

**RANCANG BANGUN ALAT UKUR VIBRASI PADA MESIN  
POMPA ROTARY DENGAN SENSOR MEMS  
AKSELEROMETER**

**TESIS**

**Karya tulis sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Magister dari  
Institut Teknologi Bandung**

**Oleh  
BASITH ADLI  
NIM: 23218116  
(Program Studi Magister Teknik Elektro)**



**INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG  
TEKNIK ELEKTRO  
2020**

## ABSTRAK

# RANCANG BANGUN ALAT UKUR VIBRASI PADA MESIN POMPA ROTARY DENGAN SENSOR MEMS AKSELEROMETER

Oleh

**BASITH ADLI**

**NIM: 23218116**

**(Program Studi Magister Teknik Elektro)**

Penelitian ini menyajikan desain alat ukur getaran, terutama dalam mendeteksi kerusakan pada mesin pompa rotari menggunakan sensor akselerometer. Jenis sensor akselerometer yang digunakan adalah Micro Electrical Mechanical System (MEMS) akselerometer. Sensor ini dirancang untuk dapat mencapai fungsi teknis, khususnya fungsi elektromekanik. Sensor MEMS akselerometer dan sensor akselerometer konvensional untuk mengukur getaran pada rotari mesin keduanya merupakan sensor yang menghasilkan nilai percepatan dalam mengukur getaran pada mesin. Terdapat kelebihan yang dimiliki oleh sensor MEMS akselerometer antara lain harga yang relatif murah, memiliki 3 sumbu deteksi getaran dan dapat diterapkan pada sistem tertanam. Dengan keunggulan ini, sensor MEMS akselerometer dapat digunakan sebagai sensor alternatif untuk mengukur getaran. Sensor MEMS akselerometer yang akan digunakan adalah ADXL345 akselerometer. Selain itu, kelebihan dari sensor ADXL345 akselerometer adalah sensor ini sudah memiliki Analog to Digital Converter (ADC) dan filter digital, sehingga sensor ini dapat melakukan komputasi yang lebih cepat dalam perolehan data dalam bentuk data digital jika dibandingkan dengan sensor MEMS lain yang tidak memiliki ADC. Hasil pengukuran akan digunakan sebagai bahan untuk analisis getaran pada mesin dalam bentuk spektrum frekuensi dengan metode Fast Fourier Transform (FFT). Pada pengujian uji coba parameter sensor diperoleh nilai rata-rata akurasi 99%, presisi 99% dan nilai error 0,4%. Pada pengukuran getaran pengujian dilakukan dengan rentang frekuensi pengukuran getaran pada 0 Hz – 107 Hz pada dua kondisi berbeda. Pada kondisi pertama diperoleh ciri-ciri kerusakan unbalance dengan ciri-ciri kemunculan amplitudo frekuensi pada 1x running speed pada spektrum frekuensi dan diperoleh besar RMS velocity sebesar 2.5884 mm/s. Pada kondisi kedua diperoleh ciri-ciri kerusakan bent shaft dengan ciri-ciri kemunculan amplitudo frekuensi pada 1x dan 2x running speed pada spektrum frekuensi dan diperoleh besar RMS velocity sebesar 2.9674 mm/s.

**Kata kunci :** Vibrasi, MEMS, ADXL345, Mikrokontroler, *Fast Fourier Transform*

## **ABSTRACT**

### **DESIGN OF VIBRATION MEASURING TOOLS IN ROTARY PUMPING MACHINE WITH ACCELEROMETER MEMS SENSORS**

By

**Basith Adli**

**NIM: 23218116**

***(Master's Program in Electrical Engineering)***

*This study presents the design of a vibration measuring instrument, especially in detecting damage to a rotary pump engine using an accelerometer sensor. The type of accelerometer sensor used is the Micro Electrical Mechanical System (MEMS) accelerometer. This sensor is designed to achieve technical functions, particularly electromechanical functions. The MEMS accelerometer sensor and the conventional accelerometer sensor for measuring vibrations in the engine rotary are both sensors that produce acceleration values in measuring vibrations in the engine. There are advantages that the accelerometer MEMS sensor has, including a relatively cheap price, has 3 axis of vibration detection and can be applied to embedded systems. With this advantage, the accelerometer MEMS sensor can be used as an alternative sensor for measuring vibration. The accelerometer MEMS sensor to be used is the ADXL345 accelerometer. In addition, the advantages of the accelerometer ADXL345 sensor are that it already has an Analog to Digital Converter (ADC) and a digital filter, so that this sensor can perform faster computations in obtaining data in the form of digital data when compared to other MEMS sensors that do not have ADC. . The measurement results will be used as material for vibration analysis in the machine in the form of a frequency spectrum using the Fast Fourier Transform (FFT) method. In the testing of sensor parameters, the average value of accuracy is 99%, precision is 99% and error value is 0.4%. In the measurement of vibration testing was carried out with a frequency range of vibration measurements at 0Hz - 107 Hz in two different conditions. In the first condition, the characteristics of unbalance damage are obtained with the characteristics of the appearance of the frequency amplitude at 1x running speed in the frequency spectrum and the RMS velocity is obtained at 2.5884mm / s. In the second condition, the characteristics of bent shaft damage are obtained with the characteristics of the appearance of the frequency amplitude at 1x and 2x running speed in the frequency spectrum and the RMS velocity is obtained at 2.9674mm / s.*

**Keywords :** *Vibration, MEMS, ADXL345, Microcontroller, Fast Fourier Transform*

## PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS

Tesis Magister yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Institut Teknologi Bandung, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Institut Teknologi Bandung. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kaidah ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Sitasi hasil penelitian Tesis ini dapat di tulis dalam bahasa Indonesia sebagai berikut:

Adli, B. (2020): Rancang Bangun Alat Ukur Vibrasi Pada Mesin Pompa Rotary Dengan Sensor MEMS Akselerometer, Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.

dan dalam bahasa Inggris sebagai berikut:

Adli, B. (2020): Design of Vibration Measuring Tools in Rotary Pumping Machine With Accelerometer MEMS Sensors, Master's Thesis, Bandung Institute of Technology

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh tesis haruslah seizin Dekan Sekolah Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung.

## HALAMAN PENGESAHAN

# SENSOR VIBRASI PADA MESIN POMPA ROTARY DENGAN MEMS AKSELEROMETER

Oleh  
**Basith Adli**  
**NIM: 23218116**  
**(Program Studi Magister Teknik Elektro)**

Institut Teknologi Bandung

Menyetujui  
Tim Pembimbing

Tanggal 19 September 2020

Pembimbing 1



---

(Dr. Pranoto Hiday Rusmin S.T., M.T)

*Dipersembahkan kepada orang tua, adik, istri dan anak serta keluarga besarku  
tercinta yang senantiasa mendukung lahir dan batin.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah *Subhanahu Wa Ta'ala*, yang atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Rancang Bangun Alat Ukur Vibrasi Pada Mesin Pompa Rotary dengan Sensor MEMS Akselerometer”. Shalawat dan salam tercurah kepada *Rasulullah* Muhammad *Shallallahu 'Alaihi Wasalam* beserta keluarga, sahabat dan orang-orang yang berpegang teguh pada jalan-Nya, agar diberi keselamatan hingga hari akhir.

Selama melaksanakan tugas akhir ini, penulis mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Pranoto Hidayat Rusmin, S.T., M.T. selaku pembimbing yang telah mencurahkan perhatian, arahan dan waktu dalam memberikan bimbingan sehingga tesis ini dapat diselesaikan.
2. Bapak/Ibu penguji yang senantiasa memberikan masukan untuk penulis
3. Keluarga yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis selama menjalani hidup. Terutama untuk Bunda Euis tercinta dan Rafdhi yang telah mencurahkan segala perhatian serta selalu mendukung penulis hingga akhirnya tesis ini dapat diselesaikan.
4. Istri tercinta yang setia menemani dalam keadaan suka ataupun duka Silmi Ath Thahirah Al Azhima dan anak tercinta Khalmeru Rakamannaf Adli yang selalu menjadi semangat dan motivasi untuk penulis.
5. Seluruh anggota LSKK ITB yang telah memberikan banyak bantuan.
6. Seluruh mahasiswa S2 Teknik Elektro ITB angkatan 2018.
7. Seluruh Staff TU STEI ITB.
8. Dan seluruh pihak yang telah membantu, yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini bukanlah tanpa kelemahan, untuk itu kritik dan saran sangat diharapkan. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembacanya.

Bandung, Mei 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	ii
PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
DAFTAR GAMBAR DAN ILUSTRASI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG .....	xv
<b>Bab I</b> Pendahuluan .....	1
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Rumusan Masalah.....	3
I.3 Pembatasan Masalah .....	3
I.4 Tujuan Penelitian .....	3
I.5 Manfaat Penelitian .....	4
I.6 Metodologi.....	4
I.7 Sistematika Penulisan .....	5
<b>Bab II</b> Tinjauan Pustaka.....	6
II.1 Perawatan ( <i>Maintenance</i> ) .....	6
II.1.1 Predictive atau Condition Based Maintenance .....	6
II.1.2 Analisis Vibrasi ( <i>Vibration Analysis</i> ) .....	8
II.2 Teori Dasar Getaran .....	9
II.2.1 Karakteristik Getaran / Vibrasi .....	10
II.2.2 Faktor Skala .....	12
II.3 Getaran Pada Mesin .....	13
II.3.1 Penyebab Getaran Mesin .....	14
II.3.2 Konsep Getaran pada Mesin .....	15
II.3.3 Kriteria Zona Kelayakan Getaran Mesin .....	16
II.4 Macam-Macam Kesalahan atau Kerusakan Pada Mesin .....	17
II.4.1 Definisi <i>Unbalance</i> .....	19

II.4.2	Definisi <i>Misalignment</i> .....	20
II.4.3	Definisi <i>Looseness</i> .....	22
II.4.4	Definisi <i>Bent Shaft</i> .....	23
II.5	Metode Analisis Sinyal Getaran .....	24
II.5.1	Metode Analisis Getaran Domain Waktu .....	24
II.5.2	Metode Analisis Getaran Domain Frekuensi.....	25
II.6	<i>Fast Fourier Transform</i> (FFT).....	26
II.7	Transduser Getaran .....	29
II.7.1	Eddy-current Sensor.....	29
II.7.2	Swing Coil Velocity Transduser .....	30
II.7.3	Akselerometer .....	31
II.8	MEMS Akselerometer .....	34
II.8.1	Sensor Accelerometer ADXL345 .....	34
II.8.2	Spesifikasi MEMS Accelerometer ADXL345.....	38
II.8.3	Perbandingan Sensor MEMS Akselerometer ADXL345 Dengan Sensor Akselerometer Konvensional.....	40
II.9	Mikrokontroler .....	41
II.9.1	Arduino 42	
II.10	Posisi Penelitian ( <i>State of The Art</i> ).....	43
Bab III	Perancangan Alat Ukur Vibrasi.....	48
III.I	Spesifikasi Sensor Alat Ukur Vibrasi.....	48
III.1.1	Parameter Spesifikasi Sensor MEMS Akselerometer ADXL34550	
III.2	Desain Sistem Pengukuran.....	53
III.3	Perancangan Rangkaian Sensor Akselerometer ADXL345 .....	54
III.3.1	Pemrograman Sensor Akselerometer ADXL345 .....	55
III.4	Desain Sistem Pengolahan dan Penyimpanan Data Analisis .....	56
III.5	Perancangan Kondisi Mesin .....	57
III.6	Cara Kerja Penelitian.....	57
Bab IV	Implementasi Dan Pembahasan .....	59
IV.1	Metode Pengambilan Data .....	59
IV.2	Pengujian Kinerja Parameter Sensor .....	60
IV.2.1	Pengukuran Pitch .....	61

IV.2.2	Pengukuran Roll.....	62
IV.3	Peralatan Penelitian .....	64
IV.4	Posisi Pemasangan Sensor dalam Pengukuran Vibrasi.....	65
IV.5	Pengukuran Getaran .....	66
IV.5.1	Pengukuran Getaran Mesin Dengan Penopang Pondasi .....	66
IV.5.2	Pengukuran Getaran Mesin Tanpa Penopang Pondasi.....	69
IV.6	Analisis Tingkat Kerusakan Mesin .....	72
IV.6.1	Tingkat Kerusakan Kondisi Mesin Pompa Rotari Menggunakan Penopang Pondasi.....	73
IV.6.2	Tingkat Kerusakan Kondisi Mesin Pompa Rotari Tidak Menggunakan Penopang Pondasi .....	73
Bab V	Kesimpulan dan Saran .....	75
V.1	Simpulan.....	75
V.2	Saran .....	76
	DAFTAR PUSTAKA .....	77
	LAMPIRAN.....	81

