

Kelayakan Akselerometer MEMS Sebagai *Velocitymeter*

Rinda S. Ariyani^{1)*}, Didik R. Santoso²⁾, Ahmad Nadhir²⁾

¹⁾ Program Studi Magister Ilmu Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Brawijaya, Malang

²⁾ Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Malang

Diterima 29 Januari 2015, direvisi 27 Maret 2015

ABSTRAK

Pengukuran getaran bisa dilakukan dengan menggunakan beberapa parameter pengukur seperti perpindahan, kecepatan dan percepatan. Sensor yang digunakan untuk pengukuran ini pun bermacam-macam seperti akselerometer dan *velocitymeter*. Hubungan matematis antara besaran percepatan dan kecepatan memungkinkan akselerometer dimodifikasi agar bisa digunakan sebagai *velocitymeter*. Akselerometer MEMS tipe MMA7361L yang diintegrasikan dengan rangkaian filter band pass dan integrator telah dibuat untuk mengukur getaran dan menghasilkan sinyal berupa kecepatan karena proses integrasi. Secara desain, sistem peralatan ini bisa bekerja dengan baik untuk mengukur sinyal frekuensi rendah. Akan tetapi, secara teknik ada beberapa kekurangan. Sistem peralatan ini bisa mengukur sinyal dengan frekuensi 0,86 Hz – 2,99 Hz dengan karakteristik sinyal yang kurang dari 1 volt dan menghasilkan sinyal keluaran yang terpotong pada daerah ayunan negatif. Pemilihan komponen yang memiliki kualitas yang lebih baik sangat disarankan agar mendapatkan sinyal keluaran yang bagus dan bisa terbaca pada sistem akuisisi data. Sinyal keluaran piranti yang berupa kecepatan masih belum bisa dinyatakan sebagai nilai kecepatan pengukuran getaran. Akan tetapi dengan kalibrasi dan perhitungan tertentu nilai kecepatan bisa diperoleh sehingga sistem peralatan berbasis MEMS ini selanjutnya bisa dinyatakan layak sebagai *velocitymeter*.

Kata kunci : akselerator MEMS, integrator, pengukuran getaran

ABSTRACT

Vibration can be measured by measuring each of several parameter, for example displacement, velocity and acceleration. There are many sensor that can be used in this measurement. Velocitymeter and accelerometer are the examples of vibration sensors. Accelerometer, generally use to measure acceleration, can be modified to measure velocity of vibration as the velocitymeter done. Accelerometer MEMS MMA7361L with the signal conditioning circuits, that is band pass filter and integrator, had been designed and assembled to measure the velocity of vibration. Velocity signal is produced in this circuit because of the integration process from integrator circuit. In design application, this circuits have a good performance in low frequency measurement like the velocitymeter done. But in practical, there are some deficiencies. This circuits can measure 0,86 Hz – 2,99 Hz frequency of low amplitude signal. The signal that is measured is about 1 volt below. Signal also have some distortion in negative swing. Hence, other new component for this real design is very needed to upgrade the performance of circuit in producing a good and non distortion signal for recording and displaying system easily. The output signal of circuit is velocity signal but it is still cannot be said to be the true measuring data. By adding calibration and the right formula, the magnitude of velocity can be gained, so that this circuit can be said to be feasible as velocitymeter.

Keywords : accelerometer MEMS, integrator, vibration measurement

PENDAHULUAN

Getaran merupakan pergerakan osilasi dari sebuah objek [1]. Dalam pengukuran getaran ada beberapa parameter yang bisa digunakan

*Corresponding author:

E-mail: rsariyani@gmail.com

untuk mengetahui karakteristik suatu getaran. Parameter tersebut yaitu perpindahan, kecepatan dan percepatan [2].

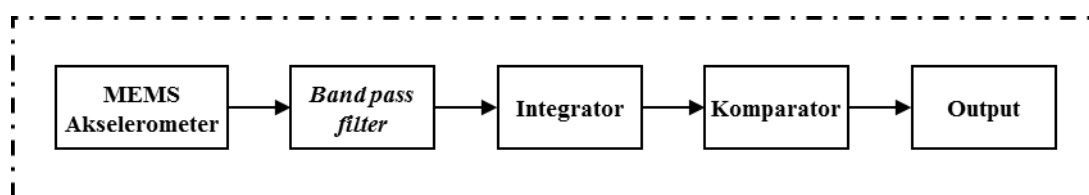
Pengukuran getaran frekuensi rendah (0 -10 Hz) biasanya menggunakan parameter posisi dan perpindahan karena memiliki tingkat akurasi yang baik. Pada aplikasi frekuensi menengah yaitu kurang dari 1 kHz pengukuran kecepatan bisa diandalkan dan dalam pengukuran getaran frekuensi tinggi pengukuran parameter percepatan lebih disukai [3].

