasarkan Gambar 6 dapat terlihat bahwa jika lengan digeser menjauhi sumbu roda motor maka semakin dekat objek bergetar ke *fluxgate*, hal ini terlihat dengan membesarnya amplitudo terukur ketika sumbu penggetar mendekati *fluxgate*. Sedangkan terhadap kenaikan frekuensi keseluruhan variasi simpangan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



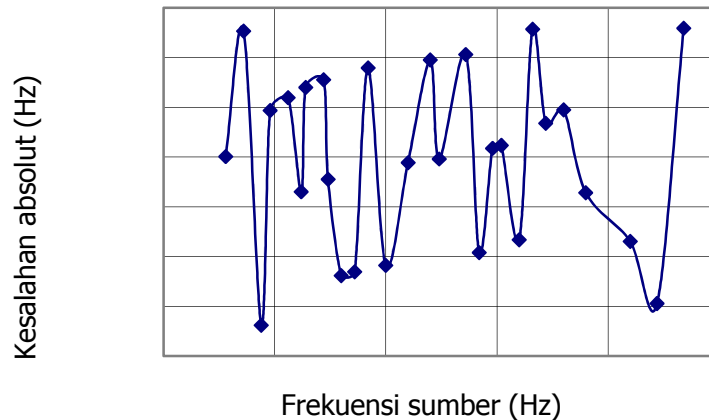
Gambar 7. Respon frekuensi terukur terhadap frekuensi sumber.

Terlihat dari Gambar 7, bahwa hubungannya linier untuk semua variasi simpangan. Hal 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 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.

6 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/KO1.12.2/KU/2010 dan Riset PRI ITB 2010.

7 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] Djamal, 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] Djamal, 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 4th 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.