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I .....	81
Lampiran 2 .....	87
Lampiran 3 .....	89
Lampiran 4 .....	92

## DAFTAR GAMBAR DAN ILUSTRASI

Gambar II. 1 Amplitudo dan Frekuensi .....	10
Gambar II. 2 Gelombang Harmonik Sederhana – Lokus Gerakan Pegas – Massa Sehubungan Dengan Waktu.....	11
Gambar II. 3 Bentuk Gelombang Percepatan ( <i>Velocity</i> ), Kecepatan ( <i>Acceleration</i> ), dan Perpindahan ( <i>Displacemanet</i> ) Massa dalam Gerakan Harmonik Sederhana.	11
Gambar II. 4 Faktor Skala pada Bentuk Gelombang Getaran Sinusoidal .....	12
Gambar II. 5 Hubungan Antara Perpindahan, Kecepatan dan Percepatan pada Kecepatan Konstan .....	16
Gambar II.6 Ciri Kerusakan <i>Static Unbalance</i> .....	19
Gambar II. 7 Ciri Kerusakan <i>Couple Unbalance</i> .....	20
Gambar II.8 Ciri Kerusakan <i>Parralel Misalignment</i> .....	21
Gambar II. 9 Ciri Kerusakan <i>Angular Misalignment</i> .....	21
Gambar II. 10 Ciri Kerusakan <i>Rotating Looseness</i> .....	22
Gambar II. 11 Ciri Kerusakan <i>Rotating Looseness</i> dengan Sub Harmonisa .....	22
Gambar II.12 Ciri Kerusakan <i>Looseness Structural</i> .....	23
Gambar II. 13 Ciri Kerusakan <i>Bent Shaft</i> .....	24
Gambar II.14 Contoh plot analisis getaran domain waktu (Luo et al., 2015).....	25
Gambar II.15 Contoh plot analisis getaran domain frekuensi (Luo et al., 2015)..	26
Gambar II. 16 Transformasi Fourier dari Gelombang Persegi .....	26
Gambar II.17 Transformasi gelombang domain waktu ke domain frekuensi .....	27
Gambar II.18 Contoh spektrum dari FFT .....	27
Gambar II.19 Konstruksi dasar dari sensor <i>eddy-current</i> .....	30
Gambar II.20 Konstruksi dasar dari <i>Swing Coil Velocity Transduser</i> .....	30
Gambar II.21 Konstruksi dasar dari sensor akselerometer .....	32
Gambar II. 23 Diagram Blok Bagian Akselerometer Piezoelektrik .....	32
Gambar II. 24 MEMS Sebagai Mikrosensor .....	34
Gambar II. 25 Blok Diagram Akselerometer ADXL345.....	35
Gambar II. 26 Skema <i>Differential Capacitive Sensor</i> .....	35

Gambar II. 27 Sumbu Sensitivitas Akselerasi (Tegangan Output Terkait Meningkatkan Ketika Dipercepat Sepanjang Sumbu Sensitif).....	36
Gambar II. 28 Respon <i>Output</i> dan Orientasi ke Gravitasi .....	36
Gambar II. 29 Prinsip <i>Sense Electronic</i> .....	37
Gambar II. 30 MEMS Accelerometer ADXL345.....	38
Gambar II.31 Diagram blok rangkaian internal mikrokontroler.....	42
Gambar II. 32 Arduino UNO R3 .....	42
Gambar III. 1 <i>Accelerometer Nonlinearity</i> .....	49
Gambar III.2 Desain sistem pengukuran getaran.....	53
Gambar III.3 Sistem sensor dalam pengukuran vibrasi .....	54
Gambar III. 4 Rangkaian Sensor Akselerometer ADXL345 .....	55
Gambar III. 5 Diagram Alir Program pada Arduino IDE untuk Sensor Akselerometer ADXL345 .....	55
Gambar III. 6 Diagram Alir Sistem Pengolahan dan Penyimpanan Data Analisis.....	56
Gambar III.7 Tahapan Penelitian .....	58
Gambar IV. 1 Diagram Alir Implementasi Penelitian .....	59
Gambar IV. 2 Mesin Pompa Rotari Wasser PC-380 E.....	64
Gambar IV. 3 Pemasangan Triaxial Sensor .....	65
Gambar IV. 4 Posisi Pemasangan Akselerometer ADXL345 pada Mesin Pompa Rotari.....	65
Gambar IV. 5 Kondisi Mesin Rotari dengan Penopang Pondasi.....	66
Gambar IV. 6 Vibrasi Data Mesin Dengan Penopang Pondasi .....	67
Gambar IV. 7 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-X Kondisi Mesin Menggunakan Penopang Pondasi .....	67
Gambar IV. 8 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-Y Kondisi Mesin Menggunakan Penopang Pondasi .....	68
Gambar IV. 9 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-Z Kondisi Mesin Menggunakan Penopang Pondasi .....	68
Gambar IV. 10 Kondisi Mesin Rotari Tanpa Menggunakan Penopang Pondasi .	69
Gambar IV. 11 Vibrasi Data Mesin Tanpa Penopang Pondasi.....	70
Gambar IV. 12 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-X Kondisi Mesin Tidak Menggunakan Penopang Pondasi .....	70

Gambar IV. 13 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-Y Kondisi Mesin Tidak Menggunakan Penopang Pondasi .....	71
Gambar IV. 14 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-Z Kondisi Mesin Tidak Menggunakan Penopang Pondasi .....	71
Gambar IV. 15 Data Getaran Velocity Sumbu-Z .....	73
Gambar IV. 16 Data Getaran Velocity Sumbu-Z .....	74

## DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Nilai Faktor Skala Gelombang Sinusoidal .....	13
Tabel II.2 Standar Indikator ISO 10816-1 .....	17
Tabel II. 3 Macam-macam penyebab kerusakan dalam domain frekuensi.....	18
Tabel II. 4 Spesifikasi Accelerometer ADXL345 .....	39
Tabel II. 5 Fungsi-fungsi Pin dari Accelerometer ADXL345 .....	40
Tabel II. 6 Pembanding MEMS Akselerometer ADXL345 dengan Akselerometer Konvensional .....	41
Tabel II. 7 Spesifikasi Arduino UNO R3.....	43
Tabel II. 8 Referensi Acuan Penelitian .....	44
Tabel III. 1 Parameter Spesifikasi Sensor MEMS Akselerometer ADXL345 .....	51
Tabel III. 2 Spesifikasi Sistem Alat Ukur Vibrasi .....	53
Tabel IV. 1 Data Pengukuran <i>Pitch</i> Pada 40° .....	61
Tabel IV. 2 Data Pengukuran <i>Roll</i> Pada 60° .....	62
Tabel IV. 3 Tabel Kemunculan Frekuensi Pada 1x <i>Running Speed</i> .....	69
Tabel IV. 4 Tabel Kemunculan Frekuensi Pada 1x <i>Running Speed</i> Pada Kondisi Mesin Tanpa Penopang Pondasi .....	72
Tabel IV. 5 Tabel Kemunculan Frekuensi Pada 1x <i>Running Speed</i> Pada Kondisi Mesin Tanpa Penopang Pondasi .....	72

## DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
MEMS	<i>Micro Electrical Mechanical System</i>	1
PC	<i>Personal Computer</i>	1
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>	1
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>	2
ADC	<i>Analog Digital Converter</i>	3
ITB	Institut Teknologi Bandung	3
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>	11
KBBI	Kamus Besar Bahasa Indonesia	14
Hz	Hertz	14
RMS	<i>Root Mean Squared</i>	17
ISO	<i>International Standards Organization</i>	20
RPM	Rotasi Per Menit	28
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>	30
AC	<i>Alternative Current</i>	35
IC	<i>Integrated Circuit</i>	42
A/D	<i>Analog Digital</i>	43
I <sup>2</sup> C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>	45
LBS	<i>Least Significant Bit</i>	46
FSR	<i>Full Scale Range</i>	50
FS	<i>Full Scale</i>	50
LAMBANG	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
$X$	Perpindahan pada waktu	15
$X_o$	Perpindahan maksimum	15
$\omega$	Omega	15
$\pi$	Phi (3.14)	15
$f$	Frekuensi	15
$t$	Waktu	15
$d$	Data	16
$dt$	Data sampling	16
$T$	Waktu	18
$y$	Rata-rata	18
$^\circ$	Derajat	24
$\Delta t$	<i>Sampling interval</i>	34
$\Delta f$	<i>Frequency resolution</i>	34
$N$	Jumlah sample	34
$g$	Gravitasi	40
$X_n$	Nilai yang diperoleh	61
$Y_n$	Nilai yang diinginkan	61

# Bab I Pendahuluan

## I.1 Latar Belakang

Perawatan mesin sangat penting dilakukan agar menjamin keberlangsungan proses produksi di dalam industri. Tanpa pemeliharaan mesin produksi yang baik dapat mengakibatkan naiknya biaya yang tidak terduga karena penggantian atau perbaikan mesin yang terlambat untuk ditangani dan dapat menyebabkan mesin menjadi rusak. Salah satu mesin produksi yang penting di dalam industri adalah mesin berbasis rotasi, atau biasa dikenal mesin rotari. Pemeliharaan pada mesin rotari yang hanya mengandalkan jadwal dan waktu yang sudah ditetapkan memang dapat menjaga kondisi mesin tersebut, tetapi cara ini memerlukan biaya yang tinggi, karena pergantian dan perbaikan pada mesin dilakukan juga terhadap mesin atau bagian mesin yang masih sehat, hal tersebut terjadi karena pergantian atau perbaikan tidak pada bagian mesin yang memang terjadi kerusakan. (Zekveld and Hancke, 2019).

Pemeliharaan mesin rotari juga dapat dilakukan berdasarkan pengetahuan terhadap kesehatan atau kondisi mesin. Kesehatan mesin rotari dapat diamati dengan perawatan prediktif berbasis analisis vibrasi (getaran), yang merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan di dalam industri. Dengan kemajuan dalam teknik perekaman, sensor dan analisis dapat menjadi sebuah teknologi yang dapat diandalkan. Dengan cara ini pemeliharaan mesin dapat lebih akurat karena dapat mengetahui lebih pasti pada bagian mana mesin mengalami kerusakan. Bagian-bagian tersebut diantaranya seperti gearbox, kipas, poros mesin, motor, kompresor, pompa, *bearing*, *mixer* dan lain-lain (Upadhye et al., 2015).

Getaran adalah gerakan yang berulang-ulang dalam tempo tertentu berdasarkan tingkat frekuensinya. Getaran selalu ada di hampir semua jenis mesin aktif. Pada penelitian ini akan membahas tentang getaran yang terjadi pada mesin rotari. Getaran dari mesin yang memiliki kondisi sehat tentu akan berbeda dengan mesin yang mengalami kerusakan. Kerusakan yang biasa terjadi pada mesin rotari diantaranya kesalahan mekanis, kelonggaran, ketidakseimbangan, keausan,

ketidaksejajaran dan lain-lain. Analisis getaran akan memberikan informasi yang relevan pada keadaan kondisi kerja mesin yang abnormal. Dengan menggunakan analisis getaran maka dapat ditemukan akar permasalahan kegagalan dan cara-cara untuk menghindari kegagalan kerja mesin (Upadhye et al., 2015).

Untuk dapat mendeteksi getaran pada mesin rotari, dibutuhkan sensor vibrasi untuk mendapatkan hasil getaran dari mesin tersebut. Dalam industri, sensor-sensor yang digunakan adalah sensor-sensor konvensional tetapi harganya cenderung mahal diantaranya seperti sensor *eddy-current*, sensor *swing coil velocity* dan sensor *piezoelectric accelerometer*. (Rohman, 2015). Selain sensor konvensional tersebut terdapat juga sensor dengan harga yang relatif murah yaitu sensor dengan teknologi *Micro Electrical Mechanical System* (MEMS), MEMS adalah sistem mikro dengan kemampuan fungsi elektromekanik baik sebagai *microsensor* ataupun *microactuator*. Salah satu sensor vibrasi dengan teknologi MEMS adalah Akselerometer MEMS (Mohanty et al., 2014). Dengan perkembangan teknologi sensor ini dapat menyajikan spesifikasi dinamik yang baik, dengan harga yang lebih murah dan konsumsi daya yang lebih sedikit dibandingkan dengan akselerometer konvensional pada umumnya. Akselerometer MEMS juga mudah digunakan dan mudah diintegrasikan dalam lingkungan yang keras. Karena kelebihan tersebut, akselerometer MEMS tetap baik dan dapat menjanjikan penginderaan getaran pada mesin motor rotary (Helal et al., 2016).

