

**FUNGSIONALISASI MEMS ACCELEROMETER SEBAGAI  
SENSOR SEISMIK**

**TESIS**



Oleh  
**AMALIA CEMARA NUR' AIDHA**  
NIM. 156090300011004

**PROGRAM STUDI S2 FISIKA  
MINAT FISIKA INSTRUMENTASI**

**PROGRAM PASCASARJANA FAKULTAS MIPA  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG  
2018**



**FUNGSIONALISASI MEMS ACCELEROMETER SEBAGAI  
SENSOR SEISMIK**

**TESIS**

**Untuk Memenuhi Persyaratan  
Memperoleh Gelar Magister**



Oleh  
**AMALIA CEMARA NUR' AIDHA**  
NIM. 156090300011004

**PROGRAM STUDI S2 FISIKA  
MINAT FISIKA INSTRUMENTASI**

**PROGRAM PASCASARJANA FAKULTAS MIPA  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG  
2018**





**TESIS**

**FUNGSIONALISASI MEMS ACCELEROMETER SEBAGAI  
SENSOR SEISMIK**

Oleh:

**AMALIA CEMARA NUR' AIDHA**

**156090300011004**

Telah dipertahankan di depan penguji

Pada tanggal 25 Juli 2018

dan dinyatakan LULUS

Menyetujui,

Komisi Pembimbing

Ketua

Anggota

Dr. Eng. Didik R. Santoso, M.Si

NIP. 196906101994021001

Sukir Maryanto, Ph.D.

NIP. 197106211998021001

Mengetahui

Ketua Program Studi S2 Fisika

Mauludi Ariesto Pamungkas, Ph.D

NIP. 197304122000031013

**IDENTITAS TIM PENGUJI**

**JUDUL TESIS:**

**FUNGSIONALISASI MEMS ACCELEROMETER SEBAGAI SENSOR SEISMIK**

Nama Mahasiswa : Amalia Cemara Nur'aidha

NIM : 156090300011004

Program Studi : S2 Fisika

Minat : Instrumentasi

**KOMISI PEMBIMBING**

Ketua : Dr. Eng. Didik R. Santoso, M.Si

Anggota : Sukir Maryanto, Ph.D

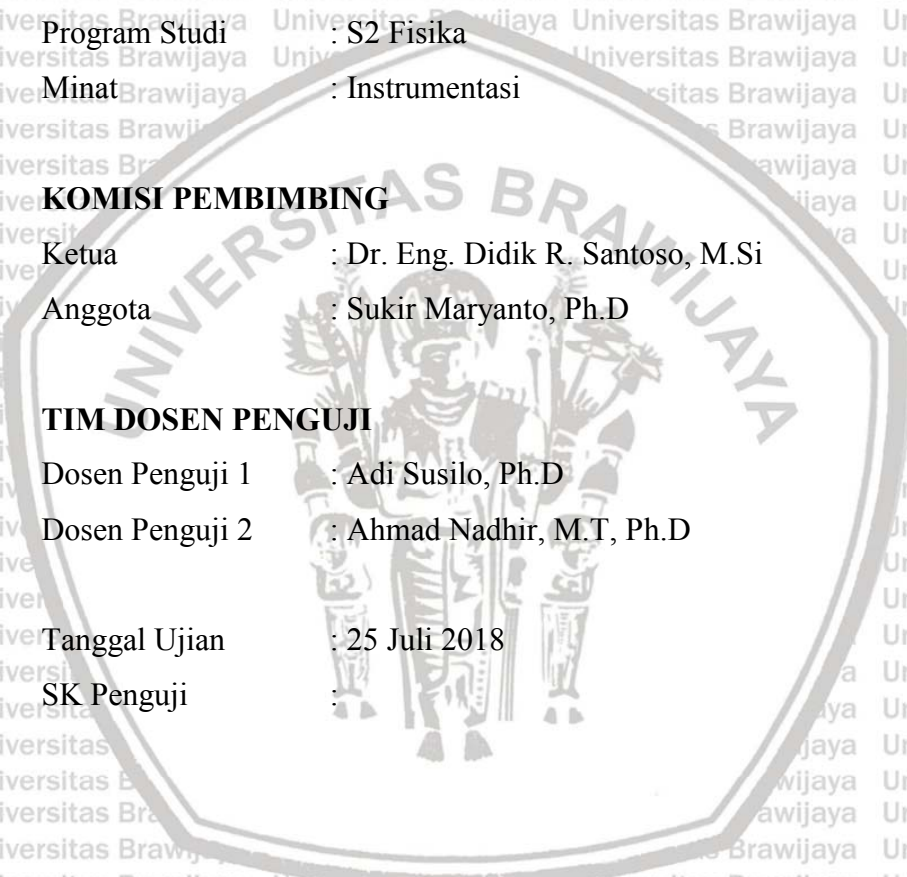
**TIM DOSEN PENGUJI**

Dosen Penguji 1 : Adi Susilo, Ph.D

Dosen Penguji 2 : Ahmad Nadhir, M.T, Ph.D

Tanggal Ujian : 25 Juli 2018

SK Penguji :



**PERNYATAAN ORISINALITAS**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan (plagiat) tesis, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

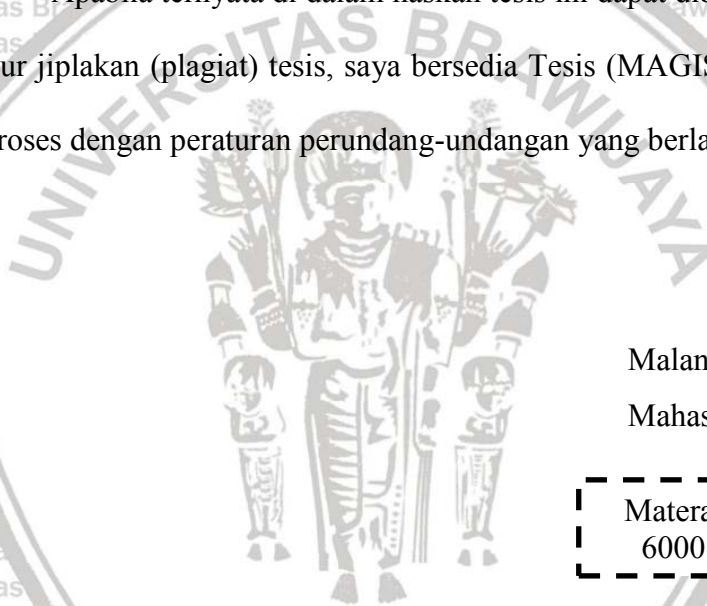
Malang, 30 Juli 2018

Mahasiswa

Materai  
6000

Amalia Cemara Nur'aidha

NIM. 156090300011004



**RIWAYAT HIDUP PENULIS**

Penulis bernama lengkap Amalia Cemara Nur'aidha lahir di Kediri pada 12 Juni 1993. Penulisan mengawali jenjang pendidikan akademik di TK Dharma Wanita dsn. Bendo, Pare-Kediri pada tahun 1997. Pada tahun 1999 penulis melanjutkan pendidikan di SDN Bendo 2 Pare-Kediri (sekarang SDN Bendo 1) hingga tahun 2000, kemudian melanjutkan di SDN Balearjosari 1 Malang hingga tahun 2002, setelah itu dilanjutkan di SDN Tunjungsekar 1 Malang hingga tahun 2005. Selanjutnya, penulis menyelesaikan pendidikan di SMPN 11 Malang pada tahun 2008, kemudian dilanjutkan ke SMAN 5 Malang hingga 2011. Penulis melanjutkan pendidikan S1 di Universitas Brawijaya Malang pada jurusan Fisika dengan program studi Instrumentasi pada tahun 2011 dan lulus pada tahun 2015. Pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan S2 pada program studi Ilmu Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya Malang.

Malang, 30 Juli 2018

Mahasiswa

Amalia Cemara Nur'aidha

NIM. 156090300011004

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Didik R. Santoso, M.Si selaku dosen pembimbing I atas waktu dan bimbingan serta motivasi yang telah diberikan selama pengerjaan tesis ini.
2. Bapak Sukir Maryanto, Ph.D selaku dosen pembimbing II atas waktu dan bimbingan yang telah diberikan selama pengerjaan tesis ini.
3. Bapak Mauludi A. Pamungkas, Ph.D selaku Ketua Program Studi S2 Fisika, Program Pascasarjana FMIPA Universitas Brawijaya.
4. Bapak Adi Susilo, Ph.D dan Bapak Dr. Eng. Ahmad Nadhir selaku dosen penguji atas saran yang telah diberikan.
5. Bapak, Ibu, Adik yang selalu memberikan dukungan semangat selama ini.
6. Bapak dan Ibu dosen jurusan Fisika Universitas Brawijaya yang telah memberikan ilmunya.
7. Teman-teman magister Fisika angkatan 2015 genap atas kebersamaannya selama ini.
8. Teman-teman Laboratorium MCS Universitas Brawijaya atas bantuan selama penelitian.
9. Kepala Agrotechnopark Cangar Universitas Brawijaya atas ijin yang telah diberikan selama pengambilan data.
10. Semua pihak yang telah banyak membantu secara langsung maupun tidak langsung selama penelitian.

Malang, 30 Juli 2018

Mahasiswa

Amalia Cemara Nur'aidha

NIM. 156090300011004



## ACKNOWLEDGEMENT

Penelitian Tesis ini dibiayai oleh Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jendral Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi sesuai dengan Kontrak Penelitian atas nama Dr. Eng Didik R. Santoso, M.Si., dkk. dengan Nomor: 054/SP2H/LT/DRPM/2018, tanggal 12 Maret 2018. Serta penelitian hibah INSINAS atas nama Sukir Maryanto, Ph.D., dkk. dengan Nomor: 338.171/UN10.C10/PN/2018.





# FUNGSIONALISASI MEMS ACCELEROMETER SEBAGAI SENSOR SEISMIK

## ABSTRAK

Sensor getaran merupakan komponen penting dalam bidang seismologi, seperti pemantauan bencana alam dan eksplorasi sumber daya alam. Saat ini sensor getaran yang sering digunakan adalah sensor Geofon berbasis elektromagnetik.

Namun sensor tersebut memiliki beberapa kelemahan yaitu, memiliki ukuran yang besar, harga yang cukup mahal serta terdapat kesulitan dalam proses perawatan.

Berdasarkan kelemahan tersebut saat ini muncul teknologi alternatif dalam pengembangan sensor getaran yaitu, sensor MEMS *Accelerometer* yang bekerja berdasarkan prinsip kapasitansi. MEMS memiliki beberapa kelebihan sebagai sensor getaran, yaitu berbentuk chip IC dengan ukuran yang sangat kecil, memiliki sensitivitas  $800\text{mV/g}@1.5\text{g}$ , dan memiliki tiga komponen kerja (x, y, dan z). Pada penelitian ini telah dikembangkan sensor MEMS *Accelerometer* tipe MMA7361L sebagai sensor seismik berbasis percepatan dan kecepatan. Untuk pengembangan sensor MEMS sebagai kecepatan diperlukan modifikasi menggunakan rangkaian integrator untuk merubah sinyal percepatan menjadi sinyal kecepatan. Berdasarkan hasil penelitian MEMS percepatan dapat merespon getaran yang memiliki frekuensi tinggi serta amplitudo yang tinggi pula dengan frekuensi diatas 30Hz. Sedangkan untuk MEMS kecepatan *cut-off* rendah mampu merespon getaran dengan frekuensi dibawah 1Hz.

**Kata kunci:** MEMS *Accelerometer*, Integrator, Seismik

# FUNCTIONALIZATION OF MEMS ACCELEROMETER FOR SEISMIC SENSOR

## ABSTRACT

A vibration (seismic) sensor is an important component in the part of seismology, such as monitoring of natural disaster and exploration of natural resources. Currently, the most commonly used vibration sensor is electromagnetic-based geophone sensor. However, geophone sensors have some disadvantages, that is has a large size, expensive, and difficult repair. Based on geophone weaknesses there are alternative technologies for vibration sensors i.e MEMS Accelerometer. MEMS has some advantages as a vibration sensor, which has a small size (IC Chip), have a sensitivity of  $800\text{mV} / \text{g}@1.5\text{g}$ , and it has three working component (x,y, and z). This research developed seismic sensor using MEMS Accelerometer (based on acceleration and velocity). To develop MEMS velocity requires modification of the circuit using an integrator to change acceleration signal to be velocity signal. Based on the result of research MEMS velocity is used to respond low frequencies below 1Hz while, MEMS acceleration to respond high frequencies above 30Hz.

**Keywords:** MEMS Accelerometer, Integrator, Seismic

## KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis haturkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan Rahmat dan Hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “**Fungsionalisasi MEMS Accelerometer sebagai Sensor Seismik**” dengan baik.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tesis ini masih jauh dari sempurna.

Oleh karena itu pendapat, kritik, dan saran yang sifatnya membangun sangat diperlukan untuk perbaikan tesis ini. Semoga segala yang tertulis dalam tesis ini dapat bermanfaat untuk dipahami bagi penulis dan semua orang yang membacanya serta dapat dikembangkan sesuai dengan kemajuan ilmu pengetahuan.

Malang, 30 Juli 2018

Penulis



DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENEKSAHAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>IDENTITAS TIM PENGUJI .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN ORISINALITAS .....</b>	<b>iv</b>
<b>RIWAYAT HIDUP PENULIS .....</b>	<b>v</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>vi</b>
<b>ACKNOWLEDGEMENT .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Batasan Masalah .....	5
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 MEMS <i>Accelerometer</i> .....	6
2.2 Sensor Geofon .....	9
2.3 Sistem Instrumentasi .....	11
2.4 Pengkondisi Sinyal .....	12
2.4.1 Filter .....	13
2.4.2 Integrator .....	15
2.4.3 Penguat Instrumentasi .....	19
2.5 Seismometer dan <i>Accelerometer</i> .....	20
2.6 Gelombang Seismik .....	23
2.7 Aktivitas Seismik .....	24
2.8 Mikroseismik .....	26
<b>BAB III KERANGKA KONSEP PEMIKIRAN .....</b>	<b>28</b>



<b>BAB IV METODE PENELITIAN .....</b>	<b>31</b>
4.1 Waktu Dan Tempat Penelitian .....	31
4.2 Prosedur Penelitian.....	31
4.3 Pengujian Sensor MEMS MMA7361L dan Geofon SM-24.....	33
4.4 Desain Sistem Sensor MEMS Percepatan.....	35
4.5 Desain Sistem Sensor MEMS Kecepatan.....	37
4.6 Uji Laboratorium.....	41
4.6.1 Pengujian Menggunakan <i>Signal Generator</i> .....	42
4.6.2 Pengujian Menggunakan <i>Cantilevar beam</i> .....	42
4.7 Pengujian Lapang.....	43
<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>45</b>
5.1 Hasil Perancangan Sistem Sensor Seismik .....	45
5.1.1 Sistem Sensor MEMS Percepatan.....	45
5.1.2 Sistem Sensor MEMS Kecepatan .....	47
5.2 Uji Laboratorium.....	48
5.2.1 Hasil Pengujian Menggunakan <i>Signal Generator</i> .....	48
5.2.2 Hasil Pengujian Menggunakan <i>Cantilevar Beam</i> .....	54
5.3 Uji Lapang MEMS Percepatan .....	60
5.4 Pembahasan.....	64
<b>BAB VI PENUTUP .....</b>	<b>69</b>
6.1 Kesimpulan .....	69
6.2 Saran.....	69
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>70</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>76</b>

**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2.1 Prinsip Dasar Sensor *Accelerometer* Berbasis Kapasitansi ..... 7

Gambar 2.2 Struktur MEMS *Accelerometer* ..... 9

Gambar 2.3 Representasi Mekanik Geofon ..... 10

Gambar 2.4 Topologi Geofon: Magnet Yang Bergerak (Kiri), Kumparan Yang Bergerak (Kanan) ..... 10

Gambar 2.5 Diagram Sistem Instrumentasi Dalam Proses Pengukuran ..... 12

Gambar 2.6 Rangkaian *Sallen-Key* Orde 2 ..... 13

Gambar 2.7 Rangkaian *Low Pass Filter* ..... 14

Gambar 2.8 Rangkaian *High Pass Filter* ..... 15

Gambar 2.9 Rangkaian Integrator RC ..... 15

Gambar 2.10 Diagram Bode Rangkaian Integrator RC ..... 16

Gambar 2.11 Rangkaian Integrator Ideal ..... 17

Gambar 2.12 Rangkaian Penguat Instrumentasi ..... 19

Gambar 2.13 Respon Frekuensi Seismometer ..... 21

Gambar 2.14 Cuplikan Sinyal Gempa Besar ..... 22

Gambar 2.15 Perhitungan Skala Richter ..... 26

Gambar 2.16 Seismogram Gempa Bumi Mikro ..... 27

Gambar 3.1 Kerangka Konsep Pemikiran ..... 30

Gambar 4.1 Diagram Alir Penelitian ..... 33

Gambar 4.2 Respon Frekuensi (A) Geofon SM-24 (B) MMA7361L ..... 35

Gambar 4.3 Diagram Blok Sistem Sensor MEMS Percepatan ..... 35

Gambar 4.4 Rangkaian Desain Sistem Sensor Berbasis Percepatan ..... 36

Gambar 4.5 Rangkaian Integrator ..... 38

Gambar 4.6 Hasil Simulasi Rangkaian Integrator Menggunakan Circuit Maker ..... 39

Gambar 4.7 Diagram Blok Sistem Sensor Berbasis Kecepatan ..... 39

Gambar 4.8 Rangkaian Sistem Sensor Berbasis Kecepatan ..... 40

Gambar 4.9 Diagram Blok Pengujian Laboratorium ..... 42

Gambar 4.10 Konfigurasi Media Uji Sensor ..... 43

Gambar 4.11 Konfigurasi Pengujian Lapang ..... 44



Gambar 5.1	Hasil Rancangan (A) MMA7361L, (B) Pengkondisi Sinyal Sistem Sensor Seismik Berbasis Percepatan .....	46
Gambar 5.2	Hasil Rancangan Sistem Sensor MEMS Kecepatan .....	47
Gambar 5.3	Konfigurasi Pengujian Menggunakan <i>Signal Generator</i> .....	49
Gambar 5.4	Hasil Uji Simulasi Circuit Maker Untuk Rangkaian BPF .....	49
Gambar 5.5	Hasil Uji Rangkaian BPF .....	50
Gambar 5.6	Hasil Pengujian Rangkaian Integrator Menggunakan Circuit Maker .....	52
Gambar 5.7	Hasil Pengujian Rangkaian Integrator Menggunakan Sinyal Generator .....	52
Gambar 5.8	Hasil Pengujian Pengkondisi Sinyal Menggunakan Circuit Maker .....	53
Gambar 5.9	Hasil Plotting Pengujian Rangkaian Secara Keseluruhan Menggunakan <i>Signal Generator</i> .....	53
Gambar 5.10	Konfigurasi Pengujian Sistem Sensor .....	54
Gambar 5.11	Foto Pengujian Menggunakan <i>Cantilever Beam</i> .....	55
Gambar 5.12	Hasil Pengujian MEMS Percepatan Dengan Geofon SM-24 Pada Frekuensi Tinggi .....	56
Gambar 5.13	Hasil Pengujian MEMS Kecepatan Dengan Geofon SM-24 Frekuensi Tinggi .....	57
Gambar 5.14	Hasil Pengujian MEMS Kecepatan Dengan Geofon Pada Frekuensi Rendah .....	57
Gambar 5.15	Respon Sinyal (A) Frekuensi Tinggi Dan (B) Frekuensi Rendah Dari Rangkaian Pengkondisi Sinyal MEMS Kecepatan <i>Cut-Off</i> Tinggi (Merah), MEMS Kecepatan <i>Cut-Off</i> Rendah (Biru), Dan MEMS Percepatan (Hijau) .....	59
Gambar 5.16	Hasil Pengujian MEMS Berbasis Percepatan Dengan MEMS Berbasis Kecepatan .....	60
Gambar 5.17	Konfigurasi Pengujian Lapang .....	61
Gambar 5.18	Hasil Pengujian Lapang (A) 15m, (B) 10m, Dan (C) 5m .....	62
Gambar 5.19	Hasil Analisis FFT (A) MMA7361L -X, (B) MMA7361L-Y, (C) MMA7361L-Z, (D) SM-24, Dan (E) L4C .....	64



DAFTAR TABEL

Tabel 5.1 Spesifikasi Seismometer dan Akselerometer..... 67





**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1.	Sinyal Hasil uji Geofon dan MMA7361L Percepatan.....	76
Lampiran 2.	Hasil Uji Rangkaian MEMS Kecepatan frekuensi tinggi, MEMS Kecepatan frekuensi rendah, dan MEMS Percepatan.....	77
Lampiran 3.	Sinyal Hasil Uji Rangkaian MEMS Percepatan dan MEMS Kecepatan menggunakan <i>Signal generator</i> .....	81
Lampiran 4.	Sinyal Hasil uji MEMS Percepatan dan MEMS Kecepatan.....	85
Lampiran 5.	Hasil Uji Rangkaian MEMS Kecepatan frekuensi tinggi, MEMS Kecepatan frekuensi rendah, dan MEMS Percepatan.....	86
Lampiran 6.	Datasheet Sensor MEMS <i>Accelerometer</i> MMA7361L.....	88
Lampiran 7.	Datasheet Sensor Geofon SM-24.....	92
Lampiran 8.	Datasheet Guralp CMG-3T.....	94
Lampiran 9.	Datasheet Strong Motion Seismometer Episensor ES-T.....	96
Lampiran 10.	Datasheet IC penguatan AD620.....	97
Lampiran 11.	Datasheet LF444.....	102
Lampiran 12.	Datasheet LM324.....	105
Lampiran 13.	Sertifikat Deteksi Plagiasi.....	111

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak didaerah seismik aktif yang merupakan pertemuan tiga lempeng tektonik yaitu, Lempeng Eurasia, Lempeng Indo Australia dan Lempeng Pasifik. Dengan adanya posisi tersebut rata-rata 10-20 kali kejadian gempa bumi baik sekala besar maupun sekala kecil terjadi setiap harinya (Setiaji, 2009). Selain itu Indonesia juga memiliki gunung api terbanyak yaitu sekitar 200 gunung api aktif yang dapat berpotensi menjadi bencana alam ataupun dapat berpotensi menjadi sumber energi panas bumi. Berdasarkan uraian tersebut dibutuhkan sebuah instrumen yang dapat digunakan untuk mendeteksi gelombang seismik yang ditimbulkan oleh pergerakan lempeng maupun aktivifitas vulkanologi dan *geothermal*. Dengan adanya kondisi tersebut saat ini Indonesia hanya memiliki 160 seismometer yang tersebar dibeberapa lokasi (Setiaji, 2009). Jumlah tersebut sangatlah sedikit apabila dilihat dari luas Indonesia dan banyaknya gunungapi yang masih aktif. Ini diakibatkan karena harga seismometer yang terlampau mahal serta sistem perbaikan yang tidak dapat dijangkau.

Sensor getaran untuk deteksi seismik (sensor seismik) merupakan komponen utama dalam seismologi, seperti pemantuan bencana alam dan inspeksi geofisika untuk sumber daya alam (Deng dkk., 2014). Sensor tersebut mampu mentransferkan gerakan tanah ke dalam sinyal listrik (Guangbei Li dkk., 2012).

Sebuah sensor seismik berfungsi sebagai sensor kecepatan atau percepatan yang dapat merasakan getaran tanah di bumi(Guanglei Li dkk., 2017). Beberapa sensor

seismik telah dikembangkan, dapat diklasifikasikan ke dalam percepatan, piezoelektrik, elektromagnetik, kapasitansi dan lain sebagainya (Deng dkk., 2014)

Proses monitoring gelombang seismik dalam penelitian sebelumnya menggunakan Geofon sebagai sensor seismiknya yang termasuk ke dalam klasifikasi elektromagnetik sensor. Sensor tersebut berbentuk sangat sederhana, yaitu berupa sebuah gulungan kawat yang melingkupi magnet permanen dengan panjang 3cm dan berat ~75g. Prinsip kerja sensor tersebut berdasarkan kecepatan.

Sensor Geofon memiliki linieritas yang baik dan memiliki *ground noise* yang relatif rendah (Brincker dkk., 2010). Pemanfaatan sensor Geofon ini sering digunakan untuk memperoleh data seismik atau keperluan eksplorasi. Sensor ini memiliki kelebihan antara lain dapat bekerja tanpa adanya catu daya, dan mampu mendeteksi perpindahan tanah yang sangat kecil (M. Hons, 2008). Penelitian yang telah dilakukan memaparkan bahwa Geofon memiliki resolusi yang baik, memiliki *bandwith* mulai dari 0-250 Hz, dan memiliki *interval sampling* sebesar 0.5 s (Bin dkk., 2014). Namun Geofon memiliki kelemahan dalam proses monitoring gelombang seismik tiga komponen. Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh (Zhu dan Wang, 2009) diperlukan 3 buah Geofon untuk melakukan proses monitoring 3 komponen, sedangkan untuk 1 buah Geofon memiliki harga yang cukup mahal.

Saat ini terdapat teknologi alternatif sensor yang sering digunakan adalah sensor MEMS *Accelerometer* untuk sensor seismik yang telah dikembangkan oleh beberapa peneliti (Aizawa, 2008). Aplikasi MEMS *Accelerometer* dalam pengembangan dan pembuatan sensor seismik mempunyai kelebihan dalam beberapa hal dibandingkan dengan sensor lain, yaitu dimensinya yang kecil, simpel,

dan memiliki harga yang terjangkau. MEMS yang digunakan adalah tipe MMA7361L yang memiliki spesifikasi dua sensitivitas ( $\pm 1.5g$  dan  $\pm 6g$ ) dengan sensitivitas maksimum  $800mV/g@1.5g$ . Sensor tersebut memiliki 3 sumbu deteksi dan bekerja menggunakan prinsip kapasitansi (Santoso dkk., 2015). Sensor MEMS *Accelerometer* memiliki kelebihan dibandingkan sensor Geofon pada frekuensi rendah dan frekuensi tinggi karena MEMS *Accelerometer* memiliki sensitivitas lebih besar jika dibandingkan dengan Geofon (S. Hons dkk., 2008).

Secara khusus respon MEMS untuk percepatan konstan bervariasi dalam frekuensi 0-800 Hz, baik dalam fase dan amplitudo yang optimal untuk menangkap sinyal *broadband*. Dimensinya yang kecil, mudah diintegrasikan dengan perangkat elektronik dan harganya yang murah menyebabkan sensor tersebut sering kali digunakan, hanya saja sensor tersebut masih dalam bentuk tegangan listrik analog yang mengakibatkan tidak dapat di analisa secara langsung. Oleh karena itu dibutuhkan sistem akuisisi data lebih lanjut supaya data yang di dapat secara mudah untuk dianalisa (Lainé & Mougnot, 2014).

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan beberapa jenis MEMS *Accelerometer* menggunakan MEMS komersial untuk *survey* seismik. Percobaan dilakukan di lapangan dengan mengobservasi gempa untuk menyelidiki kemampuan MEMS *Accelerometer*. Hasil dari percobaan menunjukkan bahwa sifat-sifat dari MEMS *Accelerometer* memiliki sensitivitas 1,5-3,0 kali dari *Geofon* yang sering digunakan. Tingkat *noise* MEMS *Accelerometer* 3C dalam pengamatan gempa bumi sekitar  $10^{-4}cm/s$ , dan jangkauan frekuensi yang dapat digunakan meluas hingga di bawah 1Hz (Aizawa dkk., 2008).

Sensor MEMS juga telah digunakan dalam penelitian yang lain untuk melihat respon frekuensi yang mampu di tangkap oleh MEMS *Accelerometer* dengan menggunakan meja penggetar. Penelitian diperoleh bahwa sensor MEMS memiliki respon frekuensi tinggi yang lebih baik. Kebanyakan akselerometer gempa ditentukan sebagai frekuensi DC sampai 50 Hz, 100 Hz atau dalam beberapa kasus 200 Hz, sensor seismik MEMS memiliki rentang frekuensi jauh lebih tinggi.

Sebagai contoh, unit *Silicon Design* yang digunakan pada sensor ESS-1221 memiliki respon frekuensi DC sampai 400Hz, dan sensor MEMS SF3000L Colibrys meluas sampai 1000Hz. Perekam gempa biasanya merekam data pada 100sps dan 200sps, yang berarti bahwa frekuensi di atas 50Hz atau 100Hz tidak terekam. Sedangkan dengan menggunakan MEMS *Accelerometer* mampu melakukan sampling hingga 2000sps (Pascale, 2009). Dalam seismologi gempa, frekuensi rendah merupakan data penting yang digunakan untuk mengkarakterisasi gerakan tanah untuk mengungkapkan mekanisme gempa, karena komponen frekuensi rendah merupakan komponen dominan dalam gempa bumi (Aizawa dkk., 2008).

Saat ini peralatan yang digunakan untuk identifikasi seismik sangatlah terbatas dan memiliki harga yang cukup mahal. Pada penelitian ini akan dikembangkan sistem sensor seismik menggunakan MEMS *Accelerometer* yang mampu mengukur getaran seismik mulai dari frekuensi rendah hingga frekuensi tinggi serta memanfaatkan komponen-komponen yang terdapat di pasar komersial.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka pokok permasalahan dari penelitian ini adalah bagaimana mengembangkan sensor MEMS *Accelerometer* sebagai sensor seismik?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Secara umum tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan sensor MEMS *Accelerometer* tipe MMA7361L sebagai sensor seismik yang dapat merespon frekuensi yang sangat rendah, serta mengamati respon frekuensi MEMS yang telah dikembangkan jika dibandingkan dengan Geofon.

## 1.4 Batasan Masalah

Agar dalam pembahasan penelitian ini tidak mengarah pada topik yang terlalu luas, maka penulis memberikan batasan masalah, yaitu:

1. Sensor yang digunakan adalah MEMS *Accelerometer* tipe MMA7361L
2. Sensor acuan yang digunakan adalah Geofon SM-24
3. Penelitian ini tidak membahas analisa lebih lanjut mengenai data yang dihasilkan.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini dengan adanya pengembangan sistem sensor MEMS *Accelerometer* dapat digunakan sebagai alternatif sensor seismik.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 MEMS *Accelerometer*

Sensor merupakan perangkat yang menerima dan merespon sinyal. Sinyal ini harus dihasilkan oleh beberapa bentuk energi, seperti panas, cahaya, gerak, atau reaksi kimia. Setelah sensor mendeteksi satu atau lebih dari sinyal masukan, sinyal tersebut mengubahnya menjadi representasi analog atau digital dari sinyal input.

Salah satu sensor getar yang saat ini banyak digunakan adalah MEMS *Accelerometer*.

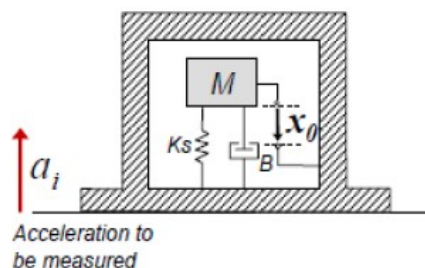
MEMS merupakan akronim dari *Micro Electromechanical System*, memiliki piranti elektronik atau komponen sensor yang berukuran mikro (Wright dkk., 2008). Komponen dari sensor MEMS tersebut berukuran sekitar 20 mikrometer dengan sistem yang terdiri dari mikroprosesor untuk *processing* data, mikrosensor sebagai penghubung sensor MEMS dengan *device* lain, serta sistem internal yang lain (Goldianto & Hernowo, 2013). MEMS dibuat atau diproses dengan menggunakan teknik *batch processing* yang mengkombinasikan komponen mekanis dan elektrik. Sensor ini memiliki kemampuan sebagai pengontrol dan aktuator pada skala mikro. MEMS merupakan sebuah sensor yang diintegrasikan ke dalam *silicon chip*.

Seiring dengan perkembangan teknologi, sampai saat ini MEMS terus berkembang. MEMS salah satunya di aplikasikan sebagai sensor percepatan, yang kemudian dikenal dengan MEMS *Accelerometer*. MEMS *Accelerometer* diaplikasikan pada alat keamanan transportasi, seperti pada bagian *Accelerometer*

mobil yang berfungsi untuk mengaktifkan *airbag* (Wright dkk., 2008). Selain itu juga telah diaplikasikan pada game untuk meningkatkan efek bahkan diimplementasikan pada manusia untuk menganalisis tremor (Aziz dkk., 2014).

Selain digunakan pada alat transportasi dan game serta manusia MEMS *Accelerometer* dapat diaplikasikan untuk sensor getaran. MEMS *Accelerometer* merupakan pilihan yang baik untuk sensor getaran karena sifatnya yang tidak terpengaruh terhadap *noise* dari getaran yang timbul akibat pergerakan mekanis (Risandriya dan Rivai, 2011).

MEMS *Accelerometer* dibagi menjadi dua tipe utama yaitu *Accelerometer* berbasis piezoresistif dan kapasitif. Saat ini yang akan dibahas adalah sensor MEMS berbasis kapasitif (Albarbar dkk., 2009). MEMS *Accelerometer* ini memiliki 3 sumbu yang bekerja dengan prinsip penginderaan kapasitif. Gambar 2.1 menunjukkan prinsip dasar sensor *Accelerometer*. Sensor terbuat dari *spring loaded* dengan struktur mikro dan dipasang pada basis silikon. Gaya pada strukturnya mengubah posisi massa seismik yang menempel pada pegas. Defleksi ini diukur dengan menggunakan sensor kapasitor pelat tetap. Perubahan pada percepatan dilihat dari ketidakseimbangan jarak lempeng kapasitor. Penginderaannya bisa dilakukan statis (gravitasi) atau dinamis (*forced acceleration*) (Aziz dkk., 2014).



Gambar 2.1 Prinsip Dasar Sensor *Accelerometer* Berbasis Kapasitansi (Majiyani dkk., 2014)



Kapasitor dapat beroperasi baik sebagai sensor dan aktuator. Mereka memiliki sensitifitas yang sangat baik dan mekanisme transduksi secara intrinsik tidak sensitif terhadap suhu. Penginderaan kapasitif tidak tergantung pada bahan dasarnya dan bergantung pada variasi kapasitansi saat geometri kapasitor berubah sesuai dengan persamaan 2.1 (Maior dkk., 2012).

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon_A \frac{1}{d} \tag{2.1}$$

Keterangan:

- $C$  : Nilai kapasitansi
- $A$  : Luas Elektroda
- $d$  : Jarak antar plat sejajar
- $\epsilon$  : Permittivitas bahan

Dimana  $\epsilon_A = \epsilon_0 \epsilon A$  perubahan pada salah satu parameter ini akan diukur sebagai perubahan kapasitansi dan variasi masing-masing dari ketiga variabel yang telah digunakan dalam MEMS.

MEMS *Accelerometer* bekerja dengan prinsip plat sejajar seperti pada gambar 2.2. Pelat bergerak dan pelat luar mewakili kapasitor. Defleksi massa diukur dengan menggunakan perbedaan kapasitansi. Kapasitas bebas antara pelat

bergerak dan dua pelat luar  $C_1$  dan  $C_2$  merupakan fungsi dari perpindahan yang sesuai dengan  $x_1$  dan  $x_2$  sesuai dengan persamaan 2.2.

$$\begin{aligned} C_1 &= \epsilon_A \frac{1}{x_1} = \epsilon_A \frac{1}{d+x} = C_0 - \Delta C \\ C_2 &= \epsilon_A \frac{1}{x_2} = \epsilon_A \frac{1}{d-x} = C_0 + \Delta C \end{aligned} \tag{2.2}$$

Jika percepatannya nol, kapasitansi  $C_1$  dan  $C_2$  sama karena  $x_1 = x_2$ . Jika  $x \neq 0$ , maka nilai kapasitansinya akan menjadi persamaan 2.3,

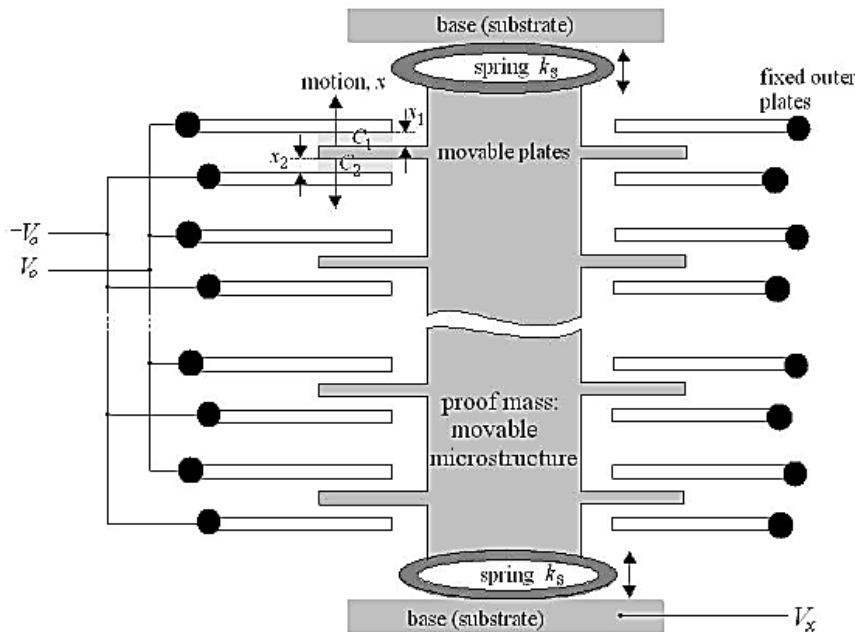
$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = 2\epsilon_A \frac{x}{d^2 - x^2} \quad (2.3)$$

Menghitung  $\Delta C$ , dengan perubahan  $x$  dapat diselesaikan dengan persamaan aljabar nonlinier sesuai dengan persamaan 2.4.

$$\Delta C x^2 + \epsilon_A x + \Delta C d^2 = 0 \quad (2.4)$$

Persamaan 2.4 dapat disederhanakan, untuk perpindahan yang kecil dengan  $\Delta C x^2$  dapat diabaikan. Maka persamaan akan menjadi persamaan 2.5 (Andreja dan Poberaj, 2008),

$$x \approx \frac{d^2}{\epsilon_A} \Delta C = d \frac{\Delta C}{C_0} \quad (2.5)$$

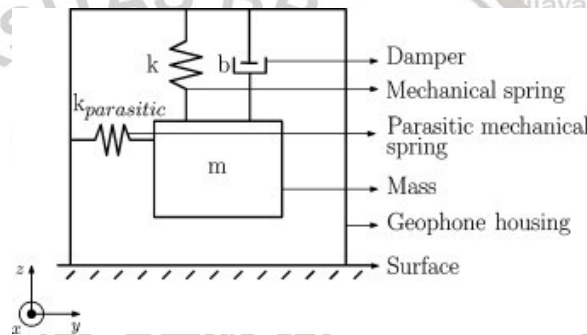


Gambar 2.2 Struktur MEMS Accelerometer (Andreja & Poberaj, 2008)

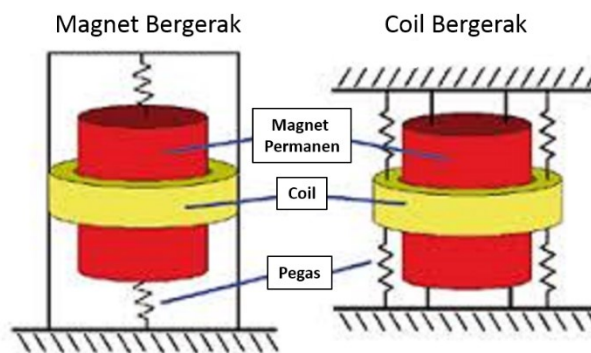
### 2.2 Sensor Geofon

Bagian dasar Geofon adalah massa yang tersuspensi dengan pegas mekanik, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.3, ketika terdapat kecepatan dalam arah-z dikenakan Geofon, baik massa yang tersuspensi maupun wadah Geofon mulai

bergerak sesuai dengan arah kecepatan, untuk frekuensi lebih rendah dari frekuensi resonansi. Sedangkan untuk frekuensi di atas frekuensi resonansi, massa tidak akan lagi mengikuti pergerakan wadah dan akan tetap diam. Massa ( $m$ ) digambarkan sesuai dengan gambar 2.3 yang diimplementasikan sebagai magnet atau koil. Oleh karena itu, terdapat dua topologi Geofon berbasis elektromagnetik yang dapat didefinisikan yaitu, kumparan yang bergerak dan magnet yang bergerak. Gambar 2.4 menunjukkan topologi dengan magnet yang bergerak, dimana bagian kumparan stasioner, dan sebaliknya kumparan yang bergerak sedangkan magnet diam (Dams, 2009).