Akselerometer MEMS sebagai salah satu pengukur getaran yang menggunakan parameter percepatan memiliki desain yang sederhana, ringan dan memiliki keterbatasan kurang bisa diandalkan pada pengukuran getaran frekuensi rendah. Di sisi lain *geophone* sebagai sensor kecepatan telah banyak digunakan dalam bidang geofisika. Akan tetapi *geophone* memiliki ukuran yang lebih besar dari akselerometer sehingga kurang praktis jika digunakan dalam pengambilan data seismik [4]. Keterbatasan pengukuran masing-masing parameter merupakan tantangan dalam pengembangan teknologi pengukur getaran. Di sisi lain, apabila sinyal masukan getaran berupa sinyal sinusoidal maka parameter-parameter pengukur getaran tersebut bisa terhubung secara matematis yaitu operasi integral atau differensial [2].

Akselerometer dan *velocitymeter* merupakan dua buah sensor yang memiliki perbedaan baik secara dimensi dan spesifikasi. Oleh karena itu, pembuatan desain instrumentasi pengukur getaran dengan menggunakan akselerometer yang tepat merupakan permasalahan yang perlu diselesaikan agar mendapatkan jangkauan frekuensi yang lebih rendah dan bisa meminimalis gangguan.

METODE PENELITIAN

Prosedur perancangan alat. Sistem pengukur getaran dengan menggunakan akselerometer MEMS dibuat sedemikian rupa agar bisa menjangkau frekuensi yang lebih rendah sehingga bisa masuk dalam jangkauan frekuensi kerja *velocitymeter*. Sistem pengukuran frekuensi rendah berbasis akselerometer MEMS membutuhkan spesifikasi seperti memiliki sensitivitas yang tinggi, menggunakan akselerometer yang tanggap terhadap DC, serta menggunakan filter yang bisa digunakan untuk menapis sinyal dengan frekuensi tinggi [5]. Untuk mencapai tujuan ini, akselerometer MEMS dirangkai dengan rangkaian pengondisi sinyal filter *band pass*, integrator dan komparator. Gambar 1 merupakan diagram blok perancangan alat.



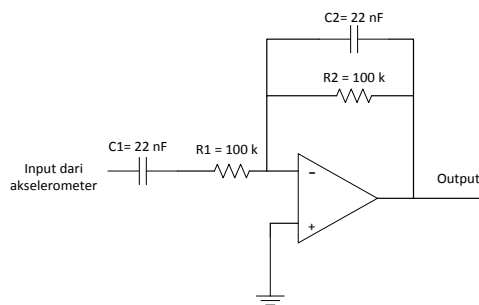
Gambar 1. Diagram blok perancangan alat

Akselerometer MEMS yang digunakan dalam penelitian ini adalah MMA7361L karena merupakan akselerometer untuk mendeteksi percepatan rendah. Dalam pengukuran sensitivitas dari akselerometer dipilih sebesar 1,5 g. Akselerometer ini memiliki keluaran sebanyak tiga sumbu X, Y dan Z. Keluaran-keluaran ini memiliki nilai *offset* DC yang besarnya tergantung dari sumbu mana yang digunakan dalam pengukuran [6]. Akselerometer MEMS dibangun dari dua komponen utama yaitu bagian yang sensitif terhadap gaya yang dikenakan padanya serta rangkaian terintegrasi yang mengubah sinyal

mekanik menjadi sinyal elektrik [7].

Filter *band pass* merupakan filter yang melewatkan sinyal dengan frekuensi antara frekuensi batas bawah dan frekuensi batas atas [8]. Filter ini digunakan untuk menghilangkan offset DC keluaran akselerometer dan juga untuk menapis sinyal dengan frekuensi tinggi. Gambar 2 merupakan rangkaian filter *band pass* yang digunakan. Kapasitor C1 dan R1 digunakan sebagai penapis frekuensi tinggi dan C2, R2 digunakan sebagai penapis frekuensi rendah (DC). Filter ini memiliki dua frekuensi *cutoff* yaitu sebesar 72,38 Hz dan 0,072 Hz. Penguatan dari rangkaian filter ini adalah

sebesar satu kali.