Pada penelitian ini, sensor MEMS akselerometer ADXL345 akan digunakan untuk mendeteksi kesalahan mekanis yang berkaitan dengan analisis getaran pada mesin pompa rotari. Dalam pekerjaannya akan difokuskan untuk mendeteksi mesin pompa rotari dalam keadaan mesin dengan menggunakan penyanggah pondasi yang tidak menggunakan pondasi penyanggah mesin. Kerusakan pada mesin pompa rotari diantaranya *unbalance*, *misalignment*, *looseness* dan *bent shaft*. Analisa *Fast Fourier Transform* (FFT) digunakan untuk mengetahui bentuk spektrumnya, metode ini sangat banyak digunakan dalam penelitian analisa getaran. Hasil dari data sensor akan disimpan dan ditampilkan ke dalam PC. Setelah itu data yang

sudah disimpan akan digunakan untuk mempelajari kerusakan yang terjadi pada mesin motor rotary.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan pada I.1 maka rumusan masalah yang akan diangkat pada tesis ini diantaranya sebagai berikut:

1. Bagaimana cara membuat alat ukur getaran menggunakan MEMS akselerometer?
2. Bagaimana cara mensimulasikan sistem pengukuran getaran mesin?
3. Bagaimana cara mengolah data mentah dalam domain waktu menjadi data dalam bentuk domain frekuensi sebagai bahan analisis kerusakan pada mesin rotari?

## **I.3 Pembatasan Masalah**

Pada penelitian ini terdapat batasan penelitian, yaitu:

1. Plant yang digunakan adalah mesin motor pompa rotari tipe Wasser PC-380 E.
2. Sensor yang digunakan adalah sensor akselerometer MEMS ADXL345.
3. Menggunakan mikrokontroler Atmega 328 dengan basis arduino sebagai perangkat untuk memproses data hasil sensor.
4. Kecepatan putar mesin motor pompa yang dibawah 3000 RPM.
5. Melakukan analisis getaran pada mesin pompa rotari Wasser PC-380 E yang terpasang untuk memompa air dari dalam tanah.
6. Merubah *raw data* yang sudah difilter dalam bentuk spektrum frekuensi dengan *Fast Forrier Transform* (FFT).

## **I.4 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijabarkan pada I.2, maka tujuan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Dapat merancang alat ukur vibrasi pada mesin rotari dengan menggunakan sensor MEMS akselerometer.

2. Dapat menjadikan data hasil sensor sebagai pembelajaran untuk menganalisis kerusakan yang terjadi pada mesin motor pompa rotari.

## **I.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik getaran pada mesin pompa rotari dengan menggunakan sensor MEMS akselerometer
2. Aplikasi sensor MEMS akselerometer dalam pengukuran getaran.
3. Membantu perindustrian untuk memantau kondisi mesin rotari dengan sensor yang relatif terjangkau dan mudah diaplikasikan.
4. Memberikan masukan dalam meningkatkan pengetahuan dan pemahaman dalam analisis pengukuran getaran pada mesin pompa rotari.
5. Menambah pustaka bagi peneliti lain untuk mengembangkan dan melanjutkan penelitian.

## **I.6 Metodologi**

Metode penelitian yang digunakan oleh penulis dalam melakukan pengerjaan tesis ini diantaranya:

1. Identifikasi Kebutuhan.  
Perawatan mesin rotari membutuhkan metode perawatan yang dapat meminimalisir pengeluaran biaya perbaikan dan sensor vibrasi konvensional di dalam industri harganya relatif mahal.
2. Studi literatur.  
Predictive maintenance dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada mesin rotari dan dapat mengurangi biaya perbaikan kerusakan mesin. Sensor *micro electrical mechanical system* (MEMS) dapat menjadi sensor alternatif dengan biaya yang relatif terjangkau dan mudah diaplikasikan.
3. Perancangan.  
*Predictive maintenance* pada mesin rotari dengan metode *analysis vibrasi* menggunakan alat ukur vibrasi. Sensor yang digunakan adalah sensor akselerometer ADXL345.
4. Implementasi.

Menggunakan mikrokontroler Arduino UNO R3 untuk mengakuisisi data mentah. Analisis karakteristik data vibrasi dalam bentuk spektrum frekuensi.

5. Pengujian dan analisis.

Melakukan pengujian pada mesin rotari untuk mendeteksi karakteristik getaran.

6. Simpulan dan saran.

Simpulan dari hasil implementasi dan pengujian.

## **I.7 Sistematika Penulisan**

Secara garis besar, pada penulisan tesis ini terdiri dari lima bab yang diantaranya sisinya saling berhubungan satu dengan yang lain. Untuk menggambarkan sistematika penulisan, maka sistematika penulisan tesis dapat diuraikan sebagai berikut:

### **BAB I Pendahuluan**

Menguraikan mengenai latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penelitian, metode penelitian dan sistematika penelitian.

### **BAB II Tinjauan Pustaka**

Bab ini meliputi pembahasan fungsi dan spesifikasi teknis sistem beserta alur perancangan yang akan dilakukan pada penelitian.

### **BAB III Perancangan Alat Ukur Vibrasi**

Bab ini mengurai desain sensor berdasarkan spesifikasi dan karakteristik yang telah ditentukan sebelumnya untuk melanjutkan dalam proses perancangan.

### **BAB IV Implementasi dan Pembahasan**

Bab ini menguraikan analisa dari data-data yang telah diperoleh setelah implementasi dan instalasi yang dilakukan.

### **BAB V Kesimpulan dan Saran**

Pada bab ini berisis kesimpulan dari hasil dan saran bagi penelitian selanjutnya.

## Bab II Tinjauan Pustaka

### II.1 Perawatan (*Maintenance*)

Perawatan atau biasa dikenal dengan kata *maintenance* dapat diartikan sebagai serangkaian kegiatan atau bisa disebut juga pekerjaan yang dilakukan untuk mengembalikan suatu kondisi dari sebuah peralatan dimana hal tersebut bertujuan untuk dapat menjalankan fungsi sesuai dengan yang semestinya. Kegagalan dalam sebuah sistem sering kali mengakibatkan kerugian yang kecil sampai kerugian yang besar. Maka dibutuhkanlah pemeliharaan yang dapat menjaga suatu komponen atau peralatan sehingga sistem dapat berjalan dengan semestinya. Beberapa cara pemeliharaan diantaranya adalah (Girdhar and Scheffer, 2004):

1. *Breakdown* atau *run failure maintenance*
2. *Preventive* atau *time-based maintenance*
3. *Proactive* atau *reactive maintenance*
4. *Predictive* atau *condition-based maintenance*

Dalam penelitian ini cara pemeliharaan yang akan dibahas adalah *Predictive* atau *condition-based maintenance*.

#### II.1.1 Predictive atau Condition Based Maintenance

*Condition Based Maintenance* (CBM) adalah salah satu perawatan yang termasuk dalam *Predictive Maintenance*. CBM didasarkan pada pemantauan kondisi dimana adanya tanda-tanda ketidaknormalan pada komponen atau peralatan yang dipantau. Dengan hal ini jika kesalahan pada peralatan dapat teridentifikasi maka selanjutnya akan dilakukan kegiatan perawatan.

Pada umumnya kerusakan yang terjadi pada sebuah komponen atau peralatan mesin diawali dengan tanda adanya kerusakan ringan, sehingga metode CBM digunakan sebagai langkah awal yang dapat digunakan sebagai rekomendasi tindakan perawatan yang sebaiknya dilakukan agar tidak menyebabkan kerusakan yang lebih lanjut.

Ada beberapa cara pendekatan dengan menggunakan metode CBM diantaranya adalah (“Condition Based Maintenance & Monitoring (CBM Maintenance) | Fiix,” n.d.) :

1. *Accoustic Emission*

Analisa ini dilakukan dengan cara menemukan kerusakan berupa retakan atau *crack* pada komponen mesin dan saluran sistem perpipaan. Pendekatan ini bisa mendeteksi titik kerusakan, serta memantau kondisi berkala.

2. *Oil Analysis*

Analisa ini dilakukan terhadap komponen pada mesin seperti bearing dan gear. Analisa ini biasa dilakukan berdasarkan partikel-partikel mikroskopik yang terdapat pada minyak pelumas.

3. *Particle Analysis*

Pada umumnya komponen mesin yang bergerak akan menghasilkan partikel atau serpihan. Pada Analisa ini dilakukan dengan mengumpulkan informasi terhadap limbah dari partikel tersebut dan membandingkannya dengan performa mesin.

4. *Corrosion Monitoring*

Analisa ini biasa dilakukan dengan menggunakan gelombang ultrasonik. Cara pendekatan ini digunakan untuk mengecek tingkat korosi yang dialami pada komponen mesin, terutama pada sistem perpipaan.

5. *Thermography*

Analisa ini dipantau terhadap temperature suatu komponen atau peralatan dengan menggunakan *infra red*. Cara pendekatan ini biasa dilakukan untuk kerusakan pada alat elektrikal pendukung kegiatan mekanik.

6. *Performance Monitoring*

Analisa ini berbasis terhadap hubungan antara kondisi mekanik dengan performa yang dihasilkan oleh mesin.

7. *Vibration Analysis*

Analisa ini atau biasa disebut juga dengan Analisa sinyal getaran adalah salah satu Teknik pemantauan kondisi berdasarkan dari getaran yang dihasilkan oleh peralatan atau komponen. Tinggi dan rendahnya frekuensi

dan amplitudo getaran yang dihasilkan oleh mesin, akan mempengaruhi kondisi mesin tersebut.

Salah satu keuntungan dari pendekatan ini adalah bahwa pemeliharaan dapat dijadwalkan secara teratur. Hal ini memungkinkan persiapan untuk membeli suku cadang untuk pekerjaan perbaikan yang diperlukan, dengan demikian dapat mengurangi kebutuhan akan persediaan suku cadang yang besar. Hal tersebut karena pekerjaan pemeliharaan hanya dilakukan apabila diperlukan. Namun adapun kekurangannya adalah pekerjaan pemeliharaan dapat meningkat apabila penilaian yang salah terhadap kerusakan mesin. Maka dibutuhkan sebuah analisis kerusakan terlebih dahulu untuk memastikan titik kesalahan ataupun kerusakan yang terjadi pada mesin (Girdhar and Scheffer, 2004).

Dari beberapa pendekatan CBM, yang paling populer dan cocok yang biasa digunakan untuk digunakan dalam mengukur dan menganalisis mesin motor rotary adalah *Vibration Analysis* (Connection Technology Center, n.d.). Maka Pada penelitian ini akan menggunakan CBM dengan pendekatan *Vibration Analysis*.

### **II.1.2 Analisis Vibrasi (*Vibration Analysis*)**

Analisis getaran untuk menentukan kondisi operasi dan mekanik peralatan. Keuntungan utama analisis getaran adalah analisis getaran dapat mengidentifikasi masalah yang berkembang sebelum menjadi terlalu serius dan menyebabkan *downtime* yang tidak terjadwal. Hal ini dapat dicapai dengan melakukan pemantauan berkala terhadap getaran mesin baik secara terus menerus atau pada interval yang dijadwalkan. Pemantauan getaran secara teratur dapat mendeteksi bantalan yang rusak atau tidak rusak, kelonggaran mekanis dan roda gigi yang aus atau rusak. Analisis getaran juga dapat mendeteksi ketidaksejajaran dan ketidakseimbangan sebelum kondisi ini menyebabkan kerusakan pada bantalan atau poros.

Dalam prakteknya operator dan teknisi sering mendeteksi suara atau getaran secara langsung yang tidak biasa di tempat mereka bekerja setiap hari. Untuk menentukan

apakah ada masalah serius mereka dapat melanjutkan dengan analisis getaran. Jika masalah memang terdeteksi analisis spektrum tambahan dapat dilakukan untuk mendapatkan hasil yang akurat untuk mendefinisikan masalah dan memperkirakan berapa lama mesin dapat terus berjalan sebelum terjadi kerusakan serius.