Gambar 2.3 Representasi Mekanik Geofon (Dams, 2009)



Gambar 2.4 Topologi Geofon: magnet yang bergerak (kiri), kumparan yang bergerak (kanan) (Dams, 2009)

Geofon elektromagnetik, digambarkan seperti pada gambar 2.4 didasarkan pada hukum Faraday. Pergerakan rangkaian magnetik relatif terhadap kumparan,

atau sebaliknya menyebabkan perubahan fluks magnetik yang dihubungkan dengan kumparan, sehingga ggl (dengan amplitudo bergantung pada kecepatan magnet) diinduksikan dalam kumparan (Dams, 2009).

Frekuensi resonansi Geofon umumnya dalam kisaran 5 hingga 50Hz.

Berdasarkan hukum Faraday/Lenz diberikan persamaan 2.6

$$V \propto \frac{dx}{dt} \quad (2.6)$$

Keterangan:

$V$  : Tegangan

$dx$  : Perpindahan relative terhadap koil

$dt$  : Perubahan waktu

Kecepatan massa relatif terhadap wadah diubah menjadi tegangan. Sistem tidak memberikan respon terhadap posisi yang berbeda dari massa, hanya laju pergerakan antara dua posisi. Jadi untuk data yang direkam melalui Geofon, nilai yang terekam adalah kecepatan magnet relatif terhadap kumparan dikalikan dengan konstanta sensitifitas dalam Volts per m/s (M. S. Hons, 2008).

### 2.3 Sistem Instrumentasi

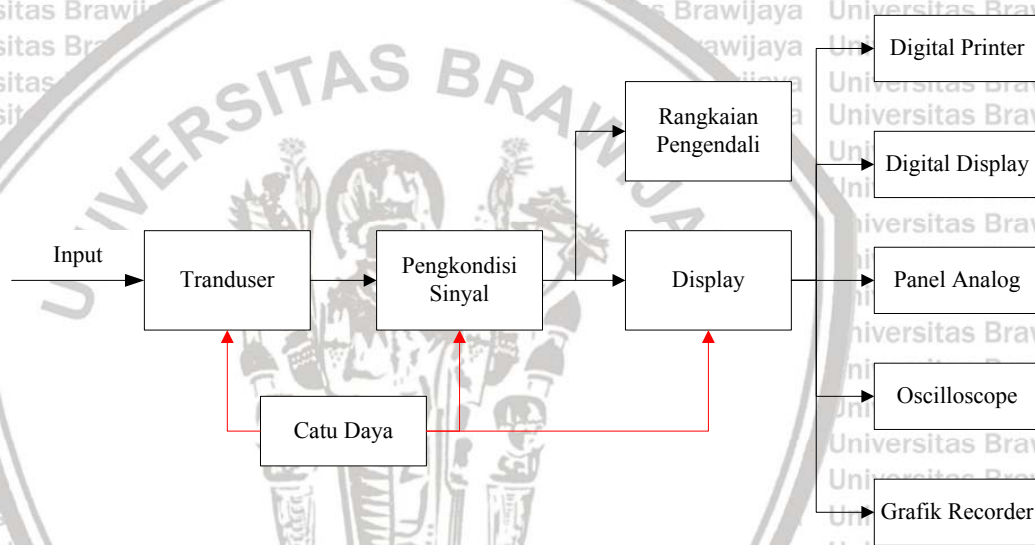
Instrumentasi memiliki peranan penting di dunia industri yaitu sebagai alat untuk mengendalikan suatu proses yang diharapkan. Salah satunya dalam dunia industri adalah sebagai alat pengukuran (*measurement system*). Instrumentasi juga dapat dikatakan sebagai alat untuk menentukan nilai besaran yang dapat berubah-ubah sehingga dapat digunakan untuk keperluan pengaturan suatu besaran.

Sistem instrumentasi memiliki tujuan untuk membuat suatu sistem pengukuran untuk memberikan suatu nilai yang sesuai dengan objek yang diukur.

Sistem instrumentasi harus dapat mempresentasikan nilai dari hasil pengukuran dengan benar serta dapat dikalibrasi dengan mudah. Sebuah sistem instrumentasi

harus memiliki masukan dan keluaran. Keluaran dari sistem tersebut tidak hanya berupa suatu hasil pengukuran, tetapi juga dapat berupa suatu kontrol yang akan melakukan kendali terhadap kondisi fisis (Park & Mackey, 2003).

Saat ini teknologi telah berkembang dengan pesat banyak sistem instrumentasi yang telah berbasis elektronika. Sistem tersebut memiliki bagian yang berkesinambungan sesuai dengan gambar 2.5, mulai dari bagian yang digunakan untuk merubah besaran fisis menjadi besaran listrik hingga bagian yang mempresesntasikan hasil dari proses dan mengontrol keadaan fisisnya.



Gambar 2.5 Diagram Sistem Instrumentasi Dalam Proses Pengukuran (Park & Mackey, 2003)

## 2.4 Pengkondisi Sinyal

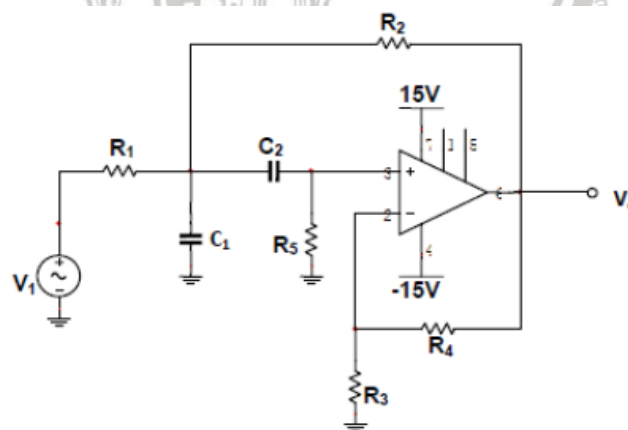
Pengkondisi sinyal merupakan rangkaian elektronik yang dirancang agar dapat digunakan untuk proses penyaringan sinyal, penguatan, dan lain sebagainya.

Rangkaian pengkondisi sinyal biasanya digunakan oleh sensor secara langsung untuk memperoleh parameter fisik yang di rubah menjadi sinyal keluaran(Tumiwan dkk., 2012). Rangkaian pengkondisi sinyal ada bermacam-macam tipe rangkaian yang dapat digunakan sebagai komponen utamanya seperti menggunakan

transistor, op-amp, rangkaian RC dan lain sebagainya. Salah satu jenis yang banyak digunakan adalah menggunakan op-amp (Bayu, 2011). Op-amp merupakan IC yang dapat dimanfaatkan untuk penguat tegangan, contohnya penguat *inverting* atau penguat *non-inverting* (Tumiwan dkk., 2012).

### 2.4.1 Filter

Filter dalam rangkaian elektronik memiliki beberapa tipe yaitu filter aktif dan pasif. Filter aktif dibangun dengan menggunakan komponen aktif seperti operational amplifier sedangkan filter pasif dibangun menggunakan komponen-komponen pasif seperti resistor dan kapasitor. Salah satu filter aktif yang sering digunakan adalah filter *Sallen-key* yang terdiri dari *Low Pass Filter* diikuti oleh *High Pass Filter*. Kombinasi *low pass* dan rangkaian *high pass* akan membuat *Band Pass Filter* yang dibutuhkan. Ini adalah konfigurasi *gain filter Sallen-key*. *Sallen-key* orde dua membutuhkan *single* op-amp dan empat komponen pasif untuk mencapai kriteria yang diinginkan. Filter ini hanya berfungsi untuk konfigurasi *non-inverting* saja.



Gambar 2.6 Rangkaian *Sallen-key* Orde 2 (Baker, 2008)

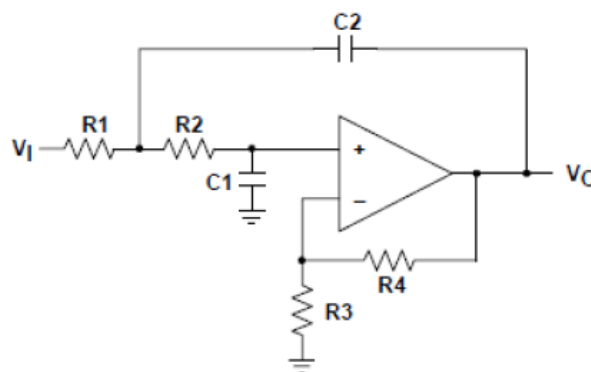
Pada rangkaian filter juga terdapat berbagai macam konfigurasi yaitu *High Pass Filter*, *Low Pass Filter*, dan *Band Pass Filter*. Filter *sallen-key* orde dua RC

ditunjukkan pada gambar 2.6. Pada sebagian besar filter diperlukan faktor kualitas lebih besar dari 0,5. Nilai Q yang lebih tinggi dapat dicapai dengan menerapkan penguat umpan balik positif.

*Low Pass Filter* merupakan filter yang bermanfaat untuk menyaring sinyal yang nilainya di bawah dari nilai *cut-off*. Filter jenis *sallen key* ini merupakan filter yang melemahkan sinyal masukan yang nilainya di atas frekuensi *cut-off*. Filter ini juga digunakan untuk mereduksi adanya *noise* serta menjaga agar sinyal yang masuk selalu dalam fase yang sama dengan sinyal yang dikeluarkan dari sensor.

Gambar 2.7 merupakan gambar rangkaian *Low Pass Filter* (Baker, 2008).

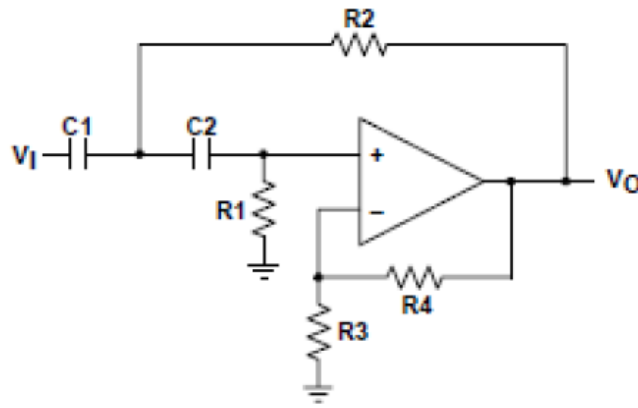
$$H_{LP} = \frac{K}{-\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + \frac{jf}{Qf_c} + 1} \quad (2.7)$$



Gambar 2.7 Rangkaian *Low Pass Filter* (Nidhi, 2015)

Konfigurasi *High Pass Filter* ditunjukkan pada gambar 2.8. Sinyal dilemahkan oleh kuadrat dari rasio frekuensi rendah terutama di bawah frekuensi *cut-off*  $f=f_c$ ,  $H_{LP} = -jKQ$  dan sinyal ditingkatkan dengan faktor Q. Bila  $f \gg f_c$ , sinyal akan dikalikan dengan faktor penguatan k. Sinyal *High Pass* orde 2 digambarkan dengan peningkatan atenuasi dengan kekuatan 2 kali pada frekuensi rendah (Nidhi, 2015).

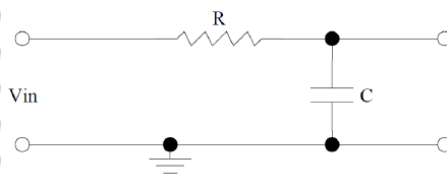
$$H_{HP} = \frac{-K \left( \frac{f}{fc} \right)^2}{-\left( \frac{f}{fc} \right)^2 + \frac{jf}{Qfc} + 1} \quad (2.8)$$



Gambar 2.8 Rangkaian High Pass Filter (Nidhi, 2015)

### 2.4.2 Integrator

Integrator yang paling sederhana ditunjukkan oleh gambar 2.9. Pasif RC integrator terdiri dari komponen pasif seperti resistor, kapasitor sehingga tidak memiliki elemen penguat seperti transistor atau opamp sehingga tidak memiliki perolehan sinyal, oleh karena itu tingkat outputnya selalu kurang dari *input*. Sirkuit ini dapat digunakan baik *Low Pass Filter* maupun integrator. Untuk mengidentifikasi kapan rangkaian ini berfungsi sebagai integrator, diperlukan untuk melihat fungsi transfernya (Karakuzulu, 2012).



Gambar 2.9 Rangkaian Integrator RC (Karakuzulu, 2012)

Fungsi transfer terkait tegangan *output* ke tegangan *input* diberikan oleh persamaan

2.9.



$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + RCs} \quad (2.9)$$

Keterangan:

$V_o$  : Tegangan keluaran

$V_i$  : Tegangan masukan

$R$  : Hambatan

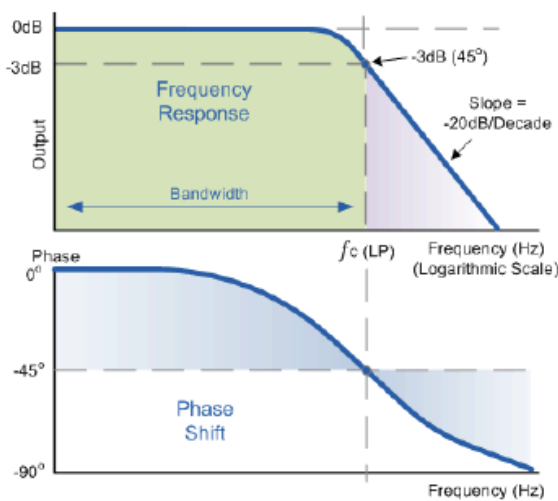
$C$  : Kapasitor

Rangkaian bertindak sebagai integrator jika  $\omega \gg 1$  atau ekuivalen untuk persamaan

2.9.

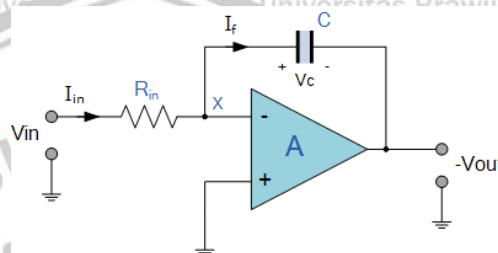
$$\omega = 2\pi f \gg \frac{1}{RC} \text{ rad / s} \quad (2.10)$$

Dengan kata lain, rangkaian RC pasif bertindak sebagai integrator hanya untuk sinyal dengan frekuensi 10 kali lebih tinggi daripada frekuensi *cut-off* dari rangkaian RC pasif (*Low Pass Filter*). Untuk tepatnya rangkaian tersebut berfungsi sebagai integrator, kurva respon frekuensi (*bode plot*) dari RC diberikan pada gambar 2.8. Setelah titik frekuensi terputus, terdapat kemiringan  $-20\text{dB/decade}$  dimana rangkaian berfungsi sebagai integrator.



Gambar 2.10 Diagram Bode Rangkaian Integrator RC (Tapashetti dkk., 2012)

Selain menggunakan rangkaian R dan C pasif untuk membangun rangkaian integrator juga dapat digunakan *operational amplifier*. Rangkaian dasar integrator merupakan rangkaian op-amp *inverting*, namun rangkaian umpan balik dari op-amp merupakan kapasitor. Keluaran pada rangkaian integrator ditentukan oleh lamanya waktu tegangan yang ada pada *input* sebagai arus melalui rangkaian umpan balik negatif yang diberi kapasitor. Rangkaian ideal integrator ditunjukkan pada gambar 2.11 (Tapashetti dkk., 2012).



Gambar 2.11 Rangkaian Integrator Ideal (Hossain dkk., 2017)

Apabila digunakan analisa pada domain fasor di dapatkan persamaan 2.11 dan 2.12.

$$\frac{(V_{in} - V_n)}{R} + \frac{(V_{out} - V_n)}{C} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{V_{in} - V_n}{R} + \frac{V_{out} - V_n}{\frac{1}{j\omega C}} = 0 \quad (2.12)$$

Menurut aturan jika menggunakan op-amp ideal maka  $V_n = V_p = 0$  maka persamaan 2.12 menjadi persamaan 2.13-2.15.

$$\frac{V_{in}}{R} + V_{out} j\omega C = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{1}{j\omega CR} \quad (2.14)$$

$$V_{out} = -\frac{V_{in}}{j\omega CR} \quad (2.15)$$

Persamaan 2.15 merupakan *Low Pass Filter* aktif, karena nilai *output* sebagian kecil dari nilai *input*. Apabila rangkaian di analisa menggunakan domain waktu maka akan di dapatkan persamaan 2.16.

$$\frac{V_{in} - V_n}{R} + C \frac{d(V_{out} - V_n)}{dt} = 0 \quad (2.16)$$

Kemudian digunakan  $i = C \frac{dV}{dt}$ , yang digunakan adalah  $V$  kapasitor ( $V_{out} - V_n$ ), dengan menggunakan aturan op-amp ideal sesuai dengan penjelasan sebelumnya maka didapatkan persamaan 2.17 (Hossain dkk., 2017).

$$C \frac{dV_{out}}{dt} = -\frac{V_{in}}{R} \quad (2.17)$$

Persamaan 2.17 kemudian diintegalkan kedua sisi dan dibagi dengan  $C$  maka persamaan akan menjadi

$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{in}(\tau) d\tau \quad (2.18)$$

Dengan adanya analisa tersebut dapat dianalisa untuk menentukan penguatan pada rangkaian integrator dengan menggunakan rumus penguatan op-amp *inverting*

yaitu gain  $G = -\frac{R_2}{R_1}$  pada rangkaian integrator diketahui  $R_1 = R_{in}$  dan

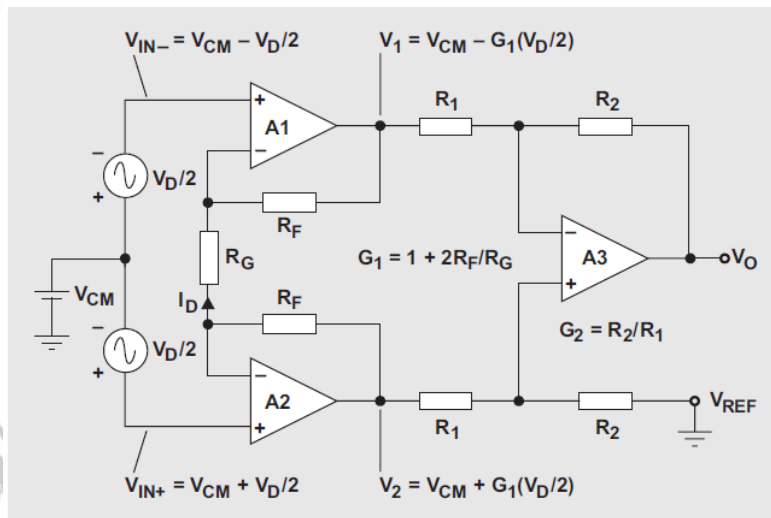
$R_2 = Z_c = \frac{1}{\omega C}$ , dengan demikian dapat diperoleh penguatan integrator pada

persamaan 2.19.

$$G(f) = -\frac{1}{2\pi fRC} \quad (2.19)$$

### 2.4.3 Penguat Instrumentasi

Penguat instrumentasi merupakan penguat yang dapat memperkuat sinyal masukan dengan akurat, idealnya tanpa *noise* dan penguatannya dapat diatur. Sinyal yang dikeluarkan dari sensor atau transduser biasanya sangat lemah, bila tanpa penguat pada umumnya akan tenggelam dalam *noise*, sehingga data yang diperoleh dari pengukuran menjadi bias atau salah. Penguat instrumentasi telah diproduksi namun untuk memperolehnya masih sulit. Sebenarnya penguat ini secara sederhana dapat dibuat atau dirakit dari beberapa tingkat penguat op-amp yang secara teoritis memiliki kualitas yang tidak jauh dari produk yang sudah ada. Op-amp secara umum terbagi menjadi beberapa macam sesuai dengan karakteristik penguatannya (Heruryanto & Nurdin, 2014).



Gambar 2. 12 Rangkaian Penguat Instrumentasi (Kugelstadt, 1990)

Persamaan untuk rangkaian pada gambar 2.12 adalah sebagai berikut:

$$V_{CM} = \frac{V_{IN+} + V_{IN-}}{2} \text{ dan } V_D = V_{IN+} - V_{IN-} \quad (2.20)$$

Jika persamaan (2.20) dipecah menjadi menjadi 2 akan menghasilkan  $V_{in+}$  dan  $V_{in-}$  sebagai berikut:

$$V_{IN+} = V_{CM} + \frac{V_D}{2} \text{ dan } V_{IN-} = V_{CM} - \frac{V_D}{2} \quad (2.21)$$

Dalam keadaan non-saturasi, op-amp  $A_1$  dan  $A_2$  akan menghasilkan tegangan diferensial  $V_D$  pada resistor  $R_G$ , sehingga juga menghasilkan arus  $I_D$

$$I_D = \frac{V_{IN+} + V_{IN-}}{R_G} = \frac{V_D}{R_G} \quad (2.22)$$

Sehingga keluaran dari op-amp  $A_1$  dan  $A_2$  adalah

$$V_1 = V_{CM} - \frac{V_D}{2} - I_D R_F \text{ dan } V_2 = V_{CM} + \frac{V_D}{2} + I_D R_F \quad (2.23)$$

Mengganti arus  $I_D$  dengan persamaan (2.21)

$$V_1 = V_{CM} - \frac{V_D}{2} G_1 \text{ dan } V_2 = V_{CM} + \frac{V_D}{2} + G_1 \quad (2.24)$$

$$\text{dengan } G_1 = 1 + 2 \frac{R_F}{R_G} \quad (2.25)$$

Penguat diferensial dari  $A_3$  akan mengurangi  $V_1$  dari  $V_2$  dan menjadi penguat diferensial dengan penguatan  $G_2$

$$V_0 = (V_2 - V_1) G_1 \text{ dengan } G_2 = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.26)$$

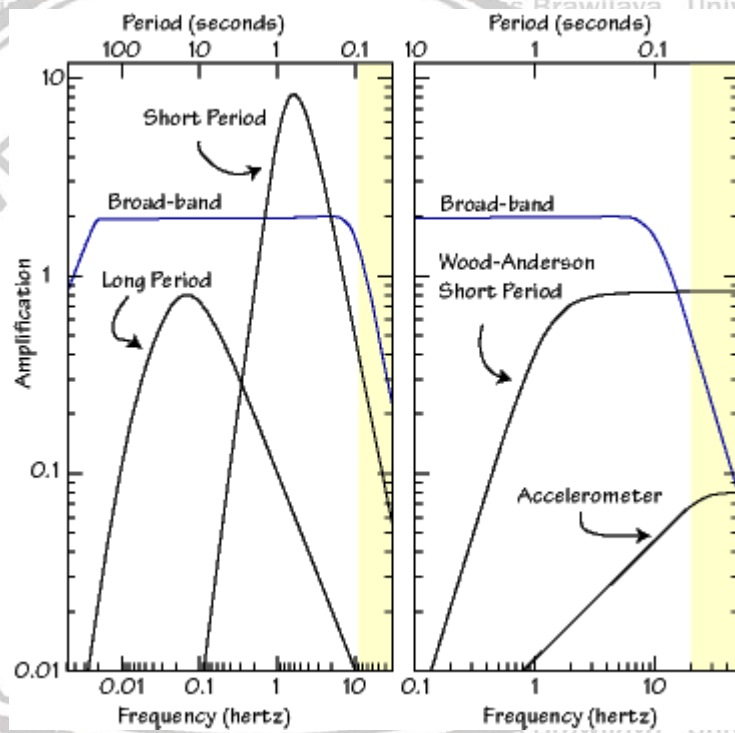
Dengan memasukkan persamaan (2.23) ke persamaan (2.25) akan menghasilkan penguatan total  $V_0/V_D$  sebagai berikut (Kugelstadt, 1990)

$$\frac{V_0}{V_D} = G_1 G_2 = G_{TOT} \quad (2.27)$$

### 2.5 Seismometer dan Accelerometer

Seismometer adalah instrumen yang digunakan untuk mengukur dan merekam gerakan tanah, termasuk gelombang seismik yang dihasilkan oleh gempa

bumi, ledakan nuklir, dan sumber seismik lainnya. Rekaman gelombang seismik memungkinkan seismolog untuk memetakan dalam bumi, serta mencari dan mengukur besarnya sumber getaran yang berbeda-beda. Seismometer biasanya dirancang untuk merekam sinyal selama frekuensi tertentu atau periode tertentu sehingga lebih mudah untuk menganalisa instrumen berdasarkan rentang respon frekuensi getaran yang dapat dideteksi. Gambar 2.13 merupakan grafik respon frekuensi untuk sensitifitas instrumen yang digunakan. Pada grafik ditunjukkan terdapat sampel lima respon frekuensi beberapa instrumen (Charles, 2008).

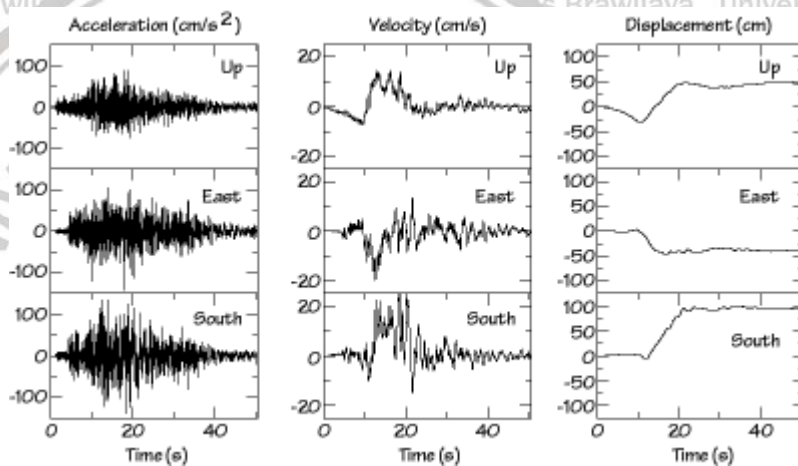


Gambar 2.13 Respon Frekuensi Seismometer (Charles, 2008)

Untuk mengkararakteristik instrumen yang benar-benar penting adalah kisaran amplitudo, bukan penguatan yang biasanya disesuaikan pada lokasi seismometer. Grafik sebelah kiri merupakan perbandingan respon frekuensi antara *broadband modern* dengan *World Wide Standard Seismic Network (WWSSN)* periode pendek dan periode panjang. *Bandwidth* respon yang sama ditunjukkan pada

grafik sebelah kanan, untuk membandingkan respon dengan priode pendek Wood-Anderson dan *accelerometer*.

*Accelerometer* merupakan alat yang direncang untuk merekam amplitudo besar dan getaran berfrekuensi tinggi di dekat gempa besar dengan jarak beberapa puluh kilometer, biasanya disebut strong motion seismometer. Instrumen *strong motion* ini dirancang untuk merekam percepatan tinggi yang sangat penting untuk mendesain bangunan dan struktur lainnya. Salah satu contoh sinyal percepatan dari gempa besar dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Cuplikan Sinyal Gempa Besar (PASCAL, 2017)

Grafik bagian kiri merupakan plot dari tiga komponen percepatan (satu vertical dan dua horizontal), berdasarkan kurva tersebut dapat dilihat bahwa getaran frekuensi tinggi yang kuat berlangsung hampir satu menit. Percepatan puncak sekitar  $150\text{cm/s}^2$  atau biasa dengan satuan gravitasi bumi “g” yang berkisar  $980\text{cm/s}^2$ . Dengan demikian percepatan puncak pada grafik sekitar  $150/980\text{ g}$  atau sekitar  $0.15\text{ g}$  setara dengan  $15\%$  dari g. Grafik bagian tengah menunjukkan kecepatan gerakan tanah, yang dapat dihitung menggunakan kalkulus. Kecepatan merupakan bagian integral dari percepatan. Kecepatan puncak untuk contoh ini selama gempa sekitar  $20\text{--}25\text{ cm/s}$ . dan jika diintegrasikan kecepatan, dapat dihitung

perpindahan yang terjadi yang telah ditampilkan pada grafik bagian kanan (PASCAL, 2017).

## 2.6 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah gelombang yang merambat baik di dalam maupun di luar permukaan bumi yang berasal dari sumber seismik seperti dari sumber gempa, ledakan, erupsi gunungapi, longsor, badai dan sebagainya.

Gelombang ini nantinya dapat direkam dengan alat penerima di atas permukaan bumi. Hasil rekaman dari alat tersebut dapat disebut seismogram. Seismogram merupakan hasil dari rekaman getaran yang disebabkan oleh penjalaran gelombang seismik dari suatu sumber. Setiap seismogram mengandung informasi yang penting tentang sumber seismik dan medium yang dilewati oleh gelombang. Gelombang yang terekam pada seismogram dapat berupa gelombang P dan gelombang S sebagai gelombang badan, serta gelombang Love dan gelombang Rayleigh sebagai gelombang permukaan (Afnimar, 2009).

Gelombang seismik ini disebut juga sebagai gelombang elastik, karena osilasi pertikel-pertikel medium terjadi akibat interaksi antara gaya gangguan melawan gaya elastik, sehingga dari interaksi tersebut gelombang longitudinal, gelombang transversal dan gelombang akibat kombinasi dari keduanya.

Gelombang seismik ini dapat terjadi akibat gempa bumi alam tektonik maupun vulkanik, selain itu dapat juga terjadi secara buatan (Hamdiana & Ginting, 2012).

Gelombang primer atau gelombang kompresi merupakan gelombang badan (*body wave*) yang memiliki kecepatan paling tinggi dari gelombang S, gelombang ini merupakan gelombang longitudinal partikel yang merambat bolak-balik dengan



arah rambatnya seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.10, gelombang ini terjadi karena adanya tekanan. Karena memiliki kecepatan tinggi gelombang ini memiliki waktu tiba terlebih dahulu dari pada gelombang S (Hidayati, 2010).

## 2.7 Aktivitas Seismik

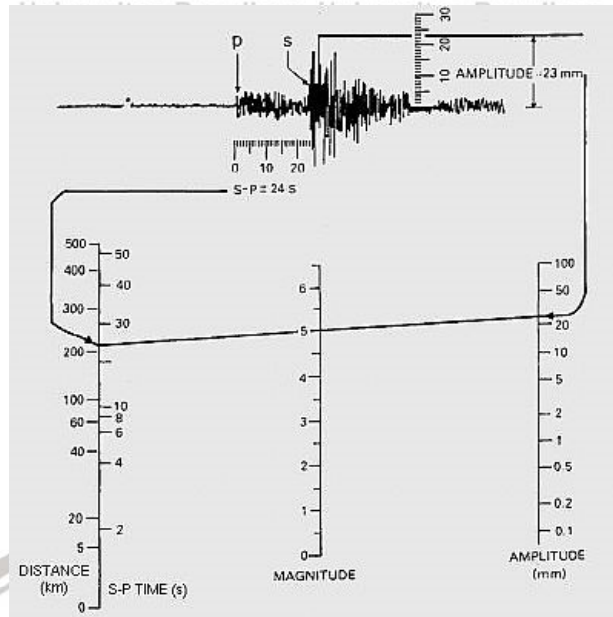
Gempa bumi di sebabkan oleh adanya pelepasan energi regangan elastis batuan pada litosfir. Semakin besar energi yang dilepas semakin kuat gempa yang terjadi. Terdapat dua teori yang menyatakan proses terjadinya gempa yaitu pergeseran sesar dan teori kekenyalan elastis. Gempa bumi di definisikan sebagai getaran yang bersifat alamiah, yang terjadi pada lokasi tertentu, dan sifatnya tidak berkelanjutan. Getaran bumi terjadi akibat dari adanya proses pergeseran secara tiba-tiba (*sudden slip*) pada kerak bumi. Pergeseran secara tiba-tiba terjadi karena adanya sumber gaya (*force*) sebagai penyebabnya, baik bersumber dari alam maupun dari batuan manusia (*artificial earthquakes*). Selain disebabkan oleh *sudden slip*, getaran pada bumi juga bisa disebabkan oleh gejala lain yang sifatnya lebih halus atau berupa getaran kecil-kecil yang sulit dirasakan manusia. Parameter getaran gelombang gempa bumi yang dicatat oleh seismograf umumnya adalah simpangan kecepatan atau *velocity* dalam satuan kine (cm/dtk). Selain *velocity* tentunya parameter yang lain seperti *displacement* (simpangan dalam satuan *micrometer*) dan percepatan (*acceleration* dalam satuan gal atau  $\text{cm/dt}^2$ ) juga bisa ditentukan parameter percepatan gelombang seismik atau sering disebut percepatan tanah merupakan salah satu parameter yang penting dalam seismologi teknik (Novianta & Setyaningsih, 2015).

Magnitudo gempa merupakan karakteristik gempa yang berhubungan dengan jumlah energi total seismik yang dilepaskan sumber gempa. Magnitudo

ialah skala besaran gempa pada sumbernya. Besaran yang digunakan untuk mengukur suatu gempa selain magnitudo adalah intensitas. Intensitas dapat didefinisikan sebagai suatu besarnya kerusakan disuatu tempat akibat gempa bumi yang diukur berdasarkan kerusakan yang terjadi. Harga intensitas merupakan fungsi dari magnitudo, jarak ke episenter, lama getaran, kedalaman gempa. Kondisi tanah dan keadaan bangunan. Skala Intensitas Modifikasi Mercalli (MMI) merupakan skala intensitas yang lebih umum dipakai. Satuan yang biasa digunakan pada gempa bumi adalah skala Richter. Skala Richter ini didefinisikan sebagai logaritma dari amplitudo maksimum, yang diukur dalam satuan *micrometer*, dari rekaman gempa oleh instrumen pengukur gempa (seismometer), pada jarak 100km dari pusat gempa. Dapat dilihat dari gambar 2.15 merupakan tabel sederhana untuk perhitungan Skala Richter (Priyadi & Wijaya, 2011).

Menurut sumber terjadinya, gempa bumi dikelompokkan menjadi:

1. Gempa tektonik adalah gempa bumi yang berasal dari pergeseran lapisan-lapisan batuan sepanjang bidang sesar di dalam bumi.
2. Gempa vulkanik adalah gempa bumi yang berasal dari gerakan magma karena aktivitas gunungapi.
3. Gempa longsor atau runtuh yaitu gempa bumi yang terjadi karena aktivitas runtuh pada daerah pertambangan atau daerah tanah longsor.
4. Gempa buatan adalah getaran gempa bumi yang terjadi karena adanya aktivitas manusia di kulit bumi yang menyebabkan getaran yang cukup kuat.



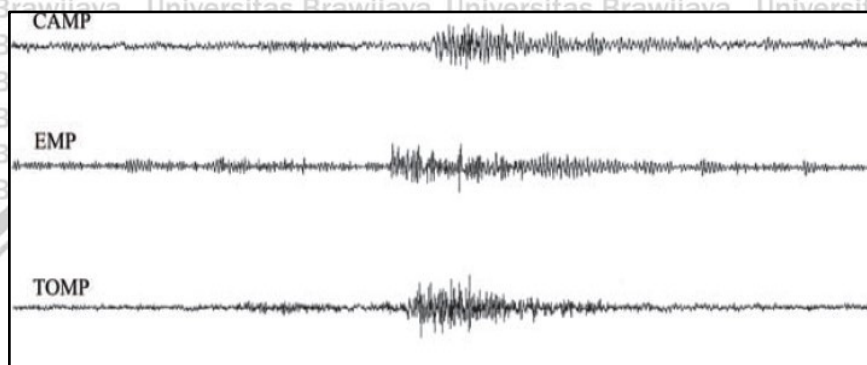
Gambar 2. 15 Perhitungan Skala Richter (Afnimar, 2009)

Gelombang gempa bumi dapat berupa gelombang primer (*p-wave*) dan gelombang sekunder (*s-wave*). Gelombang primer memiliki arah longitudinal terhadap pusat gempa (*focus*), seperti pegas namun memiliki energi yang rendah. Sedangkan gelombang sekunder berarah transversal (tegak lurus gelombang primer), yang memiliki energi lebih kuat. Gelombang primer memiliki kecepatan 1.5 kali lebih cepat daripada gelombang sekunder sehingga gelombang primer datang lebih cepat (Morib, 2013).

### 2.8 Mikroseismik

Gempa bumi mikro adalah gempa bumi yang memiliki nilai magnitudo kecil (kurang dari 2SR) dan gempa bumi ini hanya dapat dirasakan oleh orang-orang yang berada dalam radius 8 km. Gempa mikro sering terjadi pada reservoir *geothermal* yang dipicu oleh terbentuknya rekahan pada batuan reservoir ketika dilakukan injeksi fluida. Sehingga gempa mikro dapat digolongkan sebagai *induced earthquake*.

Gempa bumi mikro merupakan gempa bumi yang memiliki besaran magnitudo kurang dari 3 skala richter. Mempelajari aktivitas gempa bumi mikro pada suatu lokasi panas bumi dapat mengetahui rekahan-rekahan kecil akibat adanya pergerakan fluida (Holland & Holland, 2002). Sebaran zona rekahan tersebut dapat ditunjukkan melalui informasi episenter dan hiposenter. Gambar 2.16 menunjukkan salah satu contoh rekaman data gempa bumi mikro (Wittiri, 2010).



Gambar 2. 16 Seismogram Gempa Bumi Mikro (Wittiri, 2010)

### BAB III

#### KERANGKA KONSEP PEMIKIRAN

Metode seismik merupakan salah satu metode yang sering digunakan dalam seismologi, seperti pemantauan bencana alam dan inspeksi geofisika untuk sumber daya alam. Dalam metode seismik diperlukan sensor untuk memonitoring gelombang seismik yang terjadi di sekitar titik pantai. Salah satu sensor yang sering digunakan adalah sensor Geofon yang telah dikemas menjadi satu rangkaian yang biasa disebut dengan TDS. Sensor tersebut sangatlah besar dan berat, serta rumit pada proses perbaikan.