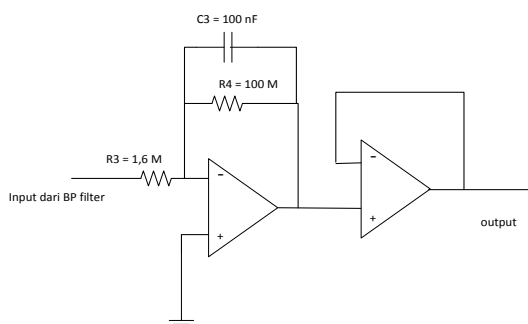


Gambar 2. Rangkaian filter *band pass*

Rangkaian integrator yang digunakan dalam rangkaian ini adalah rangkaian integrator AC (Gambar 3). Rangkaian integrator ini menggunakan penguat operasional dimana idealnya memiliki penguatan *loop* terbuka dan impedansi masukan yang tak terhingga. Penguat operasional ini juga harus memiliki tegangan *offset* nol dan arus *offset* nol [9]. Secara matematis penguatan tegangan AC integrator ini dirumuskan sebagai berikut :

$$A = \left| -\frac{R_4}{R_3} \times \frac{1}{(1 + 2\pi f C R_4)} \right| \quad (1)$$

dimana f merupakan frekuensi sinyal masukan. Berdasarkan persamaan tersebut maka besar penguatan dipengaruhi oleh frekuensi dari sinyal masukan.



Gambar 3. Rangkaian integrator AC

Rangkaian integrator pada Gambar 3 juga merupakan rangkaian ekuivalen untuk integrator frekuensi rendah. Kesalahan yang ditimbulkan oleh integrator frekuensi rendah berbanding terbalik dengan penguatan tegangan *loop* terbuka [9]. Modul pengondisi sinyal ini diperuntukkan agar sinyal keluaran dari modul bisa dibaca oleh modul akuisisi data dan kontrol. Oleh karena itu, keluaran dari rangkaian integrator dihubungkan ke rangkaian

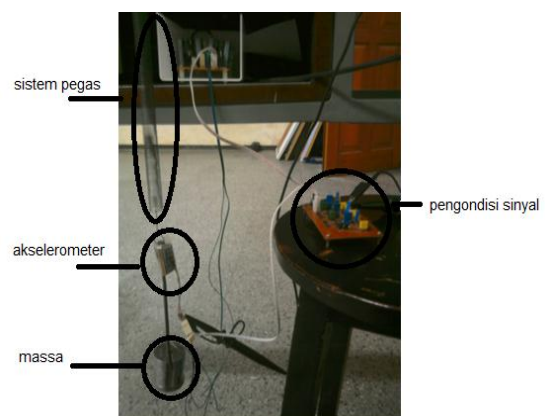
komparator agar pusat ayunan sinyal tidak berada pada nol Volt sehingga tidak ada sinyal yang berayun pada daerah negatif.

Metode pengujian alat. Pengujian masing-masing rangkaian penyusun modul pengukur getaran ini dilakukan secara parsial terlebih dahulu untuk mengetahui karakteristik sinyal keluaran dari rangkaian. Setelah itu pengujian alat ukur getaran dilakukan secara keseluruhan dengan cara mengukur getaran sebuah objek.

Pengukuran getaran dilakukan dengan menggunakan sistem pegas bermassa. Besar massa yang digantungkan pada pegas divariasikan agar memperoleh frekuensi getaran yang berbeda-beda. Tabel 1 menunjukkan hubungan antara massa yang digantungkan pegas dengan frekuensi dan periode getaran yang dihasilkan. Besar frekuensi getaran yang didapatkan pada Tabel 1 merupakan frekuensi getaran pegas yang sudah terangkai dengan alat pengukur getaran.

Tabel 1. Besar frekuensi dan periode getaran pegas berdasarkan besar massa yang digantungkan.