Keuntungan utama dalam analisis getaran adalah dapat digunakan sebagai bagian dari program keseluruhan untuk secara signifikan meningkatkan keandalan peralatan. Hal ini dapat mencakup penyejajaran dan penyeimbangan yang lebih tepat, analisis dan perbaikan kualitas yang lebih baik, dan secara terus-menerus menurunkan tingkat getaran peralatan di dalam pabrik (Girdhar and Scheffer, 2004).

## **II.2 Teori Dasar Getaran**

Definisi getaran atau vibrasi berasal dari kata dasar getar, yang menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI) adalah gerak yang berulang-ulang secara cepat. Atau jika dijelaskan lebih lanjut bahwa getaran adalah gerakan yang berulang-ulang dengan tempo yang cepat tergantung dengan besar frekuensinya. Contoh yang sederhana dari prinsip dasar getaran adalah pendulum yang berayun, senar pada alat music seperti gitar yang dipetik. Terdapat dua parameter penting dalam getaran, yaitu:

1. Amplitudo

Amplitudo adalah jarak terjauh dari simpangan yang berawal dari titik kesetimbangan. Semakin besar nilai amplitudo berarti akan semakin besar getaran yang terjadi.

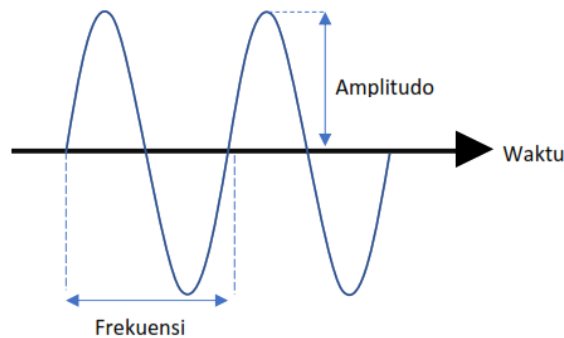
2. Frekuensi

Frekuensi adalah banyaknya getaran yang terjadi dalam kurun waktu satu detik. Frekuensi memiliki satuan yaitu hertz (Hz).

3. Fase Getaran

Phase merupakan penggambaran akhir dari karakteristik suatu getaran pada suatu benda atau mesin yang berkerja. Phase merupakan perpindahan posisi dari bagian-bagian yang bergetar secara relatif untuk menentukan titik referensi atau titik awal pada bagian lain yang bergetar (Adistya, 2014).

Parameter tersebut dapat tunjukan pada gambar II.3



Gambar II. 1 Amplitudo dan Frekuensi

Dari parameter tersebut dapat digunakan untuk menjadi parameter dasar dalam analisis getaran.

### II.2.1 Karakteristik Getaran / Vibrasi

Keadaan atau kondisi suatu benda atau mesin dan masalah-masalah kerusakan mekanik yang terjadi dapat diketahui dengan menganalisa karakteristik sinyal getaran pada benda atau mesin tersebut. Gambar II.2 menjelaskan tentang karakteristik getaran. Gerakan massa dari posisi netral, ke batas atas perjalanan, lalu kembali melalui posisi netralnya, setelah itu ke batas bawah perjalanan dan kembali ke posisi netral dapat mewakili satu siklus gerak. Dalam satu siklus gerak mengandung semua informasi yang diperlukan untuk mengukur getaran. Gerakan yang berkelanjutan dari massa hanya akan mengulangi siklus yang sama. Gerakan ini disebut periodik harmonik, dan hubungan antara perpindahan massa dan waktu dinyatakan dalam bentuk persamaan sinusoidal pada Persamaan 2.1 (Girdhar and Scheffer, 2004).

$$X = X_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

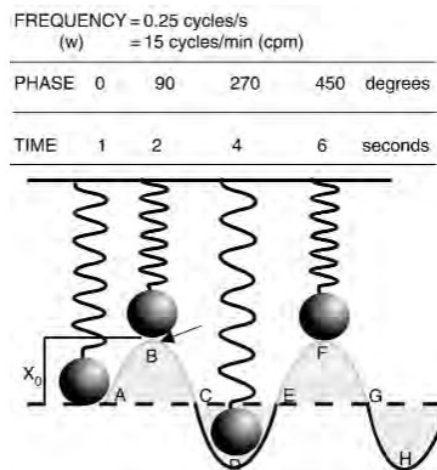
$X$  = Perpindahan pada waktu ( $t$ ) instan tertentu

$X_0$  = Perpindahan maksimum

$$\omega = 2. \pi. f$$

$f$  = Frekuensi (siklus/s-hertz-Hz)

$t$  = waktu (detik)



Gambar II. 2 Gelombang Harmonik Sederhana – Lokus Gerakan Pegas – Massa Sehubungan Dengan Waktu

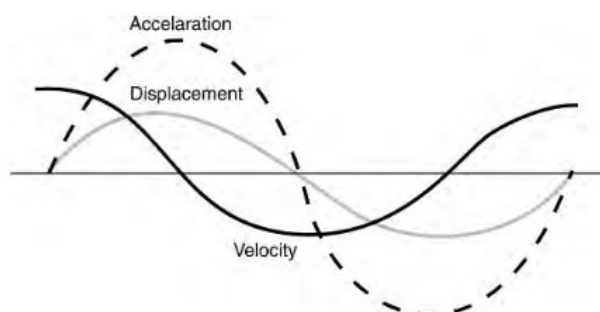
Saat massa bergerak naik dan turun, kecepatan perjalanan berubah dari nol ke maksimum. Kecepatan (*velocity*) dapat diperoleh dengan mbedakan waktu dari persamaan perpindahan (*displacement*), dapat dilihat pada persamaan 2.2.

$$\text{Velocity} = \frac{dx}{dt} = X_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (2.2)$$

Demikian pula, percepatan (*acceleretation*) massa juga bervariasi dan dapat diperoleh dengan mbedakan persamaan kecepatan, dapat dilihat pada persamaan 2.3.

$$\text{Acceleration} = \frac{d(\text{velocity})}{dt} = -X_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \quad (2.3)$$

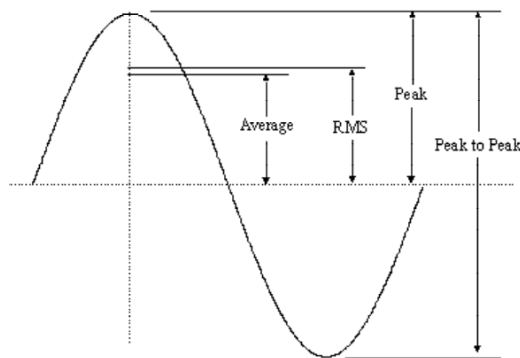
Dalam gambar II.3 perpindahan ditampilkan sebagai kurva sinus. Kecepatan sebagai kurva kosinus dan akselerasi diwakili oleh kurva sinus (Girdhar and Scheffer, 2004).



Gambar II. 3 Bentuk Gelombang Percepatan (*Velocity*), Kecepatan (*Acceleration*), dan Perpindahan (*Displacemanet*) Massa dalam Gerakan Harmonik Sederhana

## II.2.2 Faktor Skala

Ketika membandingkan nilai keseluruhan dalam getaran, faktor skala adalah cara menentukan bagaimana pengukuran tersebut diukur dan harus konsisten. Faktor skala yang digunakan dalam pengukuran getaran keseluruhan adalah *Peak*, *Peak to Peak*, Rata-rata (*Average*), dan *Root Mean Square* (RMS). Faktor skala ini memiliki hubungan satu sama lain ketika bekerja dan gelombang digambarkan dalam bentuk gelombang sinusoidal. Gambar II.4 menunjukkan hubungan antara *Peak*, *Peak to Peak*, Rata-rata (*Average*), dan *Root Mean Square* untuk bentuk sinusoidal (S K F Reliability Systems, n.d.).



Gambar II. 4 Faktor Skala pada Bentuk Gelombang Getaran Sinusoidal

1. Nilai *Peak* adalah nilai amplitudo yang mewakili jarak ke puncak gelombang yang diukur dari referensi nol.
2. Nilai *Peak to Peak* adalah nilai amplitudo yang diukur dari bagian paling atas dari bentuk gelombang ke bagian paling bawah dari bentuk sinyal gelombang sinusoidal.
3. Nilai *Average* adalah nilai rata-rata amplitudo untuk bentuk gelombang. Rata-rata gelombang sinusoidal murni adalah nol (sama positifnya dengan negatif). Namun, sebagian besar bentuk gelombang bukanlah gelombang sinusoidal murni, tetapi juga bentuk gelombang yang tidak terpusat disekitar nol akan menghasilkan nilai rata-rata nol.
4. Nilai *Root Mean Square* (RMS) adalah nilai yang sering digunakan untuk mengklasifikasi keparahan getaran pada suatu mesin yang mengukur energi efektif yang menghasilkan getaran pada mesin.

Tabel II.2 menunjukkan nilai faktor skala (S K F Reliability Systems, n.d.).

Tabel II. 1 Nilai Faktor Skala Gelombang Sinusoidal

No.	Keterangan	Nilai Faktor Skala
1.	<i>Peak</i>	1
2.	<i>Peak to Peak</i>	2x <i>Peak</i>
3.	<i>Average</i>	0.637x <i>Peak</i>
4.	<i>RMS</i>	0.707x <i>Peak</i>

Nilai rata-rata (*Average*) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4.

$$y_{mean} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt = 0 \quad (2.4)$$

Nilai *RMS* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.5.

$$y_{mean} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

Nilai rata-rata bukanlah ukuran dari kekuatan sinyal secara umum. Nilai *RMS* adalah akar kuadrat dari nilai rata-rata kuadrat untuk sinyal dengan integrasi langsung (de Silva, 1999).

### II.3 Getaran Pada Mesin

Secara istilah, getaran mesin adalah gerakan bolak-balik dari mesin secara utuh atau komponen mekanik mesin sebagai reaksi dari adanya gaya yang mempengaruhi baik itu berupa gaya dari dalam mesin itu sendiri ataupun gaya dari luar mesin, Kasus yang sering terjadi yang mengakibatkan getaran dari mesin adalah yang disebabkan oleh gaya eksitasi yang berasal dari mesin itu sendiri, contohnya seperti pompa, motor, sabuk, kipas dan beberapa komponen lain yang terdapat pada mesin (Rohman, 2015).

### II.3.1 Penyebab Getaran Mesin

Ada beberapa penyebab utama terjadinya getaran pada mesin yang disebabkan karena gaya yang dipengaruhi oleh mesin itu sendiri dan gaya dari luar. Diantaranya adalah tekanan yang berulang, kerenggangan, dan resonansi.

1. Tekanan yang berulang

Contoh dalam kehidupan adalah ketika perahu berlayar pada saat cuaca buruk maka gelombang laut akan menerjang perahu tersebut secara terus-menerus sehingga perahupun bergoyang. Hal ini hamper serupa yang terjadi pada mesin. Mesin akan begetar apabila diberikan tekanan yang berulang-ulang dengan tempo dan juga frekuensi tertentu. Dalam hal ini getaran mesin akan terjadi karena beberapa kerusakan atau kesalahan kerja mesin diantaranya adalah *unbalance rotation*, *misalignment*, komponen yang sudah usang dan pemasangan komponen yang kurang sesuai dengan semestinya.

2. Kerenggangan

Penyebab terjadinya kerenggangan yang mengakibatkan getaran mesin adalah ketika salah satu bagian mesin yang renggang dimana seharusnya masih dalam toleransi bias menjadi berlebihan dan bahkan tidak terkendali.

3. Resonansi

Mesin cenderung akan bergetar pada tingkat osilasi tertentu yang disebut tingkat osilasi alami. Pada tingkat osilasi ini mesin akan menjadi bergetar. Sebagian besar mesin memiliki lebih dari satu buah tingkat osilasi alami. Sebagai contoh misalnya mesin terdiri dari dua buah substruktur yang berbeda tingkat osilasi alaminya akan menunjukkan setidaknya dua buah tingkat osilasi alami. Umumnya semakin kompleks mesin maka semakin banyak tingkat osilasi alaminya.

Karena hal-hal tersebut maka getaran yang dialami oleh mesin akan memiliki karakteristiknya masing-masing, yaitu disaat mesin dalam keadaan normal (sehat), atau mendapat gaya tambahan dari kesalahan atau kerusakan yang terjadi pada mesin tersebut.