Fokus pada penelitian ini adalah mengembangkan sistem sensor seismik yang memanfaatkan sensor MEMS *Accelerometer*. Tipe sensor yang digunakan adalah MMA7361L dengan besar sensitivitas  $800\text{mV}/@1.5\text{g}$ . Sensor MEMS ini memiliki 3 sumbu kerja yaitu x, y, dan z, oleh sebab itu sensor ini mampu menerima getaran dari segala arah. Selain itu MEMS *Accelerometer* memiliki beberapa kelebihan yaitu ukuran sensornya yang kecil, simpel, dan mudah diintegrasikan dengan perangkat elektronik yang lain, namun sensor MEMS *Accelerometer* ini juga memiliki kelemahan yaitu hasil dari sensor tersebut masih dalam bentuk tegangan analog, sehingga sensor tersebut perlu diintegrasikan dengan sistem akuisisi data agar sinyal tersebut lebih mudah diolah.

Pengembangan sensor MEMS ini akan dilakukan dengan dua metode yang berbeda yaitu metode MEMS berbasis percepatan dan MEMS berbasis kecepatan.

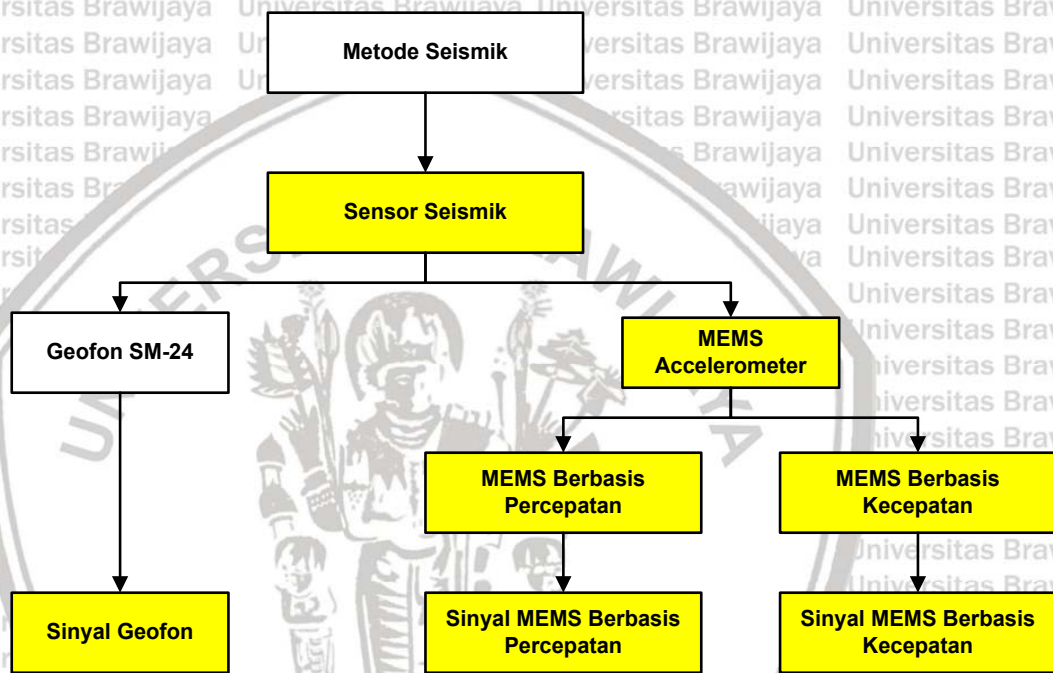
Metode MEMS berbasis percepatan memanfaatkan karakteristik dari MEMS sendiri namun tetap menambahkan pengkondisi sinyal untuk proses filter frekuensi

dan penguatan sinyal. Metode yang kedua yaitu MEMS berbasis kecepatan, dalam metode tersebut pada sensor MEMS ditambahkan sebuah pengkondisi sinyal yang berfungsi merubah sinyal percepatan pada MEMS menjadi sinyal kecepatan.

Proses pada metode yang pertama yaitu MEMS berbasis percepatan, sinyal yang telah terekam oleh sensor nantinya akan dilakukan proses filter frekuensi untuk menentukan besarnya frekuensi gelombang seismik. Sinyal yang telah difilter kemudian dimasukkan pada rangkaian penguatan untuk menguatkan hasil sinyal yang telah difilter. Hasil penguatan sinyal tersebut kemudian ditampilkan pada PC memanfaatkan Picoscope S5000 yang telah terinstal pada PC. Sedangkan metode yang kedua yaitu, memanfaatkan MEMS berbasis kecepatan, sinyal yang telah terekam oleh sensor kemudian dilakukan proses filter frekuensi untuk menentukan frekuensi gelombang seismik, kemudian hasil sinyal di proses pada rangkaian integrator untuk merubah besaran percepatan MEMS menjadi besaran kecepatan. Sinyal yang telah berubah menjadi besaran kecepatan akan dilakukan proses penguatan sinyal dan dilakukan proses filter frekuensi kembali untuk memastikan frekuensi gelombang seismik yang diloloskan.

Hasil sinyal dari kedua metode kemudian dilakukan proses perbandingan dari masing-masing metode yang telah dikembangkan. Dengan adanya proses perbandingan diharapkan dapat mengetahui karakteristik dari masing-masing metode. Selain itu hasil sinyal tersebut akan dibandingkan dengan Geofon SM-24 sebagai acuan pada penelitian ini. Diharapkan untuk kedepannya sensor MEMS *Accelerometer* dapat digunakan sebagai sensor seismik dengan harga yang murah, ringan dan simpel, serta dapat menggantikan Geofon.

Parameter yang perlu diperhatikan pada penelitian ini adalah sensitivitas sensor yang digunakan yaitu MMA7361L sebesar  $800\text{mV/g}@1.5\text{g}$ , Geofon SM-24 dengan sensitivitas  $28.8\text{V/m/s}$ , pemilihan IC pada pengkondisi sinyal dengan *bandwith* frekuensi di atas  $200\text{Hz}$ , serta IC op-amp yang digunakan termasuk dalam katagori *low power* op-amp. Serta perhitungan rangkaian integrator pada metode MEMS berbasis kecepatan.



Gambar 3. 1 Kerangka Konsep Pemikiran

## BAB IV METODE PENELITIAN

### 4.1 Waktu Dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium *Measurement Circuit And System* Jurusan Fisika Universitas Brawijaya Malang selama 10 bulan yaitu dari bulan Agustus 2017 hingga bulan Mei 2018.

### 4.2 Prosedur Penelitian

Supaya penelitian yang dilakukan dapat berjalan dengan baik, maka diperlukan adanya prosedur dalam melakukan penelitian. Prosedur pada penelitian ini di gambarkan oleh diagram alir pada gambar 4.1. Berdasarkan diagram alir tersebut penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur untuk memperoleh informasi dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Informasi yang diperlukan pada penelitian ini adalah karakteristik sensor seismik yang telah banyak digunakan yaitu seismometer dan akselerometer. Pada penelitian ini sensor yang didapatkan adalah seismometer jenis Geofon dengan tipe SM-24. Kemudian dilakukan proses uji respon frekuensi untuk Geofon SM-24. Pengembangan sensor seismik pada penelitian ini memanfaatkan sensor MEMS *Accelerometer* MMA7361L. Dengan adanya pemilihan sensor tersebut, kemudian dilakukan proses uji respon frekuensi untuk MEMS yang digunakan, dengan adanya hasil uji respon dari SM-24 serta MEMS maka proses selanjutnya yaitu proses desain pengkondisis sinyal untuk MEMS, supaya dapat digunakan sebagai sensor seismik.

Pada penelitian ini akan dikembangkan MEMS percepatan dan MEMS kecepatan yang difungsikan pada frekuensi yang berbeda. Numun fokus pada



penelitian ini adalah mengembangkan MEMS sebagai alternatif sensor seismik yang dapat merespon frekuensi sangat rendah hingga frekuensi tinggi. Tahap pertama yaitu membuat desain pengkondisi sinyal untuk MEMS percepatan.

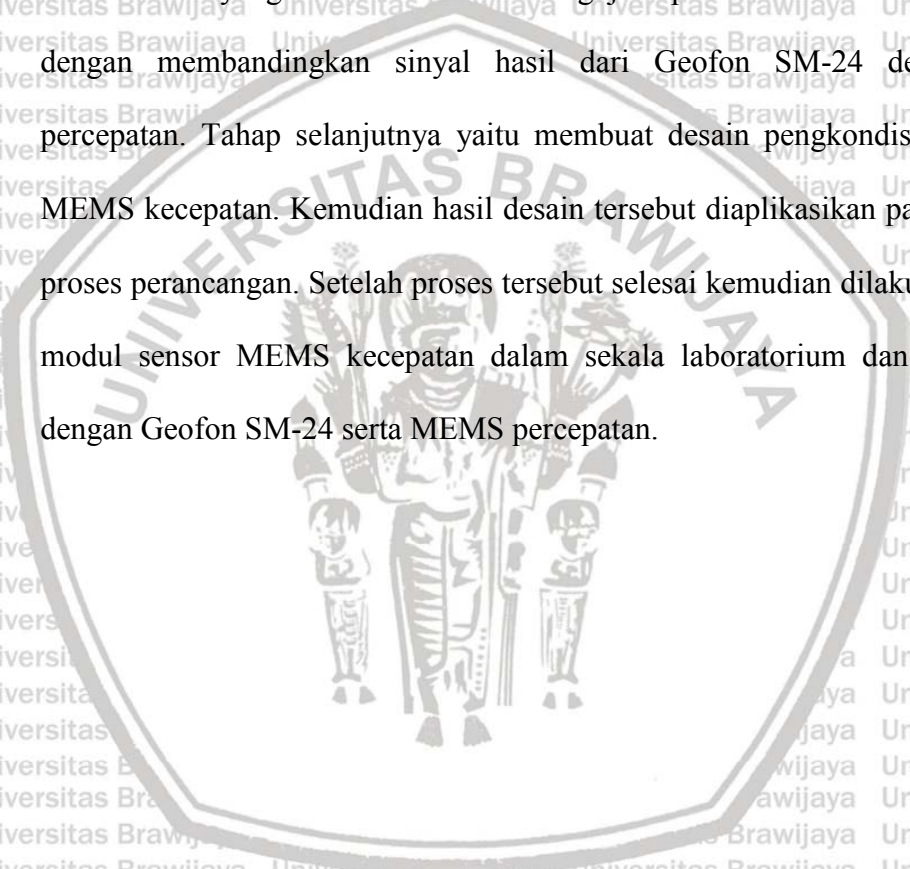
Kemudian dilakukan perancangan pengkondisi sinyal sesuai dengan desain sensor yang telah dibuat. Selanjutnya modul sensor yang telah dilengkapi dengan

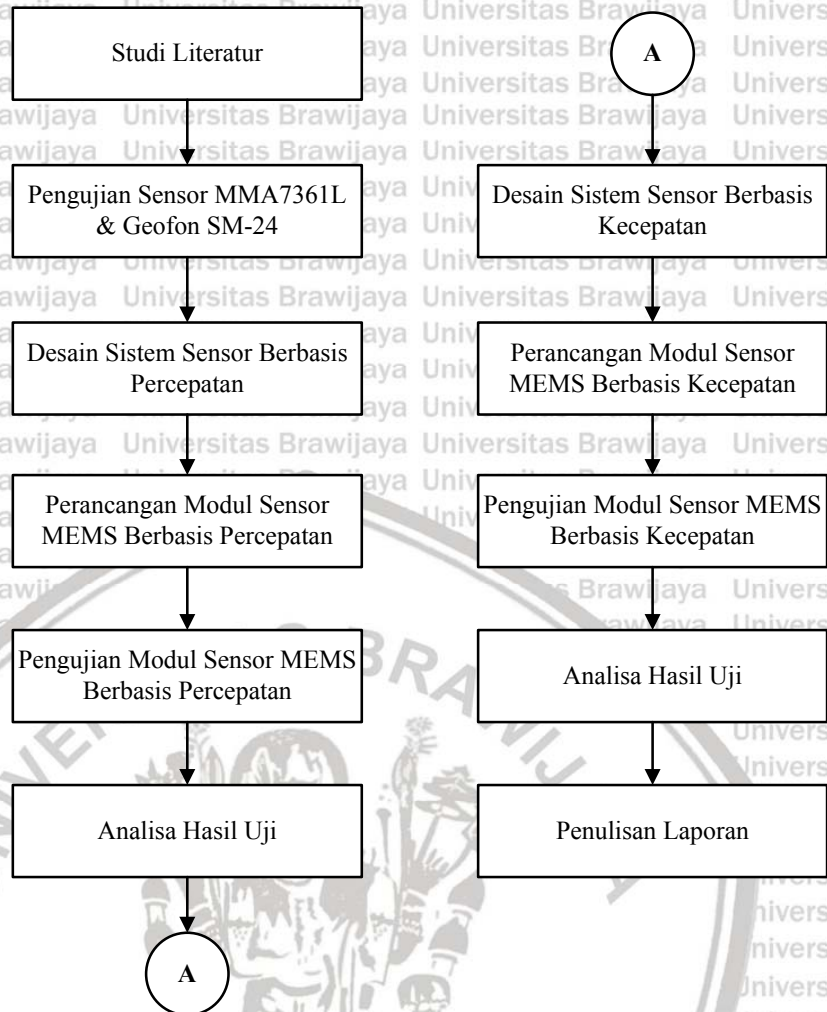
pengkondisi sinyal dilakukan pengujian dalam skala laboratorium dengan kondisi laboratorium yang telah ditentukan. Pengujian pada laboratorium ini dilakukan

dengan membandingkan sinyal hasil dari Geofon SM-24 dengan MEMS percepatan. Tahap selanjutnya yaitu membuat desain pengkondisi sinyal untuk

MEMS kecepatan. Kemudian hasil desain tersebut diaplikasikan pada PCB untuk proses perancangan. Setelah proses tersebut selesai kemudian dilakukan proses uji

modul sensor MEMS kecepatan dalam skala laboratorium dan dibandingkan dengan Geofon SM-24 serta MEMS percepatan.





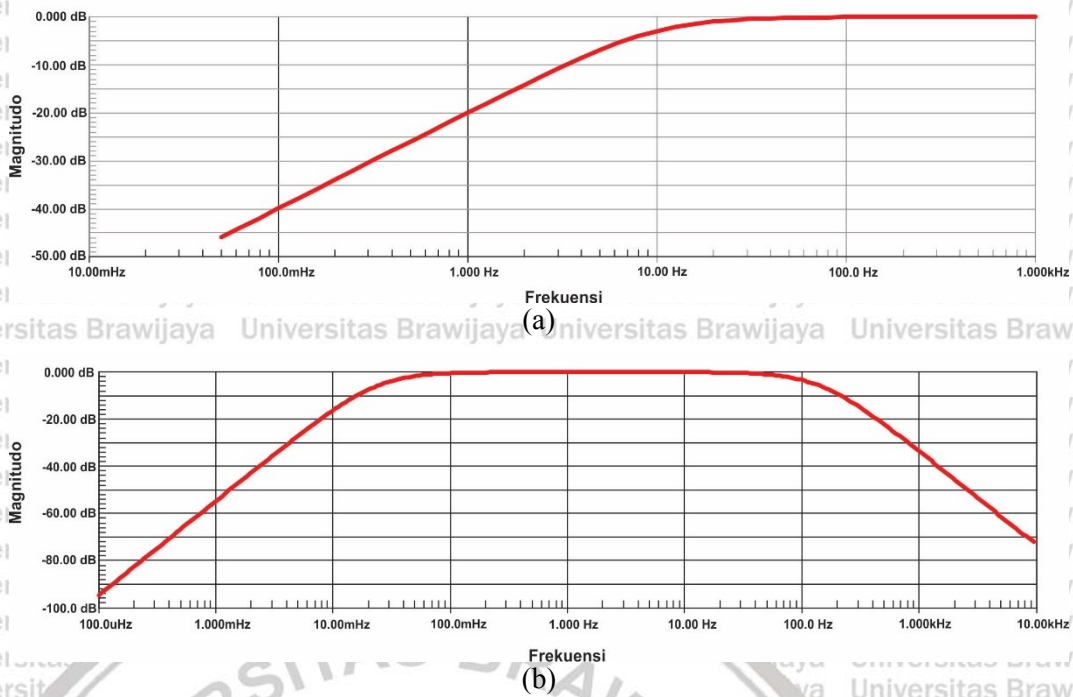
Gambar 4. 1 Diagram Alir Penelitian

### 4.3 Pengujian Sensor MEMS MMA7361L dan Geofon SM-24

Pada penelitian ini dilakukan terlebih dahulu pengujian sensor yang telah dipilih. Pemilihan sensor ditentukan dengan adanya ketersediaan sensor pada pasar komersial. Sensor yang digunakan pada penelitian ini adalah MEMS *Accelerometer* tipe MMA7361L dan Geofon SM-24. Geofon SM-24 merupakan salah satu sensor seismik yang bekerja dengan prinsip elektromagnetik. Sensor tersebut berbentuk seperti tabung dengan diameter 25.4mm dan tinggi 32mm yang diproduksi oleh I/O Sensor Nederland B.V. SM-24 memiliki natural frekuensi 10Hz serta *bandwith* frekuensi 10Hz hingga 240Hz. Selain itu SM-24 memiliki sensitivitas sebesar 28.8

V/m/s (Nederland, 2006). Sedangkan MMA7361L merupakan sensor getaran yang bekerja menggunakan prinsip kapasitansi. Sensor tersebut telah terkemas dalam bentuk *chip* yang dibuat oleh Freescale Semiconductor. Sensor MMA7361L telah dilengkapi dengan pengkondisi sinyal sederhana dan *g-select* untuk memilih dua sensitivitas (1.5g dan 6g) yang telah disediakan, dengan maksimal sensitivitas 800mV/g@1.5g. Selain itu, sensor MMA7361L memiliki 3 komponen kerja secara vertikal dan horizontal (x, y, dan z).

Dengan spesifikasi yang telah dipaparkan kemudian dilakukan simulasi menggunakan *software* Circuit Maker untuk mengidentifikasi respon frekuensi dari masing-masing sensor dan juga dilakukan pengujian sensor secara langsung dengan memanfaatkan Picoscope S5000 (Lampiran 1). Pada penelitian ini Geofon SM-24 merupakan sensor acuan yang digunakan untuk mengembangkan sensor seismik. Hasil simulasi dari Geofon SM-24 dan MMA7361L dapat dilihat pada gambar 4.2. Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat bahwa Geofon SM-24 mampu merespon frekuensi mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Sedangkan MMA7361L mampu merespon frekuensi mulai dari 0.01Hz hingga 100Hz. Hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa Geofon tidak mampu mendeteksi frekuensi rendah dibawah 10Hz, sedangkan MMA7361L mampu mendeteksi frekuensi rendah hingga frekuensi tinggi. Ketidakmampuan Geofon merespon frekuensi dibawah 10Hz dikarenakan sinyal yang direkam oleh Geofon dilewatkan secara *high pass* untuk mengurangi *noise* disekitar sensor yang memiliki frekuensi rendah. Sehingga *bandwith* tidak dapat diperluas ke frekuensi rendah. Ketidakmampuan tersebut menjadi peluang untuk sensor MMA7361L yang memiliki respon frekuensi dengan *bandwith* yang lebih lebar.

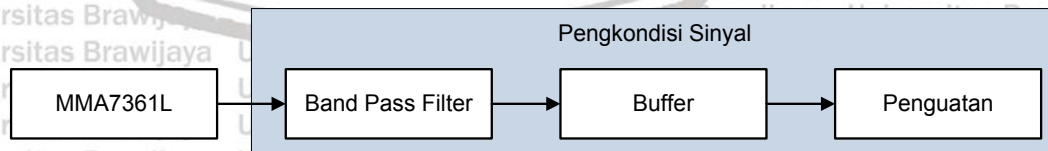


Gambar 4.2 Respon Frekuensi (a) Geofon SM-24 (b) MMA7361L

#### 4.4 Desain Sistem Sensor MEMS Percepatan

Sensor MEMS dapat dikembangkan menjadi sebuah sensor seismik, namun harus dilengkapi dengan sebuah pengkondisi sinyal. Gambar 4.3 menunjukkan diagram blok dari sistem pengkondisi sinyal yang dibutuhkan oleh sensor MEMS.

Berdasarkan gambar 4.3 getaran yang diterima oleh sensor direkam sebagai sinyal. Kemudian sinyal tersebut dikondisikan oleh pengkondisi sinyal yang terdiri dari BPF, *buffer* dan penguatan.



Gambar 4.3 Diagram Blok Sistem Sensor MEMS Percepatan

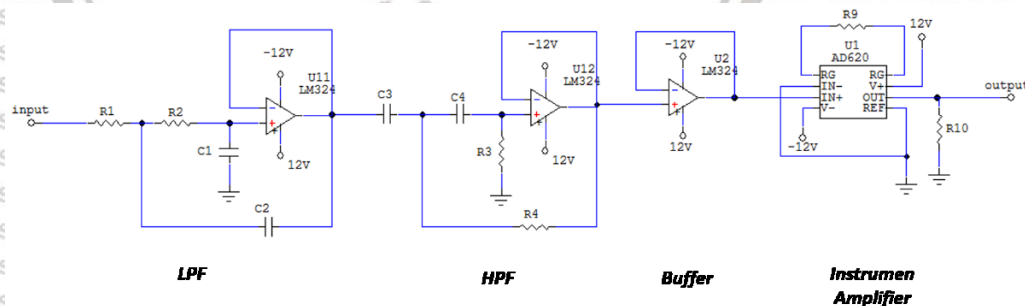
Desain diagram blok pada gambar 4.3 diimplementasikan dengan membuat desain rangkaian pengkondisi sinyal seperti yang ditampilkan pada gambar 4.4.

Rangkaian pengkondisi sinyal untuk MMA7361L terdiri dari rangkaian *Band Pass*

Filter (BPF) yang dibangun dari rangkaian *Low Pass Filter* (LPF) dan *High Pass Filter* (HPF), rangkaian *buffer* dan rangkaian penguatan yang memanfaatkan *Instrumen Amplifier* (IA). Rangkaian BPF yang terdiri dari LPF dan HPF dibangun dengan memanfaatkan IC LM324 yang tergolong IC *low power* yang dapat bekerja dengan *single supply*. IC tersebut memiliki *gain* hingga 100dB dan lebar *bandwidth* hingga 1MHz. Selain itu LM324 dibangun dari 4 buah *operational amplifier* yang telah tergabung menjadi satu *chip* IC (Circuited dkk., 2002). Rangkaian ini digunakan untuk proses filter frekuensi sesuai dengan yang dibutuhkan. Untuk menentukan nilai frekuensi dari LPF ( $f_{C-LPF}$ ) maupun HPF ( $f_{C-HPF}$ ) masing-masing ditentukan berdasarkan persamaan 4.1 dan 4.2, dengan menentukan besar nilai dari ( $R_1, R_2, C_1, C_2$ ) dan ( $C_3, C_4, R_3, R_4$ ) maka nilai frekuensi dari masing-masing rangkaian menjadi lebih spesifik.

$$f_{C-LPF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \tag{4.1}$$

$$f_{C-HPF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}} \tag{4.2}$$



Gambar 4.4 Rangkaian Desain Sistem Sensor Berbasis Percepatan

Rangkaian BPF kemudian dihubungkan dengan rangkaian penguat yang memanfaatkan IC *instrument amplifier*. Rangkaian *instrument amplifier* ini

berfungsi untuk menguatkan tegangan yang masuk. Rangkaian tersebut dibangun dengan menggunakan IC AD620 yang memiliki kemampuan gain hingga 10.000 kali serta termasuk dalam kategori *instrument amplifier low noise* (Device, 2011).

Nilai penguatan pada rangkaian *instrument amplifier* ditentukan oleh nilai resistor tertentu sebagai variabel nilai penguatan. Berdasarkan rangkaian pada gambar 4.4

resistor variabel yang digunakan adalah  $R_g$ . Nilai resistor variabel diperoleh dengan menerapkan persamaan 4.3 berikut

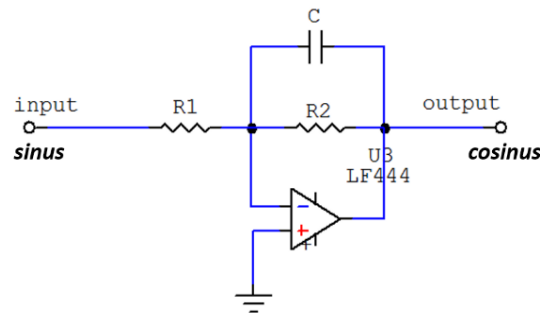
$$A_v = \frac{49.4k\Omega}{R_g} + 1 \quad (4.3)$$

Kemudian setelah ditentukan nilai penguatan sinyal maka sinyal keluaran akan dihubungkan dengan Picoscope S5000 yang telah terinstal pada PC untuk menampilkan hasil sinyal yang telah diolah.

#### 4.5 Desain Sistem Sensor MEMS Kecepatan

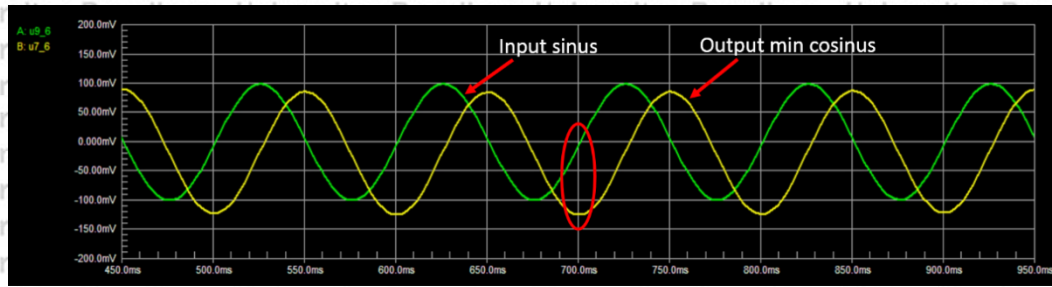
Pengembangan sensor seismik pada penelitian ini juga digunakan metode alternatif lain untuk mengimplementasikan MEMS MMA7361L sebagai sensor seismik, yaitu dengan mendesain sensor MEMS sebagai sensor seismik berbasis kecepatan. Desain sistem sensor ini tetap mengacu pada hasil simulasi pada gambar 4.2. Namun pada pengembangan sensor MEMS kecepatan dibutuhkan sebuah rangkaian yang dapat mengubah besaran percepatan menjadi besaran kecepatan.

Salah satu rangkaian yang dapat digunakan ialah rangkaian integrator. Rangkaian integrator tersebut mampu melakukan proses integral terhadap sinyal masukan yang berupa percepatan menjadi kecepatan pada keluarannya.



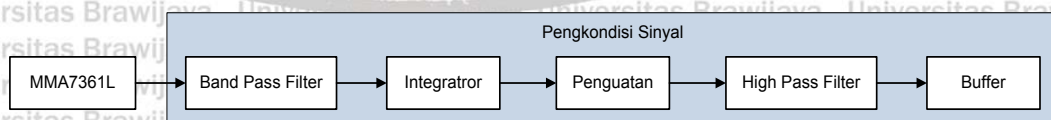
Gambar 4.5 Rangkaian Integrator

Sebelum membuat desain rangkaian terlebih dahulu dilakukan simulasi untuk rangkaian integrator untuk memastikan rangkaian tersebut dapat digunakan dalam proses pengembangan sensor seismik pada penelitian ini. Rangkaian yang digunakan pada proses simulasi ditampilkan pada Gambar 4.5. Proses simulasi menggunakan *software* Circuit Maker. Hasil simulasi tersebut digunakan untuk melihat bagaimana respon dari rangkaian integrator yang digunakan serta melihat perubahan sinyal keluaran pada rangkaian integrator. Konsep dari rangkaian integrator telah dipaparkan pada Bab 2, yang menyatakan apabila masukan berupa sinyal sinus jika integralkan akan menjadi sinyal minus cosinus yang artinya rangkaian tersebut mampu merubah sinyal masukan yang berupa sinyal percepatan menjadi sinyal kecepatan pada keluarannya. Hasil dari simulasi rangkaian integrator ditunjukkan oleh Gambar 4.6 tampak bahwa sinyal berwarna hijau merupakan sinyal masukan pada rangkaian integrator dalam hal ini sinyal masukan pada rangkaian integrator merupakan sinyal yang memiliki besaran percepatan, sedangkan sinyal berwarna kuning merupakan sinyal keluaran dari rangkaian integrator yang telah menjadi sinyal dengan besaran kecepatan.



Gambar 4.6 Hasil Simulasi Rangkaian Integrator menggunakan Circuit Maker

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, maka pada penlaitian ini dilakukan pengembangan pengkondisi sinyal dengan membuat diagram blok pengkondisi sinyal yang telah disajikan pada Gambar 4.7. Sensor yang digunakan tetap sama yaitu MEMS MMA7361L yang berfungsi mendeteksi getaran yang ada disekeliling sensor kemudian keluaran dari sensor akan dihubungkan dengan pengkondisi sinyal. Sinyal yang direkam oleh sensor kemudian dilakukan proses filtering untuk menyaring frekuensi sinyal yang masuk, setelah itu keluaran dari filter akan dihubungkan dengan rangkaian integrator sebagai komponen utama pada pengkondisi sinyal yaitu mengubah sinyal masukan yang berupa besaran percepatan menjadi besaran kecepatan. Kemudian keluaran dari integrator dihubungkan ke dalam rangkaian penguatan yang memanfaatkan gain rangkaian integrator. Keluaran dari *integrator amplifier* dihubungkan dengan rangkaian filter frekuensi serta *buffer*.



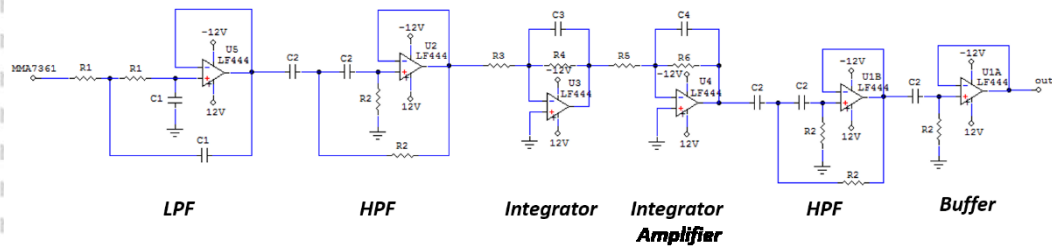
Gambar 4.7 Diagram Blok Sistem Sensor Berbasis Kecepatan

Hasil desain diagram blok Gambar 4.7 kemudian diimplementasikan dengan membuat desain rangkaian menggunakan *software* Circuit Maker.

Pengembangan rangkaian pengkondisi sinyal untuk MMA7361L telah disajikan



pada rangkaian Gambar 4.8. Rangkaian tersebut terdiri dari rangkaian *Band Pass Filter* (BPF) yang dibangun dari rangkaian *Low Pass Filter* (LPF) dan *High Pass Filter* (HPF), rangkaian integrator, rangkaian penguatan yang memanfaatkan rangkaian integrator, rangkaian HPF dan yang terakhir adalah rangkaian *buffer*.



Gambar 4.8 Rangkaian Sistem Sensor Berbasis Kecepatan

Rangkaian BPF yang terdiri dari LPF dan HPF dibangun dengan memanfaatkan IC LF444 yang tergolong ke dalam IC *low power op-amp* serta memiliki *bandwith* hingga 1MHz, selain itu LF444 ini dibangun dari 4 op-amp dalam satu *chip* IC (Texas Instruments, 1995). Rangkaian LPF dan HPF pada rangkaian BPF didesain berdasarkan filter *Sallen-key* orde 2. Rangkaian ini digunakan untuk proses penyaringan frekuensi yang diinginkan. Nilai frekuensi

LPF ( $f_{c-LPF}$ ) dan HPF ( $f_{c-HPF}$ ) masing-masing ditentukan berdasarkan persamaan

4.4 dan 4.5 Selain itu, nilai frekuensi yang ditentukan menjadi lebih spesifik dengan menentukan nilai dari ( $R_1, C_1$ ) dan ( $R_2, C_2$ ).

$$f_{c-LPF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_1 C_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (4.4)$$

$$f_{c-HPF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_2 C_2 C_2}} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad (4.5)$$

Rangkaian BPF kemudian dihubungkan dengan rangkaian integrator.

Rangkaian integrator ini berfungsi untuk mengubah sinyal dengan besaran

percepatan menjadi sinyal dengan besaran kecepatan sesuai dengan simulasi pada Gambar 4.6. Pada penelitian ini rangkaian integrator dibangun dengan menggunakan IC LF444 sama seperti pada rangkaian LPF dan HPF. Kemudian keluaran dari integrator dihubungkan dengan rangkaian *integrator amplifier* yang berfungsi untuk menguatkan tegangan yang berasal dari rangkaian integrator.

Rangkaian *integrator amplifier* ini juga dibangun menggunakan IC LF444. Untuk menentukan besarnya penguatan diberikan pada persamaan 4.6. Dengan menentukan nilai dari  $(R_5, R_6)$  maka nilai penguatan yang diinginkan lebih spesifik.

$$A_v = \frac{R_6}{R_5} \quad (4.6)$$

Selanjutnya tegangan keluaran dari *integrator amplifier* dihubungkan dengan rangkaian HPF yang berfungsi untuk meloloskan frekuensi tinggi, serta mereduksi *noise-noise* mekanik yang masuk dan yang terakhir terdapat rangkaian *buffer* yang berfungsi untuk penyangga tegangan agar tegangan tetap stabil.

Keluaran dari rangkaian pengkondisi sinyal akan dihubungkan ke Picoscope tipe S5000 dengan 4 kanal yang seluruh proses kerja picoscope dikendalikan oleh *software* yang telah terinstal pada komputer.

#### 4.6 Uji Laboratorium

Setiap proses pembuatan sebuah instrumen perlu dilakukan proses pengujian dalam laboratorium. Proses pengujian menggunakan perlengkapan yang telah tersedia di laboratorium. Beberapa pengujian yang dilakukan antara lain pengujian pengkondisi sinyal masing-masing pengembangan MEMS menggunakan *signal generator* dan pengujian hasil pengembangan sensor dibandingkan dengan Geofon SM-24.

#### 4.6.1 Pengujian Menggunakan *Signal Generator*

Pengujian masing-masing pengembangan sensor dilakukan untuk melihat respon rangkaian pengkondisi sinyal yang telah dikembangkan. Proses pengujian rangkaian pengkondisi sinyal ini memanfaatkan picoscope S5000 yang telah tersedia dilaboratorium. Rangkaian pengkondisi sinyal yang telah terintegrasi pada masing-masing pengembangan (MEMS percepatan dan MEMS kecepatan) pada pin masukan akan diberi masukan menggunakan *signal generator* dengan frekuensi yang bervariasi, mulai dari 300mHz hingga 500Hz. Sinyal masukan tersebut nantinya akan diolah pada rangkaian yang telah terintegrasi dan akan ditampilkan pada PC oleh Picoscope S5000 yang telah terinstal pada PC.

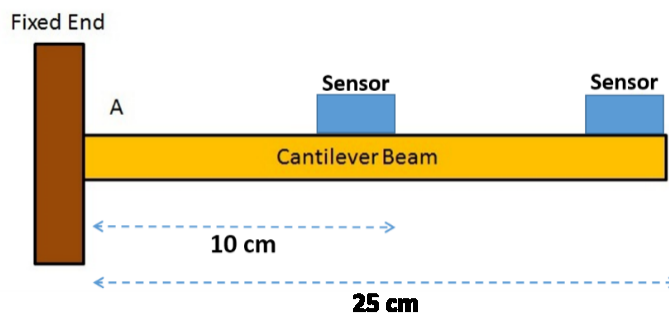
#### 4.6.2 Pengujian Menggunakan *Cantilever beam*

Setelah melakukan pengujian dengan menggunakan *signal generator* kemudian dilakukan pengujian menggunakan *cantilever beam* yang telah tersedia pada laboratorium. Sensor MEMS MMA7361L kemudian dihubungkan dengan rangkaian pengkondisi sinyal melalui pin masukan rangkaian pengkondisi sinyal. Konfigurasi pengujian laboratorium menggunakan *cantilever beam* dapat dilihat pada Gambar diagram blok 4.9. Tampak pada gambar sensor MEMS yang telah dilengkapi dengan rangkaian pengkondisi sinyal dihubungkan dengan Picoscope S5000 yang telah terinstal pada PC dan kemudian sinyal keluaran akan ditampilkan pada layar PC.



Gambar 4.9 Diagram Blok Pengujian Laboratorium

Pengujian pada *cantilever beam* ini terdapat beberapa variasi yang dilakukan yaitu, pengujian MEMS percepatan dengan MEMS kecepatan, MEMS percepatan dengan Geofon SM-24, dan pengujian MEMS kecepatan dengan Geofon. Pengujian menggunakan Geofon berfungsi untuk melihat respon frekuensi MEMS yang mampu direspon dibandingkan dengan Geofon SM-24. Proses pengujian dengan memanfaatkan *cantilever beam* telah digambarkan pada Gambar 4.10, dimana dilakukan pengujian pada dua posisi. Perlakuan tersebut digunakan untuk menghasilkan frekuensi rendah (25cm) dan frekuensi tinggi (10cm). Untuk menghasilkan getaran poin A ditekan kebawah secara perlahan kemudian dilepas dengan cepat maka *cantilever beam* akan berayun (bergetar) ke atas – ke bawah.