Massa (gram)	Frekuensi (Hz)	Periode (s)
200	1,55	0,64
300	1,36	0,74
400	1,15	0,87
500	1,05	0,96
600	0,88	1,13
700	0,86	1,16

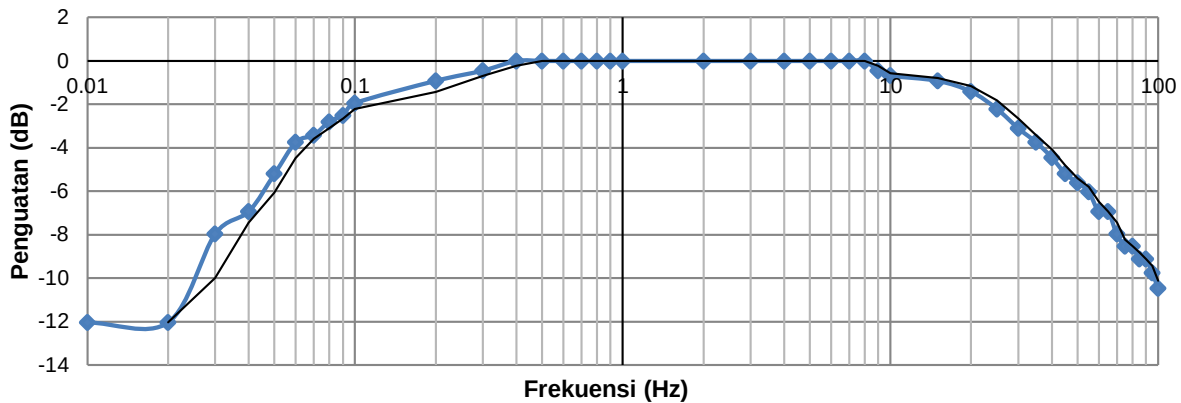


Gambar 4. Rangkaian sistem pegas dan alat pengukur getaran.

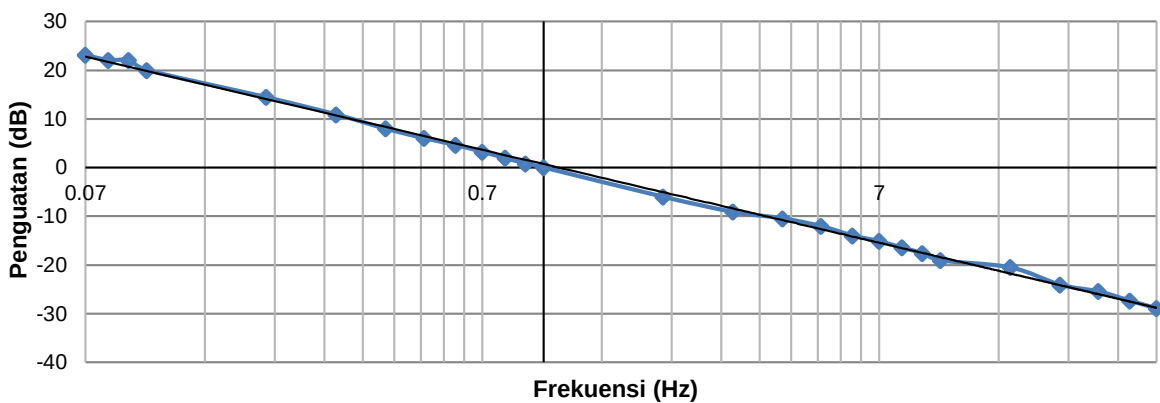
Gambar 4 menunjukkan rangkaian alat pengukur pada pengukuran dilakukan. Akselerometer ditempelkan pada pegas dengan

sinyal keluaran dihubungkan dengan sumbu Y. Akselerometer dipasang sedemikian rupa sehingga akselerometer tidak mengalami

guncangan pada saat pengukuran. Pengukuran dan pengujian modul pengukur getaran ini dilakukan dengan bantuan osiloskop.



Gambar 5. Diagram bode keluaran rangkaian filter band pass



Gambar 6. Diagram bode rangkaian integrator

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian alat. Ada beberapa hal yang bisa dianalisa untuk mengetahui kinerja dari sebuah rangkaian. Diantaranya melihat bentuk sinyal, penguatan, besar frekuensi dan ada tidaknya pergeseran fasanya. Karakteristik sinyal hasil keluaran filter ditunjukkan pada diagram bode Gambar 5

Diagram bode dari keluaran filter menunjukkan bahwa penguatan sebesar satu kali dialami oleh sinyal masukan dengan frekuensi 0,3 Hz hingga 8 Hz. Daerah kerja filter band pass ini adalah dari frekuensi 0,07 Hz hingga 35 Hz. Frekuensi batas bawah filter hasil pengujian ini sesuai dengan hasil simulasi dan perhitungan akan tetapi frekuensi batas atasnya tidak sesuai. Seharusnya nilai frekuensi cut-off ini adalah sebesar 70 Hz. Roll-off dari rangkaian filter band pass ini seolah-olah mengalami penurunan

sehingga makin tajam dan terjadi pergeseran frekuensi cut-off.