### II.3.2 Konsep Getaran pada Mesin

Dalam mengetahui karakteristik getaran pada mesin ada 3 konsep getaran yang dapat digunakan untuk menganalisis getaran pada mesin diantaranya adalah perpindahan getaran (*displacement vibration*), kecepatan getaran (*velocity vibration*) dan percepatan getaran (*acceleration vibration*) (Scheffer and Girdhar, 2004).

1. Perpindahan Getaran (*Displacement Vibration*)

Total jarak tempuh oleh bagian pada mesin yang bergetar, dari satu batas ke batas lainnya atau *peak to peak*. Perpindahan tersebut pada umumnya dinyatakan dalam satuan *mikron* ( $\mu m$ ) atau *mili*. Dimana  $1 \mu m = 0,001 (mm)$  dan  $1 \text{ mili} = 0,001 (inch)$ .

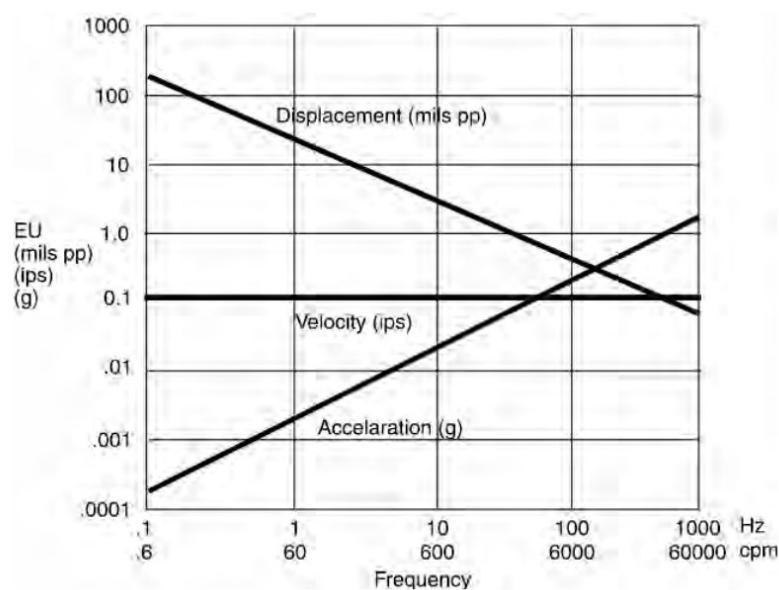
2. Kecepatan Getaran (*Volocity Vibration*)

Menurut *International Standards Organization* (ISO) menyarankan *velocity vibration – Root Mean Square* (RMS) sebagai satuan standar pengukuran tingkat kerusakan getaran pada mesin. RMS cenderung memberukan kandungan energi dalam sinyal getaran, sedangkan *velocity peak* berkorelasi lebih baik dengan intensitas getaran.

3. Percepatan Getaran (*Acceleration Vibration*)

Percepatan didefinisikan sebagai laju perubahan percepatan. Percepatan getaran pada umumnya dinyatakan dengan satuan *g*, dimana *g* adalah percepatan yang disebabkan oleh adanya gaya gravitasi bumi. Menurut kesepakatan internasional satuan gravitasi pada permukaan bumi (*g*) adalah  $9.0665 (m/det^2)$ ,  $386,087 (in/det^2)$  atau  $32,1739 (ft/det^2)$ .

Hubungan antara perpindahan, kecepatan dan percepatan berhubungan dengan amplitudo getaran dan kesehatan mesin dalam mendefinisikan teknik pengukuran dan analisis data. Gambar II.5 Menggambarkan hubungan antara perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kecepatan konstan, dengan contoh getaran 10 Hz (600 cpm).



Gambar II. 5 Hubungan Antara Perpindahan, Kecepatan dan Percepatan pada Kecepatan Konstan

Pada rentang frekuensi tinggi, nilai akselerasi menghasilkan nilai lebih signifikan dari pada kecepatan atau perpindahan. Oleh karena itu untuk frekuensi lebih dari 1000 Hz (60 kcpm) atau 1500 Hz (90 kcpm), unit pengukuran yang cocok untuk analisis getaran adalah percepatan. Secara umum getaran antara 10 Hz (600 cpm) dan 1000 Hz (60 kcpm), getaran kecepatan memberikan indikasi yang baik dari tingkat keparahan getaran sampai di atas 1000 Hz (60 kcpm) sehingga akselerasi adalah satu-satunya indikator yang baik. Karena mayoritas rotasi umum beroperasi pada rentang 10-1000 Hz, maka getaran kecepatan biasanya digunakan untuk pengukuran dan analisis dalam getaran mesin (P.Bloch and K.Geitner, 1999).

### II.3.3 Kriteria Zona Kelayakan Getaran Mesin

Getaran dalam mesin memiliki standar yang sudah ditetapkan sebagai indikator sebagai acuan untuk menentukan nilai batas keadaan normal (sehat) mesin, keadaan mesin yang mulai mengalami kerusakan dan mesin yang sudah dalam keadaan yang rusak. Dalam penelitian ini indikator standar yang digunakan adalah ISO 10816-1. Standar indikator getaran ditunjukkan pada table II.3 sebagai berikut (Sutar et al., 2018):

Tabel II.2 Standar Indikator ISO 10816-1

Velocity Severity		Velocity Range Limits And Machine Classes ISO Standard 10816-1			
RMS (mm/sec)	PEAK (in/Sec)	Small Machines Class 1	Medium Machines Class 2	Large Machines	
				Rigid Supports Class 3	Less Rigid Supports Class 4
0.28	0.02	Good	Good	Good	Good
0.45	0.03				
0.71	0.04				
1.12	0.06	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory	Good
1.8	0.1				
2.8	0.16	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)	Satisfactory	Satisfactory
4.5	0.25	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unsatisfactory (Alert)	
7.1	0.4			Unsatisfactory (Alert)	
11.2	0.62			Unacceptable (Alert)	
18	1	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)
28	1.56			Unacceptable (Danger)	
45	2.51			Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)

Klasifikasi kelas mesin pada ISO 10816-1 diantaranya:

1. *Class 1* adalah motor listrik produksi hingga 15kW
2. *Class 2* adalah mesin berukuran sedang biasanya motor listrik dengan output 15-75 kW tanpa pondasi khusus.
3. *Class 3* adalah Mesin berukuran besar dengan massa yang dipasang di atas fondasi yang kaku dan berat.
4. *Class 4* adalah Mesin yang relatif besar salah satu contohnya adalah perangkat turbogenerator.

Batas perbedaan ini berbeda-beda karena setiap mesin memiliki spesifikasinya masing-masing, oleh sebab itu setiap kelas mesin memiliki batas kondisinya masing-masing.

#### II.4 Macam-Macam Kesalahan atau Kerusakan Pada Mesin

Beberapa parameter penting yang dianalisa pada vibrasi diantaranya adalah:

1. Amplitudo dibandingkan dengan frekuensi
2. Amplitudo dibandingkan dengan waktu
3. Amplitudo dibandingkan dengan frekuensi dibandingkan dengan waktu
4. *Time waveform*

5. *Lissajous pattern*
6. Amplitudo dan phasa dibandingkan dengan rpm
7. Phasa analisis
8. *Mode shape determination*

Dari beberapa contoh diatas analisa yang digunakan adalah amplitudo dibandingkan dengan frekuensi. Analisa parameter amplitudo dengan frekuensi dalam kenyataannya selalu melibatkan *FFT analyzer*.

Untuk mengetahui dan memberikan gambaran secara umum agar dapat lebih mudah dalam memahami dari macam-macam kerusakan pada mesin, Tabel II.4 menjelaskan macam-macam penyebab dan kemungkinan penyebab lainnya dalam domain frekuensi (P.Bloch and K.Geitner, 1999).

Tabel II. 3 Macam-macam penyebab kerusakan dalam domain frekuensi

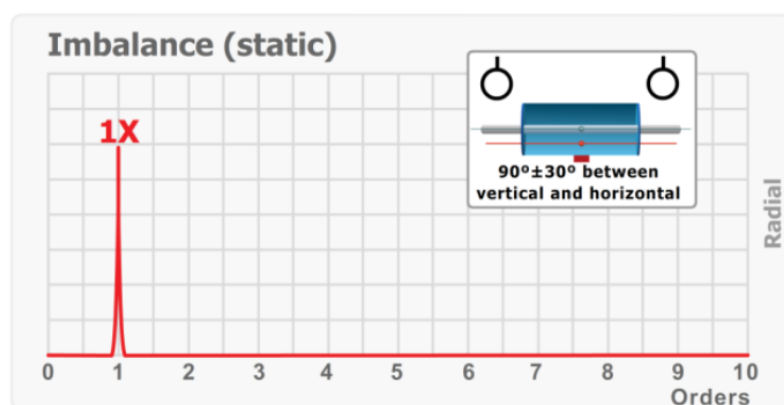
Frekuensi dalam RPM	Penyebab Utama	Penyebab Lainnya
1 x RPM	Unbalance	1. Ekisentrik journal, gigi atau puli 2. Sabuk buruk. 3. Masalah listrik
2 x RPM	Kelonggaran	1. Misalignment 2. Gaya reciprocating 3. Resonansi
3 x RPM	Misalignment	Biasanya terjadi masalah karena kelonggaran pada komponen atau peralatan mesin.
Kurang dari 1 x RPM	Terjadi pusran oli	1. Putaran belt yang tidak teratur 2. Vibrasi belt
2 x synkron frekuensi	Pulsa torso	Pada umumnya masalah ini jarang terjadi, kecuali resonansi yang tereksitasi

N x RPM	Gigi buruk. Gaya Hydraulic	1. Jumlah gigi x RPM yang tidak memadai
Frekuensi tinggi	Bearing defect	1. Cavitasi 2. Lubrikasi 3. Gesekan halus

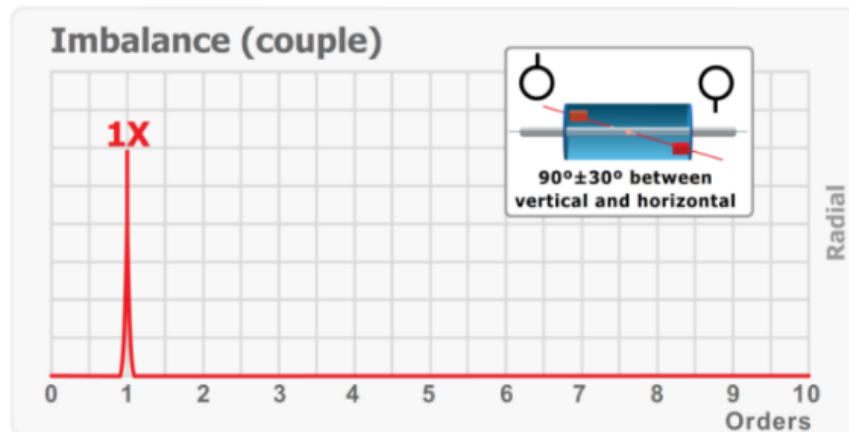
### II.4.1 Definisi *Unbalance*

Cara teknis untuk menggambarkan *unbalance* adalah dengan kondisi dimana garis tengah geometris poros dan garis tengah massa tidak bertepatan, atau di mana pusat massa tidak terletak pada sumbu rotasi. Dengan kata lain ada titik berat di suatu tempat di sepanjang poros. Ada dua jenis *unbalance* yaitu *static* dan *couple*.