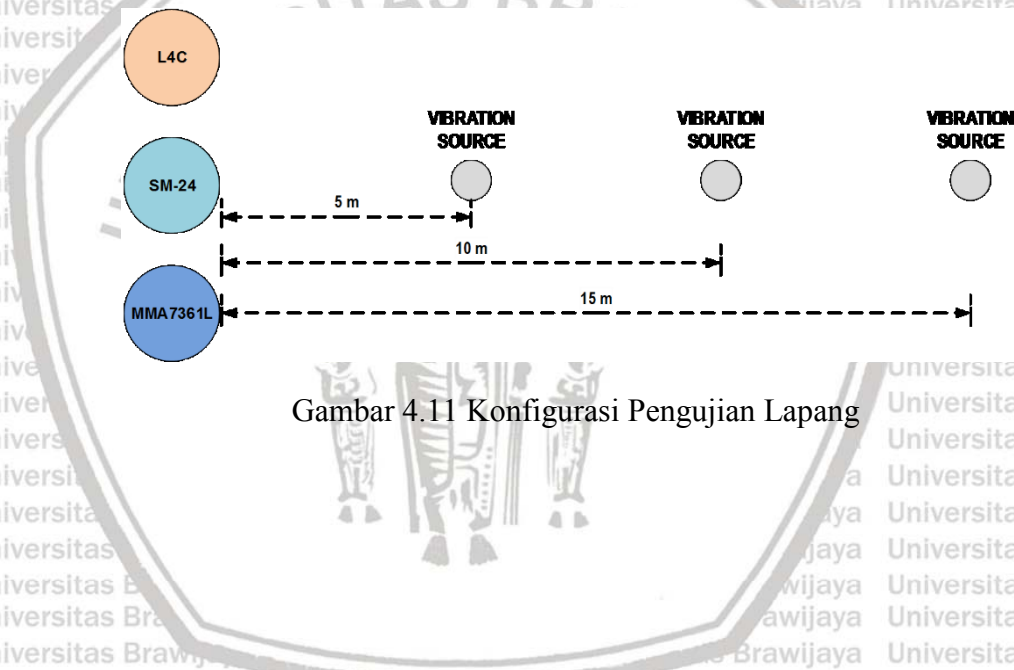


Gambar 4.10 Konfigurasi Media Uji Sensor

#### 4.7 Pengujian Lapangan

Proses pengembangan sensor setelah melalui uji laboratorium perlu dilakukan pengujian lapang untuk melihat kemampuan hasil pengembangan sensor tersebut. Pengujian lapang dilakukan pada Laboratorium Vulkanologi dan Geothermal Cangar, Batu. Konfigurasi pengujian lapang telah digambarkan pada Gambar 4.11. Proses pengujian lapang pada penelitian ini memanfaatkan sensor Geofon L4C dan Geofon SM-24 sebagai pembanding. L4C merupakan salah satu seismometer berbasis kecepatan yang digunakan untuk mendeteksi frekuensi

rendah yang sensitivitas sebesar 166.54 V/m/s dengan kemampuan mendeteksi diatas 1Hz (Lampiran 6). Selain menggunakan L4C juga digunakan SM-24, sensor tersebut sering digunakan untuk eksplorasi. Sensor SM-24 ini bekerja berbasis kecepatan dengan sensitivitas sebesar 28.8 V/m/s serta mampu mendeteksi getaran dengan frekuensi di atas 10Hz (Lampiran 7). Dengan adanya sensor pembandingan tersebut diharapkan hasil pengembangan sensor tersebut dapat mendekati dengan sensor yang telah ada dan sering digunakan seperti L4C dan SM-24. Pengujian lapang digunakan sumber getaran yang berasal dari lompatan manusia, dalam konfigurasi sumber getaran dihasilkan mulai dari jarak 15m, 10m, dan 5m.



Gambar 4.11 Konfigurasi Pengujian Lapang

## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

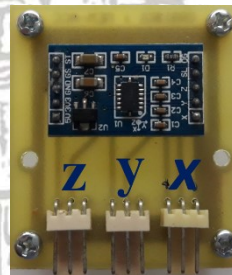
#### 5.1 Hasil Perancangan Sistem Sensor Seismik

##### 5.1.1 Sistem Sensor MEMS Percepatan

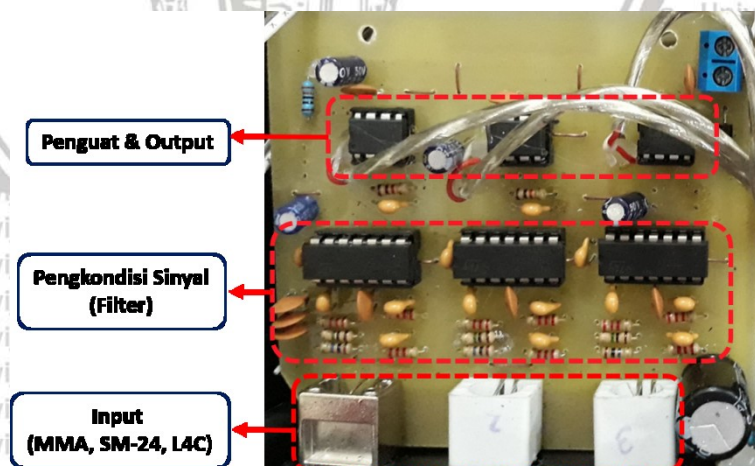
Hasil desain rangkaian sistem sensor berbasis percepatan telah digambarkan pada Bab 4 (gambar 4.4) kemudian hasil desain tersebut diimplementasikan kedalam cetakan PCB yang telah ditampilkan pada Gambar 5.1. MEMS MMA7361L merupakan sebuah modul yang telah di fabrikasi oleh Freescale Semiconductor yang kemudian harus dibuatkan pin keluaran dengan menggunakan PCB (gambar 5.1a). Pin out pada MMA7361L terdiri dari pin keluaran x, y dan z, setiap pin keluaran dilengkapi dengan sumber tegangan (ground dan 5V). Setiap pin keluaran MEMS MMA7361L dihubungkan dengan rangkaian pengkondisi sinyal yang telah dicetak ke dalam PCB (Gambar 5.1b). Hasil perancangan PCB dari pengkondisi sinyal memiliki tiga pin masukan untuk masing-masing keluaran pada MEMS MMA7361L.

Modul pengkondisi sinyal (gambar 5.1b) terdiri dari pengkondisi sinyal komponen x, y, dan z. Setiap pengkondisi sinyal terdiri dari BPF, *buffer* dan penguatan sesuai dengan desain pada Bab 4 (gambar 4.4). Untuk menentukan kinerja dari pengkondisi sinyal kemudian dilakukan penentuan nilai dari  $R_1 = R_2 = 3.3k\Omega$ ,  $C_1 = C_2 = 10\mu F$ , dengan menggunakan persamaan 4.1 didapatkan nilai *cut-off* frekuensi LPF sekitar 146Hz, sehingga frekuensi yang dapat lolos pada rangkaian ini adalah dibawah 146Hz serta menentukan nilai dari

$R_3 = R_4 = 680k\Omega, C_3 = C_4 = 10\mu F$ , dengan menggunakan persamaan 4.2 didapatkan nilai *cut-off* frekuensi HPF sekitar 0.02Hz, sehingga frekuensi yang dapat lolos pada rangkaian ini adalah frekuensi diatas 0.02Hz. Dengan demikian *bandwith* frekuensi yang dapat lolos pada rangkaian ini adalah 0.02Hz hingga 146Hz. Selain menentukan *cut-off* frekuensi juga ditentukan besar penguatan tegangan yang diinginkan. Pada pengkondisi sinyal digunakan IC penguat instrumentasi AD620 yang hanya memerlukan satu resistor untuk variabel penguatan. Pada penelitian ini digunakan 3 variabel resistor yang tersambung dengan *switch* agar dapat dipilih nilai penguatannya, dengan menentukan  $R_5 = 5k\Omega$  (20dB),  $R_6 = 1.8k\Omega$  (30dB), dan  $R_7 = 1k\Omega$  (34dB) nilai tersebut dapat dipilih sesuai dengan kebutuhan.



(a)

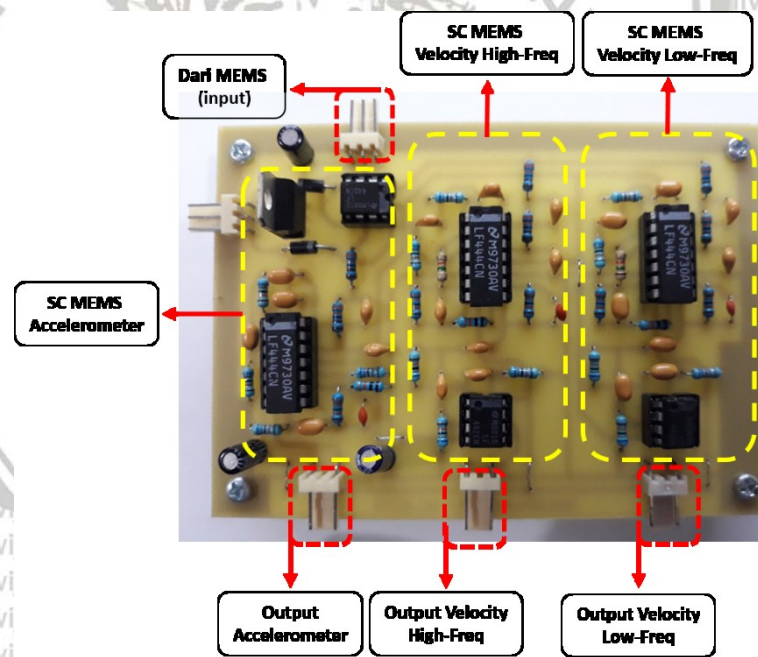


(b)

Gambar 5.1 Hasil Rancangan (a) MMA7361L, (b) Pengkondisi Sinyal Sistem Sensor Seismik Berbasis Percepatan

### 5.1.2 Sistem Sensor MEMS Kecepatan

Hasil desain rangkaian sistem sensor seismik berbasis kecepatan telah digambarkan pada Bab 4 (gambar 4.8) kemudian diimplementasikan kedalam cetakan PCB yang telah ditampilkan pada Gambar 5.2. Sensor yang digunakan pada sistem ini tetap sama yaitu MEMS MMA7361L yang telah ditampilkan pada gambar 5.1a. Modul pengkondisi sinyal (gambar 5.2) terdiri dari pengkondisi sinyal MEMS kecepatan *cut-off* tinggi serta MEMS kecepatan *cut-off* rendah. Setiap rangkaian pengkondisi sinyal tersebut terdiri dari BPF (LPF dan HPF), integrator, penguat integrator, HPF, dan *buffer*. Kecuali pada rangkaian pengkondisi sinyal MEMS percepatan tidak dilengkapi oleh rangkaian integrator dikarenakan rangkaian ini digunakan sebagai pembanding.



Gambar 5.2 Hasil Rancangan Sistem Sensor MEMS Kecepatan

Beberapa simulasi dilakukan kembali untuk menentukan kinerja dari sistem sensor yang telah dibangun berdasarkan rangkaian pada Gambar 4.8. Untuk menentukan kinerja modul ini dilakukan dengan mengatur nilai-nilai dari



$R_1 = 3.3k\Omega$ ;  $C_1 = 330nF$ ;  $R_2 = 680k\Omega$  dan  $C_2 = 10\mu F$ . Berdasarkan persamaan 4.4 maka nilai frekuensi *cut-off* LPF sekitar 146Hz dan dengan persamaan 4.5 nilai frekuensi *cut-off* HPF sekitar 0.02Hz. Dengan hasil tersebut sistem sensor memiliki rentang frekuensi 0.02Hz hingga 146Hz. Rentang frekuensi ini digunakan untuk rangkaian pengkondisi sinyal MEMS kecepatan *cut-off* rendah. Sedangkan untuk rangkaian pengkondisi sinyal MEMS kecepatan *cut-off* tinggi dengan nilai  $R_1 = 3.3k\Omega$ ;  $C_1 = 330nF$ ;  $R_2 = 680k\Omega$  dan  $C_2 = 10\mu F$  memiliki rentang frekuensi 0.2Hz hingga 146Hz. Sementara penguatan tegangan sinyal pada penelitian ini mengacu pada persamaan 4.6 yaitu dengan mengatur nilai  $R_5 = 10k\Omega$  dan  $R_6 = 330k\Omega$  sehingga penguatan yang diperoleh sebesar 33kali (30dB).

## 5.2 Uji Laboratorium

### 5.2.1 Hasil Pengujian Menggunakan *Signal Generator*

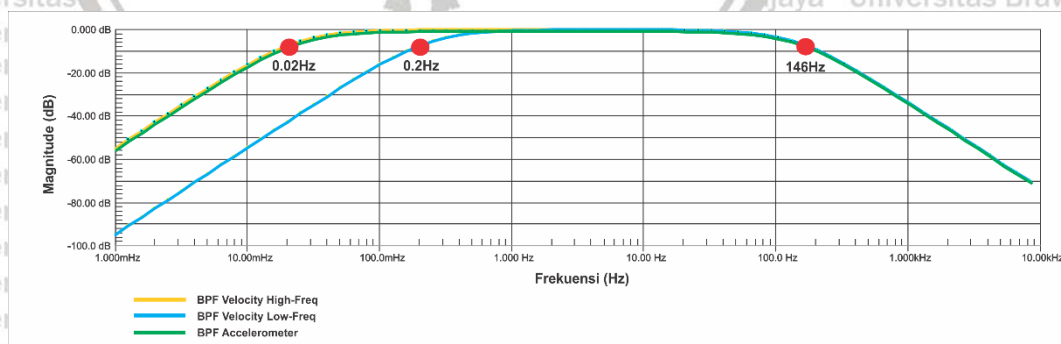
Pengujian rangkaian menggunakan *signal generator* merupakan komponen penting dalam setiap pembuatan sebuah sistem instrumen. Pada penelitian ini pengujian akan dilakukan dengan memberikan masukan menggunakan *signal generator* dari Picoscope S5000 dengan besar tegangan masukan 1V serta variasi frekuensi mulai dari 300mHz hingga 500Hz. Gambar 5.3 merupakan konfigurasi pengujian sistem menggunakan *signal generator*. Tampak pada gambar rangkaian yang telah diaplikasikan pada PCB dihubungkan dengan Picoscope S5000, pin masukan pada rangkaian dihubungkan dengan *signal generator* untuk memberikan masukan serta untuk pin keluaran dihubungkan dengan picoscope S5000 yang berfungsi sebagai penampil pada PC. Untuk mengatur frekuensi yang masuk dapat diatur melalui PC yang telah terinstal oleh picoscope S5000.



Gambar 5.3 Konfigurasi Pengujian Menggunakan *Signal Generator*

Pengujian menggunakan *signal generator* dilakukan pada beberapa rangkaian. Pengujian pertama dilakukan pada rangkaian *Band Pass Filter*.

Rangkaian filter merupakan salah satu komponen penting dalam pengkondisi sinyal, karena rangkaian filter berfungsi untuk memilah frekuensi yang dapat lolos dan dapat diproses ke dalam tahap selanjutnya. Pada penelitian ini filter yang digunakan adalah jenis filter aktif yang memanfaatkan op-amp, dengan menggunakan desain filter Sallen Key orde 2. Pada hasil desain sebelumnya telah ditentukan nilai dari  $R$  dan  $C$  untuk masing-masing rangkaian. Setelah ditentukan nilainya, didapatkan nilai frekuensi yang dapat lolos pada rangkaian BPF sebesar 0.02Hz hingga 146Hz, nilai *cut-off* frekuensi ini didesain untuk seluruh rangkaian sistem sensor. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, maka akan dilakukan uji menggunakan simulasi Circuit Maker dan sinyal generator.



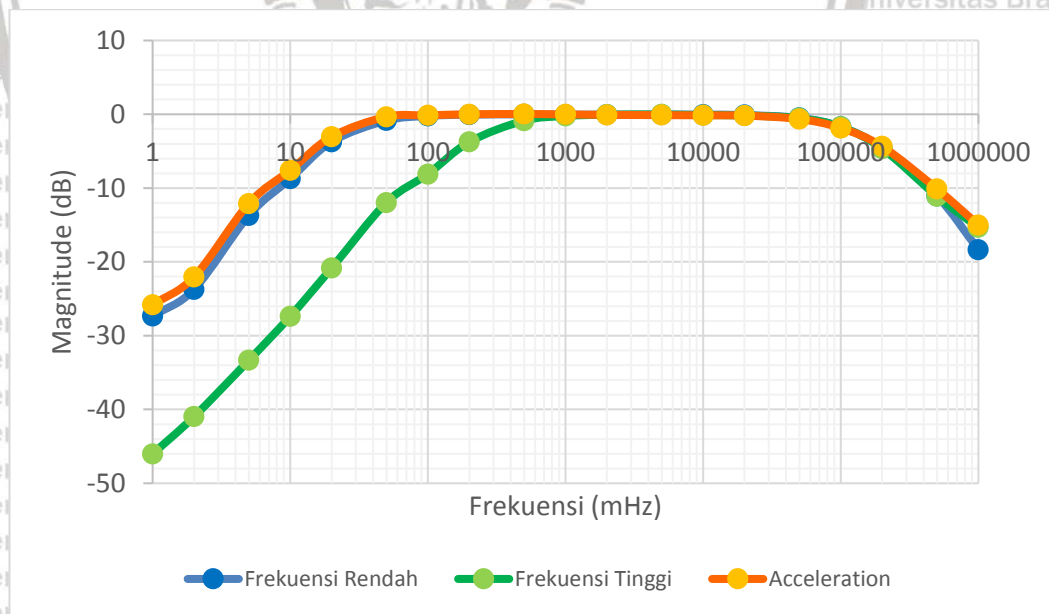
Gambar 5.4 Hasil Uji Simulasi Circuit Maker untuk rangkaian BPF

Hasil pengujian rangkaian BPF menggunakan simulasi Circuit Maker ditunjukkan pada gambar 5.4. Pada gambar terlihat bahwa terdapat 3 grafik yang

terbentuk. Tiga grafik tersebut di ambil melalui tiga rangkaian BPF MEMS percepatan, MEMS kecepatan *cut-off* rendah, dan MEMS kecepatan *cut-off* tinggi.

Tanda warna merah merupakan frekuensi *cut-off* (-3dB) berdasarkan hasil simulasi, tanda tersebut menunjukkan bahwa rangkaian yang diujikan menggunakan simulasi telah sesuai dengan perhitungan sebelumnya, dengan nilai *cut-off* sekitar 0.02Hz-146Hz untuk MEMS percepatan serta MEMS *cut-off* rendah dan 0.2Hz -146Hz untuk *cut-off* tinggi.

Kemudian dilakukan pengujian pada rancangan menggunakan *signal generator* pada Picoscope S5000. Proses pengujian dilakukan dengan memberikan input melalui sinyal generator dengan masukan tegangan 1V dengan rentang frekuensi 300 mHz hingga 500Hz. Pada setiap frekuensi *peak* sinyal pada *display* picoscope di catat yang kemudian di plot menggunakan Ms.Excel. Hasil pengujian hasil rancangan BPF ditunjukkan pada gambar 5.5.



Gambar 5.5 Hasil Uji Rangkaian BPF

Berdasarkan hasil plotting menggunakan Ms.Excel hasil pengujian tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil menggunakan simulasi. Pada gambar dapat dilihat

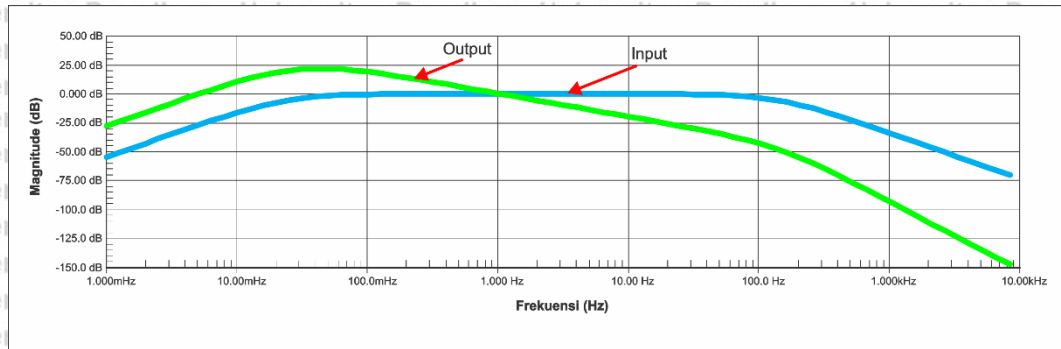
grafik dengan warna merah dan biru memiliki *cut-off* (-3dB) pada frekuensi 0.02Hz hingga 146Hz, sedangkan grafik berwarna hijau memiliki *cut-off* (-3dB) pada frekuensi 0.2Hz hingga 146Hz. Hasil tersebut serupa dengan hasil simulasi dan hasil perhitungan yang telah dilakukan.

Setelah melakukan pengujian pada rangkaian filter, kemudian dilakukan pengujian rangkaian integrator pada rangkaian pengkondisi sinyal MEMS kecepatan. Rangkaian integrator menghasilkan integral dari sinyal input selama rentang frekuensi tertentu. Sinyal masukan diaplikasikan pada masukan pembalik, sehingga keluaran relatif terhadap polaritas sinyal masukan. Sifat rangkaian integrator yang digunakan pada penelitian ini adalah *Low Pass Integrator* yang memiliki fungsi sama seperti filter frekuensi. Pada rangkaian integrator pada frekuensi rendah akan mengalami penguatan, sedangkan ketika frekuensi tinggi akan mengalami pelemahan sehingga hasil dari pengujian rangkaian integrator ditunjukkan pada Gambar 5.6. Berdsarkan hasil tersebut sesuai dengan persamaan

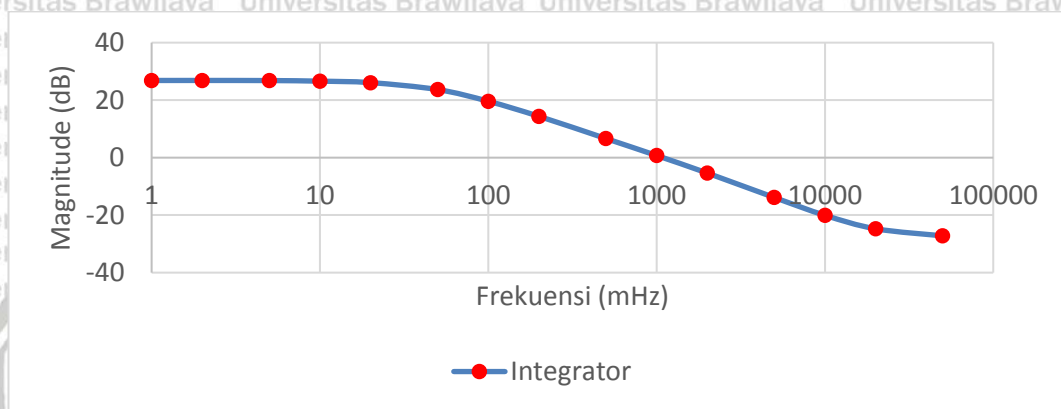
2.19 yang telah ditampilkan pada Bab 2 dimana penguatan integrator

$G(\omega) = -\frac{1}{\omega RC}$  sedangkan  $\omega$  didapatkan dari  $2\pi f$ , maka penguatan sinyal

dipengaruhi oleh besarnya frekuensi yang masuk. Semakin besar frekuensi maka nilai penguatannya akan semakin kecil, sebaliknya jika frekuensi semakin kecil maka penguatannya akan semakin besar. Hasil tersebut sesuai dengan tujuan penelitian ini yang difokuskan pada sensor seismik frekuensi rendah. Apabila dilihat dari pengujian menggunakan sinyal generator, hasil pengujian menggambarkan diagram bode *Low Pass Filter* (gambar 5.7).

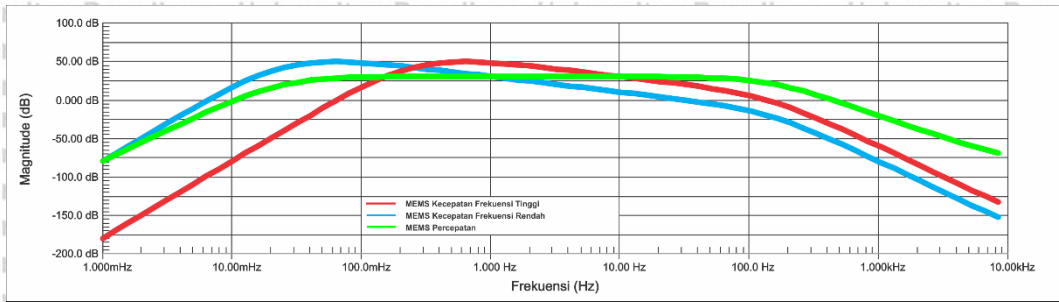


Gambar 5.6 Hasil Pengujian Rangkaian Integrator menggunakan Circuit Maker

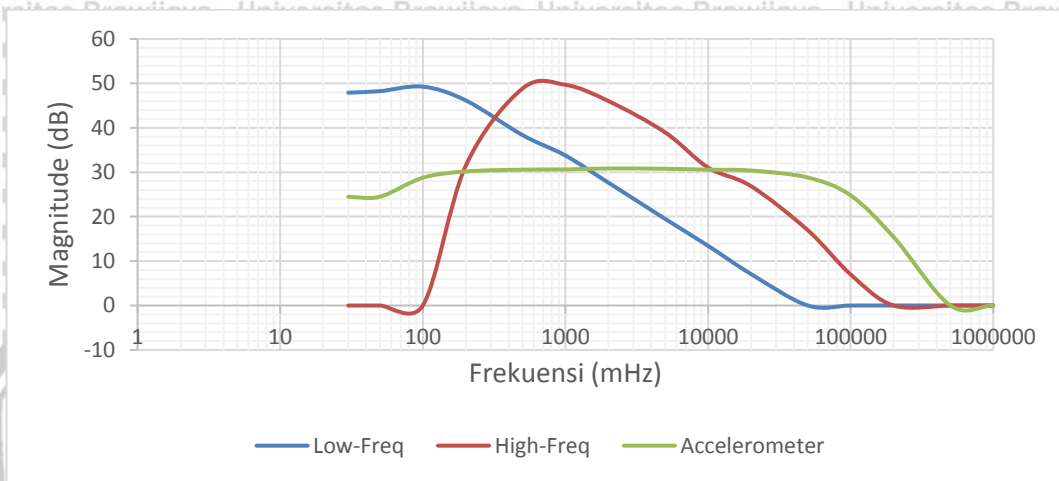


Gambar 5.7 Hasil Pengujian Rangkaian Integrator menggunakan Sinyal Generator

Setelah melakukan pengujian pada bagian rangkaian integrator kemudian dilakukan pengujian secara keseluruhan rangkaian pengkondisi sinyal untuk MEMS percepatan, MEMS kecepatan *cut-off* rendah serta MEMS kecepatan *cut-off* tinggi. Namun sebelum melakukan pengujian menggunakan *signal generator* ada baiknya melakukan simulasi terhadap rangkaian yang telah dibuat. Didapatkan hasil simulasi menggunakan Circuit Maker untuk rangkaian MEMS percepatan dan MEMS kecepatan disajikan pada Gambar 5.8. Simulasi yang dilakukan yaitu dengan memberikan masukan *signal generator* dengan tegangan 1V dan variasi frekuensi mulai dari 0Hz hingga 5 kHz. Dengan adanya hasil simulasi dapat digunakan sebagai acuan ketika melakukan pengujian menggunakan *signal generator*.



Gambar 5.8 Hasil Pengujian Pengkondisi Sinyal Menggunakan Circuit Maker



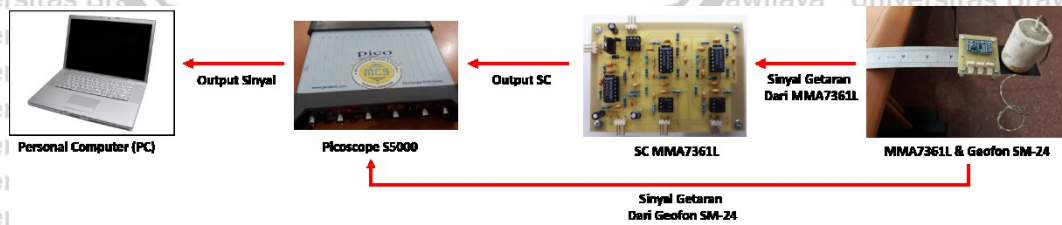
Gambar 5.9 Hasil Plotting Pengujian Rangkaian Secara Keseluruhan menggunakan *Signal Generator*

Gambar 5.9 merupakan grafik hasil pengujian rangkaian pengkondisi sinyal secara keseluruhan menggunakan *signal generator* dengan masukan tegangan 1V serta variasi frekuensi mulai dari 300 mHz hingga 1kHz. Garfik berwarna biru merupakan plot keluaran untuk pengujian rangkaian pengkondisi sinyal MEMS kecepatan dengan *cut-off* rendah, grafik berwarna merah merupakan pengujian MEMS kecepatan dengan *cut-off* tinggi, dan grafik berwarna hijau merupakan keluaran MEMS percepatan. Apabila hasil pengujian menggunakan *signal generator* dibandingkan dengan hasil simulasi dapat dilihat bahwa *trend* dari grafik yang dihasilkan tidak jauh berbeda. Untuk lebih jelas pengambilan sinyal pengujian

menggunakan *signal generator* dapat dilihat pada lampiran 2 yang telah memaparkan cuplikan sinyal mulai dari 300 mHz hingga 100Hz.

### 5.2.2 Hasil Pengujian Menggunakan *Cantilever Beam*

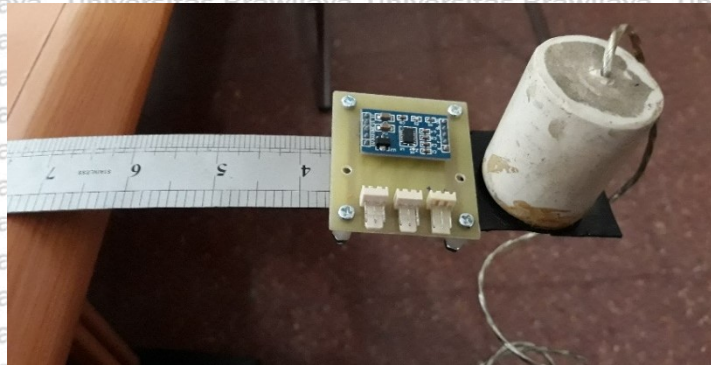
Pengkondisi sinyal yang telah selesai diuji kemudian dikonfigurasi menjadi satu dengan sensor MEMS MMA7361L. Kemudian dilakukan pengujian seluruh modul sensor MEMS percepatan maupun MEMS kecepatan dengan Geofon SM-24. Adapun konfigurasi pengujian telah ditampilkan pada Gambar 5.10. Pada pengujian ini sensor MEMS MMA7361L dihubungkan dengan pin masukan pada pengkondisi sinyal maka sinyal yang didapat dari sensor MEMS MMA7361L akan diolah pada rangkaian pengkondisi sinyal, kemudian pin keluaran pengkondisi sinyal dihubungkan dengan picoscope S5000. Proses kinerja Picoscope S5000 sepenuhnya dikendalikan oleh *software* yang terinstal pada PC. Setelah itu sinyal yang telah di tangkap oleh Picoscope S5000 akan ditampilkan pada layar PC. Pada proses pengujian sistem ini akan digunakan Geofon SM-24 sebagai pembanding, namun Geofon SM-24 tidak diolah melalui pengkondisi sinyal. Sinyal getar yang ditangkap Geofon secara langsung dihubungkan dengan picoscope dan kemudian ditampilkan pada layar PC.



Gambar 5.10 Konfigurasi Pengujian Sistem Sensor

Proses pengujian dilakukan dengan meletakkan sensor MEMS beserta Geofon SM-24 pada ujung *cantilever beam* (gambar 5.11), kemudian *cantilever*

*beam* tersebut ditekan ke bawah pada pangkal cantilevar setelah itu dilepaskan yang kemudian akan menghasilkan getaran sesuai dengan metode yang telah dipaparkan.

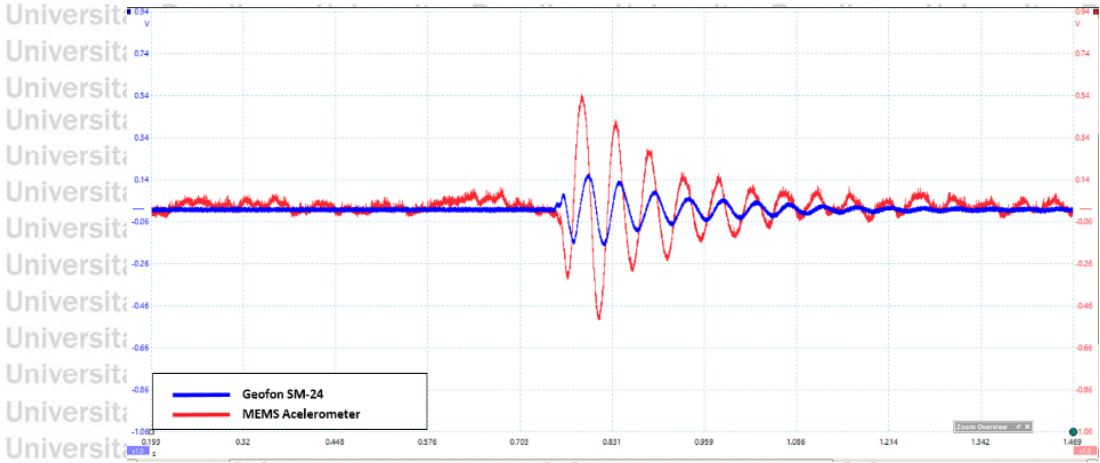


Gambar 5.11 Foto Pengujian menggunakan *Cantilevar beam*

#### A. Hasil Uji MEMS Percepatan dengan Geofon SM-24

Hasil pengujian MEMS percepatan dan Geofon telah ditampilkan pada Gambar 5.12. Berdasarkan hasil pengujian pada gambar 5.12 (Frekuensi Tinggi), sinyal yang dihasilkan oleh MEMS percepatan memiliki amplitudo yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan Geofon SM-24 ini dikarenakan pada pengkondisi sinyal MEMS sinyal yang masuk di kuatkan hingga 30kali menggunakan IC AD620, namun untuk hasil MEMS percepatan masih terdapat *noise* yang terlihat cukup besar. *Noise* tersebut dihasilkan oleh getaran mekanis polysilicon. Selain itu respon sesaat MEMS berbeda dengan Geofon, dimana respon sesaat MEMS membentuk gelombang ke bawah terlebih dahulu, ini sesuai dengan arah getar yang di timbulkan. Sedangkan Geofon SM-24 membentuk gelombang ke bawah terlebih dahulu ini merupakan hasil berlawanan dari arah getar.





Gambar 5.12 Hasil Pengujian MEMS Percepatan dengan Geofon SM-24 pada Frekuensi Tinggi

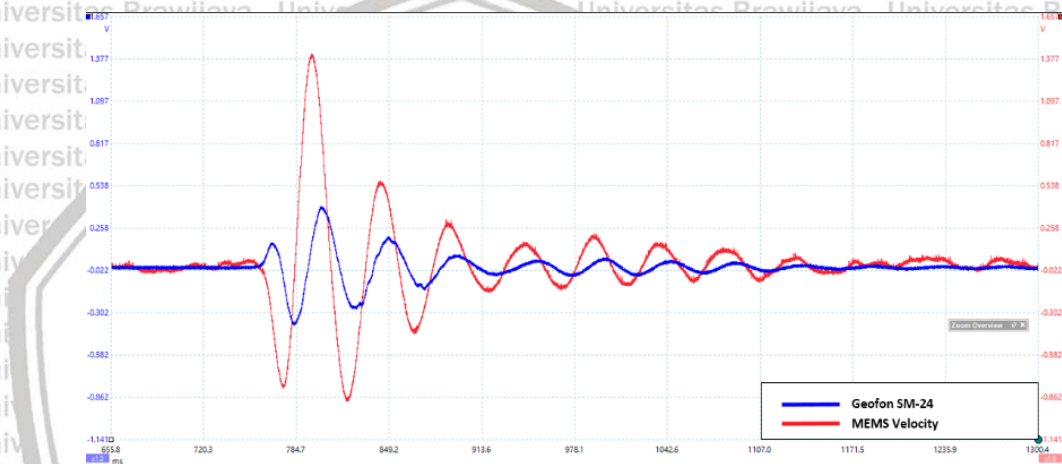
### B. Hasil Uji MEMS Kecepatan dengan Geofon SM-24

Sensor seismik berbasis kecepatan ini merupakan alternatif pengembangan dari sensor seismik, namun pada pengembangan ini dilakukan penambahan rangkaian untuk mengubah besaran percepatan dari MEMS menjadi besaran kecepatan. Rangkaian ini dibangun setelah rangkaian *Band Pass Filter*, sehingga setelah frekuensi sinyal difilter, kemudian dilakukan proses integral. Proses pengujian tidak jauh berbeda dengan pengujian MEMS percepatan, dimana sensor MEMS kecepatan dan Geofon SM-24 juga diletakkan pada ujung *cantilever beam* untuk melakukan pengujian.

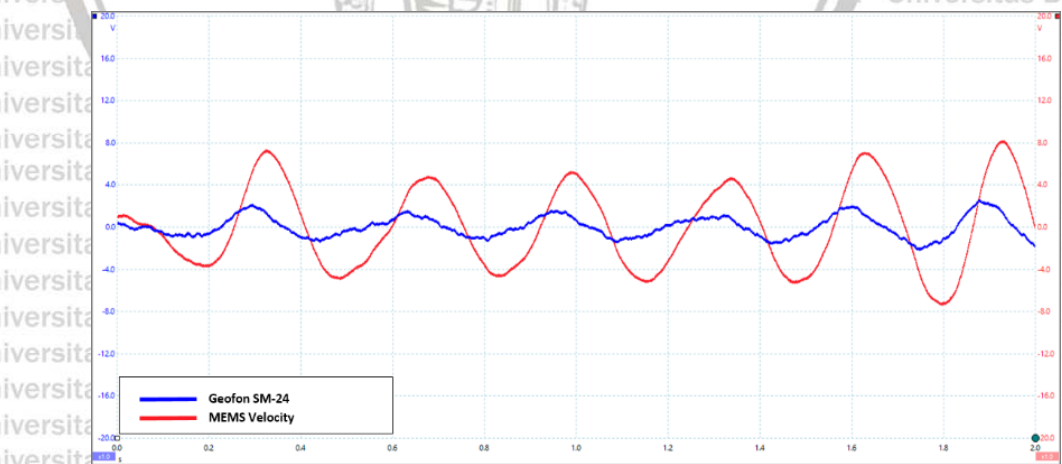
Gambar 5.13 adalah hasil pengujian untuk getaran berfrekuensi tinggi, tampak pada frekuensi tinggi MEMS kecepatan memiliki amplitudo yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan Geofon. Hal ini disebabkan karena pada pengondisi sinyal MEMS dilengkapi dengan penguatan sinyal. Berdasarkan hasil tersebut dapat dikatakan bahwa pada frekuensi tinggi MEMS kecepatan dapat merespon getaran dengan baik dan kemampuannya sebanding dengan Geofon.

Sedangkan untuk hasil respon sinyal getaran berfrekuensi rendah disajikan pada

Gambar 5.14 dimana pada frekuensi ini MEMS kecepatan memiliki nilai amplitudo yang lebih besar dari pada Geofon, serta Geofon kurang dapat merespon getaran yang dihasilkan. Hal Ini disebabkan karena Geofon tidak mampu mendeteksi frekuensi rendah di bawah 10Hz, sedangkan MEMS kecepatan memiliki kemampuan mendeteksi mulai dari 0.02Hz. Hasil dari pengujian ini sesuai dengan hasil simulasi yang telah dilakukan dimana pengembangan MEMS kecepatan dapat mendeteksi getaran yang memiliki frekuensi rendah dengan baik.



Gambar 5.13 Hasil pengujian MEMS Kecepatan dengan Geofon SM-24 Frekuensi Tinggi



Gambar 5.14 Hasil Pengujian MEMS Kecepatan dengan Geofon Pada Frekuensi Rendah

### C. Hasil Uji MEMS Percepatan dengan MEMS Kecepatan

Pengujian MEMS percepatan dan MEMS kecepatan digunakan untuk melihat respon frekuensi dan hasil sinyal yang direkam oleh masing-masing sensor.

Pengujian menggunakan *Cantilever beam* berfrekuensi tinggi dapat dilihat pada gambar 5.15a, respon sinyal yang dihasilkan menunjukkan amplitudo untuk MEMS

kecepatan *cut-off* tinggi malampaui maksimum hingga saturasi. Begitu pula untuk MEMS kecepatan *cut-off* rendah memiliki amplitudo maksimum. Hal ini

menunjukkan ketika getaran dengan frekuensi tinggi merambat akan selalu diikuti

oleh getaran berfrekuensi rendah sehingga sistem sensor ini berhasil merespon

getaran frekuensi rendah yang berasosiasi dengan frekuensi tinggi. Sementara

untuk respon sinyal rangkaian MEMS percepatan memiliki respon yang fluktuatif

yaitu sesaat mengalami amplitudo maksimal kemudian berangsur-angsur menurun.