Rangkaian integrator bertujuan sebagai pengintegrasi sinyal keluaran filter yang masih berupa percepatan menjadi sinyal kecepatan. Karakteristik dari rangkaian ini ditunjukkan pada Gambar 6. Diagram pada gambar 6 menunjukkan bahwa penguatan dari rangkaian integrator dipengaruhi oleh frekuensi dari sinyal masukan.

Pelemahan sinyal keuaran terjadi pada frekuensi di atas 1 Hz. Pada frekuensi 35 Hz pelemahan berkisar 28 dB atau sekitar 0,03 kali. Jika grafik ini dilanjutkan, maka untuk frekuensi 50 Hz akan memiliki pelemahan yang lebih besar. Hal ini berarti bahwa rangkaian integrator melemahkan sinyal dengan frekuensi tinggi. Di sisi lain, sinyal di bawah 1 Hz mengalami penguatan. Sinyal dengan frekuensi semakin rendah akan mengalami penguatan yang semakin besar. Sehingga rangkaian

integrator ini membuat sistem peralatan bagus digunakan untuk mendeteksi sinyal dengan frekuensi yang rendah.

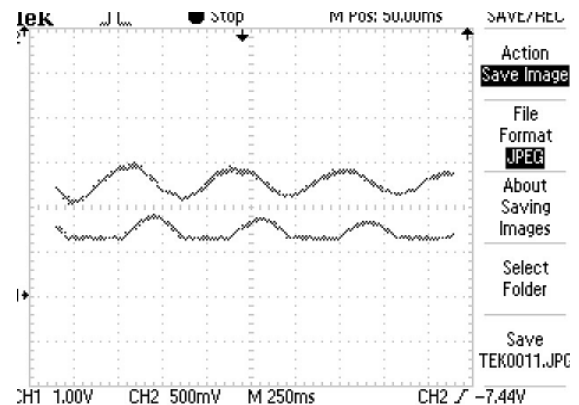
Sinyal masukan mengalami pergeseran fasa 180° pada rangkaian filter *band pass* karena sinyal masukan diberikan ke masukan pembalik. Setelah itu sinyal ini kembali melalui masukan pembalik pada rangkaian integrator sehingga sinyal ini mengalami pergeseran total 360° atau sinyal ini kembali ke keadaan semula. Akibat dari proses matematis integral dari integrator sinyal keluaran dari integrator mengalami pergeseran fasa sebesar 90° . Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pergeseran rata-rata dari sinyal keluaran sebesar $88,98^\circ$.

Pengukuran getaran. Sistem pegas bermassa yang digunakan sebagai sumber getaran pada penelitian ini bisa menghasilkan frekuensi getaran dari 0,86 Hz hingga 2,99 Hz. Nilai ini merepresentasikan daerah frekuensi rendah. Sebagai contoh sinyal masukan dan keluaran dari pengukuran getaran pegas ini ditunjukkan pada Gambar 7. Sinyal ini memiliki frekuensi 1,55 Hz. Sinyal masukan berada di atas dan sinyal keluaran berada di bawah.

Sinyal keluaran yang ditunjukkan oleh Gambar 7 menunjukkan bahwa modul pengondisi sinyal telah bekerja dengan baik akan tetapi kurang optimal. Sinyal telah mengalami pergeseran fasa sebesar $83,077^\circ$. Secara lengkap besarnya pergeseran fasa dapat dilihat pada Tabel 2. Rata-rata dari pergeseran fasa ini adalah sebesar $85,80^\circ$. Besar periode dan frekuensi getaran antara sinyal masukan dan keluaran hampir sama. Nilai periode antara sinyal masukan dan keluaran bisa dilihat pada Tabel 3. Selain itu, besar penguatan yang diperoleh dari hasil pengukuran juga ditunjukkan oleh Tabel 3. Dari tabel tersebut bisa diketahui bahwa sinyal dengan frekuensi di bawah 1 Hz mengalami penguatan lebih dari 1 kali dan sinyal dengan frekuensi lebih dari 1 Hz mengalami penguatan kurang dari 1 kali. Penguatan yang didapatkan pada tabel ini berlaku untuk sinyal masukan walaupun sinyal mengalami peredaman. Peredaman dari sinyal masukan ini dikarenakan efek pembebanan pada pegas pada saat pengambilan data. Hal ini menyebabkan amplitudo getaran semakin lama semakin kecil.