*Static unbalance* terjadi jika sumbu inersia dari masa yang berputar tidak berada pada pusat rotasi, namun parallel terhadap pusat rotasi, hal tersebut disebabkan karena adanya distribusi beban massa yang tidak merata. *Couple unbalance* adalah kerusakan yang terjadi pada mesin dimana sebuah massa yang berputar memiliki dua buah gaya yang berbeda 180°. Namun biasanya ada kombinasi yang disebut dengan *dynamic unbalance*, yaitu gabungan antara *static unbalance* dan *couple unbalance*. Gambar II.6 menunjukkan spektrum frekuensi dan ciri kerusakan dari *static unbalance*. Gambar II.7 menunjukkan spektrum frekuensi dan ciri kerusakan dari *couple unbalance* (“Vibration Analysis Definitions - Mobius Institute,” 2019):



Gambar II.6 Ciri Kerusakan *Static Unbalance*



Gambar II. 7 Ciri Kerusakan *Couple Unbalance*

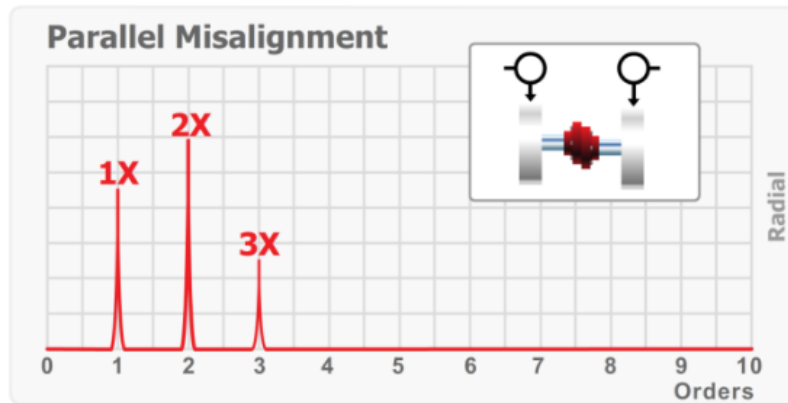
Dalam spektrum Gambar II.6 dan Gambar II.7 dapat dilihat puncak ketinggian pada kecepatan putar poros 1x (frekuensi rotasi 1x *running speed*). Hal ini sering lebih tinggi dalam arah horizontal dibandingkan dengan arah vertical karena kekakuan magnitudonya yang lebih tinggi.

#### II.4.2 Definisi *Misalignment*

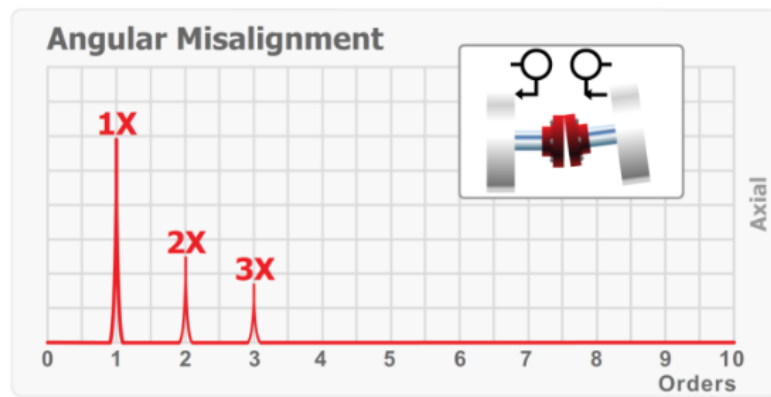
*Misalignment* adalah kondisi di mana garis tengah poros yang berpasangan tidak bertepatan. *Misalignment* terjadi karena praktik penyelarasan yang buruk atau karena kemunculan termal, fondasi yang bergeser, pipa yang menegang dan lain-lain. Ada dua jenis *misalignment* yaitu, *parallel misalignment* dan *angular misalignment*.

*Parallel misalignment* adalah kerusakan yang terjadi karena garis tengah *shaft* terpisah satu sama lain tetapi terhubung secara parallel atau jika garis tengah poros tidak sejajar parallel tetapi tidak bersamaan. *Angular misalignment* adalah kerusakan yang terjadi karena sudut antara dua buah *shaft* yang terhubung dengan sebuah *coupling* atau jika poros yang tidak selaras bertemu pada suatu titik tetapi tidak sejajar. Getaran tidak selalu berubah dengan cara yang dapat diprediksi saat poros tidak selaras. Kebanyakan kasus *misalignment* adalah kombinasi dari *parallel* dan *angular misalignment*. Gambar II.8 menunjukkan spektrum frekuensi dan ciri kerusakan dari *parallel misalignment*. Gambar II.9 menunjukkan spektrum frekuensi

dan ciri kerusakan dari *angular misalignment* (“Vibration Analysis Definitions - Mobius Institute,” 2019):



Gambar II.8 Ciri Kerusakan *Parallel Misalignment*

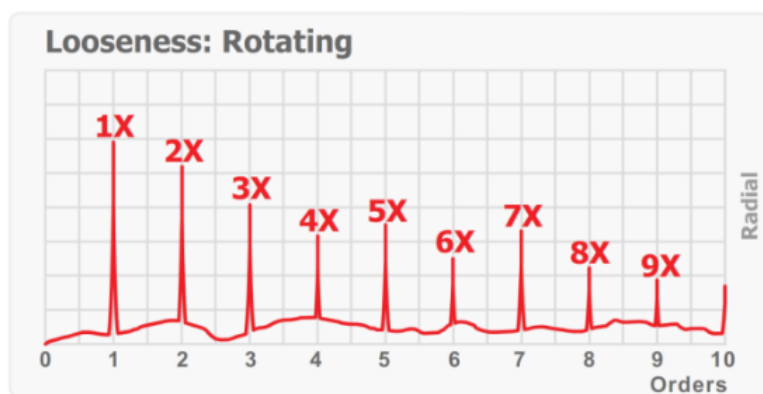


Gambar II. 9 Ciri Kerusakan *Angular Misalignment*

Diagnosis aturan umum pada *misalignment* didasarkan pada getaran dominan pada dua kali laju rotasi (2x) dengan peningkatan tingkat rotasi (1x) yang bekerja dalam aksial dan dalam arah vertical atau horizontal. Perbedaan antara *parallel* dan *angular misalignment* dapat di amati pada frekuensi 2x. Jika amplitudo pada 2x relatif lebih besar dibandingkan dengan 1x, maka kerusakan dapat diprediksikan yaitu *parallel misalignment*. Sedangkan jika amplitudo frekuensi 2x lebih kecil dari amplitudo 1x maka dapat diprediksi kerusakan adalah *angular misalignment*. Ketika *parallel misalignment* dan *angular misalignment* terjadi bersamaan maka tingkat kerusakan akan semakin tinggi, analisis spektrum frekuensi akan menampilkan harmonisa amplitudo yang relatif tinggi pada amplitudo frekuensi 3x sampai 8x, tergantung seberapa besar kerusakan yang terjadi (J Alsalaet, 2012).

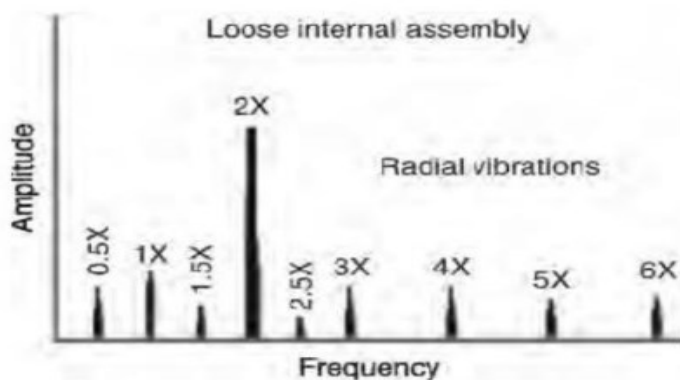
### II.4.3 Definisi *Looseness*

Kerusakan dengan ciri *looseness* pada analisis vibrasi dibagi menjadi dua bagian, yaitu *structural looseness* dan *rotating looseness*. Pada kerusakan *rotating looseness*, jarak antara *sleeve* dan *rolling element* jarak antara *sleeve* dan *rolling element* yang berlebih menghasilkan harmonisa pada amplitudo frekuensi 1x dan dalam kondisi tertentu dapat mencapai frekuensi 10x. Gambar II.10 menunjukkan spektrum frekuensi dari *rotating looseness* (“Vibration Analysis Definitions - Mobius Institute,” 2019).



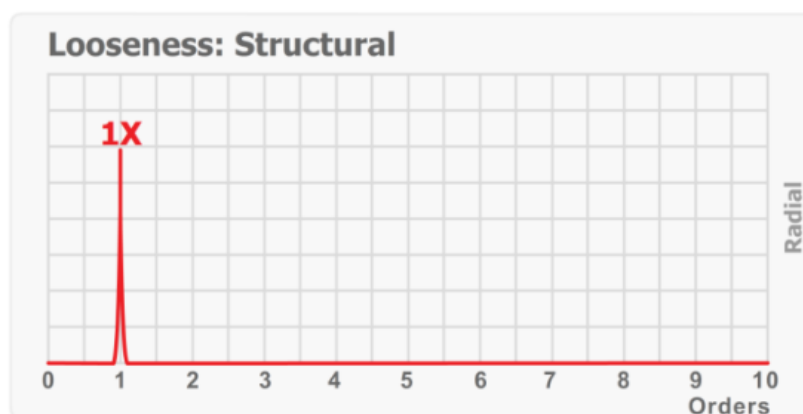
Gambar II. 10 Ciri Kerusakan *Rotating Looseness*

Dalam keadaan tertentu ketika penggunaan *rotating element* seperti *bearing* sudah cukup lama biasanya dapat menghasilkan harmonisa amplitudo frekuensi pada 0.5x yang biasa disebut dengan sub harmonisa. Hal ini dapat terjadi karena adanya gesekan dan tumbukan. Gambar II.11 menunjukkan kerusakan pada *rotating looseness* bersamaan dengan adanya sub harmonisa (J Alsalaet, 2012).



Gambar II. 11 Ciri Kerusakan *Rotating Looseness* dengan Sub Harmonisa

*Structural Looseness* adalah kerusakan yang biasanya terjadi karena kerusakan pada pondasi mesin, baut yang mengalami kelonggaran, kerusakan pada *base plate* atau antara bagian yang biasanya tidak bergerak. Pada analisis vibrasi, karakteristik kerusakan pada *structural looseness* biasanya akan mirip dengan kerusakan *unbalance*, dimana terjadi pada amplitudo frekuensi 1x. Untuk membedakannya adalah jika amplitudo frekuensi 1x horizontal bernilai dua kali lebih besar dibandingkan dengan amplitudo frekuensi 1x vertikal, maka kerusakan yang terjadi adalah *structural looseness*. Gambar II.12 menunjukkan kerusakan *structural looseness*. (“Vibration Analysis Definitions - Mobius Institute,” 2019).



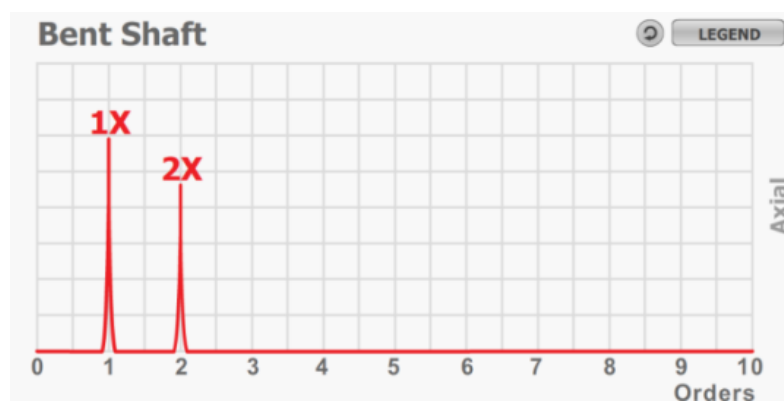
Gambar II.12 Ciri Kerusakan *Looseness Structural*

*Structural looseness*, atau kelonggaran antara mesin dan fondasinya, akan meningkatkan komponen getaran 1x ke arah yang paling tidak kaku. Ini biasanya arah horizontal tetapi tergantung pada tata letak fisik mesin.

#### II.4.4 Definisi *Bent Shaft*

*Bent Shaft* adalah kondisi kerusakan yang terjadi dibagian poros mesin, dimana poros mengalami pembengkokkan yang disebabkan karena memuainya poros karena panas yang berlebih dan dapat disebabkan karena poros mendapatkan beban yang tidak seimbang dan mengakibatkan bengkoknya poros, atau poros yang dipasang mengalami kebengkokan fisik karena kesalahan produksi. *Bent shaft* memiliki karakteristik yang hampir serupa dengan *misalignment* yang membedakannya adalah *misalignment* terjadi karena poros yang tidak sejajar dengan poros lain sedangkan *bent shaft* ketidaksejajaran porosnya terjadi karena

poros yang melengkung atau bengkok, dan jika dengan menganalisis getaran pada spektrum frekuensi, *bent shaft* terlihat dengan ciri-ciri akan menghasilkan amplitude getaran dominan hanya pada 1X dan 2X saja. Gambar II.13 menunjukkan spektrum frekuensi dari ciri-ciri kerusakan *bent shaft* sebagai berikut (“Vibration Analysis Definitions - Mobius Institute,” 2019):



Gambar II. 13 Ciri Kerusakan *Bent Shaft*

Kerusakan *bent shaft* terjadi ketika kerusakan-kerusakan lain sudah terjadi sebelumnya, seperti *unbalance* dan *misalignment*, karena poros yang terus bekerja ketika keadaan mesin sudah mengalami kerusakan pada poros atau struktur pondasinya mengakibatkan poros menjadi lebih berat dalam bekerja dan mengakibatkan panas yang berlebih sehingga poros menjadi bengkok (Jaafar Alsalaet, 2012).