Kemudian dilakukan juga untuk pemberian getaran frekuensi rendah dalam

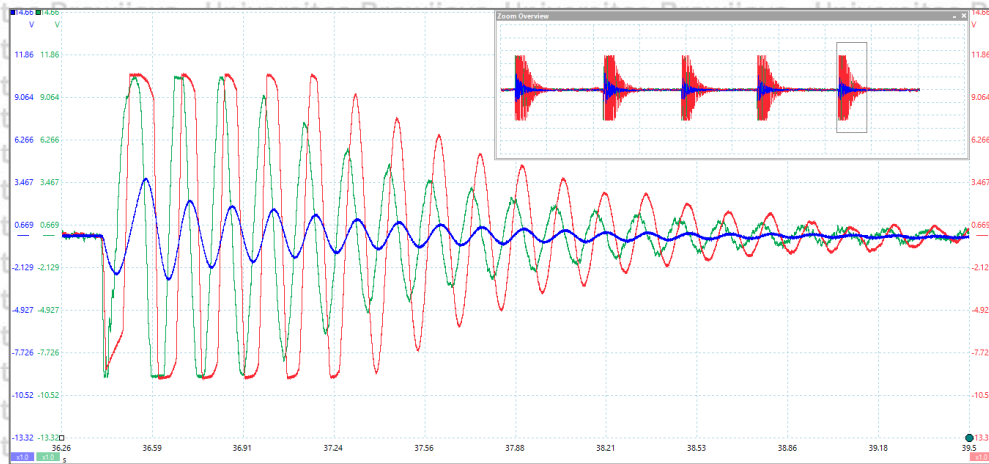
pengujian respon sinyal. Gambar 5.15b menunjukkan respon sinyal keluaran

rangkain MEMS kecepatan *cut-off* rendah, amplitudo sinyal keluarannya bernilai

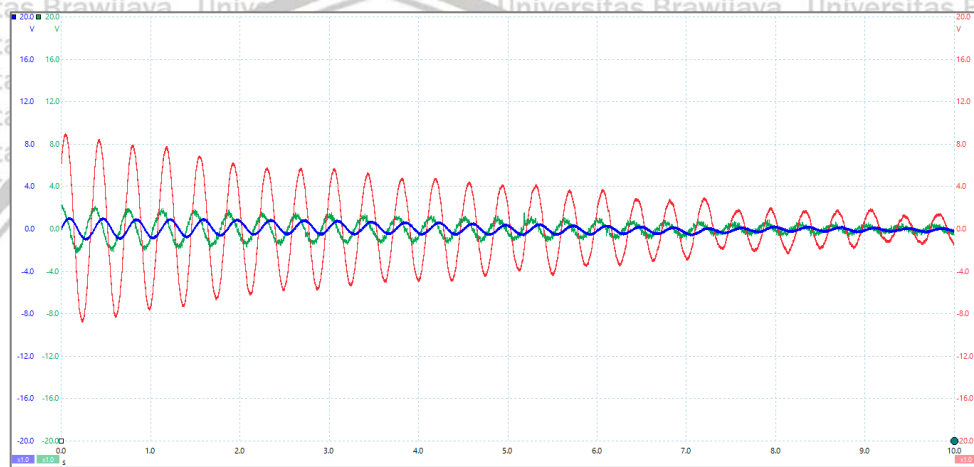
sama dengan respon MEMS percepatan dan tetap merespon getaran frekuensi tinggi

yang berasosiasi dengan getaran frekuensi rendah yang diberikan saat pengujian

berlangsung.



(a)

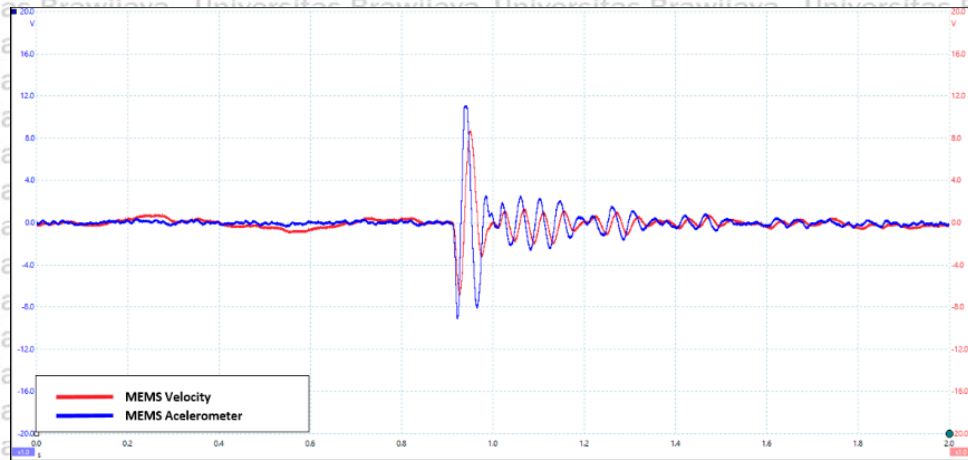


(b)

Gambar 5.15 Respon Sinyal (a) Frekuensi Tinggi dan (b) Frekuensi Rendah dari Rangkaian Pengkondisi Sinyal MEMS kecepatan *cut-off* tinggi (Merah), MEMS kecepatan *cut-off* rendah (Biru), dan MEMS Percepatan (Hijau)

Secara khusus jika dilakukan pengujian pada rangkaian MEMS percepatan dan MEMS kecepatan dapat dilihat pada gambar 5.16. Berdasarkan hasil pengujian dapat dilihat untuk hasil perbandingan antara pengkondisi sinyal berbasis percepatan dan pengkondisi sinyal berbasis kecepatan amplitudo yang dihasilkan tidak jauh berbeda. Namun ketika diamati *noise* yang dihasilkan pengkondisi sinyal MEMS berbasis kecepatan telah terdapat sedikit pengurangan. Selain itu terdapat beda fase  $90^\circ$  antara pengkondisi sinyal berbasis percepatan dengan berbasis

kecepatan, ini disebabkan karena proses integral pada pengkondisi sinyal MEMS berbasis kecepatan.



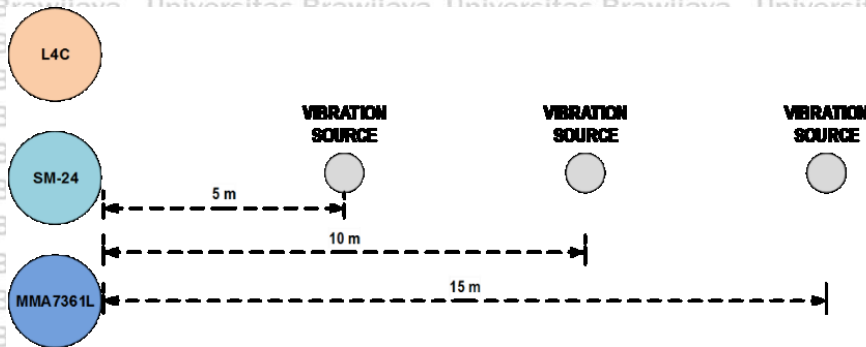
Gambar 5.16 Hasil pengujian MEMS Berbasis Percepatan dengan MEMS Berbasis Kecepatan

### 5.3 Uji Lapangan MEMS Percepatan

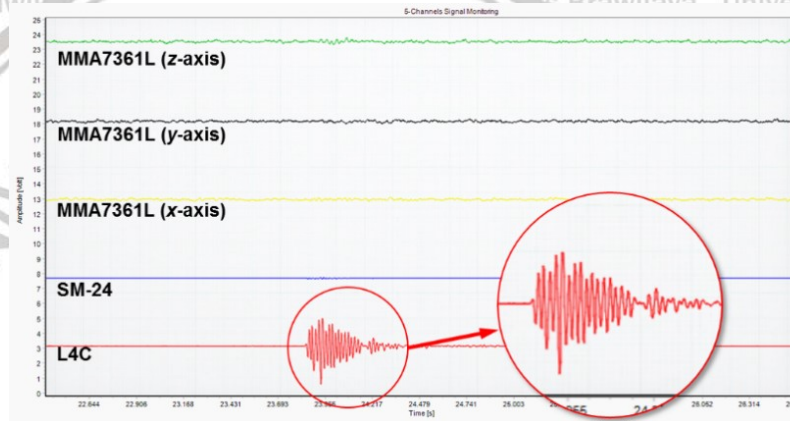
Berdasarkan hasil dari pengujian sistem sensor secara keseluruhan, maka perlu dilakukan uji lapang untuk melihat bagaimana kinerja sistem sensor yang telah dibuat. Pengujian lapang pada penelitian ini menggunakan pengkondisi sinyal MEMS percepatan. Pada pengujian lapang ini memanfaatkan arduino sebagai mikrokontrol pengolahan sinyal dan memanfaatkan SD Card sebagai penyimpan data. Selain data tersebut disimpan juga ditampilkan ke layar PC sehingga mudah dalam pemantauan.

Pengujian sistem sensor dilakukan di Laboratorium lapang Geothermal, Cangar, Kota Batu. Pada pengujian ini dilakukan dengan proses uji MEMS percepatan dengan beberapa sensor pembanding. Sensor pembanding yang digunakan adalah sensor Geofon tipe L4C dan SM-24 yang telah dijual secara komersial. Proses pengujian didesain sesuai dengan gambar 5.17, dimana jarak sumber getar terhadap sensor-sensor uji divariasikan. Jarak uji yang digunakan yaitu

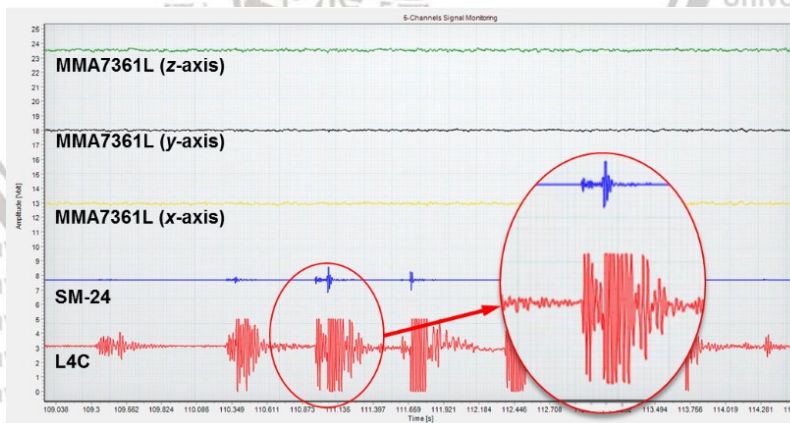
5m, 10m, dan 15m terhadap jajaran sensor, adapun sumber getar yang digunakan adalah lompatan manusia.



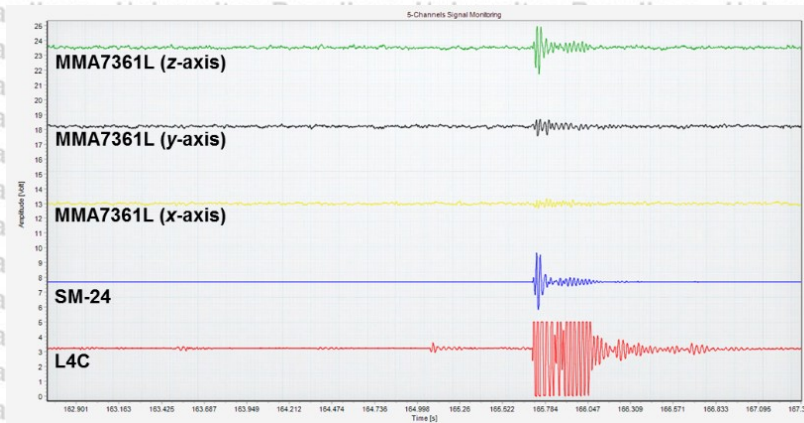
Gambar 5.17 Konfigurasi Pengujian Lapangan



(a)



(b)



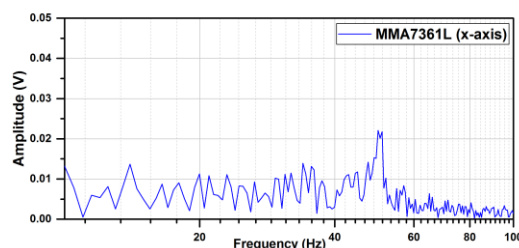
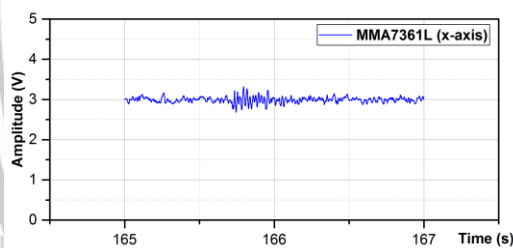
(c)  
Gambar 5.18 Hasil Pengujian Lapang (a) 15m, (b) 10m, dan (c) 5m

Setelah dilakukan pengujian sensor MEMS percepatan dengan sensor pembanding berupa Geofon tipe L4C dan tipe SM-24 dengan jarak bervariasi yaitu 5m, 10m, dan 15m didapatkan rekaman sinyal yang ditampilkan pada gambar 5.18.

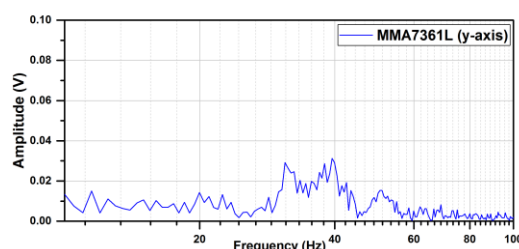
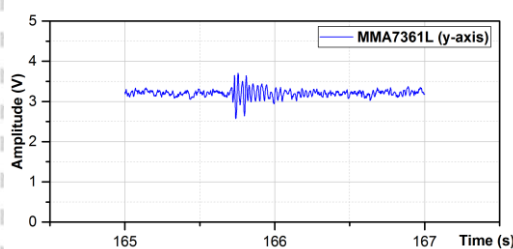
Gambar 5.18a adalah hasil perekaman sinyal untuk sumber getar yang berjarak 15m, hanya sensor Geofon tipe L4C yang dapat merekam sinyal sedangkan MEMS dan SM-24 tidak dapat merespon. Kemudian untuk hasil pengujian dengan jarak 10m, didapatkan sinyal pada gambar 5.18b. Berdasarkan gambar 5.18b dapat dilihat bahwa hanya sensor L4C dan SM-24 yang dapat merekam getaran yang dihasilkan sumber. Sinyal yang direkam oleh L4C mengalami *cut-off* sedangkan untuk SM-24 tidak mengalami *cut-off*. Selanjutnya dilakukan pengujian dengan jarak 5m dan hasil rekaman sinyal ditunjukkan pada gambar 5.18c. Sensor MMA7361L baru dapat merespon getaran pada jarak 5m beserta sensor yang lain. Sensor MEMS dan SM-24 merekam getaran cukup baik sedangkan sensor L4C mengalami *cut-off*.

Setelah di dapat respon sinyal dari masing-masing sensor kemudian dilakukan analisis Fast Fourier Transform (FFT) untuk mengetahui nilai frekuensi masing-masing sinyal. Gambar 5.19 merupakan hasil cuplikan sinyal dan respon frekuensi yang telah dianalisis dari masing-masing sensor. Khusus untuk MEMS

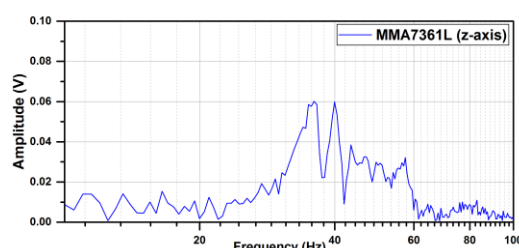
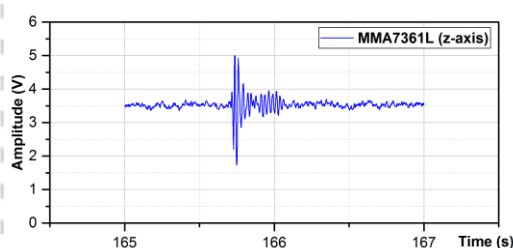
MMA7361L percepatan sinyal yang ditampilkan pada gambar 5.19a, 5.19b, dan 5.19c merupakan cuplikan sinyal dari masing-masing komponen kerjanya yaitu komponen x, y, dan z. Sinyal yang ditampilkan adalah sinyal hasil uji respon alat dengan jarak 5m karena hanya pada jarak ini seluruh sensor dapat mendeteksi adanya getaran. Hasil analisis FFT menunjukkan untuk seluruh sensor memiliki rentang frekuensi dari 20Hz hingga 60Hz. Sensor MEMS MMA7361L komponen x memiliki frekuensi dominan 50Hz (gambar 5.19a), untuk komponen y 40Hz (gambar 5.19b) sedangkan untuk komponen z memiliki frekuensi dominan sebesar 37Hz (gambar 5.19c). Sementara untuk sensor L4C dan SM-24 juga memiliki rentang frekuensi yang sama mulai dari 20Hz hingga 60Hz dengan frekuensi dominan untuk SM-24 sebesar 45Hz (5.19d) dan untuk L4C sebesar 40Hz (5.19e).



(a)

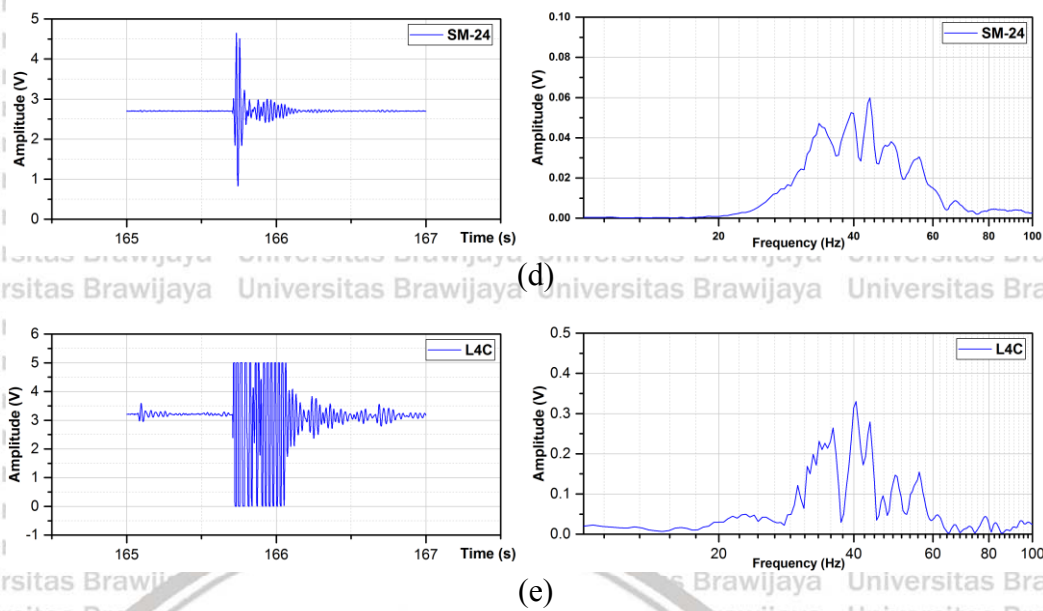


(b)



(c)





Gambar 5.19 Hasil Analisis FFT (a) MMA7361L -x, (b) MMA7361L-y, (c) MMA7361L-z, (d) SM-24, dan (e) L4C

Berdasarkan hasil analisis frekuensi dominan dari MEMS *Accelerometer* tipe MMA7361L menunjukkan bahwa sinyal yang diperoleh komponen x dan y tidak begitu kuat, karena sumber getar yang dihasilkan dominan kearah vertikal. Sehingga getaran sumber yang terekam hanya pada komponen z. Sementara komponen x dan y hanya merekam *noise* permukaan yang menjalar secara horizontal.

#### 5.4 Pembahasan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan terdapat dua proses pengembangan sensor seismik menggunakan sensor MEMS *Accelerometer* yaitu pengembangan MEMS berbasis percepatan serta MEMS berbasis kecepatan.

Pengembangan sensor seismik ini terfokus pada desain dan perancangan pengkondisi sinyal untuk MEMS yang digunakan. Hasil desain dan perancangan yang telah dilakukan terdapat tiga bagian pengkondisi sinyal yaitu MEMS percepatan, MEMS kecepatan *cut-off* rendah serta MEMS kecepatan *cut-off* tinggi.

Kemudian hasil tersebut dilakukan proses pengujian menggunakan *signal generator*, didapatkan hasil sinyal yang telah ditampilkan pada Gambar 5.9.

Tampak pada gambar tersebut MEMS kecepatan *cut-off* rendah bekerja dengan baik dan mampu merespon frekuensi yang sangat rendah dibawah 1Hz. Hasil tersebut mampu memenuhi peluang sebagai pengganti Geofon SM-24 yang tidak mampu merespon frekuensi di bawah 10Hz. Sedangkan untuk MEMS kecepatan *cut-off* tinggi mampu melemahkan frekuensi tinggi yang tidak digunakan pada monitoring seismik karena pada penelitian ini bertujuan untuk membuat sensor MEMS pada rentang frekuensi 0.02Hz hingga 100Hz.

Setelah mendapatkan respon frekuensi yang diinginkan kemudian dilakukan pengujian menggunakan *Cantilever beam* sebagai media uji penghasil getaran. Pengujian ini dilakukan pada masing-masing modul sensor. Hasil dari pengujian modul MEMS percepatan dibandingkan dengan Geofon SM-24 dapat dilihat pada gambar 5.12. Tampak pada gambar modul MEMS percepatan terdapat *noise-noise* kecil yang terekam. *Noise* ini disebut dengan *noise* mekanik yang dihasilkan oleh sensor MEMS itu sendiri dikarenakan MEMS bekerja berdasarkan prinsip kapasitansi yang menggunakan fluida sebagai detektor yang digunakan.

Pada MEMS *Accelerometer* yang dibuat oleh Freescale Semiconductor menggunakan fluida jenis Polysilicon. Ketika MEMS pada posisi diam dan diberikan tegangan maka sensor tersebut akan muncul sedikit getaran-getaran kecil akibat adanya tegangan masukan. Berbeda dengan Geofon SM-24, tampak pada cuplikan sinyal, Geofon tidak terdapat *noise* mekanik yang terekam ini disebabkan karena Geofon bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik yang akan menghasilkan sinyal apabila ada getaran yang dideteksi oleh sensor

Setelah didapatkan hasil pengujian laboratorium dilakukan pengujian lapang pada modul MEMS percepatan. Proses pengujian lapang ini dilakukan menggunakan sensor pembanding sebagai acuan. Sensor yang digunakan sebagai acuan adalah L4C dengan sensitivitas 166 V/m/s dan SM-24 dengan sensitivitas 28.8 V/m/s. Hasil yang didapatkan pada pengujian lapang sensor MEMS percepatan merespon frekuensi diatas 30Hz. Berdasarkan hasil tersebut dapat dikatakan bahwa MEMS percepatan tidak dapat merespon getaran yang memiliki frekuensi rendah. MEMS percepatan hanya mampu merespon frekuensi tinggi dengan amplitudo yang tinggi. Hasil tersebut dapat dikategorikan bahwa MEMS percepatan merupakan *strong motion* seismometer yang dapat dimanfaatkan untuk mengukur gelombang seismik yang dihasilkan oleh gempa bumi lokal. Biasanya *strong motion* seismometer dapat merespon 0.001 hingga 2 g atau sama dengan frekuensi sebesar 0 hingga 100Hz. Oleh sebab itu karena fokus pada penelitian ini adalah mengembangkan seismometer *broadband* yang mampu mendeteksi frekuensi sangat rendah hingga sangat tinggi maka dilakukan pengembangan MEMS percepatan menjadi MEMS kecepatan agar mampu merespon frekuensi rendah.

Dilakukan pengembangan tersebut karena pada umumnya sensor seismik untuk merespon frekuensi sangat rendah bekerja dengan prinsip kecepatan. Beberapa contoh seismometer yang sering digunakan adalah seismometer Guralp CMG-3T, Mark L4C dan SM-24. Setiap seismometer tersebut memiliki spesifikasi tersendiri seperti yang ditunjukkan pada tabel 5.1 serta untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada bagian lampiran. Seismometer tersebut digunakan sebagai acuan dalam melakukan pengembangan seismometer pada penelitian ini.

Berdasarkan spesifikasi seismometer yang didapatkan maka dilakukan pengembangan lanjutan untuk MEMS *Accelerometer* menjadi MEMS kecepatan dengan memodifikasi pengkondisi sinyal yang telah dikembangkan. Pengkondisi sinyal tersebut ditambahkan dengan rangkaian integrator yang dapat mengubah sinyal masukan dengan besaran percepatan menjadi besaran kecepatan. Dengan adanya modifikasi tersebut diharapkan pengembangan seismometer menggunakan MEMS dapat mendeteksi frekuensi sangat rendah seperti CMG-3T yang digunakan sebagai acuan. Tabel 5.1 juga dilengkapi spesifikasi seismometer yang telah dibuat ditunjukkan pada baris berwarna kuning, namun pengembangan sensor tersebut belum dilakukan proses kalibrasi.

Tabel 5.1 Spesifikasi Seismometer dan Akselerometer

Sensor	Manufacture	Energi	Kemampuan Frekuensi	Sensitivitas
CMG-3T	Guralp	70ma @12VDC	0.003-50Hz	1500 V/m/s
L4C	Mark	Passive	1Hz-50Hz	166.54 V/m/s
SM-24	I/O Sensor Nederland	Passive	10-240Hz	28.8 V/m/s
Kinometrics Episensor ES-T	Kinometrics	12VDC	0-200Hz	±4g
MMA7361L Velocity	MCS	12VDC	0.02-146Hz	Belum Terkalibrasi
MMA7361L Accelerometer	MCS	12VDC	0.02-146Hz	Belum Terkalibrasi

Hasil modifikasi pengkondisi sinyal yang telah ditambah dengan rangkaian integrator kemudian di hubungkan dengan MEMS MMA7361L, kemudian

dilakukan pengujian menggunakan masukan sinyal generator dengan frekuensi yang sangat rendah hingga sangat tinggi. Gambar 5.17 merupakan hasil plot respon frekuensi dari hasil pengembangan MEMS kecepatan. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa MEMS kecepatan yang telah dilengkapi modifikasi pengkondisi sinyal dapat merespon frekuensi sangat rendah. MEMS tersebut dapat mendeteksi frekuensi dibawah 0.1Hz sesuai dengan acuan seismometer yang digunakan yaitu CMG-3T yang mampu mendeteksi frekuensi sebesar 0.003Hz.



## BAB VI PENUTUP

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, telah dilakukan pengembangan sensor seismik menggunakan MEMS *Accelerometer* MMA7361L dengan dua jenis pengembangan yaitu MEMS percepatan dan MEMS kecepatan dengan respon frekuensi 0.02Hz hingga 100Hz. Selain itu untuk MEMS kecepatan telah dikembangkan pula menjadi MEMS kecepatan *cut-off* tinggi dan MEMS kecepatan *cut-off* rendah. Hasil penelitian pada uji lapang menunjukkan bahwa MEMS percepatan hanya dapat digunakan untuk merespon getaran berfrekuensi tinggi dan amplitude yang sangat tinggi. Namun berbeda dengan MEMS kecepatan, hasil uji MEMS kecepatan *cut-off* rendah mampu merespon frekuensi yang sangat rendah dibawah 1Hz. Hasil tersebut dapat digunakan untuk menggantikan Geofon yang tidak mampu mendeteksi frekuensi rendah dibawah 10Hz.

### 6.2 Saran

Diharapkan pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan uji lapang pada MEMS kecepatan serta dapat dilakukan proses kalibrasi untuk MEMS percepatan dan MEMS kecepatan, sehingga dapat digunakan sebagai alternatif instrumen monitoring seismik yang dibutuhkan di Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

Afnimar (2009): *Seismologi*, Bandung: ITB.

Aizawa, T., Kimura, T., Matsuoka, T., Takeda, T., dan Asano, Y. (2008):

Application of MEMS accelerometer to geophysics, *International Journal of The Mechanics*, 4(2), 1–4.

Albarbar, A., Badri, A., Sinha, J. K., dan Starr, A. (2009): Performance evaluation

of MEMS accelerometers, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 42(5), 790–795, diperoleh melalui situs internet:

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2008.12.002>.

Andreja, M., dan Poberaj, I. (2008): *MEMS ACCELEROMETER*.

Aziz, Z., Manjiyani, A., Jacob, R. T., R, K. K., dan Varghese, B. (2014):

Development of MEMS Based 3-Axis Accelerometer for Hand Movement Monitoring, *International Journal of Scinetific and Research Publications*, 4(2), 2–5.

Baker, B. C. (2008): Stop-band limitations of the Sallen-Key low-pass filter, *Analog*

*Application Journal*, 5–7.

Bin, S. U. N., Haiying, L. I., dan Gang, Z. (2014): A Study Based on Distributed

Data Acquisition System of Smart Geophones in Three-dimensional Seismic Prospecting, *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, 2665–2669.

Brincker, R., Bolton, B., Brandt, A., Allé, B., dan M, D.-O. (2010): Calibration and

Processing of Geophone Signals for Structural Vibration Measurements, *Experimental Mechanics*, 1–5.

Charles, A. J. (2008): Waves, Seismograms, and Seismometers, diperoleh melalui situs internet: <http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon/HTML/Classes/IntroQuakes/Notes/seismometers.html>.

Circuited, S., Outputs, P., Differential, T., Stage, I., Amplifiers, F., Package, P., Compensated, I., Pinouts, I. S., dan Operation, D. (2002): Single Supply Quad Operational Amplifiers, *Current*.

Dams, J. (2009): -frequency Low, *Magnetic Innovation in Velocity sensing (mikrotek)*, (3), 24–29.

Deng, T., Chen, D., Wang, J., Chen, J., dan He, W. (2014): A MEMS based electrochemical vibration sensor for seismic motion monitoring, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 23(1), 92–99, diperoleh melalui situs internet: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2013.2292833>.

Device, A. (2011): Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier AD620.

Goldianto, D., dan Hernowo, O. (2013): Pengembangan Prototipe Sensor Elektromekanik Berbasis Prinsip Strain, *Jurnal Fisika Indonesia*, XVII(April), 14–17.

Hamdan Heruryanto, Wira Bahari Nurdin, B. A. (2014): Sistem Pengukuran Denyut Jantung Berbasis Mikrokontroler ATMEGA8535.

Hamdiana, D. P., dan Ginting, A. S. (2012): Inversi Impedansi Akustik dengan Model-Based Inversion untuk Identifikasi Coal Bed Methane ( CBM ) pada Formasi Sajau , Kalimantan Timur.

Holland, A. A. (2002): Microearthquake Study of the Salton Sea Geothermal Field , California : Evidence of Stress Triggering Microearthquake Study of the Salton Sea Geothermal Field , California : Evidence of Stress Triggering,



(February).

Hons, M. (2008): *Seismic sensing: Comparison of geophones and accelerometers using laboratory and field data*, *Masters Abstracts International*, diperoleh melalui <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Seismic+sensing:+Comparison+of+geophones+and+accelerometers+using+laboratory+and+field+data#0>.

Hons, M. S. (2008): *Seismic sensing: Comparison of geophones and accelerometers using laboratory and field data*.

Hossain, R., Ahmed, M., Zaman, H. U., dan Nazim, M. A. (2017): A Comparative Study of Various Simulation Software for Design and Analysis of Operational Amplifier Based Integrator Circuits, 278–282.

Karakuzulu, A. (2012): *Design of a Low Current Leakage Integrator for Non-Coherent Ultra-WideBand Receiver*, Royal Institute of Technology.

Kugelstadt, T. (1990): Getting the most out of your silos, *Texas Instruments Incorporated*, **82**(10), 52, 54.

Lainé, J., dan Mougenot, D. (2014): A high-sensitivity MEMS-based accelerometer, (November).

Li, G., Chen, D., Wang, J., Jian, C., He, W., Fan, Y., dan Deng, T. (2012): A MEMS based seismic sensor using the electrochemical approach, *Procedia Engineering*, **47**, 362–365, diperoleh melalui situs internet: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.158>.

Li, G., Wang, J., Chen, D., Chen, J., Chen, L., dan Xu, C. (2017): An electrochemical, low-frequency seismic micro-sensor based on MEMS with a force-balanced feedback system, *Sensors (Switzerland)*, **17**(9), diperoleh

- melalui situs internet: <https://doi.org/10.3390/s17092103>.
- Maior, P., Mureş, T., dan Ágoston, K. (2012): Accelerometer Characteristics , Errors and Signal Conditioning, 276–282.
- Majiyani, Z. A. A., Jacob, R. T., R, K. K., dan Varghese, B. (2014): Development of MEMS Based 3-Axis Accelerometer for Hand Movement Monitoring, *International Journal of Scinetific and Research Publications*, **4**(2), 2–5.
- Morib, M. A. (2013): Mitigasi bencana dan analisis resiko gempa pada bangunan gedung di yogyakarta, *Majalah Olmiah UKRIM*, 63–72.
- Nederland, S. (2006): SM-24 Geophone Element, diperoleh 18 Maret 2018, melalui situs internet: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometers/SM-24> Brochure.pdf.
- Nidhi (2015): Band Pass Filtering Technique using Sallenkey Filter, *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, **10**(2), 73–75, diperoleh melalui situs internet: <https://doi.org/10.9790/2834-10227375>.
- Noorulil Bayu (2011): Rancang Bangun Model Mekanik Alat untuk Mengukur Kadar Keasaman Susu Cair, Sari Buah dan Soft Drink, *Tehnik Kimia*, 1–9.
- Novianta, M. A., dan Setyaningsih, E. (2015): Early Detection System Design Based on Fluctuation Earthquake Using Magnetic Muhammad Andang Novianta , Emy Setyaningsih, **16**(1), 35–44.
- Park, J., dan Mackey, S. (2003): *Data Acquitition For Instrumentation and Control System*.
- PASCAL, I. (2017): Instrumentation, diperoleh melalui situs internet: <https://www.passcal.nmt.edu/>.
- Pascale, A. (2009): *Using Micro-ElectroMechanical Systems ( MEMS )*

*accelerometers for earthquake monitoring.*

Priyadi, I., dan Wijaya, M. E. (2011): Perancangan alat pendeteksi dan peringatan gempa berpotensi tsunami dengan transmisi sinyal audio melalui media jala-jala listrik, 1–14.

Risandriya, S. K., dan Rivai, M. (2011): Aplikasi sensor Micro Electro Mechanical system ( MEMS ) sebagai identifikasi ketidaknormalan pada conveyor belt system, *Seminar Nasional Pascasarjana XI-ITS*.

S. Hons, M., R. Stewart, R., Hauer, G., C. Lawton, D., dan B. Bertram, M. (2008): Accelerometer Versus Geophone Response - A Field Case History, diperoleh melalui situs internet: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20147584>.

Santoso, D. R., Maryanto, S., dan Nadhir, A. (2015): Application of Single MEMS-accelerometer to Measure 3-axis Vibrations and 2-axis Tilt-Angle Simultaneously, *TELKOMNIKA*, **13**(2), 442, diperoleh melalui situs internet: <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v13i2.1490>.

Setiaji, A. (2009): *Analisis Kualitas Data Seismik 6 Stasiun Indonesia Menggunakan PQLX*.

Tapashetti, P., Gupta, A., Mithlesh, C., dan Umesh, A. S. (2012): Design and Simulation of Op Amp Integrator and Its Applications, (3), 12–19.

Texas Instruments (1995): LF444 Quad Low Power JFET Input Operational Amplifier LF444 Quad Low Power JFET Input Operational Amplifier.

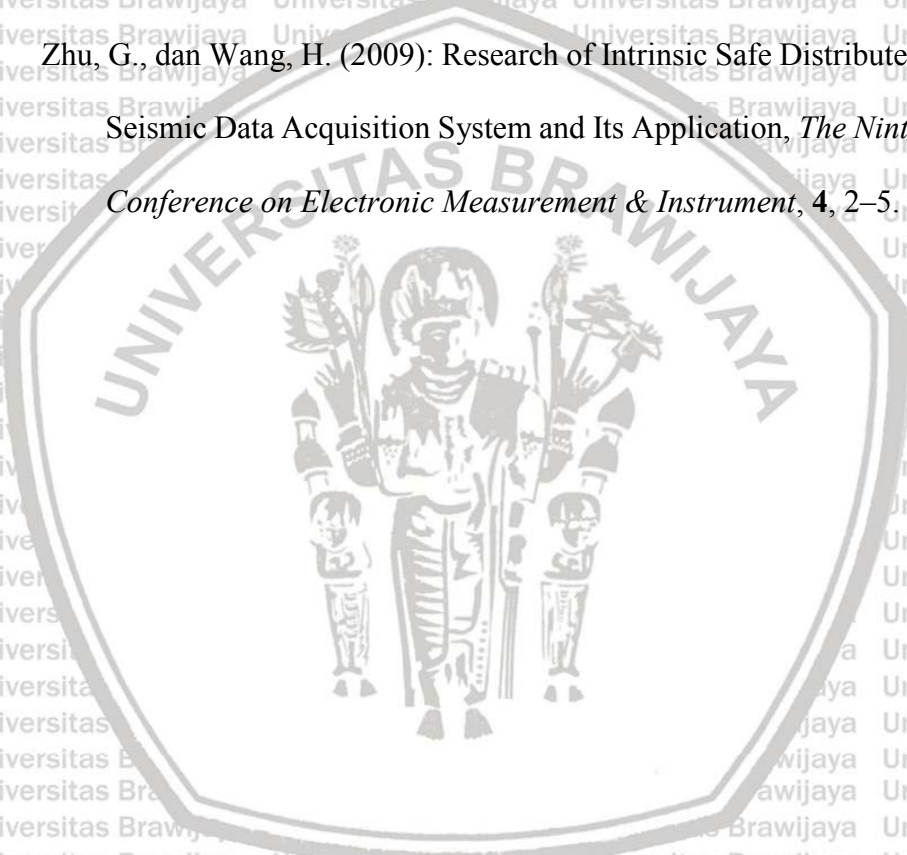
Tumiwan, G. G., Suoth, V. A., dan Asari (2012): Rancang Bangun Alat Ukur Suhu Bawah Permukaan Bumi Menggunakan IC Sensor LM35 Untuk Pengukuran Secara Mapping, *Jurnal Ilmiah Sains*, **15**, 9–15.

Wittiri, S. R. (2010): Gempa mikro sebagai indikasi amblesnya Kawah Tompaluan

, Gunung Lokon , Sulawesi Utara, *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*,  
 1(1), 1–10.