Sinyal keluaran juga mengalami distorsi atau pemotongan pada daerah ayunan negatif.

Pemotongan ini bisa dikarenakan beberapa hal seperti proses discharge kapasitor terbaca sebagai sinyal DC bukan AC yang mengayun pada daerah negatif. Selain itu juga bisa karena terhubung singkatnya satu daya negatif dari penguat operasional ke *ground* sehingga daerah dibawah nol Volt terpotong.



Gambar 7. Sinyal pengukuran getaran pada frekuensi sumber 1,55 Hz.

Tabel 2. Beda fasa sinyal hasil pengukuran pada frekuensi tertentu.

f (Hz)	T (div)	t (div)	Beda fasa ($^\circ$)
2,99	1,20	0,30	90,00
1,55	2,60	0,60	83,08
1,36	2,90	0,70	86,90
1,15	3,50	0,80	82,29
1,05	3,90	1,00	92,31
0,88	4,40	1,00	81,82
0,86	4,70	1,10	84,26

Tabel 3. Besar sinyal dan penguatan hasil pengukuran getaran.

f (Hz)	t (s)	Input		Output		Gain (kali)
		V (volt)	t (s)	V (volt)	t (s)	
2,99	0,33	0,50	0,30	0,20	0,30	0,40
1,55	0,64	0,45	0,65	0,30	0,65	0,67
1,36	0,74	0,30	0,72	0,15	0,72	0,50
1,15	0,87	0,18	0,88	0,10	0,88	0,57
1,05	0,96	0,20	0,98	0,20	0,98	1,00
0,88	1,13	0,20	1,10	0,25	1,10	1,25
0,86	1,16	0,13	1,15	0,20	1,18	1,50

KESIMPULAN

Pengukur getaran berbasis akselerometer MEMS telah dibuat dan berhasil menghasilkan

sinyal keluaran berupa kecepatan. Sinyal mengalami pergeseran fasa rata-rata sebesar 85,80°. Piranti ini juga bisa digunakan untuk mengukur getaran frekuensi rendah yaitu sekitar 0,86 Hz hingga 2,99 Hz. Akan tetapi sinyal keluaran mengalami distorsi pada daerah ayunan negatif. Penurunan performa dari *hardware* piranti ini dikarenakan penggunaan tipe penguat operasional yang kurang optimal jika digunakan untuk mengukur sinyal frekuensi rendah. Selain itu, sinyal kecepatan yang dihasilkan masih belum bisa dinyatakan sebagai hasil pengukuran getaran yang valid. Akan tetapi dengan penambahan kalibrasi dan perhitungan khusus sinyal kecepatan ini bisa diperoleh. Sehingga sistem pengukuran getaran ini masih bisa dinyatakan layak sebagai *velocitymeter*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Boyes, W., (2010). *Instrumentation References Book edisi 4*, Elsevier Inc, New York. USA.
- [2] Bruel and Kjaer (1982), *Measuring Vibrations*. DK-2850 Nærum, Denmark.
- [3] Fraden, J. (2010). *Handbook of Modern Sensor: Physics, Design and Applications Fourth Edition*, Springer, New York
- [4] Mougnot, D. (2014). *How Digital Sensor compare to Geophone?*. Sercel, Perancis.
- [5] Sethuramalingam, T.K. & Juliet, A.V. (2009). Measuring Low Frequency Vibration using MEMS Based Accelerometer. *International Conference on MEMS NANO*, 5: 162-165
- [6] Freescale Semiconductors, Inc. (2008). $\pm 1.5g$, $\pm 6g$ Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer Technical Data. Document Number MMA7361L, Rev 0, 04/2008.
- [7] Muset, B & Emerich, S (2012). Distance Measuring Using Accelerometer and Gyroscope Sensor, *J. Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering*, 5: 83 – 86.
- [8] Dorf, RC. & Wan, Z. (2000). *The Electrical Engineering Handbook*. CRC Press LLC.
- [9] Stata, Ray (1967), Operasional Integrator, *J. Analog Device*, 1: 1 – 8.