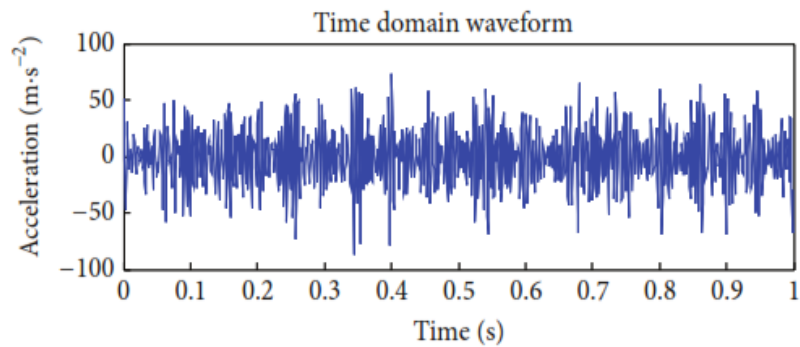
## II.5 Metode Analisis Sinyal Getaran

Dalam proses analisis menggunakan sinyal getaran terdapat dua metode yang paling umum untuk digunakan, diantaranya adalah analisis sinyal getaran domain waktu dan analisis getaran domain frekuensi.

### II.5.1 Metode Analisis Getaran Domain Waktu

Domain waktu dari sinyal vibrasi merupakan data rekaman yang terkandung dalam sinyal seperti halnya getaran dan biasanya didominasi oleh elemen-elemen yang menimbulkan suara berisik. Pada gambar II.14 merupakan contoh grafik tipikal dari plotting data getaran dengan analisis domain waktu yang biasanya nilai dari

ketinggian gelombang (amplitude) terhadap waktu dan kadang juga disebut dengan nilai puncak (peak) terhadap waktu.



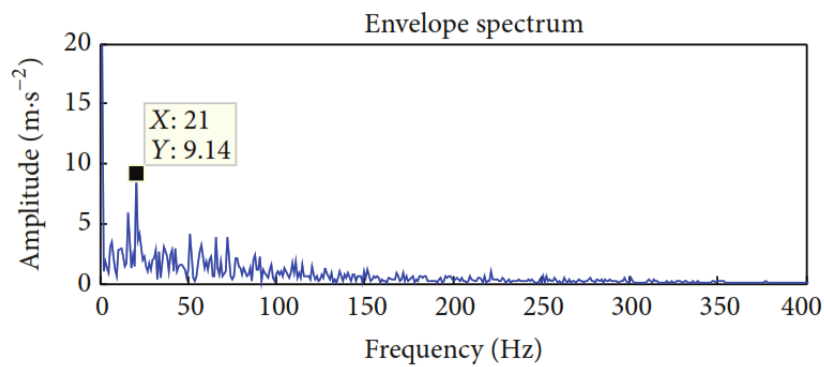
Gambar II.14 Contoh plot analisis getaran domain waktu (Luo et al., 2015)

Pada umumnya metode analisis getaran dalam domain waktu dapat meningkatkan efektifitas proses analisis getaran. Tetapi dalam menentukan titik atau lokasi terjadinya kerusakan pada mesin tetap harus dengan kombinasi spektrum lain, salah satu contohnya adalah spektrum frekuensi, karena metode analisis getaran domain waktu hanya efektif digunakan pada kecepatan rendah (<10 RPM) pada lokasi kerusakan *rolling element bearing*, *gears*, *looseness*, *rubs* dan *beats*. Namun tidak efektif digunakan untuk mendeteksi *unbalance* dan *misalignment* pada kecepatan RPM normal mesin (Dunton, 1999).

## II.5.2 Metode Analisis Getaran Domain Frekuensi

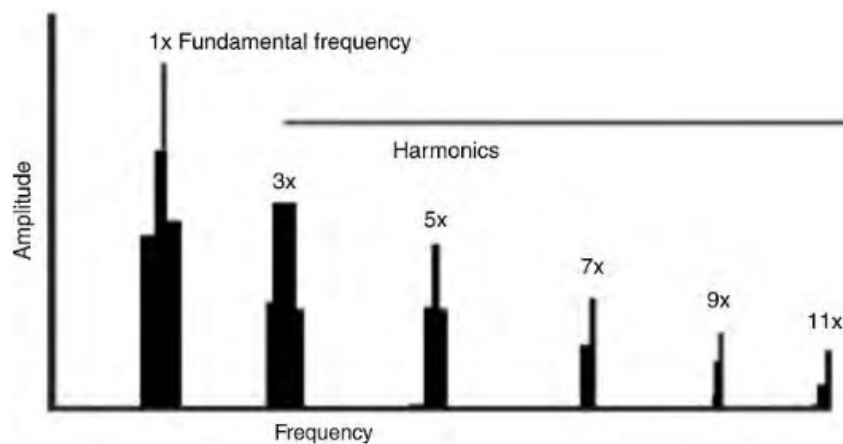
Domain frekuensi dilakukan dengan mengubah sinyal gelombang domain waktu ke dalam domain frekuensi. Metode yang sangat umum yang digunakan untuk mengkonversikan domain waktu ke domain frekuensi adalah dengan menggunakan suatu metode yaitu metode *Fast Fourrie Transform* (FFT).

Penggunaan data domain frekuensi ini diperlukan untuk Analisa setelah diketahui trend level getaran yang terukur pada data domain waktu melebihi getaran yang diperbolehkan. Berdasarkan domain frekuensi, menunjukkan frekuensi dasar dan frekuensi-frekuensi kelipatan dari frekuensi dasar yang disebut sebagai harmonik. Kemunculan harmonik tersebut menunjukkan sinyal frekuensi komponen seperti frekuensi poros, frekuensi impeler, dan frekuensi motor. Contoh plot analisis getaran domain frekuensi ditunjukkan pada gambar II.15 sebagai berikut:



Gambar II.15 Contoh plot analisis getaran domain frekuensi (Luo et al., 2015)

Dalam analisis menggunakan analisis getaran domain frekuensi salah satu contohnya adalah dengan menggunakan analisis Fourier. Analisis Fourier adalah istilah lain untuk transformasi bentuk gelombang waktu menjadi transformasi bentuk spektrum nilai amplitudo berbanding frekuensi. Analisis Fourier kadang-kadang disebut sebagai analisis spektrum, dan dapat dilakukan dengan penganalisa *Fast Fourier Transform* (FFT). Analisa dalam bentuk FFT ditunjukkan pada Gambar II.16 berikut (Girdhar and Scheffer, 2004).

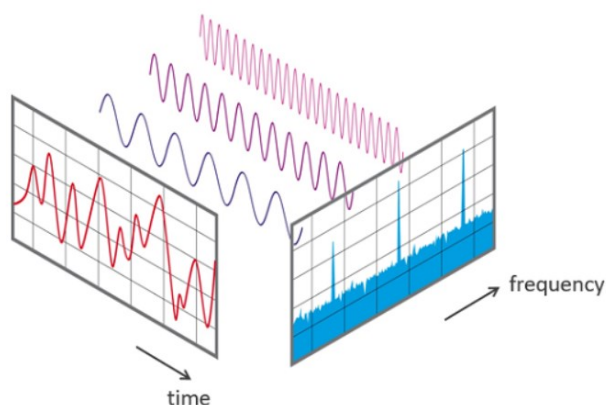


Gambar II. 16 Transformasi Fourier dari Gelombang Persegi

## II.6 *Fast Fourier Transform* (FFT)

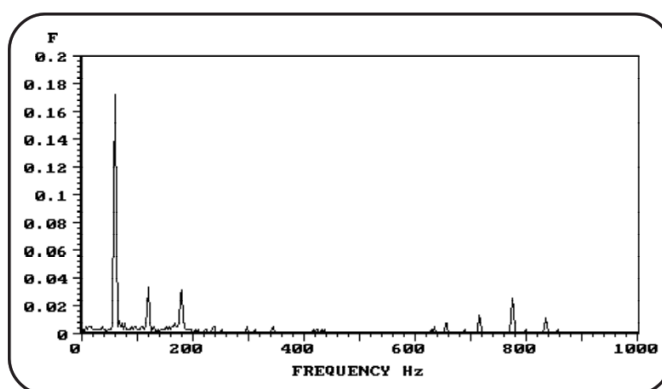
*Fast Fourier Transform* (FFT) adalah varian tercepat dari pada varian lainnya seperti *Discrete Fourier Transform* (DFT). Dimana FFT menggunakan algoritma yang lebih baik untuk melakukan proses yang sama dengan DFT, namun perbedaannya FFT menggunakan waktu yang lebih singkat. Karena kecepatannya

dan sifat diskritnya inilah yang membuat FFT banyak digunakan pada berbagai pengolahan sinyal digital, pada hal ini FFT digunakan dalam pengolahan sinyal getaran. Untuk proses transformasi dari gelombang berbasis domain waktu ke gelombang berbasis domain frekuensi dapat ditunjukkan pada gambar II.17 sebagai berikut (Audio, n.d.):



Gambar II.17 Transformasi gelombang domain waktu ke domain frekuensi

Dengan menggunakan Fourier analysis atau spectrum analisis, gelombang dengan domain waktu akan diubah menjadi gelombang sebagai fungsi dari domain frekuensi. Dalam analisis getaran pada mesin spektrum FFT adalah metode yang sangat berguna. Jika ada masalah mesin, spektrum FFT dapat memberikan informasi untuk membantu mempermudah menentukan lokasi terjadinya kesalahan atau kerusakan pada mesin. Dengan mencari perubahan pada amplitudo dalam rentan frekuensi tertentu maka dapat diketahui masalah pada mesin dengan menganalisis spektrum FFT (S K F Reliability Systems, n.d.). Sebagai contoh gambaran spektrum FFT dapat dilihat pada gambar II.18 sebagai berikut:



Gambar II.18 Contoh spektrum dari FFT

Dengan grafik dari spektrum pada gambar II.18 maka dapat dilakukan analisa spektrum, dengan melihat karakteristik dari frekuensi sebagai basis Analisa. Frekuensi memberikan informasi apa yang menjadi penyebab getaran dan amplitudo menunjukkan tingkat keparahan dalam kesalahan atau kerusakan mesin.

Transformasi Fourier dapat dibagi menjadi empat kategori berdasarkan tipe sinyal. Sinyal dapat kontinu ataupun diskrit dan dapat periodik ataupun aperiodik. berikut perhitungan Transformasi Fourier ditunjukkan pada persamaan 2.11 (de Silva, 1999).

$$X(f) = F\{x(t)\} = \int_{-x}^x x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (2.6)$$

Persamaan II.6 adalah bentuk dari transformasi Fourier yang siap di komputasikan secara langsung dari bentuk sinyal  $x(t)$ . Sedangkan transformasi *Fourier* dalam operasi digital memerlukan sampel sinyal diskrit, oleh karena itu untuk merubah sinyal kontinyu ke bentuk sinyal diskrit dibutuhkan algoritma perhitungan transformasi *Fourier* sinyal diskrit atau biasa disebut dengan *Discrete Fourier Transform* (DFT), persamaan DFT ditunjukkan pada persamaan 2.12 (Proakis and Manolakis, 1990)

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (2.7)$$

Dimana  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$

Dalam menentukan atau nilai sampel ( $N$ ) untuk analisis DFT dari sinyal kontinyu perlu diperhatikan adanya keterbatasan sampel terhadap bentuk sinyal kontinyu yang sebenarnya. Persamaan 2.13 di bawah ini adalah perhitungan *sampling interval* ( $\Delta t$ ) pada domain waktu (Sunarko, 2010).

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (2.8)$$

Dimana  $f_s$  adalah *sampling per second* (S/s).

Persamaan 2.14 adalah jarak frekuensi atau *frequency resolution* ( $\Delta f$ ) pada domain frekuensi (Sunarko, 2010).