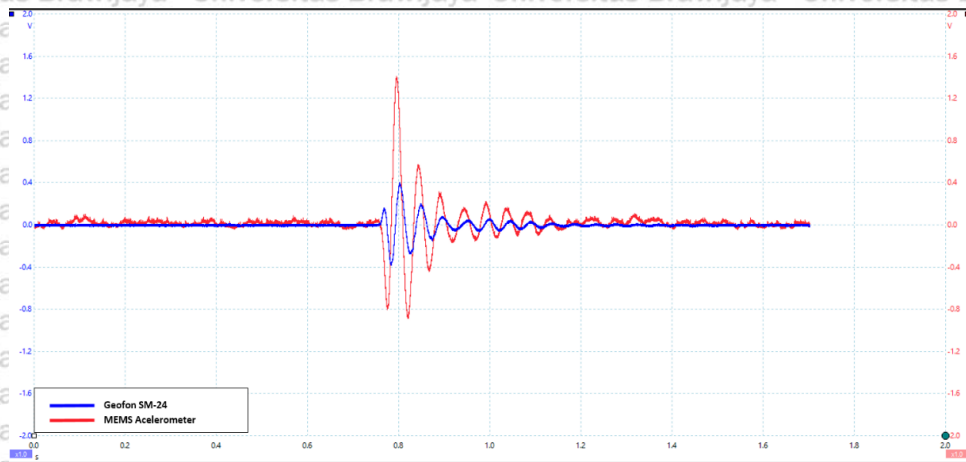
Wright, P., Dornfeld, D., dan Ota, N. (2008): Sustainability Title : Condition  
 Monitoring in End-Milling Using Wireless Sensor Networks ( WSNs )  
 Author : Series : Green Manufacturing and Sustainable Manufacturing  
 Partnership Copyright Information : All rights reserved unless otherwise  
 indicated . Con, *Transactions of NAMRI/SME*, **36**, 177–183.

Zhu, G., dan Wang, H. (2009): Research of Intrinsic Safe Distributed 3-component  
 Seismic Data Acquisition System and Its Application, *The Ninth International  
 Conference on Electronic Measurement & Instrument*, **4**, 2–5.

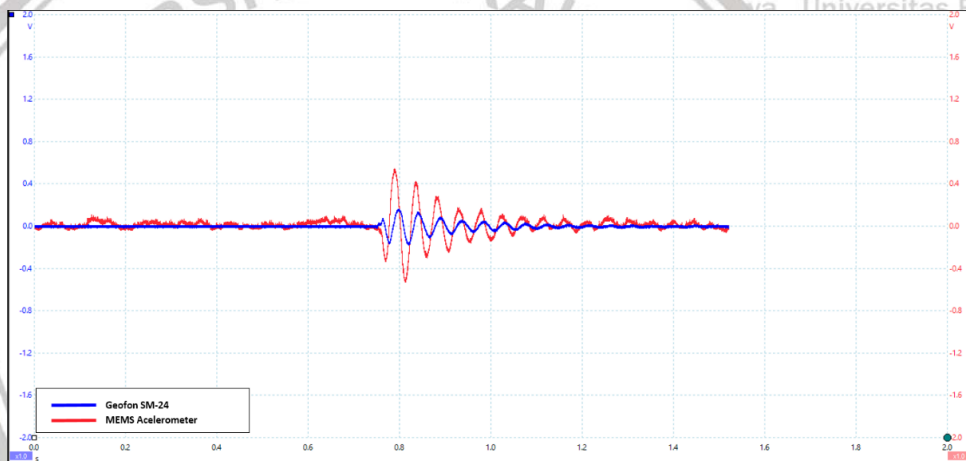


## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Sinyal Hasil uji Geofon dan MMA7361L Percepatan



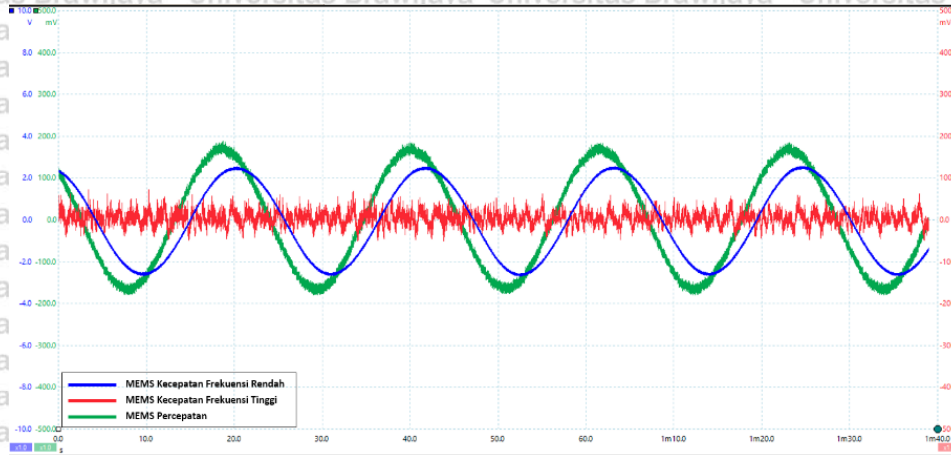
Gambar L1.1 Cuplikan Sinyal Frekuensi Tinggi



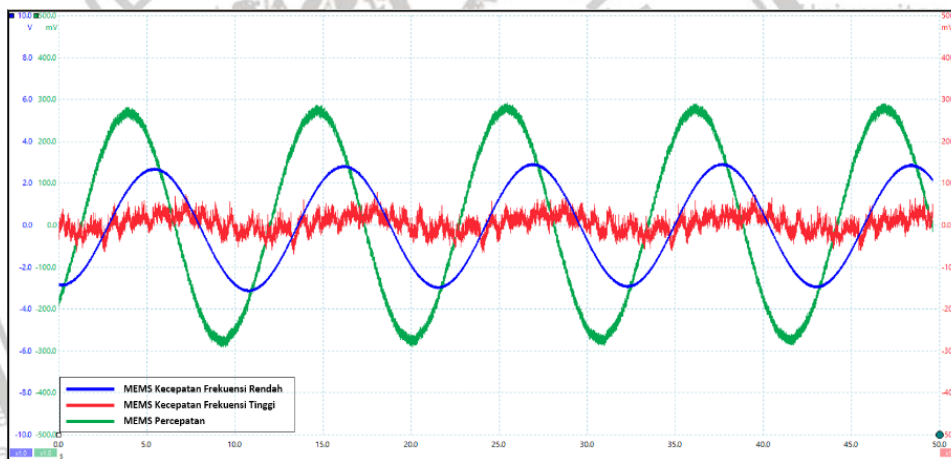
Gambar L1.2 Cuplikan Sinyal Frekuensi Rendah

**Lampiran 2.** Hasil Uji Rangkaian MEMS Kecepatan frekuensi tinggi, MEMS Kecepatan frekuensi rendah, dan MEMS Percepatan

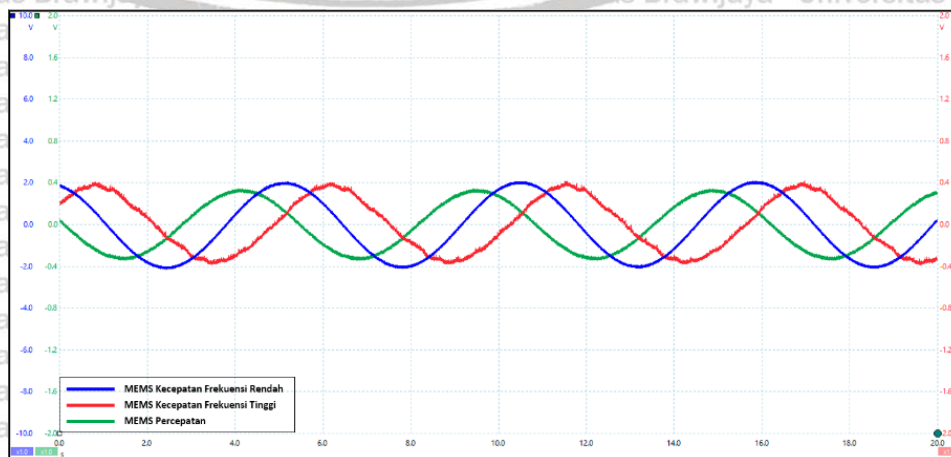
1. Sinyal 50mHz



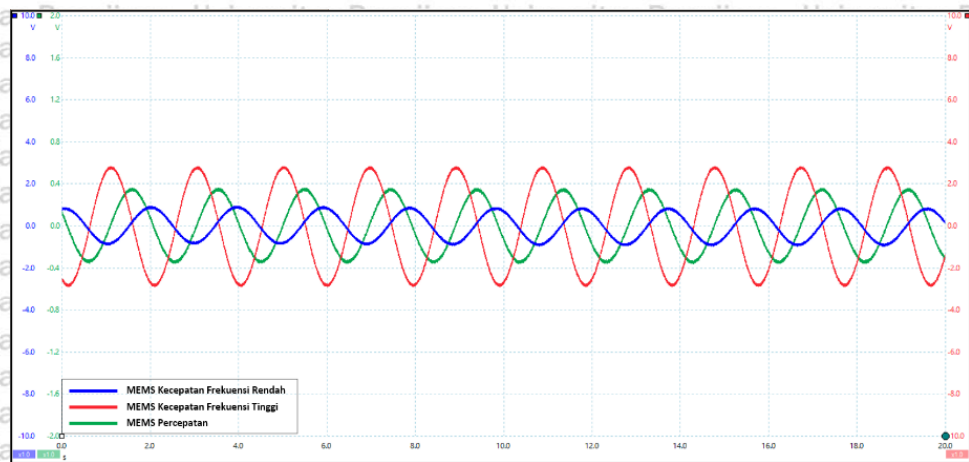
2. Sinyal 100mHz



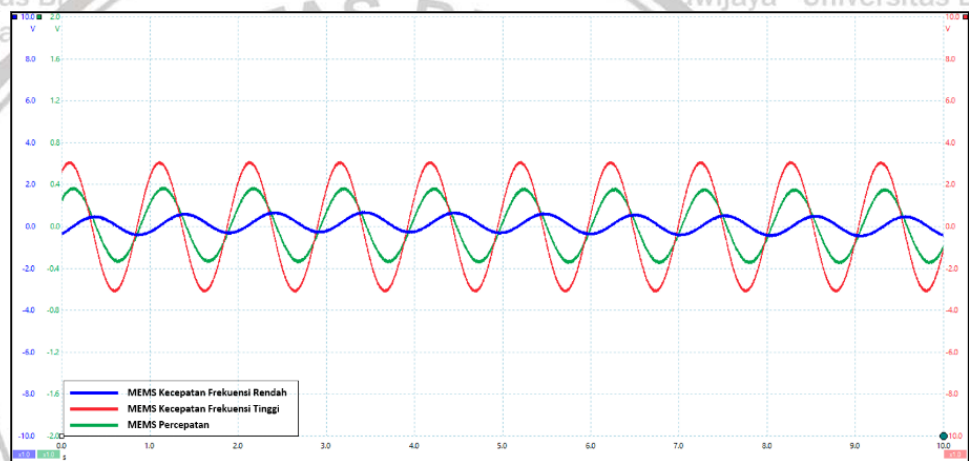
3. Sinyal 200mHz



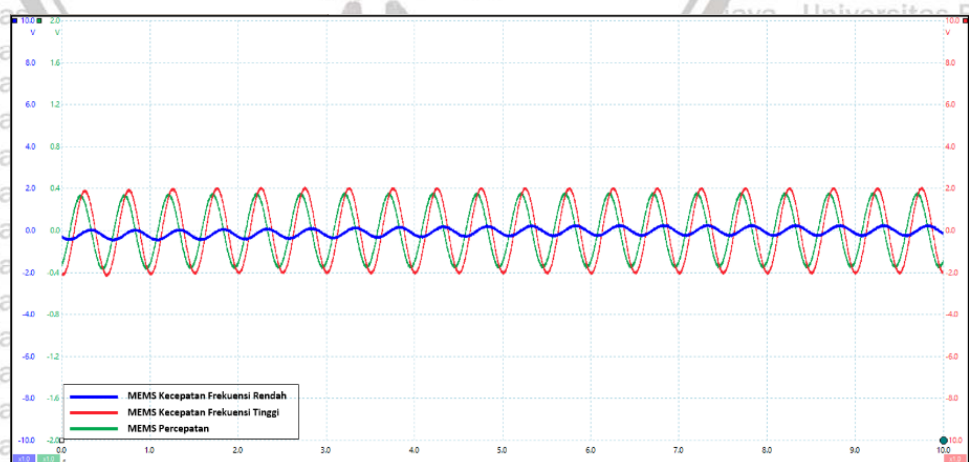
#### 4. Sinyal 500mHz



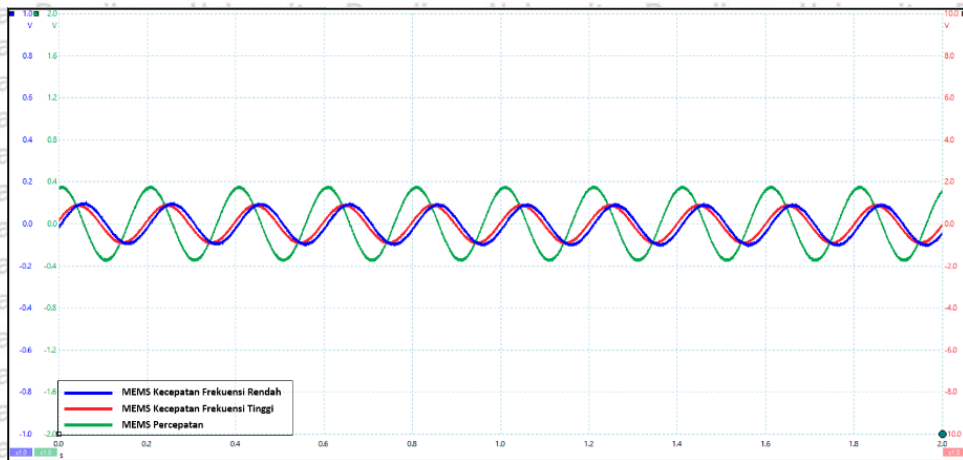
#### 5. Sinyal 1Hz



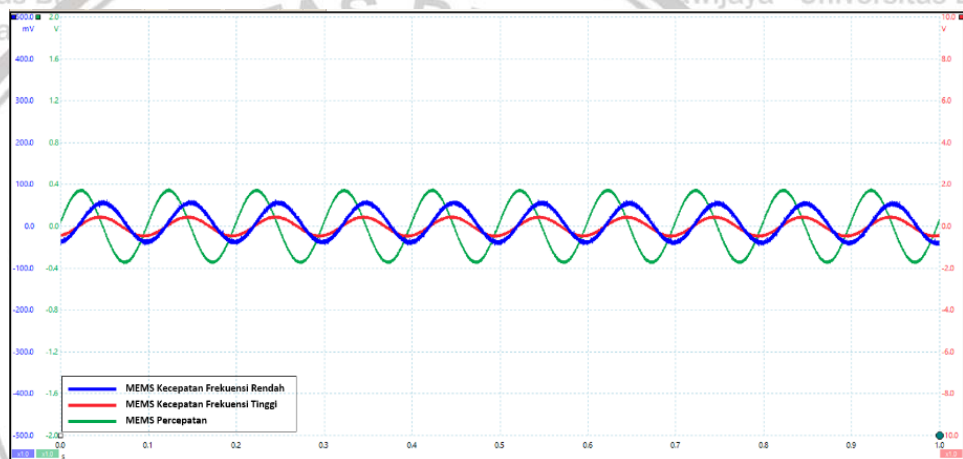
#### 6. Sinyal 2Hz



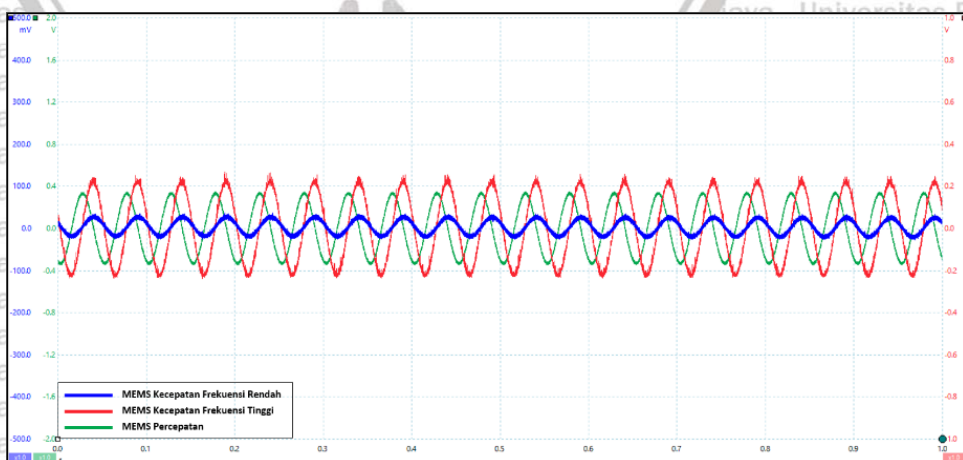
### 7. Sinyal 5Hz



### 8. Sinyal 10Hz

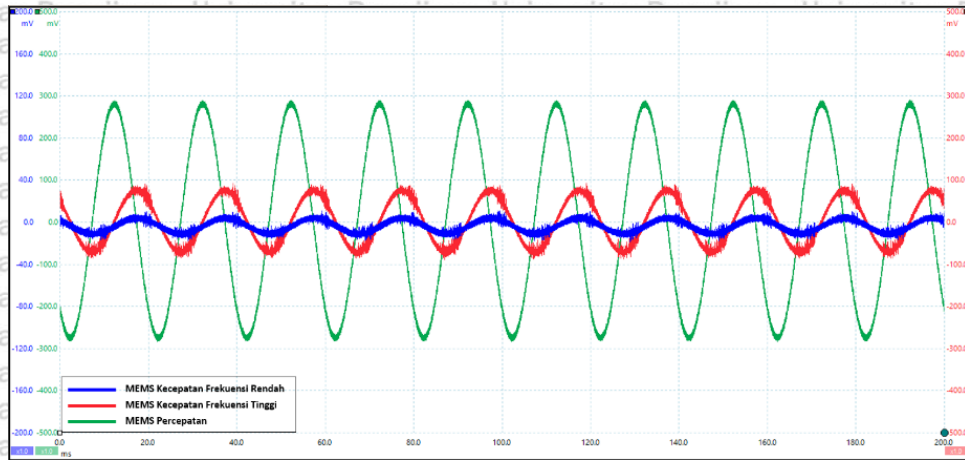


### 9. Sinyal 20Hz

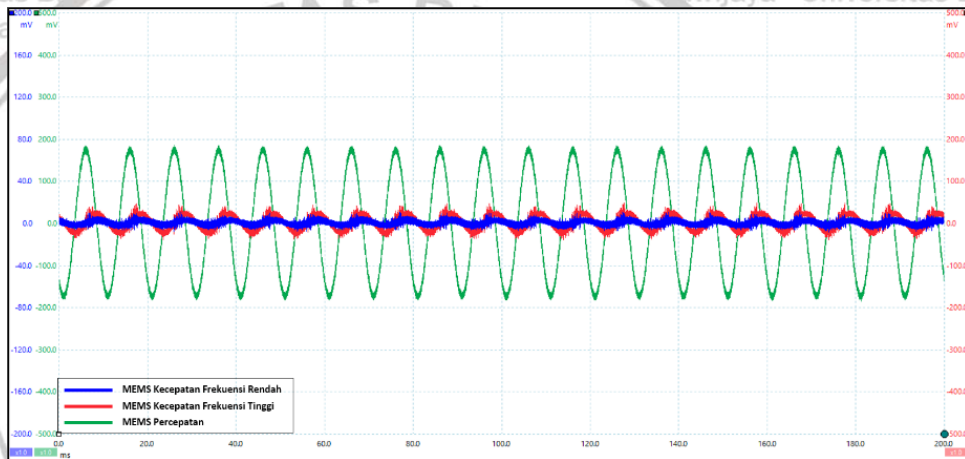




### 10. Sinyal 50Hz

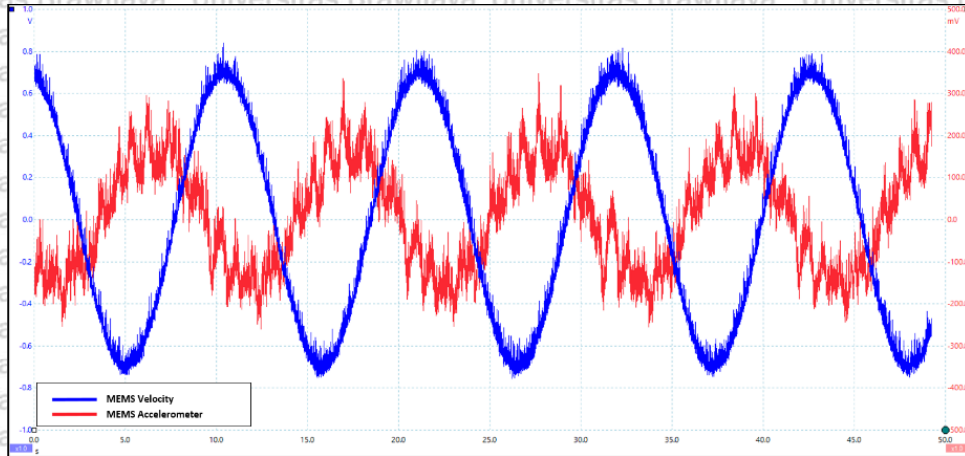


### 11. Sinyal 100Hz

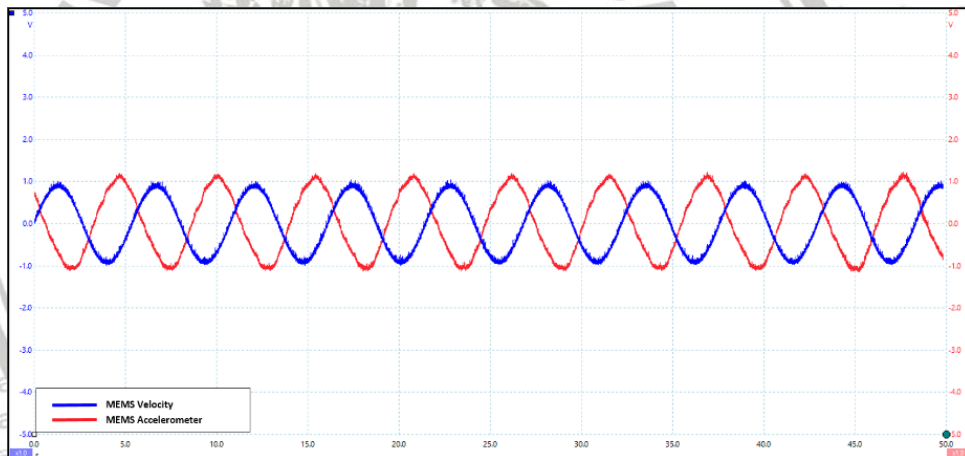


### Lampiran 3. Sinyal Hasil Uji Rangkaian MEMS Percepatan dan MEMS Kecepatan menggunakan *Signal generator*

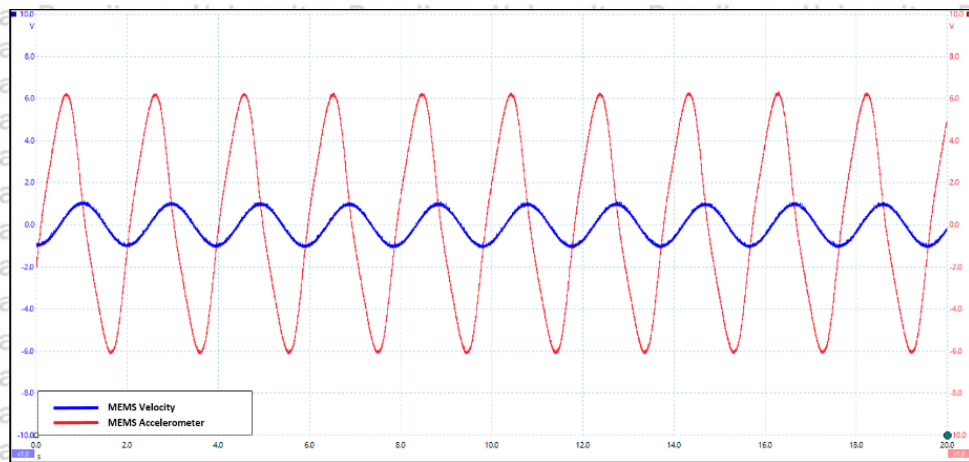
#### 1. Sinyal 100mHz



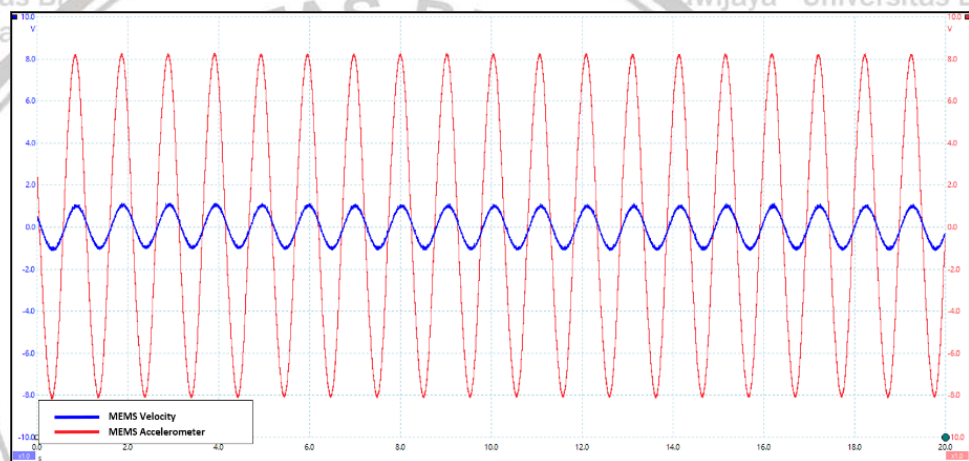
#### 2. Sinyal 200mHz



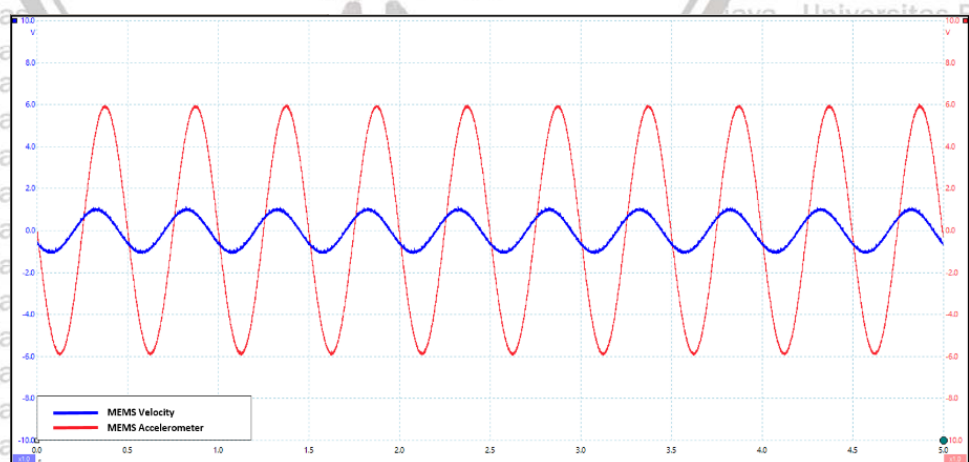
### 3. Sinyal 500mHz



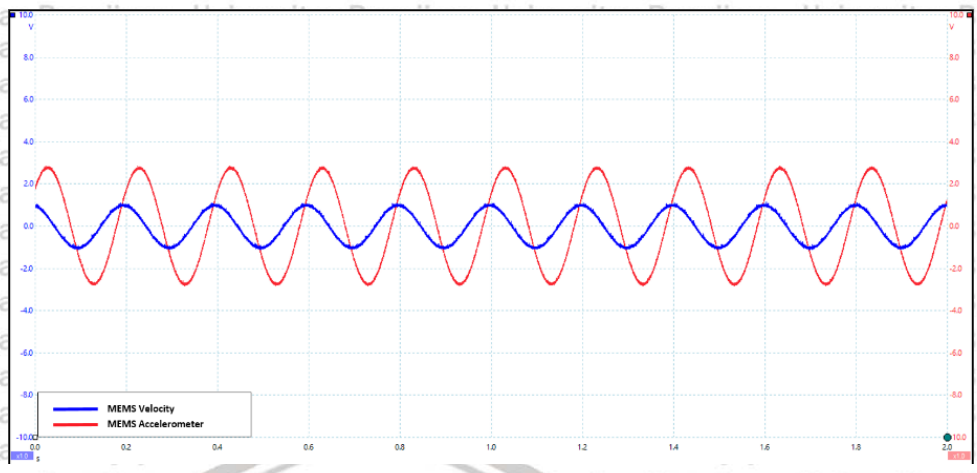
### 4. Sinyal 1Hz



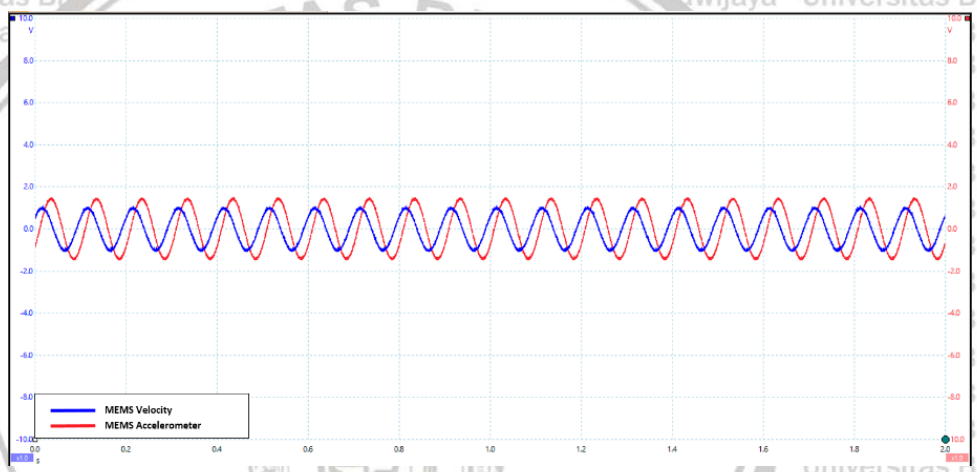
### 5. Sinyal 2Hz



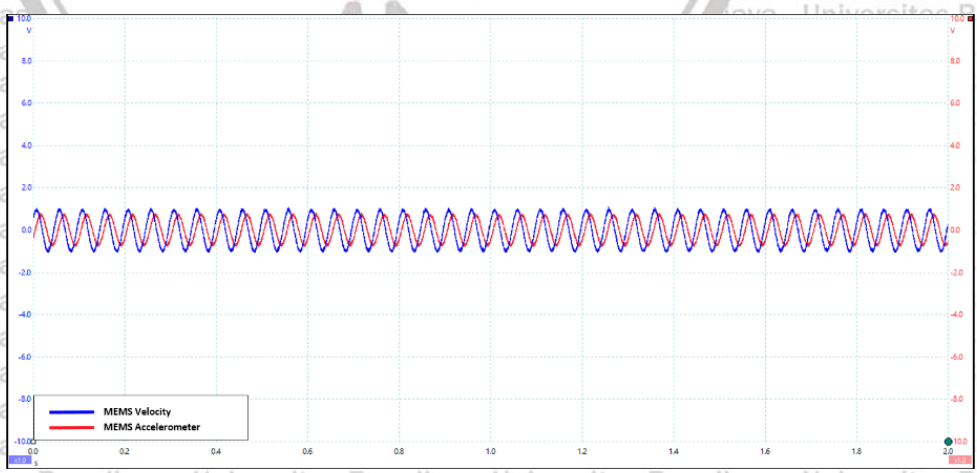
6. Sinyal 5Hz



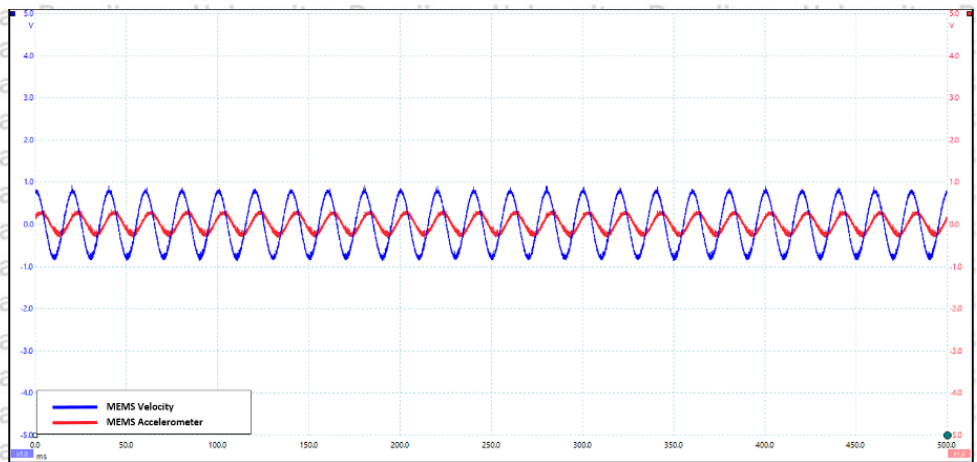
7. Sinyal 10Hz



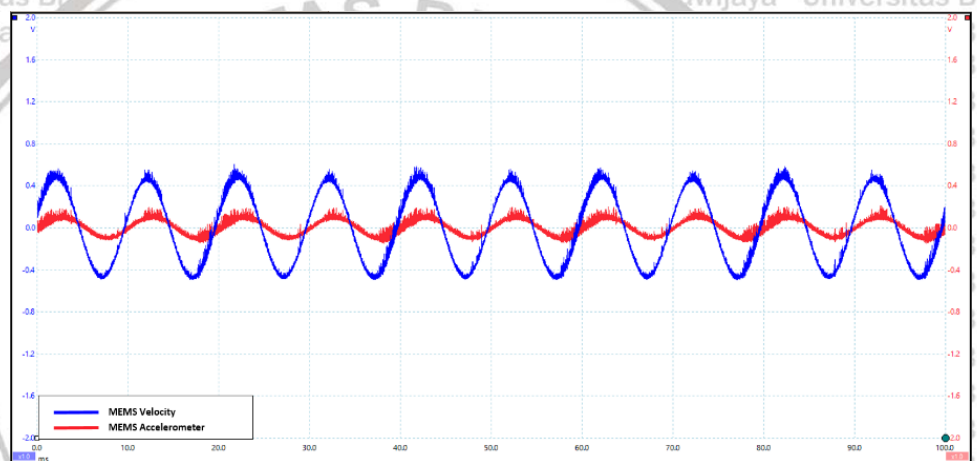
8. Sinyal 20Hz



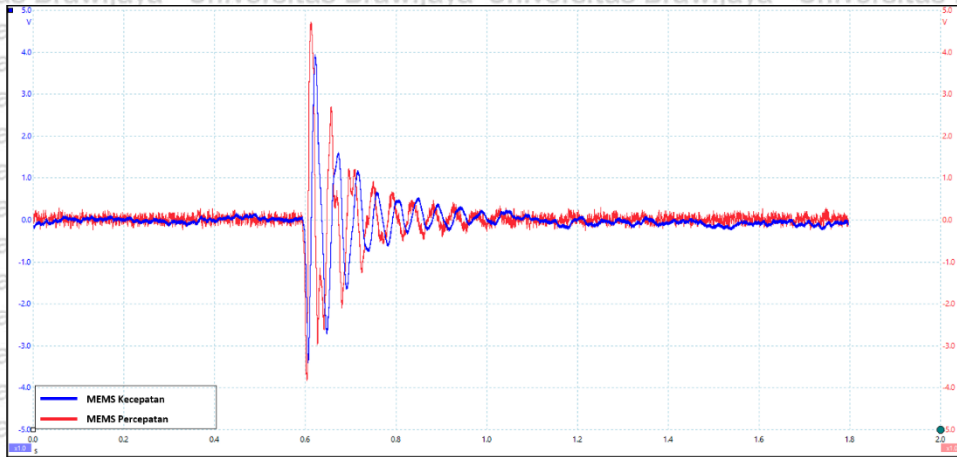
9. Sinyal 50Hz



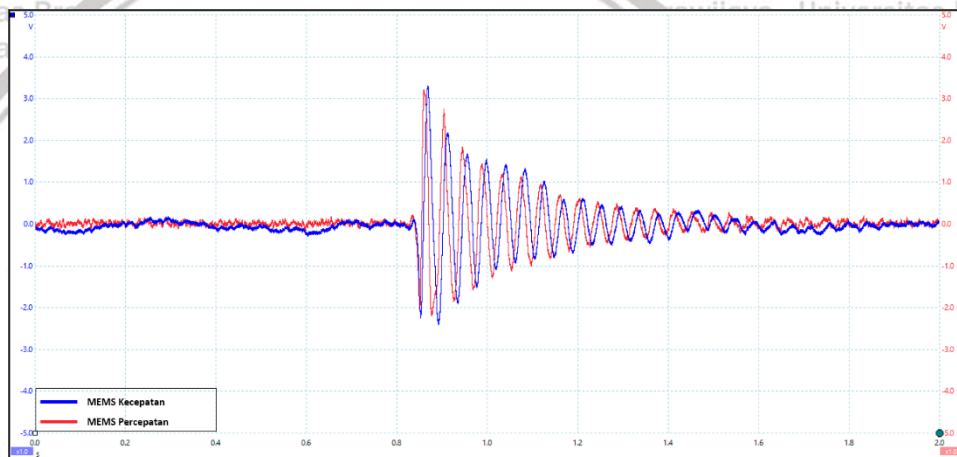
10. Sinyal 100Hz



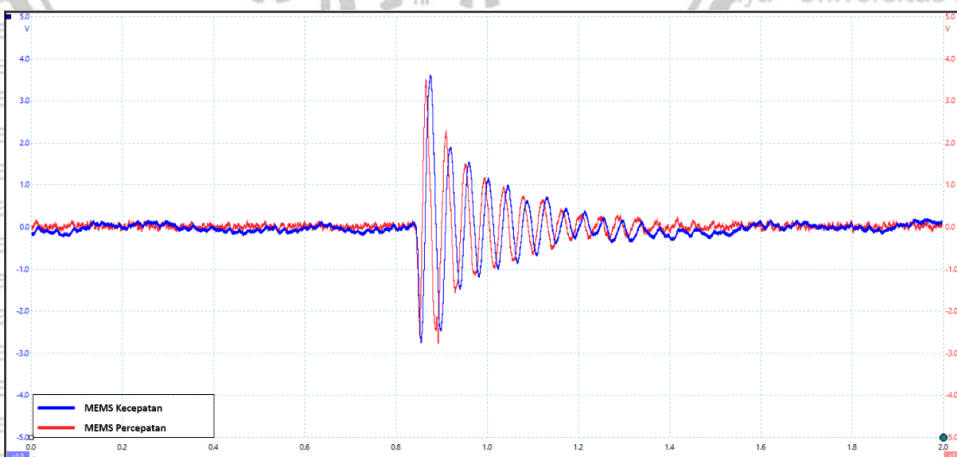
Lampiran 4. Sinyal Hasil uji MEMS Percepatan dan MEMS Kecepatan



Gambar L 4.1 Sinyal Hasil uji MEMS Percepatan dan MEMS Kecepatan



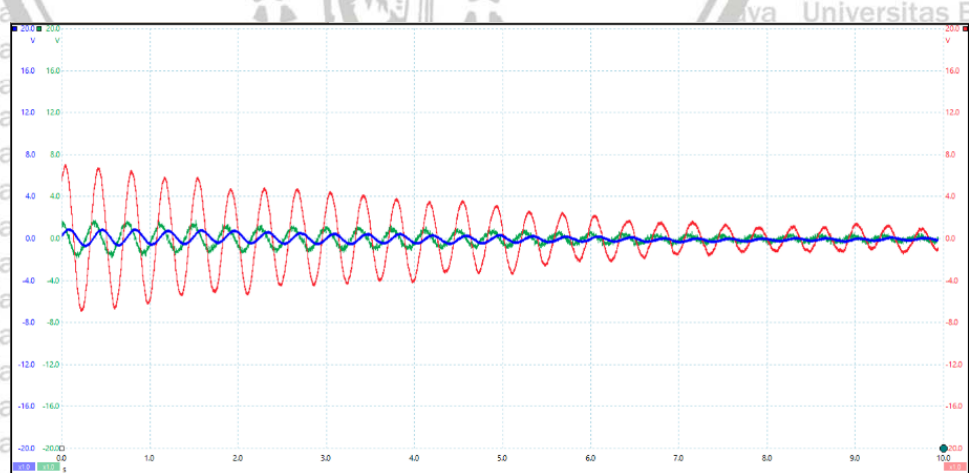
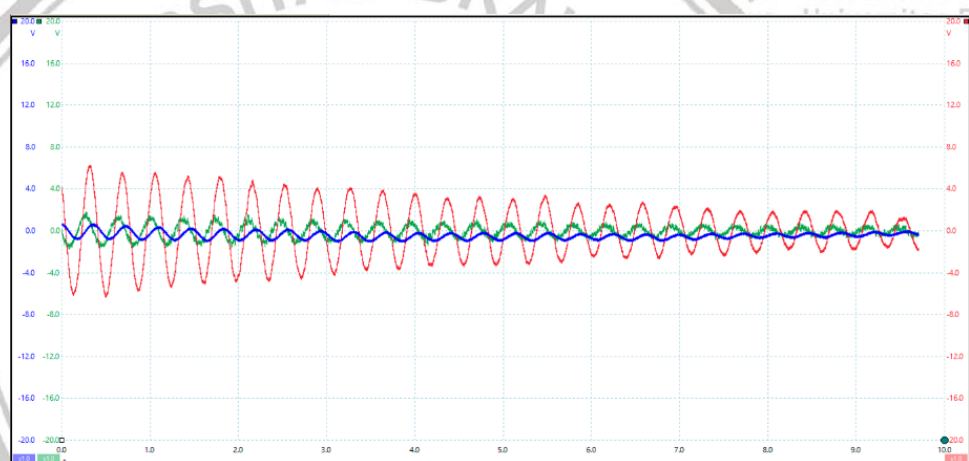
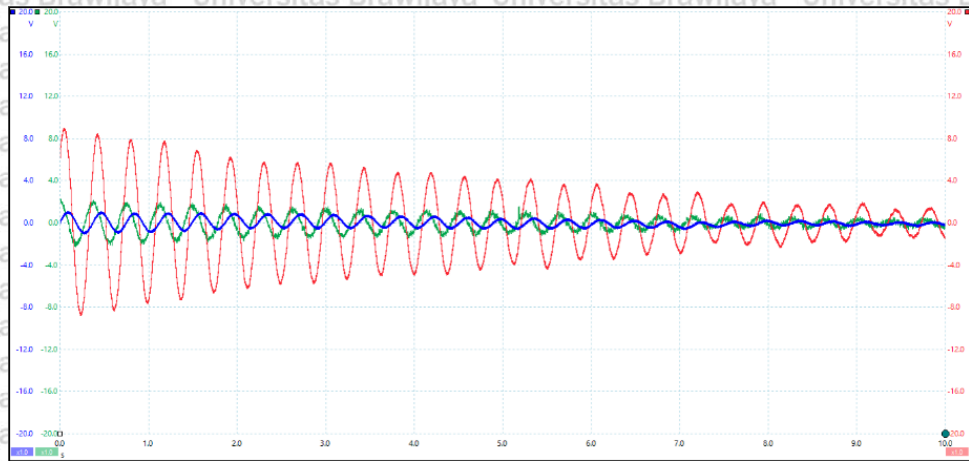
Gambar L 4.2 Sinyal Hasil uji MEMS Percepatan dan MEMS Kecepatan



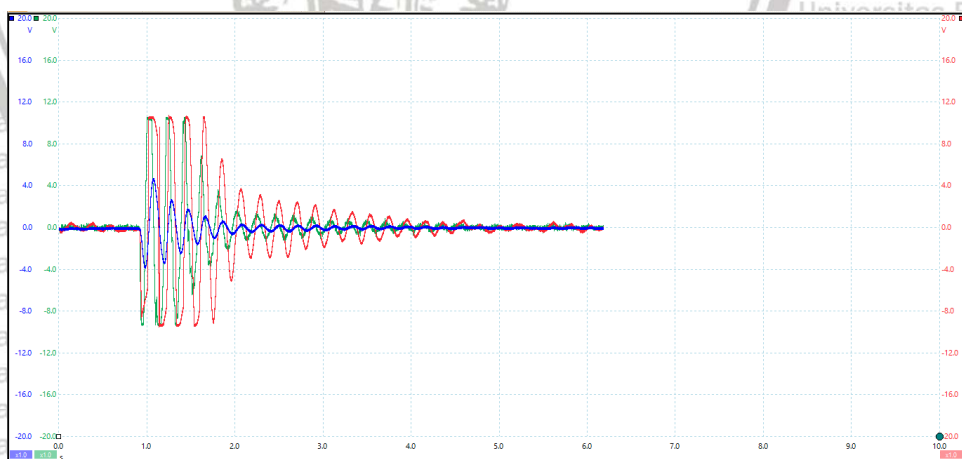
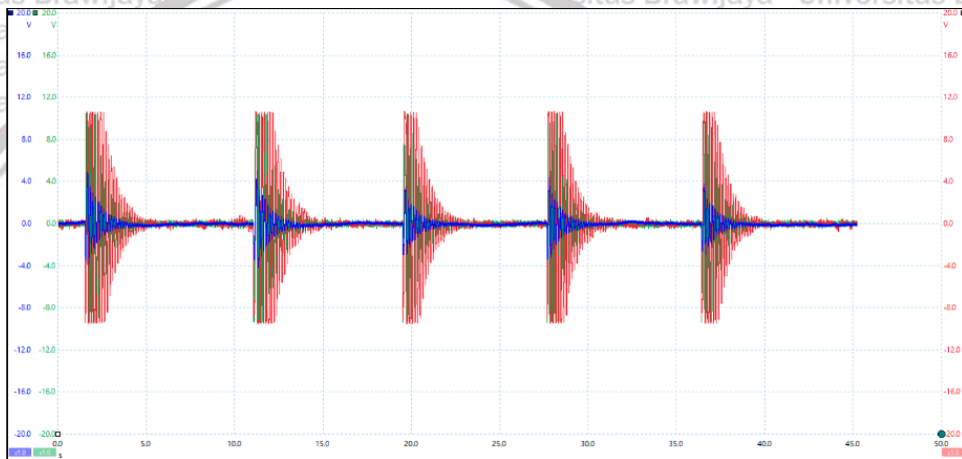
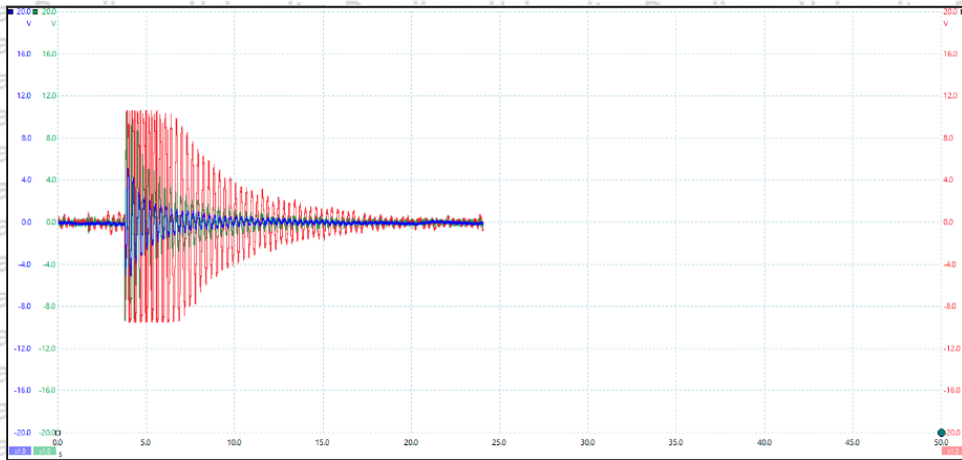
Gambar L 4.3 Sinyal Hasil uji MEMS Percepatan dan MEMS Kecepatan

Lampiran 5. Hasil Uji Rangkaian MEMS Kecepatan frekuensi tinggi, MEMS Kecepatan frekuensi rendah, dan MEMS Percepatan

1. Frekuensi Rendah



## 2. Frekuensi Tinggi





## Lampiran 6. Datasheet Sensor MEMS Accelerometer MMA7361L



Freescale Semiconductor  
Technical Data

Document Number: MMA7361L  
Rev 0, 04/2008



### ±1.5g, ±6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer

The MMA7361L is a low power, low profile capacitive micromachined accelerometer featuring signal conditioning, a 1-pole low pass filter, temperature compensation, self test, 0g-Detect which detects linear freefall, and g-Select which allows for the selection between 2 sensitivities. Zero-g offset and sensitivity are factory set and require no external devices. The MMA7361L includes a Sleep Mode that makes it ideal for handheld battery powered electronics.

#### Features

- 3mm x 5mm x 1.0mm LGA-14 Package
- Low Current Consumption: 400  $\mu$ A
- Sleep Mode: 3  $\mu$ A
- Low Voltage Operation: 2.2 V – 3.6 V
- High Sensitivity (800 mV/g @ 1.5g)
- Selectable Sensitivity ( $\pm$ 1.5g,  $\pm$ 6g)
- Fast Turn On Time (0.5 ms Enable Response Time)
- Self Test for Freefall Detect Diagnosis
- 0g-Detect for Freefall Protection
- Signal Conditioning with Low Pass Filter
- Robust Design, High Shocks Survivability
- RoHS Compliant
- Environmentally Preferred Product
- Low Cost

#### Typical Applications

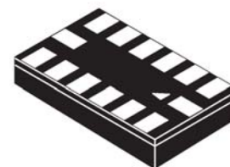
- 3D Gaming: Tilt and Motion Sensing, Event Recorder
- HDD MP3 Player: Freefall Detection
- Laptop PC: Freefall Detection, Anti-Theft
- Cell Phone: Image Stability, Text Scroll, Motion Dialing, E-Compass
- Pedometer: Motion Sensing
- PDA: Text Scroll
- Navigation and Dead Reckoning: E-Compass Tilt Compensation
- Robotics: Motion Sensing

ORDERING INFORMATION				
Part Number	Temperature Range	Package Drawing	Package	Shipping
MMA7361LT	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	Tray
MMA7361LR1	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	7" Tape & Reel
MMA7361LR2	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	13" Tape & Reel

MMA7361L

MMA7361L: XYZ AXIS  
ACCELEROMETER  
 $\pm$ 1.5g,  $\pm$ 6g

Bottom View



14 LEAD  
LGA  
CASE 1977-01

Top View

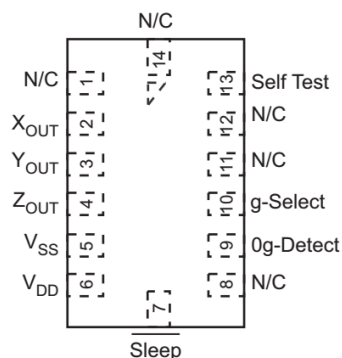


Figure 1. Pin Connections

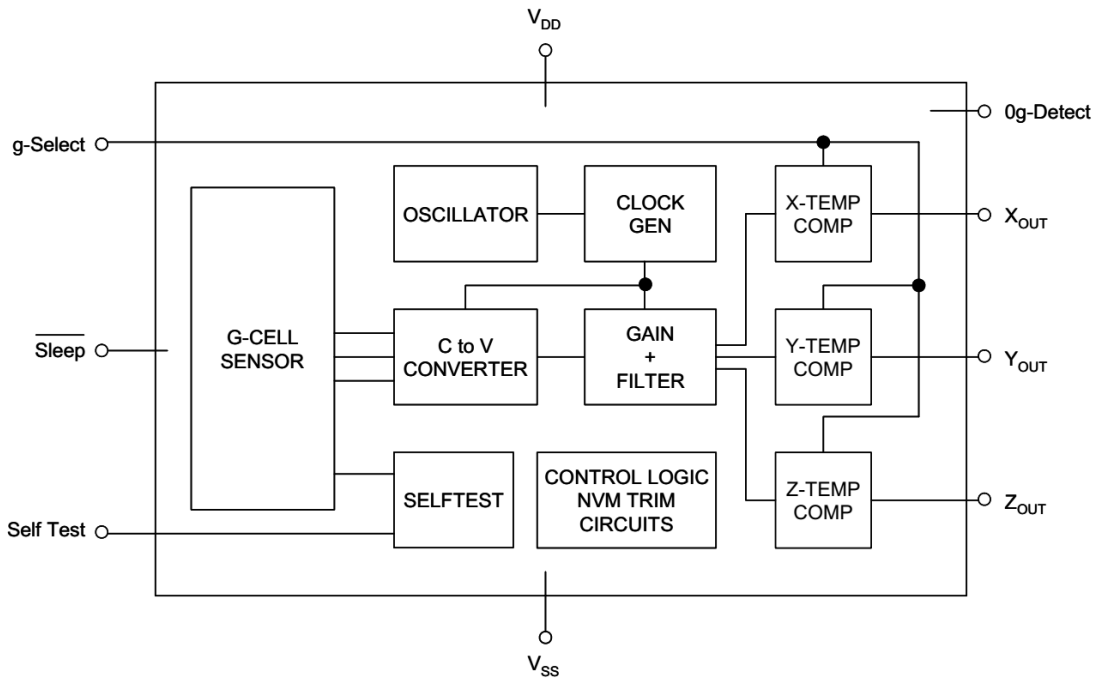


Figure 2. Simplified Accelerometer Functional Block Diagram

Table 1. Maximum Ratings

(Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Acceleration (all axis)	$g_{max}$	$\pm 5000$	g
Supply Voltage	$V_{DD}$	-0.3 to +3.6	V
Drop Test <sup>(1)</sup>	$D_{drop}$	1.8	m
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-40 to +125	°C

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

### ELECTRO STATIC DISCHARGE (ESD)

**WARNING: This device is sensitive to electrostatic discharge.**

Although the Freescale accelerometer contains internal 2000 V ESD protection circuitry, extra precaution must be taken by the user to protect the chip from ESD. A charge of over 2000 volts can accumulate on the human body or associated test equipment. A charge of this magnitude can

alter the performance or cause failure of the chip. When handling the accelerometer, proper ESD precautions should be followed to avoid exposing the device to discharges which may be detrimental to its performance.

MMA7361L



**Table 2. Operating Characteristics**

Unless otherwise noted:  $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 85^{\circ}\text{C}$ ,  $2.2\text{ V} \leq V_{\text{DD}} \leq 3.6\text{ V}$ , Acceleration = 0g, Loaded output<sup>(1)</sup>

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range <sup>(2)</sup>					
Supply Voltage <sup>(3)</sup>	$V_{\text{DD}}$	2.2	3.3	3.6	V
Supply Current <sup>(4)</sup>	$I_{\text{DD}}$	—	400	600	$\mu\text{A}$
Supply Current at Sleep Mode <sup>(4)</sup>	$I_{\text{DD}}$	—	3	10	$\mu\text{A}$
Operating Temperature Range	$T_A$	-40	—	+85	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range, X-Axis, Y-Axis, Z-Axis					
g-Select: 0	$g_{\text{FS}}$	—	$\pm 1.5$	—	g
g-Select: 1	$g_{\text{FS}}$	—	$\pm 6.0$	—	g
Output Signal					
Zero-g ( $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ , $V_{\text{DD}} = 3.3\text{ V}$ ) <sup>(5)</sup> , <sup>(6)</sup>	$V_{\text{OFF}}$	1.485	1.65	1.815	V
Zero-g <sup>(4)</sup>	$V_{\text{OFF}}, T_A$	-2.0	$\pm 0.5$	+2.0	$\text{mg}/^{\circ}\text{C}$
Sensitivity ( $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ , $V_{\text{DD}} = 3.3\text{ V}$ )					
1.5g	$S_{1.5\text{g}}$	740	800	860	$\text{mV/g}$
6g	$S_{6\text{g}}$	190.6	206	221.5	$\text{mV/g}$
Sensitivity <sup>(4)</sup>	$S, T_A$	-0.0075	$\pm 0.002$	+0.0075	$\%/^{\circ}\text{C}$
Bandwidth Response					
XY	$f_{-3\text{dBXY}}$	—	400	—	Hz
Z	$f_{-3\text{dBZ}}$	—	300	—	Hz
Output Impedance	$Z_{\text{O}}$	—	32	—	$\text{k}\Omega$
0g-Detect	$0g_{\text{detect}}$	-0.4	0	+0.4	g
Self Test					
Output Response					
$X_{\text{OUT}}, Y_{\text{OUT}}$	$\Delta g_{\text{STXY}}$	+0.05	-0.1	—	g
$Z_{\text{OUT}}$	$\Delta g_{\text{STZ}}$	+0.8	+1.0	+1.2	g
Input Low	$V_{\text{IL}}$	$V_{\text{SS}}$	—	$0.3 V_{\text{DD}}$	V
Input High	$V_{\text{IH}}$	$0.7 V_{\text{DD}}$	—	$V_{\text{DD}}$	V
Noise					
Power Spectral Density RMS (0.1 Hz – 1 kHz) <sup>(4)</sup>	$\eta_{\text{PSD}}$	—	350	—	$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Control Timing					
Power-Up Response Time <sup>(7)</sup>	$t_{\text{RESPONSE}}$	—	1.0	2.0	ms
Enable Response Time <sup>(8)</sup>	$t_{\text{ENABLE}}$	—	0.5	2.0	ms
Self Test Response Time <sup>(9)</sup>	$t_{\text{ST}}$	—	2.0	5.0	ms
Sensing Element Resonant Frequency					
XY	$f_{\text{GCELLXY}}$	—	6.0	—	kHz
Z	$f_{\text{GCELLZ}}$	—	3.4	—	kHz
Internal Sampling Frequency	$f_{\text{CLK}}$	—	11	—	kHz
Output Stage Performance					
Full-Scale Output Range ( $I_{\text{OUT}} = 3\ \mu\text{A}$ )	$V_{\text{FSO}}$	$V_{\text{SS}}+0.1$	—	$V_{\text{DD}}-0.1$	V
Nonlinearity, $X_{\text{OUT}}, Y_{\text{OUT}}, Z_{\text{OUT}}$	$\text{NL}_{\text{OUT}}$	-1.0	—	+1.0	%FSO
Cross-Axis Sensitivity <sup>(10)</sup>	$V_{\text{XY}, \text{XZ}, \text{YZ}}$	-5.0	—	+5.0	%

- For a loaded output, the measurements are observed after an RC filter consisting of an internal 32k $\Omega$  resistor and an external 3.3nF capacitor (recommended as a minimum to filter clock noise) on the analog output for each axis and a 0.1 $\mu\text{F}$  capacitor on  $V_{\text{DD}} - \text{GND}$ . The output sensor bandwidth is determined by the Capacitor added on the output.  $f = 1/2\pi * (32 \times 10^3) * C$ .  $C = 3.3\text{ nF}$  corresponds to  $\text{BW} = 1507\text{Hz}$ , which is the minimum to filter out internal clock noise.
- These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
- Within the supply range of 2.2 and 3.6 V, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
- This value is measured with g-Select in 1.5g mode.
- The device can measure both + and - acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above  $V_{\text{DD}}/2$ . For negative acceleration, the output will decrease below  $V_{\text{DD}}/2$ .
- For optimal 0g offset performance, adhere to AN3484 and AN3447
- The response time between 10% of full scale  $V_{\text{DD}}$  input voltage and 90% of the final operating output voltage.
- The response time between 10% of full scale Sleep Mode input voltage and 90% of the final operating output voltage.
- The response time between 10% of the full scale self test input voltage and 90% of the self test output voltage.
- A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90° from the true axis of sensitivity.

MMA7361L

Sensors



## PRINCIPLE OF OPERATION

The Freescale accelerometer is a surface-micromachined integrated-circuit accelerometer.

The device consists of a surface micromachined capacitive sensing cell (g-cell) and a signal conditioning ASIC contained in a single package. The sensing element is sealed hermetically at the wafer level using a bulk micromachined cap wafer.

The g-cell is a mechanical structure formed from semiconductor materials (polysilicon) using semiconductor processes (masking and etching). It can be modeled as a set of beams attached to a movable central mass that move between fixed beams. The movable beams can be deflected from their rest position by subjecting the system to an acceleration (Figure 3).

As the beams attached to the central mass move, the distance from them to the fixed beams on one side will increase by the same amount that the distance to the fixed beams on the other side decreases. The change in distance is a measure of acceleration.

The g-cell beams form two back-to-back capacitors (Figure 3). As the center beam moves with acceleration, the distance between the beams changes and each capacitor's value will change, ( $C = A\epsilon/D$ ). Where A is the area of the beam,  $\epsilon$  is the dielectric constant, and D is the distance between the beams.

The ASIC uses switched capacitor techniques to measure the g-cell capacitors and extract the acceleration data from the difference between the two capacitors. The ASIC also signal conditions and filters (switched capacitor) the signal, providing a high level output voltage that is ratiometric and proportional to acceleration.

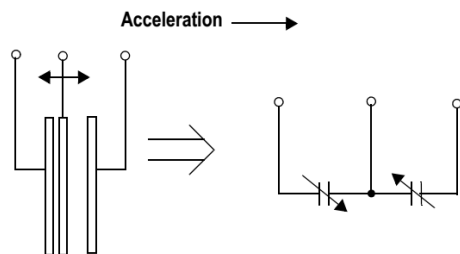


Figure 3. Simplified Transducer Physical Model

## SPECIAL FEATURES

### 0g-Detect

The sensor offers a 0g-Detect feature that provides a logic high signal when all three axes are at 0g. This feature enables the application of Linear Freefall protection if the signal is connected to an interrupt pin or a poled I/O pin on a microcontroller.

### Self Test

The sensor provides a self test feature that allows the verification of the mechanical and electrical integrity of the accelerometer at any time before or after installation. This feature is critical in applications such as hard disk drive

protection where system integrity must be ensured over the life of the product. Customers can use self test to verify the solderability to confirm that the part was mounted to the PCB correctly. To use this feature to verify the 0g-Detect function, the accelerometer should be held upside down so that the z-axis experiences -1g. When the self test function is initiated, an electrostatic force is applied to each axis to cause it to deflect. The x- and y-axis are deflected slightly while the z-axis is trimmed to deflect 1g. This procedure assures that both the mechanical (g-cell) and electronic sections of the accelerometer are functioning.

### g-Select

The g-Select feature allows for the selection between two sensitivities. Depending on the logic input placed on pin 10, the device internal gain will be changed allowing it to function with a 1.5g or 6g sensitivity (Table 3). This feature is ideal when a product has applications requiring two different sensitivities for optimum performance. The sensitivity can be changed at anytime during the operation of the product. The g-Select pin can be left unconnected for applications requiring only a 1.5g sensitivity as the device has an internal pull-down to keep it at that sensitivity (800mV/g).

Table 3. g-Select Pin Description

g-Select	g-Range	Sensitivity
0	1.5g	800 mV/g
1	6g	206 mV/g

### Sleep Mode

The 3 axis accelerometer provides a Sleep Mode that is ideal for battery operated products. When Sleep Mode is active, the device outputs are turned off, providing significant reduction of operating current. A low input signal on pin 7 (Sleep Mode) will place the device in this mode and reduce the current to 3  $\mu$ A typ. For lower power consumption, it is recommended to set g-Select to 1.5g mode. By placing a high input signal on pin 7, the device will resume to normal mode of operation.

### Filtering

The 3 axis accelerometer contains an onboard single-pole switched capacitor filter. Because the filter is realized using switched capacitor techniques, there is no requirement for external passive components (resistors and capacitors) to set the cut-off frequency.

### Ratiometricity

Ratiometricity simply means the output offset voltage and sensitivity will scale linearly with applied supply voltage. That is, as supply voltage is increased, the sensitivity and offset increase linearly; as supply voltage decreases, offset and sensitivity decrease linearly. This is a key feature when interfacing to a microcontroller or an A/D converter because it provides system level cancellation of supply induced errors in the analog to digital conversion process.

## MMA7361L

## Lampiran 7. Datasheet Sensor Geofon SM-24

### SM-24 Geophone Element

Where Quality Data Starts

#### Features

- Tight specification, low-distortion geophone
- Extended spurious over 240 Hz, allowing full bandwidth at 2-ms sampling
- Backwards compatible with SM-4, SM-4 Superphone™ range, and SM-24ST
- Horizontal element available for shear-wave and 3-C recording.
- 3-year non-prorated warranty
- Lowest lifecycle cost of ownership in the industry
- Installed base of over 8 million worldwide (est.)



The SM-24 geophone element is designed to offer the highest performance in seismic exploration based upon field-proven I/O Sensor technology. Low distortion, combined with excellent specifications, provide high-fidelity data in 2-D and 3-D surveys. The extended bandwidth allows the full potential of 2-ms/24-bit recording systems to be realized.

The tight specifications, unique element design, and exceptional quality of the Sensor SM-24 make it the lowest life cycle cost of ownership geophone in the industry.

Applications: 2-D & 3-D seismic exploration with bandwidth from 10 Hz up to 240 Hz.

Implementation: Can be installed in a variety of I/O Sensor geophone cases.



**SENSOR Nederland b.v.**  
An I/O subsidiary

**Specifications: SM-24 Geophone Element**

**Frequency**

Natural frequency 10 Hz  
 Tolerance ± 2.5%  
 Maximum tilt angle for specified Fn 10°  
 Typical spurious frequency >240 Hz

**Distortion**

Distortion coil to case velocity with 17.78mm/s (0.7 in/s) p.p. <0.1%  
 Distortion measurement frequency 12 Hz  
 Typical distortion (string of 12 in series, measured at 12 Hz) 0.03 %

**Damping**

Open circuit (typical) 0.25  
 Damping calibration- shunt resistance 1,339 Ω  
 Damping with calibration shunt 0.6  
 Tolerance with calibration shunt + 5 %, - 0 %

**Sensitivity**

Sensitivity 28.8 V/m/s (0.73 V/in/s)  
 Tolerance ± 2.5 %  
 RtBcfn 6,000 Ω Hz  
 Moving mass 11 g (0.38 oz)  
 Max coil excursion p.p. 2 mm (0.08 in)

**Coil Resistance**

Standard 375 Ω  
 Tolerance +/- 2.5 %

**Physical Characteristics**

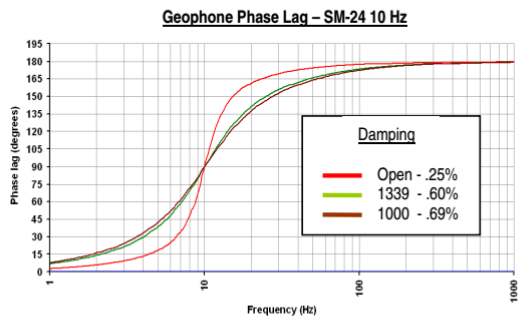
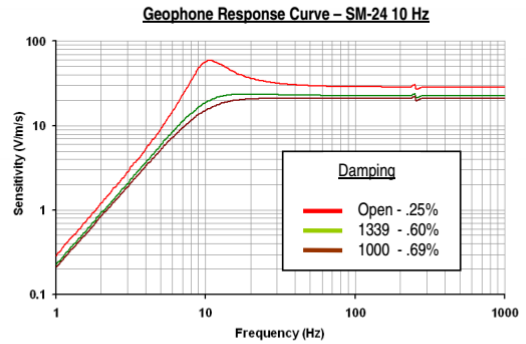
Diameter 25.4 mm (1 in)  
 Height 32 mm (1.26 in)  
 Weight 74 g (2.6 oz)  
 Operating temperature range -40°C to +100°C (-40°F to +212°F)

**Warranty Period\***

3 years

\* Warranty excludes damage caused by high voltage and physical damage to the element case.

All parameters are specified at +20°C in the vertical position unless otherwise stated.



**Ordering Information**

**SM-24**

SM-24/U-B 10 Hz 375 Ohm (upright basic unit with insulating disc) P/N 1004117

Europe	United States - Stafford, TX	England	Web Site
I/O Sensor Nederland bv	Input/Output Inc.	Input/Output Inc.	www.geophone.com
Fax +31 71 561 7145	Fax +1 281 879 3626	Fax +44 1603 415143	www.i-o.com
Phone +31 71 560 1234	Phone +1 281 933 3339	Phone +44 1603 481020	

© 2006. Input/Output, Inc. All rights reserved. Information subject to change without notice.

Lampiran 8. Datasheet Güralp CMG-3T

# Güralp 3T



## WEAK MOTION BROADBAND SEISMOMETER



Our best-selling 3T instrument has been in continuous production since 1987.

The Güralp 3T is a triaxial, broadband, weak motion instrument, suitable for surface vault, subsurface vault and post-hole installations. The 3T is widely used on many national seismic networks, with in excess of 3000 triaxial sensors deployed worldwide.

### Key features

- Covers the complete seismic spectrum with a single transfer function
- The 3T family offers standard frequency responses of either a 120 s or a 360 s long period corner, other bespoke options are available on request
- Hybrid velocity-acceleration responses available offering unrivalled dynamic range.
- Measured Self noise below the USGS NLNM from 200 s to 20 Hz
- High linearity: >111 dB (USGS figures)
- Over 140 dB dynamic range over a wide frequency band
- Cross axis rejection over 65 dB; sensor axes orthogonal to within  $\pm 0.05^\circ$
- Remote, automatic electronic mass locking, unlocking and centring
- Operating tilt range of  $\pm 2.5^\circ$  with adjustable feet for off-horizontal installation bases
- Low power consumption: 0.75 W from a 10–36 V supply
- Truly portable with lifing handle and convenient access to connectors

### Applications

- > Surface and subsurface vault installations
- > Posthole installation
- > National seismic networks
- > Global and regional earthquake monitoring
- > Nuclear test ban treaty monitoring
- > Permanent dense arrays

Images: Güralp 3T seismometer

# Güralp 3T



## SPECIFICATIONS

SYSTEM	
Technology	Force feedback (force-balance) velocity sensor
Configuration / Topology	Triaxial orthogonal (ZNE)
PERFORMANCE	
Velocity output band (flat response within -3 dB crossing points)	Standard options: 120s (0.0083 Hz) to 50 Hz 360 s (0.0028 Hz) to 50 Hz  Contact Güralp to discuss other frequency response options
Output sensitivity	1500 V/ms <sup>2</sup> (2 x 750 V/ms <sup>2</sup> ) differential standard output (full-scale clip level of 13 mm/s)  Contact Güralp to discuss alternative high sensitivity (high gain) options
Peak full-scale output voltage	Differential: ±20 V (40 V peak-to-peak) Single-ended (e.g. mass positions): ±10 V (20 V peak-to-peak)
Self noise below NLNM (New Low Noise Model, Peterson, 1993, USGS)	200 s (0.005 Hz) to 20 Hz
Sensor dynamic range (at standard output sensitivity)	140 dB
Cross axis rejection	65 dB
Linearity	>111 dB
Lowest spurious resonance	>140 Hz
Damping	70% of critical
Operating tilt range	±2.5°
MASS / MONITORING CONTROL	
Sensor Mass positions	Three independent sensor mass position outputs (single-ended)
Mass locking	Remote auto mass lock/unlock for transportation
Mass centring / offset zeroing	Remotely controlled automatic mass centring

CALIBRATION	
Calibration input	Independent signal and enable lines exposed on sensor connector
CONNECTORS	
Analogue output	26-pin Mil-spec (military specification bayonet) connector  Optional 1500 psi waterproof connector for posthole deployment
POWER	
Power supply voltage	10–36 V DC
Power consumption (at 12 V DC)	0.75 W
PHYSICAL / ENVIRONMENTAL	
Operating temperature range	-20 to +75 °C (-55 °C optional)
Operating humidity range	0-100% relative humidity
Enclosure ingress protection	IP68 - protection against prolonged effects of immersion under pressure (tested under 3 m of water for 72 hours)  For deeper, long term immersion, the optional 1500 psi waterproof connector is recommended
Enclosure material	Stainless steel case O-ring seals throughout
Diameter	168 mm
Height with feet and handle	340 mm
Weight	14.6 kg
Alignment	Bubble level on lid; north arrow on handle and base; adjustable feet
SUPPORTING DOCUMENTATION	
Calibration values	Measured sensor sensitivity, frequency response, instrument poles and zeros enclosed
Full user's guide	Available online at: <a href="https://www.guralp.com/documents/MAN-030-0001.pdf">https://www.guralp.com/documents/MAN-030-0001.pdf</a>

Güralp Systems Limited  
Midas House  
Calleva Park  
Aldermaston  
Reading  
RG7 8EA  
United Kingdom

T +44 118 981 9056  
F +44 118 981 9943  
E sales@guralp.com

[www.guralp.com](http://www.guralp.com)

In the interests of continual improvement with respect to design, reliability, function or otherwise, all product specifications and data are subject to change without prior notice.

DAS-030-0001 Issue L



## Lampiran 9. Datasheet Strong Motion Seismometer EpiSensor ES-T



# EpiSensor ES-T

## Force Balance Accelerometer

### The EpiSensor ES-T: A Flexible, Versatile Value

Kinematics announces its latest line of earthquake sensors – EpiSensor force balance accelerometers. Model FBA ES-T is a triaxial surface package useful for many types of earthquake recording applications. The unit consists of three EpiSensor force balance accelerometer modules mounted orthogonally in one small convenient package. With fullscale recording ranges of  $\pm 0.25$  to  $\pm 4g$  (user selectable) the EpiSensor provides on-scale recording of earthquake motions even at nearfault locations and in a wide variety of structure types.

The significantly improved bandwidth of DC to 200 Hz allows engineers and scientists to study motions at higher frequencies while maintaining the very important DC response that allows simple field calibration and reduces post-processing confusion.

Output circuitry is also significantly enhanced. Several types of outputs can be field-selected by the user:  $\pm 2.5V$  single-ended output for use with traditional Kinematics earthquake recording instruments;  $\pm 10V$  single-ended or  $\pm 20V$  differential output for use with Kinematics digital recorders and other 24-bit digital recorders currently on the market.

EpiSensor force balance accelerometers are also available in uniaxial (the FBA ES-U) and borehole (the FBA ES-SB shallow and FBA ES-DH deep) packages.

### FEATURES

- Low noise
- Extended bandwidth - DC to 200Hz
- User-selectable full-scale range
- Calibration coil (standard)
- Single-end or differential output (user selectable)
- Double-stage transient protection

### SPECIFICATIONS

<b>Dynamic range:</b>	155 dB+
<b>Bandwidth:</b>	DC to 200Hz
<b>Calibration coil:</b>	Standard
<b>Full-scale range:</b>	User selectable at $\pm 0.25g$ , $\pm 0.5g$ , $\pm 1g$ , $\pm 2g$ or $\pm 4g$
<b>Outputs:</b>	User selectable at: $\pm 2.5V$ single-ended $\pm 10V$ single-ended $\pm 5V$ differential $\pm 20V$ differential
<b>Zero adjust:</b>	Three user-friendly access holes for simple, safe, efficient adjustment

<b>Linearity:</b>	< 1000 $\mu g/g^2$
<b>Hysteresis:</b>	< 0.1% of full scale
<b>Cross-axis sensitivity:</b>	< 1% (including misalignment)
<b>Zero point thermal drift:</b>	< 500 $\mu g/^\circ C$ (1g sensor)
<b>ESD, RF, EMI protection:</b>	Double stage transient protection with gas arrester elements
<b>Power consumption:</b>	12mA from +/- 12V (Standard Amp) 35mA from +/- 12V (Low Noise Amp) Single supply option available
<b>Physical size:</b>	13.3 cm diameter (cylinder), 6.2 cm high
<b>Mounting:</b>	Single bolt mounting, three adjustable leveling feet and bubble level
<b>Connection:</b>	Single military-style metal connector
<b>Operating Temperature:</b>	-20° to 70°C (0° to 160°F)
<b>Housing:</b>	Watertight enclosure

USA - 222 Vista Ave., Pasadena, CA 91107  
Tel (626)795-2220 | Fax (626)795-0868

Switzerland - Z.I. Le Tresis 6B, 1028 Preverenges  
Tel +41 (21) 803-2829 | www.kinematics.com

10-23-13

Lampiran 10. Datasheet IC penguatan AD620



Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier

AD620

FEATURES

Easy to use

- Gain set with one external resistor (Gain range 1 to 10,000)
- Wide power supply range ( $\pm 2.3$  V to  $\pm 18$  V)
- Higher performance than 3 op amp IA designs
- Available in 8-lead DIP and SOIC packaging
- Low power, 1.3 mA max supply current

Excellent dc performance (B grade)

- 50  $\mu$ V max, input offset voltage
- 0.6  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C max, input offset drift
- 1.0 nA max, input bias current
- 100 dB min common-mode rejection ratio (G = 10)

Low noise

- 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 kHz, input voltage noise
- 0.28  $\mu$ V p-p noise (0.1 Hz to 10 Hz)

Excellent ac specifications

- 120 kHz bandwidth (G = 100)
- 15  $\mu$ s settling time to 0.01%

APPLICATIONS

- Weigh scales
- ECG and medical instrumentation
- Transducer interface
- Data acquisition systems
- Industrial process controls
- Battery-powered and portable equipment

CONNECTION DIAGRAM

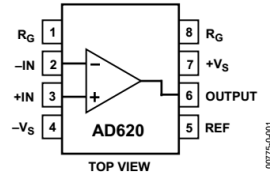


Figure 1. 8-Lead PDIP (N), CERDIP (Q), and SOIC (R) Packages

PRODUCT DESCRIPTION

The AD620 is a low cost, high accuracy instrumentation amplifier that requires only one external resistor to set gains of 1 to 10,000. Furthermore, the AD620 features 8-lead SOIC and DIP packaging that is smaller than discrete designs and offers lower power (only 1.3 mA max supply current), making it a good fit for battery-powered, portable (or remote) applications.

The AD620, with its high accuracy of 40 ppm maximum nonlinearity, low offset voltage of 50  $\mu$ V max, and offset drift of 0.6  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C max, is ideal for use in precision data acquisition systems, such as weigh scales and transducer interfaces. Furthermore, the low noise, low input bias current, and low power of the AD620 make it well suited for medical applications, such as ECG and noninvasive blood pressure monitors.

The low input bias current of 1.0 nA max is made possible with the use of Super $\beta$  processing in the input stage. The AD620 works well as a preamplifier due to its low input voltage noise of 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  at 1 kHz, 0.28  $\mu$ V p-p in the 0.1 Hz to 10 Hz band, and 0.1 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  input current noise. Also, the AD620 is well suited for multiplexed applications with its settling time of 15  $\mu$ s to 0.01%, and its cost is low enough to enable designs with one in-amp per channel.

Table 1. Next Generation Upgrades for AD620

Part	Comment
AD8221	Better specs at lower price
AD8222	Dual channel or differential out
AD8226	Low power, wide input range
AD8220	JFET input
AD8228	Best gain accuracy
AD8295	+2 precision op amps or differential out
AD8429	Ultra low noise

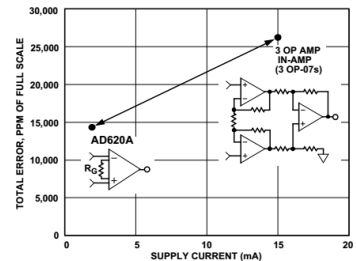


Figure 2. Three Op Amp IA Designs vs. AD620

Rev. H

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
 Tel: 781.329.4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
 Fax: 781.326.8703 © 2003–2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## SPECIFICATIONS

Typical @ 25°C,  $V_S = \pm 15\text{ V}$ , and  $R_L = 2\text{ k}\Omega$ , unless otherwise noted.

Table 2.

Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S <sup>1</sup>			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>GAIN</b>											
	$G = 1 + (49.4\text{ k}\Omega/R_G)$										
Gain Range		1		10,000	1		10,000	1		10,000	
Gain Error <sup>2</sup>	$V_{OUT} = \pm 10\text{ V}$										
G = 1			0.03	0.10		0.01	0.02		0.03	0.10	%
G = 10			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
G = 100			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
G = 1000			0.40	0.70		0.35	0.50		0.40	0.70	%
Nonlinearity	$V_{OUT} = -10\text{ V to }+10\text{ V}$										
G = 1–1000	$R_L = 10\text{ k}\Omega$		10	40		10	40		10	40	ppm
G = 1–100	$R_L = 2\text{ k}\Omega$		10	95		10	95		10	95	ppm
Gain vs. Temperature	G = 1			10			10			10	ppm/°C
	Gain > 1 <sup>2</sup>			–50			–50			–50	ppm/°C
<b>VOLTAGE OFFSET</b>											
	(Total RTI Error = $V_{OSI} + V_{OSO}/G$ )										
Input Offset, $V_{OSI}$	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$		30	125		15	50		30	125	$\mu\text{V}$
Overtemperature	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$			185			85			225	$\mu\text{V}$
Average TC	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$		0.3	1.0		0.1	0.6		0.3	1.0	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset, $V_{OSO}$	$V_S = \pm 15\text{ V}$		400	1000		200	500		400	1000	$\mu\text{V}$
	$V_S = \pm 5\text{ V}$			1500			750			1500	$\mu\text{V}$
Overtemperature	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$			2000			1000			2000	$\mu\text{V}$
Average TC	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$		5.0	15		2.5	7.0		5.0	15	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSR)	$V_S = \pm 2.3\text{ V to } \pm 18\text{ V}$										
G = 1		80		100	80		100	80		100	dB
G = 10		95		120	100		120	95		120	dB
G = 100		110		140	120		140	110		140	dB
G = 1000		110		140	120		140	110		140	dB
<b>INPUT CURRENT</b>											
Input Bias Current			0.5	2.0		0.5	1.0		0.5	2	nA
Overtemperature				2.5			1.5			4	nA
Average TC			3.0			3.0			8.0		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current			0.3	1.0		0.3	0.5		0.3	1.0	nA
Overtemperature				1.5			0.75			2.0	nA
Average TC			1.5			1.5			8.0		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
<b>INPUT</b>											
Input Impedance											
Differential			10  2			10  2			10  2		$\text{G}\Omega_{\text{pF}}$
Common-Mode			10  2			10  2			10  2		$\text{G}\Omega_{\text{pF}}$
Input Voltage Range <sup>3</sup>	$V_S = \pm 2.3\text{ V to } \pm 5\text{ V}$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	V
Overtemperature		$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	V
	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 18\text{ V}$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	V
Overtemperature		$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 2.1$		$+V_S + 2.1$	$-V_S + 2.3$		$+V_S - 1.4$	V

# AD620

Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S <sup>1</sup>			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Common-Mode Rejection											
Ratio DC to 60 Hz with 1 kΩ Source Imbalance	$V_{CM} = 0\text{ V to } \pm 10\text{ V}$										
G = 1		73	90		80	90		73	90		dB
G = 10		93	110		100	110		93	110		dB
G = 100		110	130		120	130		110	130		dB
G = 1000	110	130		120	130		110	130		dB	
OUTPUT											
Output Swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 2.3\text{ V to } \pm 5\text{ V}$	$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		V
Overtemperature		$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.3$		V
Overtemperature	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 18\text{ V}$	$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		V
Short Circuit Current		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$		$-V_S + 2.3$	$+V_S - 1.5$		V
DYNAMIC RESPONSE											
Small Signal -3 dB Bandwidth											
G = 1			1000			1000			1000		kHz
G = 10			800			800			800		kHz
G = 100			120			120			120		kHz
G = 1000		12			12			12		kHz	
Slew Rate		0.75	1.2		0.75	1.2		0.75	1.2		V/ $\mu\text{s}$
Settling Time to 0.01%	10 V Step										
G = 1-100			15			15			15		$\mu\text{s}$
G = 1000			150			150			150		$\mu\text{s}$
NOISE											
Voltage Noise, 1 kHz	$Total\ RTI\ Noise = \sqrt{(e_{ni}^2) + (e_{no}/G)^2}$										
Input, Voltage Noise, $e_{ni}$		9	13		9	13		9	13		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Output, Voltage Noise, $e_{no}$		72	100		72	100		72	100		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz											
G = 1		3.0			3.0	6.0		3.0	6.0		$\mu\text{V p-p}$
G = 10		0.55			0.55	0.8		0.55	0.8		$\mu\text{V p-p}$
G = 100-1000		0.28			0.28	0.4		0.28	0.4		$\mu\text{V p-p}$
Current Noise	$f = 1\text{ kHz}$	100			100			100			fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
0.1 Hz to 10 Hz		10			10			10			pA p-p
REFERENCE INPUT											
$R_{IN}$	$V_{IN}, V_{REF} = 0$	20			20			20			k $\Omega$
$I_{IN}$		50	60		50	60		50	60		$\mu\text{A}$
Voltage Range		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		V
Gain to Output		$1 \pm 0.0001$			$1 \pm 0.0001$			$1 \pm 0.0001$			
POWER SUPPLY											
Operating Range <sup>4</sup>		$\pm 2.3$	$\pm 18$		$\pm 2.3$	$\pm 18$		$\pm 2.3$	$\pm 18$		V
Quiescent Current	$V_S = \pm 2.3\text{ V to } \pm 18\text{ V}$		0.9	1.3		0.9	1.3		0.9	1.3	mA
Overtemperature				1.1	1.6		1.1	1.6		1.1	1.6
TEMPERATURE RANGE											
For Specified Performance		-40 to +85			-40 to +85			-55 to +125			$^{\circ}\text{C}$

<sup>1</sup> See Analog Devices military data sheet for 883B tested specifications.

<sup>2</sup> Does not include effects of external resistor  $R_C$ .

<sup>3</sup> One input grounded.  $G = 1$ .

<sup>4</sup> This is defined as the same supply range that is used to specify PSR.

AD620

THEORY OF OPERATION

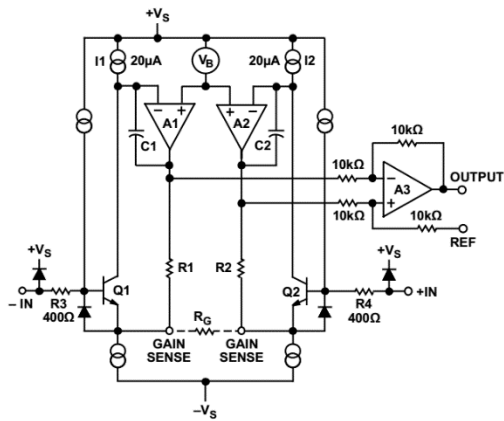


Figure 36. Simplified Schematic of AD620

The AD620 is a monolithic instrumentation amplifier based on a modification of the classic three op amp approach. Absolute value trimming allows the user to program gain accurately (to 0.15% at G = 100) with only one resistor. Monolithic construction and laser wafer trimming allow the tight matching and tracking of circuit components, thus ensuring the high level of performance inherent in this circuit.

The input transistors Q1 and Q2 provide a single differential-pair bipolar input for high precision (Figure 36), yet offer 10× lower input bias current thanks to Superbeta processing. Feedback through the Q1-A1-R1 loop and the Q2-A2-R2 loop maintains constant collector current of the input devices Q1 and Q2, thereby impressing the input voltage across the external gain setting resistor RG. This creates a differential gain from the inputs to the A1/A2 outputs given by  $G = (R1 + R2)/RG + 1$ . The unity-gain subtractor, A3, removes any common-mode signal, yielding a single-ended output referred to the REF pin potential.

The value of RG also determines the transconductance of the preamp stage. As RG is reduced for larger gains, the transconductance increases asymptotically to that of the input transistors. This has three important advantages: (a) Open-loop gain is boosted for increasing programmed gain, thus reducing gain related errors. (b) The gain-bandwidth product (determined by C1 and C2 and the preamp transconductance) increases with programmed gain, thus optimizing frequency response. (c) The input voltage noise is reduced to a value of 9 nV/√Hz, determined mainly by the collector current and base resistance of the input devices.

The internal gain resistors, R1 and R2, are trimmed to an absolute value of 24.7 kΩ, allowing the gain to be programmed accurately with a single external resistor.

The gain equation is then

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1$$

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{G - 1}$$

**Make vs. Buy: a Typical Bridge Application Error Budget**

The AD620 offers improved performance over “homebrew” three op amp IA designs, along with smaller size, fewer components, and 10× lower supply current. In the typical application, shown in Figure 37, a gain of 100 is required to amplify a bridge output of 20 mV full-scale over the industrial temperature range of -40°C to +85°C. Table 4 shows how to calculate the effect various error sources have on circuit accuracy.

AD620

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3.

Parameter	Rating
Supply Voltage	±18 V
Internal Power Dissipation <sup>1</sup>	650 mW
Input Voltage (Common-Mode)	±Vs
Differential Input Voltage	25 V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range (Q)	−65°C to +150°C
Storage Temperature Range (N, R)	−65°C to +125°C
Operating Temperature Range	
AD620 (A, B)	−40°C to +85°C
AD620 (S)	−55°C to +125°C
Lead Temperature Range (Soldering 10 seconds)	300°C

<sup>1</sup> Specification is for device in free air:  
 8-Lead Plastic Package:  $\theta_{JA} = 95^{\circ}\text{C}$   
 8-Lead CERDIP Package:  $\theta_{JA} = 110^{\circ}\text{C}$   
 8-Lead SOIC Package:  $\theta_{JA} = 155^{\circ}\text{C}$

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

### ESD CAUTION



**ESD (electrostatic discharge) sensitive device.** Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

Lampiran 11. Datasheet LF444



LF444

www.ti.com

SNOSC04D – MAY 1998 – REVISED MARCH 2013

## LF444 Quad Low Power JFET Input Operational Amplifier

Check for Samples: [LF444](#)

### FEATURES

- 1/4 Supply Current of a LM148: 200  $\mu$ A/Amplifier (max)
- Low Input Bias Current: 50 pA (max)
- High Gain Bandwidth: 1 MHz
- High Slew Rate: 1 V/ $\mu$ s
- Low Noise Voltage for Low Power 35 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Low Input Noise Current 0.01 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- High Input Impedance:  $10^{12}\Omega$
- High Gain: 50k (min)

### DESCRIPTION

The LF444 quad low power operational amplifier provides many of the same AC characteristics as the industry standard LM148 while greatly improving the DC characteristics of the LM148. The amplifier has the same bandwidth, slew rate, and gain (10 k $\Omega$  load) as the LM148 and only draws one fourth the supply current of the LM148. In addition the well matched high voltage JFET input devices of the LF444 reduce the input bias and offset currents by a factor of 10,000 over the LM148. The LF444 also has a very low equivalent input noise voltage for a low power amplifier.

The LF444 is pin compatible with the LM148 allowing an immediate 4 times reduction in power drain in many applications. The LF444 should be used wherever low power dissipation and good electrical characteristics are the major considerations.

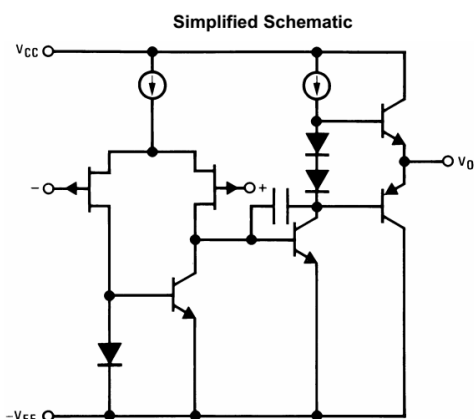


Figure 1. 1/4 Quad

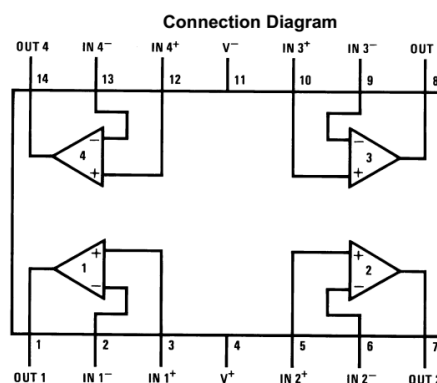


Figure 2. PDIP/SOIC Package  
Top View  
See Package Number NAK0014D, D0014A or NFF0014A



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet. BI-FET is a trademark of Texas Instruments. All other trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not

Copyright © 1998–2013, Texas Instruments Incorporated



## LF444

SNOSC04D – MAY 1998 – REVISED MARCH 2013

www.ti.com

### Absolute Maximum Ratings<sup>(1)(2)(3)</sup>

	LF444A	LF444
Supply Voltage	±22V	±18V
Differential Input Voltage	±38V	±30V
Input Voltage Range <sup>(4)</sup>	±19V	±15V
Output Short Circuit Duration <sup>(5)</sup>	Continuous	Continuous
	<b>NAK Package</b>	<b>D, NFF Packages</b>
Power Dissipation <sup>(6)(7)</sup>	900 mW	670 mW
T <sub>j</sub> max	150°C	115°C
θ <sub>JA</sub> (Typical)	100°C/W	85°C/W
<b>LF444A/LF444</b>		
Operating Temperature Range	See <sup>(8)</sup>	
ESD Tolerance <sup>(9)</sup>	Rating to be determined	
Storage Temperature Range	–65°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ 150°C	
Soldering Information	Dual-In-Line Packages (Soldering, 10 sec.)	
	260°C	
	Small Outline Package	Vapor Phase (60 sec.)
	215°C	
	Infrared (15 sec.)	
	220°C	

- (1) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not ensure specific performance limits. Electrical Characteristics state DC and AC electrical specifications under particular test conditions which ensure specific performance limits. This assumes that the device is within the Operating Ratings. Specifications are not ensured for parameters where no limit is given, however, the typical value is a good indication of device performance.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the TI Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- (3) Refer to RETS444X for LF444MD military specifications.
- (4) Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.
- (5) Any of the amplifier outputs can be shorted to ground indefinitely, however, more than one should not be simultaneously shorted as the maximum junction temperature will be exceeded.
- (6) For operating at elevated temperature, these devices must be derated based on a thermal resistance of θ<sub>JA</sub>.
- (7) Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside ensured limits.
- (8) The LF444A is available in both the commercial temperature range 0°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ 70°C and the military temperature range –55°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ 125°C. The LF444 is available in the commercial temperature range only. The temperature range is designated by the position just before the package type in the device number. A "C" indicates the commercial temperature range and an "M" indicates the military temperature range. The military temperature range is available in "NAK" package only.
- (9) Human body model, 1.5 kΩ in series with 100 pF.

### DC Electrical Characteristics<sup>(1)</sup>

Symbol	Parameter	Conditions	LF444A			LF444			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V <sub>OS</sub>	Input Offset Voltage	R <sub>S</sub> = 10k, T <sub>A</sub> = 25°C		2	5		3	10	mV
		0°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +70°C			6.5			12	mV
		–55°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +125°C			8				mV
ΔV <sub>OS</sub> /ΔT	Average TC of Input Offset Voltage	R <sub>S</sub> = 10 kΩ		10			10		μV/°C
I <sub>OS</sub>	Input Offset Current	V <sub>S</sub> = ±15V <sup>(1)(2)</sup>	T <sub>j</sub> = 25°C	5	25		5	50	pA
			T <sub>j</sub> = 70°C			1.5		1.5	nA
			T <sub>j</sub> = 125°C			10			nA
I <sub>B</sub>	Input Bias Current	V <sub>S</sub> = ±15V <sup>(1)(2)</sup>	T <sub>j</sub> = 25°C	10	50		10	100	pA
			T <sub>j</sub> = 70°C			3		3	nA
			T <sub>j</sub> = 125°C			20			nA

- (1) Unless otherwise specified the specifications apply over the full temperature range and for V<sub>S</sub> = ±20V for the LF444A and for V<sub>S</sub> = ±15V for the LF444. V<sub>OS</sub>, I<sub>B</sub>, and I<sub>OS</sub> are measured at V<sub>CM</sub> = 0.
- (2) The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature, T<sub>j</sub>. Due to limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation, P<sub>D</sub>. T<sub>j</sub> = T<sub>A</sub> + θ<sub>JA</sub>P<sub>D</sub> where θ<sub>JA</sub> is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.



**DC Electrical Characteristics <sup>(1)</sup> (continued)**

Symbol	Parameter	Conditions	LF444A			LF444			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
R <sub>IN</sub>	Input Resistance	T <sub>J</sub> = 25°C		10 <sup>12</sup>			10 <sup>12</sup>		Ω
A <sub>VOL</sub>	Large Signal Voltage Gain	V <sub>S</sub> = ±15V, V <sub>O</sub> = ±10V	50	100		25	100		V/mV
		R <sub>L</sub> = 10 kΩ, T <sub>A</sub> = 25°C							
		Over Temperature	25			15			V/mV
V <sub>O</sub>	Output Voltage Swing	V <sub>S</sub> = ±15V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ	±12	±13		±12	±13		V
V <sub>CM</sub>	Input Common-Mode Voltage Range		±16	+18		±11	+14		V
				-17			-12		V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	R <sub>S</sub> ≤ 10 kΩ	80	100		70	95		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	See <sup>(3)</sup>	80	100		70	90		dB
I <sub>S</sub>	Supply Current			0.6	0.8		0.6	1.0	mA

(3) Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practice from ±15V to ±5V for the LF444 and from ±20V to ±5V for the LF444A.

**AC Electrical Characteristics <sup>(1)</sup>**

Symbol	Parameter	Conditions	LF444A			LF444			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
	Amplifier-to-Amplifier Coupling			-120			-120		dB
SR	Slew Rate	V <sub>S</sub> = ±15V, T <sub>A</sub> = 25°C		1			1		V/μs
GBW	Gain-Bandwidth Product	V <sub>S</sub> = ±15V, T <sub>A</sub> = 25°C		1			1		MHz
e <sub>n</sub>	Equivalent Input Noise Voltage	T <sub>A</sub> = 25°C, R <sub>S</sub> = 100Ω, f = 1 kHz		35			35		nV/√Hz
i <sub>n</sub>	Equivalent Input Noise Current	T <sub>A</sub> = 25°C, f = 1 kHz		0.01			0.01		pA/√Hz

(1) Unless otherwise specified the specifications apply over the full temperature range and for V<sub>S</sub> = ±20V for the LF444A and for V<sub>S</sub> = ±15V for the LF444. V<sub>OS</sub>, I<sub>B</sub>, and I<sub>OS</sub> are measured at V<sub>CM</sub> = 0.

Lampiran 12. Datasheet LM324



LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N

SNOSC16D – MARCH 2000 – REVISED JANUARY 2015

LMx24-N, LM2902-N Low-Power, Quad-Operational Amplifiers

1 Features

- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain 100 dB
- Wide Bandwidth (Unity Gain) 1 MHz (Temperature Compensated)
- Wide Power Supply Range:
  - Single Supply 3 V to 32 V
  - or Dual Supplies ±1.5 V to ±16 V
- Very Low Supply Current Drain (700 µA) —Essentially Independent of Supply Voltage
- Low Input Biasing Current 45 nA (Temperature Compensated)
- Low Input Offset Voltage 2 mV and Offset Current: 5 nA
- Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground
- Differential Input Voltage Range Equal to the Power Supply Voltage
- Large Output Voltage Swing 0 V to  $V^+ - 1.5 V$
- **Advantages:**
  - Eliminates Need for Dual Supplies
  - Four Internally Compensated Op Amps in a Single Package
  - Allows Direct Sensing Near GND and  $V_{OUT}$  also Goes to GND
  - Compatible With All Forms of Logic
  - Power Drain Suitable for Battery Operation
  - In the Linear Mode the Input Common-Mode, Voltage Range Includes Ground and the Output Voltage
  - Can Swing to Ground, Even Though Operated from Only a Single Power Supply Voltage
  - Unity Gain Cross Frequency is Temperature Compensated
  - Input Bias Current is Also Temperature Compensated

2 Applications

- Transducer Amplifiers
- DC Gain Blocks
- Conventional Op Amp Circuits

3 Description

The LM124-N series consists of four independent, high-gain, internally frequency compensated operational amplifiers designed to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split-power supplies is also possible and the low-power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

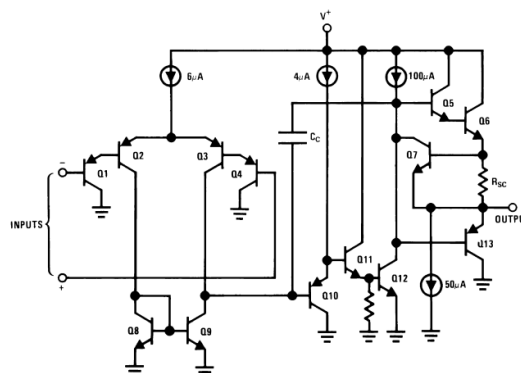
Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM124-N series can directly operate off of the standard 5-V power supply voltage which is used in digital systems and easily provides the required interface electronics without requiring the additional ±15 V power supplies.

Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM124-N	CDIP (14)	19.56 mm × 6.67 mm
LM224-N	CDIP (14)	19.56 mm × 6.67 mm
LM324-N	CDIP (14)	19.56 mm × 6.67 mm
	PDIP (14)	19.177 mm × 6.35 mm
	SOIC (14)	8.65 mm × 3.91 mm
	TSSOP (14)	5.00 mm × 4.40 mm
LM2902-N	PDIP (14)	19.177 mm × 6.35 mm
	SOIC (14)	8.65 mm × 3.91 mm
	TSSOP (14)	5.00 mm × 4.40 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

Schematic Diagram



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

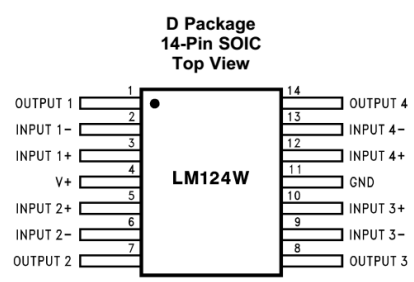
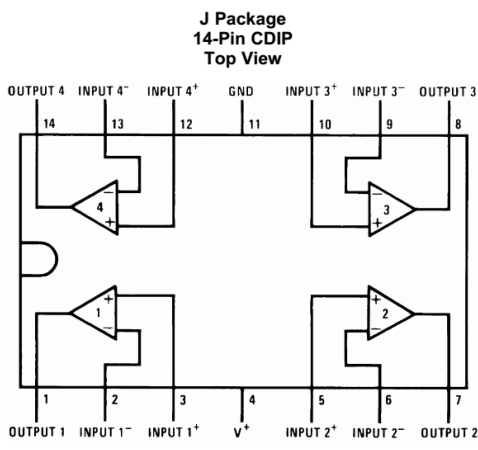


www.ti.com

LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N

SNOSC16D – MARCH 2000 – REVISED JANUARY 2015

## 5 Pin Configuration and Functions



### Pin Functions

PIN		TYPE	DESCRIPTION
NAME	NO.		
OUTPUT1	1	O	Output, Channel 1
INPUT1-	2	I	Inverting Input, Channel 1
INPUT1+	3	I	Noninverting Input, Channel 1
V+	4	P	Positive Supply Voltage
INPUT2+	5	I	Nonverting Input, Channel 2
INPUT2-	6	I	Inverting Input, Channel 2
OUTPUT2	7	O	Output, Channel 2
OUTPUT3	8	O	Output, Channel 3
INPUT3-	9	I	Inverting Input, Channel 3
INPUT3+	10	I	Noninverting Input, Channel 3
GND	11	P	Ground or Negative Supply Voltage
INPUT4+	12	I	Noninverting Input, Channel 4
INPUT4-	13	I	Inverting Input, Channel 4
OUTPUT4	14	O	Output, Channel 4



**LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N**

SNOSC16D –MARCH 2000–REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

**6 Specifications**

**6.1 Absolute Maximum Ratings**

See <sup>(1)(2)</sup>.

		LM124-N/LM224-N/LM324-N LM124A/LM224A/LM324A		LM2902-N		
		MIN	MAX	MIN	MAX	UNIT
Supply Voltage, V <sup>+</sup>		32		26	V	
Differential Input Voltage		32		26	V	
Input Voltage		-0.3	32	-0.3	26	V
Input Current (V <sub>IN</sub> < -0.3 V) <sup>(3)</sup>		50		50	mA	
Power Dissipation <sup>(4)</sup>	PDIP	1130		1130	mW	
	CDIP	1260		1260	mW	
	SOIC Package	800		800	mW	
Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) <sup>(5)</sup>		V <sup>+</sup> ≤ 15 V and T <sub>A</sub> = 25°C		Continuous		
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)		260		260	°C	
Soldering Information	Dual-In-Line Package	Soldering (10 seconds)		260	°C	
	Small Outline Package	Vapor Phase (60 seconds)		215	°C	
		Infrared (15 seconds)		220	°C	
Storage temperature, T <sub>stg</sub>		-65	150	-65	150	°C

- Refer to RETS124AX for LM124A military specifications and refer to RETS124X for LM124-N military specifications.
- If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the op amps to go to the V<sup>+</sup> voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than -0.3 V (at 25°C).
- For operating at high temperatures, the LM324-N/LM324A/LM2902-N must be derated based on a 125°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 88°C/W which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM224-N/LM224A and LM124-N/LM124A can be derated based on a 150°C maximum junction temperature. The dissipation is the total of all four amplifiers—use external resistors, where possible, to allow the amplifier to saturate of to reduce the power which is dissipated in the integrated circuit.
- Short circuits from the output to V<sup>+</sup> can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V<sup>+</sup>. At values of supply voltage in excess of 15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

**6.2 ESD Ratings**

			VALUE	UNIT
V <sub>(ESD)</sub>	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 <sup>(1)</sup>	±250	V

- JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

**6.3 Recommended Operating Conditions**

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

	MIN	MAX	UNIT
Supply Voltage (V <sup>+</sup> - V <sup>-</sup> ): LM124-N/LM124A/LM224-N/LM224A/LM324-N/LM324A	3	32	V
Supply Voltage (V <sup>+</sup> - V <sup>-</sup> ): LM2902-N	3	26	V
Operating Input Voltage on Input pins	0	V <sup>+</sup>	V
Operating junction temperature, T <sub>J</sub> : LM124-N/LM124A	-55	125	°C
Operating junction temperature, T <sub>J</sub> : L2902-N	-40	85	°C
Operating junction temperature, T <sub>J</sub> : LM224-N/LM224A	-25	85	°C
Operating junction temperature, T <sub>J</sub> : LM324-N/LM324A	0	70	°C



www.ti.com

LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N  
SNOSC16D – MARCH 2000 – REVISED JANUARY 2015

### 6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC <sup>(1)</sup>	LM124-N / LM224-N	LM324-N / LM2902-N	UNIT
	J/CDIP	D/SOIC	
	14 PINS	14 PINS	
R <sub>θJA</sub> Junction-to-ambient thermal resistance	88	88	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).

### 6.5 Electrical Characteristics: LM124A/224A/324A

V\* = 5.0 V, <sup>(1)</sup> unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124A			LM224A			LM324A			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	T <sub>A</sub> = 25°C <sup>(2)</sup>		1	2		1	3		2	3	mV
Input Bias Current <sup>(3)</sup>	I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = 25°C		20	50		40	80		45	100	nA
Input Offset Current	I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = 25°C		2	10		2	15		5	30	nA
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(4)</sup>	V* = 30 V, (LM2902-N, V* = 26 V), T <sub>A</sub> = 25°C		0	V* - 1.5		0	V* - 1.5		0	V* - 1.5	V
Supply Current	Over Full Temperature Range, R <sub>L</sub> = ∞ On All Op Amps V* = 30 V (LM2902-N V* = 26 V)		1.5	3		1.5	3		1.5	3	mA
	V* = 5 V		0.7	1.2		0.7	1.2		0.7	1.2	
Large Signal Voltage Gain	V* = 15 V, R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ, (V <sub>O</sub> = 1 V to 11 V), T <sub>A</sub> = 25°C		50	100		50	100		25	100	V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	DC, V <sub>CM</sub> = 0 V to V* - 1.5 V, T <sub>A</sub> = 25°C		70	85		70	85		65	85	dB
Power Supply Rejection Ratio	V* = 5 V to 30 V, (LM2902-N, V* = 5V to 26 V), T <sub>A</sub> = 25°C		65	100		65	100		65	100	dB
Amplifier-to-Amplifier Coupling <sup>(5)</sup>	f = 1 kHz to 20 kHz, T <sub>A</sub> = 25°C, (Input Referred)		-120			-120			-120		dB
Output Current	Source V <sub>IN+</sub> = 1 V, V <sub>IN-</sub> = 0 V, V* = 15 V, V <sub>O</sub> = 2 V, T <sub>A</sub> = 25°C		20	40		20	40		20	40	mA
	Sink V <sub>IN+</sub> = 1 V, V <sub>IN-</sub> = 0 V, V* = 15 V, V <sub>O</sub> = 2 V, T <sub>A</sub> = 25°C		10	20		10	20		10	20	
	V <sub>IN+</sub> = 1 V, V <sub>IN-</sub> = 0 V, V* = 15 V, V <sub>O</sub> = 200 mV, T <sub>A</sub> = 25°C		12	50		12	50		12	50	
Short Circuit to Ground	V* = 15 V, T <sub>A</sub> = 25°C <sup>(6)</sup>		40	60		40	60		40	60	mA
Input Offset Voltage	See <sup>(2)</sup>			4			4			5	mV
V <sub>OS</sub> Drift	R <sub>S</sub> = 0 Ω			7			7			7	μV/°C
Input Offset Current	I <sub>IN(+)</sub> - I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0 V			30			30			75	nA

- (1) These specifications are limited to -55°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +125°C for the LM124-N/LM124A. With the LM224-N/LM224A, all temperature specifications are limited to -25°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +85°C, the LM324-N/LM324A temperature specifications are limited to 0°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +70°C, and the LM2902-N specifications are limited to -40°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +85°C.
- (2) V<sub>O</sub> = 1.4V, R<sub>S</sub> = 0 Ω with V\* from 5 V to 30 V; and over the full input common-mode range (0 V to V\* - 1.5 V) for LM2902-N, V\* from 5 V to 26 V.
- (3) The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- (4) The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V (at 25°C). The upper end of the common-mode voltage range is V\* - 1.5 V (at 25°C), but either or both inputs can go to 32 V without damage (26 V for LM2902-N), independent of the magnitude of V\*.
- (5) Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.
- (6) Short circuits from the output to V\* can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V\*. At values of supply voltage in excess of 15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.



**LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N**

SNOSC16D – MARCH 2000 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

**Electrical Characteristics: LM124A/224A/324A (continued)**

V<sup>+</sup> = 5.0 V, <sup>(1)</sup> unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124A			LM224A			LM324A			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
I <sub>OS</sub> Drift	R <sub>S</sub> = 0 Ω		10	200		10	200		10	300	pA/°C
Input Bias Current	I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub>		40	100		40	100		40	200	nA
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(4)</sup>	V <sup>+</sup> = 30 V, (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26 V)		0	V <sup>+</sup> -2		0	V <sup>+</sup> -2		0	V <sup>+</sup> -2	V
Large Signal Voltage Gain	V <sup>+</sup> = 15 V (V <sub>O</sub> Swing = 1 V to 11 V), R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ		25			25			15		V/mV
Output Voltage Swing	V <sub>OH</sub>	V <sup>+</sup> = 30 V (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26 V)	R <sub>L</sub> = 2 kΩ	26		26		26			V
	V <sub>OL</sub>	V <sup>+</sup> = 5 V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ	R <sub>L</sub> = 10 kΩ	27	28	27	28	27	28		mV
Output Current	Source	V <sub>O</sub> = 2 V	V <sub>IN</sub> <sup>+</sup> = +1V, V <sub>IN</sub> <sup>-</sup> = 0V, V <sup>+</sup> = 15V	10	20	10	20	10	20		mA
	Sink	V <sub>IN</sub> <sup>-</sup> = +1V, V <sub>IN</sub> <sup>+</sup> = 0V, V <sup>+</sup> = 15V		10	15	5	8	5	8		

**6.6 Electrical Characteristics: LM124-N/224-N/324-N/2902-N**

V<sup>+</sup> = +5.0V, <sup>(1)</sup> unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124-N / LM224-N			LM324-N			LM2902-N			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	T <sub>A</sub> = 25°C <sup>(2)</sup>		2	5		2	7		2	7	mV
Input Bias Current <sup>(3)</sup>	I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = 25°C		45	150		45	250		45	250	nA
Input Offset Current	I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = 25°C		3	30		5	50		5	50	nA
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(4)</sup>	V <sup>+</sup> = 30 V, (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26V), T <sub>A</sub> = 25°C		0	V <sup>+</sup> -1.5		0	V <sup>+</sup> -1.5		0	V <sup>+</sup> -1.5	V
Supply Current	Over Full Temperature Range R <sub>L</sub> = ∞ On All Op Amps, V <sup>+</sup> = 30 V (LM2902-N V <sup>+</sup> = 26 V)		1.5	3		1.5	3		1.5	3	mA
	V <sup>+</sup> = 5 V		0.7	1.2		0.7	1.2		0.7	1.2	
Large Signal Voltage Gain	V <sup>+</sup> = 15V, R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ, (V <sub>O</sub> = 1 V to 11 V), T <sub>A</sub> = 25°C		50	100		25	100		25	100	V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	DC, V <sub>CM</sub> = 0 V to V <sup>+</sup> - 1.5 V, T <sub>A</sub> = 25°C		70	85		65	85		50	70	dB
Power Supply Rejection Ratio	V <sup>+</sup> = 5 V to 30 V (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 5 V to 26 V), T <sub>A</sub> = 25°C		65	100		65	100		50	100	dB
Amplifier-to-Amplifier Coupling <sup>(5)</sup>	f = 1 kHz to 20 kHz, T <sub>A</sub> = 25°C (Input Referred)		-120			-120			-120		dB

- (1) These specifications are limited to -55°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +125°C for the LM124-N/LM124A. With the LM224-N/LM224A, all temperature specifications are limited to -25°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +85°C, the LM324-N/LM324A temperature specifications are limited to 0°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +70°C, and the LM2902-N specifications are limited to -40°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +85°C.
- (2) V<sub>O</sub> ≈ 1.4V, R<sub>S</sub> = 0 Ω with V<sup>+</sup> from 5 V to 30 V; and over the full input common-mode range (0 V to V<sup>+</sup> - 1.5 V) for LM2902-N, V<sup>+</sup> from 5 V to 26 V.
- (3) The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- (4) The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V (at 25°C). The upper end of the common-mode voltage range is V<sup>+</sup> - 1.5 V (at 25°C), but either or both inputs can go to 32 V without damage (26 V for LM2902-N), independent of the magnitude of V<sup>+</sup>.
- (5) Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.



**Electrical Characteristics: LM124-N/224-N/324-N/2902-N (continued)**

V<sup>+</sup> = +5.0V, <sup>(1)</sup>, unless otherwise stated

PARAMETER		TEST CONDITIONS	LM124-N / LM224-N			LM324-N			LM2902-N			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Output Current	Source	V <sub>IN<sup>-</sup></sub> = 1 V, V <sub>IN<sup>+</sup></sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V, V <sub>O</sub> = 2 V, T <sub>A</sub> = 25°C	20	40		20	40		20	40		mA
	Sink	V <sub>IN<sup>-</sup></sub> = 1 V, V <sub>IN<sup>+</sup></sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V, V <sub>O</sub> = 2 V, T <sub>A</sub> = 25°C	10	20		10	20		10	20		mA
		V <sub>IN<sup>-</sup></sub> = 1 V, V <sub>IN<sup>+</sup></sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V, V <sub>O</sub> = 200 mV, T <sub>A</sub> = 25°C	12	50		12	50		12	50		μA
Short Circuit to Ground		V <sup>+</sup> = 15 V, T <sub>A</sub> = 25°C <sup>(6)</sup>		40	60		40	60		40	60	mA
Input Offset Voltage		See <sup>(2)</sup>			7			9			10	mV
V <sub>OS</sub> Drift		R <sub>S</sub> = 0 Ω		7		7		7		7		μV/°C
Input Offset Current		I <sub>IN(+)</sub> - I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0 V			100			150		45	200	nA
I <sub>OS</sub> Drift		R <sub>S</sub> = 0 Ω		10		10		10		10		pA/°C
Input Bias Current		I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub>		40	300		40	500		40	500	nA
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(4)</sup>		V <sup>+</sup> = 30 V, (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26 V)	0		V <sup>+</sup> -2	0		V <sup>+</sup> -2	0		V <sup>+</sup> -2	V
Large Signal Voltage Gain		V <sup>+</sup> = 15 V (V <sub>O</sub> Swing = 1V to 11V), R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	25			15			15			V/mV
Output Voltage Swing	V <sub>OH</sub>	V <sup>+</sup> = 30 V (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26 V)	R <sub>L</sub> = 2 kΩ		26		26		22			V
			R <sub>L</sub> = 10 kΩ		27	28	27	28	23	24		
	V <sub>OL</sub>	V <sup>+</sup> = 5 V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ		5	20		5	20		5	100	mV
Output Current	Source	V <sub>O</sub> = 2 V	V <sub>IN<sup>+</sup></sub> = 1 V, V <sub>IN<sup>-</sup></sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V		10	20	10	20	10	20		mA
	Sink		V <sub>IN<sup>-</sup></sub> = 1 V, V <sub>IN<sup>+</sup></sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V		5	8	5	8	5	8		mA

(6) Short circuits from the output to V<sup>+</sup> can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V<sup>+</sup>. At values of supply voltage in excess of 15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

Lampiran 13. Sertifikat Deteksi Plagiasi