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} - \frac{1}{N\Delta t} \quad (2.9)$$

Dimana  $\Delta f$  adalah *frequency resolution*,  $N$  adalah Jumlah sampel dan  $N\Delta t$  adalah total akuisisi waktu.

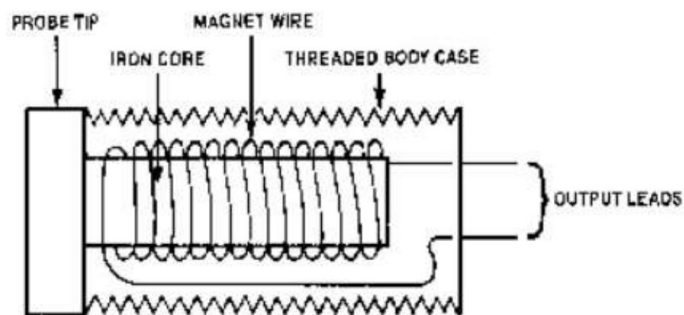
Analisis dalam spektrum frekuensi dengan menggunakan FFT dengan menggunakan metode komputasi DFT sangat berguna dalam analisis getaran mesin, kerana dapat memetakan sinyal getaran pada frekuensi-frekuensi karakteristik yang menggambarkan jenis masalah-masalah yang terjadi pada mesin rotari.

## II.7 Transduser Getaran

Untuk mengukur getaran mesin diperlukan suatu transduser getaran yang berfungsi untuk mengubah sinyal getaran yang dihasilkan oleh mesin menjadi sinyal listrik. Masing-masing amplitudo getaran yang telah diukur dapat menjadi parameter perpindahan, kecepatan dan percepatan mempunyai transduser tersendiri. Beberapa transduser yang umumnya digunakan untuk mengukur getaran sehingga dapat dijadikan sebagai acuan dalam menentukan transduser mana yang cocok untuk penelitian yang akan dilakukan. Diantaranya adalah *Eddy-current* Sensor, *Swing Coil Velocity* Transduser dan Akselerometer (Rohman, 2015).

### II.7.1 Eddy-current Sensor

Sensor *Eddy-current* adalah salah satu sensor *non-contact* yang biasa digunakan untuk mengukur getaran. Sensor ini memiliki jangkauan frekuensi terluas dari 0-240KHz. Dengan menggunakan prinsip induksi *eddy-current* yang timbul ketika medan magnet mendekati sebuah konduktor. Sensor ini biasanya digunakan untuk mengukur jarak pemisah antara komponen-komponen mesin yang diukur dengan posisi sensor itu sendiri. Gambar II.19 menunjukkan konstruksi dari sensor *eddy-current* (Rohman and Djuniadi, 2015)

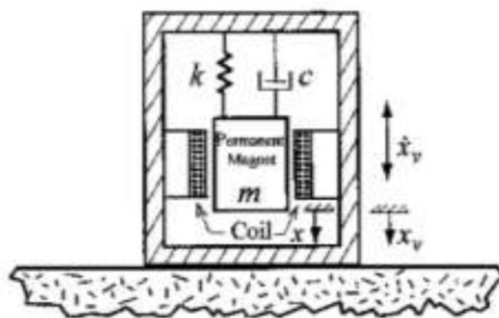


Gambar II.19 Konstruksi dasar dari sensor *eddy-current*

Bagian-bagian dari sensor ini terdiri dari lilitan dan inti besi yang membentuk medan magnet jika diberi tegangan *Alternative Current* (AC), probe tip dan bodi ulir. Sensor ini diaplikasikan untuk mengukur getaran pada poros mesin.

### II.7.2 Swing Coil Velocity Transducer

Sensor transduser *Swing Coil Velocity* Transduser memiliki spesifikasi jangkauan frekuensi dari 10 – 1,5 KHz merupakan sensor yang menggunakan prinsip elektrokinetik. Dasar dari konstruksi transduser ini dapat di gambarkan pada gambar II.20 sebagai berikut (Rohman, 2015):



Gambar II.20 Konstruksi dasar dari *Swing Coil Velocity Transducer*

Transduser ini terdiri dari sebuah magnet permanen yang digantung pada sebuah pegas dan diantara lilitan. Prinsip kerja dari transduser ini adalah ketika terjadi getaran, magnet akan ikut bergetar. Gerakan yang dilakukan magnet tersebut berinteraksi dengan lilitan sehingga menimbulkan tegangan listrik. Biasanya sensor ini diaplikasikan untuk monitoring dan balancing pada mesin.

### II.7.3 Akselerometer

Akselerometer adalah sensor getaran yang paling banyak digunakan sebagai transduser pengukuran getaran karena sensor ini relatif sederhana, kokoh dari sisi keandalannya (Sutar et al., 2018). Sensor akselerometer adalah sensor yang paling sering digunakan dalam industri sebagai sensor pendeteksi getaran pada mesin-mesin industri (Rohman, 2015) Ada tiga jenis atau teknologi pada *accelerometer* diantaranya adalah *piezoresistive accelerometer*, *piezoelectric accelerometer* dan *capacitive MEMS accelerometer* (Hanly, 2016).

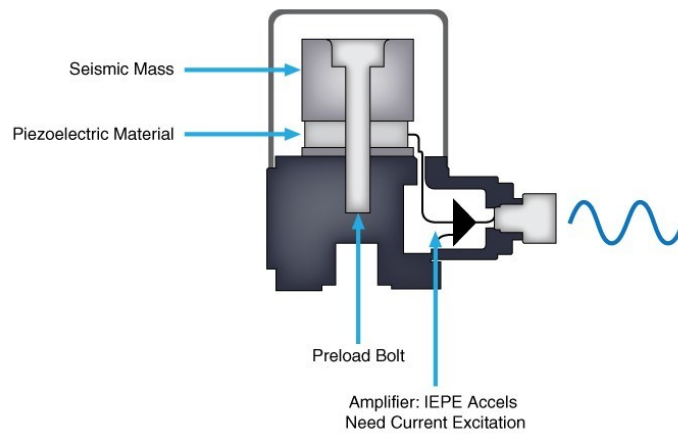
1. *Piezoresistive Accelerometer*

*Piezoresistive accelerometer* adalah teknologi sensor yang digunakan untuk akselerometer dengan respon DC, yaitu sensor dapat mengukur hingga nol hertz yang biasanya digunakan untuk mengukur vektor gravitasi dan akselerasi berkelanjutan. *Piezoresistive accelerometer* menghasilkan perubahan resistansi pada *strain gauge* yang merupakan bagian dari sistem seismik *accelerometer*. *Piezoresistive accelerometer* memiliki *bandwidth* yang sangat lebar yang memungkinkan digunakan untuk mengukur peristiwa kejutan dengan durasi yang pendek dan frekuensi tinggi. *Piezoresistive accelerometer* biasanya memiliki sensitivitas yang sangat rendah, hal ini menyebabkan fungsinya kurang berguna untuk pengujian getaran yang akurat. *Piezoresistive accelerometer* sejauh ini merupakan jenis sensor getaran terbaik untuk pengukuran impuls, dimana rentan frekuensi dan amplitudo tinggi, contohnya pengujian tabrakan otomotif dan pengujian senjata.

2. *Piezoelectric Accelerometer*

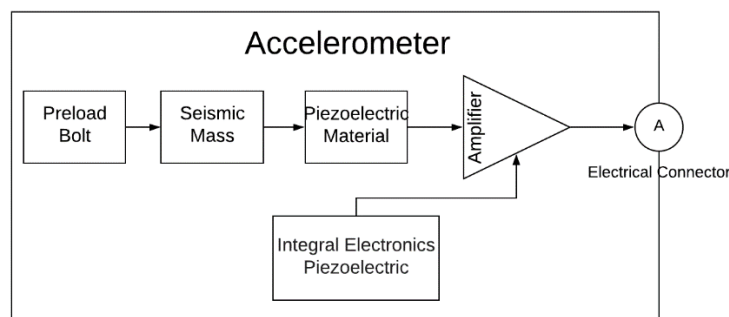
Akselerometer yang umumnya digunakan dalam industri adalah akselerometer tipe piezoelektrik. Akselerometer tipe ini menggunakan material piezoelektrik sebagai komponen transdusernya. Material yang terdapat pada piezoelektrik merupakan material kristal yang dapat menghasilkan tegangan listrik ketika diberikan sinyal getaran lalu mendorong atom didalamnya. Hasil output dari sensor akselerometer dapat didiferensialkan dalam velocity maupun displacement. Konstruksi dasar

dari akselerometer ditunjukkan pada gambar II.21 sebagai berikut (Instrument, 2019)



Gambar II.21 Konstruksi dasar dari sensor akselerometer

Dari fungsinya dan cara kerjanya piezoelectric accelerometer adalah akselerometer yang paling banyak digunakan untuk digunakan untuk aplikasi tes dan pengukuran getaran, dimana piezoelectric accelerometer menjadi pilihan pertama untuk sebagian besar pengukuran getaran karena respon frekuensi yang luas dan sensitivitas yang baik. Namun sensor jenis ini tidak dapat mengukur akselerasi statis dan umumnya tidak dapat mengukur getaran rendah, dan akselerometer jenis ini membutuhkan penguat muatan yang dapat menjadi jenuh ketika akselerometer mengalami tingkat percepatan di luar rentan pengukurannya. Penjelasan tentang cara kerja dasar dari piezoelectric accelerometer digambarkan pada blok diagram bagian akselerometer piezoelektrik pada Gambar II.22 sebagai berikut (Instrument, 2019).



Gambar II. 22 Diagram Blok Bagian Akselerometer Piezoelektrik

Pada umumnya *accelerometer* bergantung pada penggunaan dari prinsip kerja *piezoelectric*, yaitu *piezoelectric* akan menghasilkan tegangan tertentu ketika bagian *piezoelectric* ditekan. Percepatan yang ditransmisikan ke massa seismik di dalam *accelerometer* akan menghasilkan gaya proposional pada kristal *piezoelectric material*. Tegangan ini menghasilkan impedansi dan muatan listrik yang sebanding dengan gaya yang diberikan yang sebanding terhadap percepatan. *Piezoelectric accelerometer* pada umumnya memerlukan penguat eksternal atau konverter *inline charge* untuk memperkuat muatan yang dihasilkan, menurunkan impedansi untuk mengkompatibilisasi dengan perangkat pengukuran, dan meminimalkan kerentanan terhadap sumber *noise*. Bagian *Integral Electronic Piezoelectric (IEPE)* sensor pada *accelerometer* berfungsi untuk memberikan sumber arus konstan dan memariasikan impedansi sehubungan dengan muatan yang bervariasi dalam *piezoelectric material* ke *amplifier* (Instrument, 2019).

### 3. *Capacitive MEMS Accelerometer*

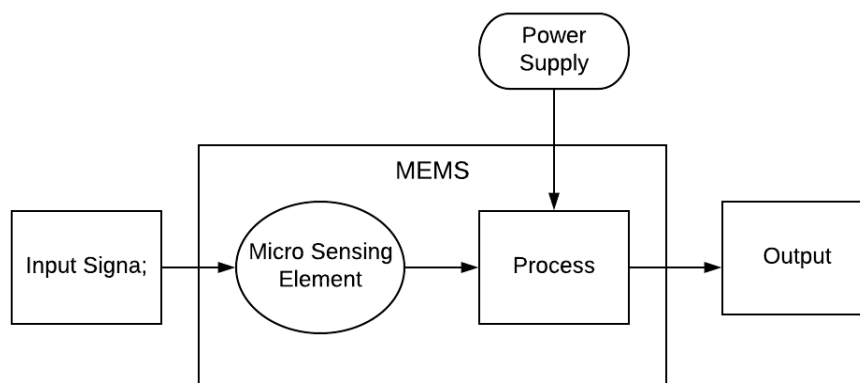
Diantara jenis-jenis sensor *accelerometer* terdapat salah satu jenis sensor *accelerometer* dengan cara kerja menggunakan teknik proses *batch integrated circuit*. Dimana sensor ini seperti sebuah miniatur perangkat atau susunan perangkat yang membangun komponen elektrik dan mekanik. Sensor jenis biasa disebut dengan MEMS yaitu *Micro Electrical Mechanical System* dengan keuntungan dalam penggunaannya adalah biayanya yang murah (*low cost*), dapat memperkecil ukuran dan massa dari sebuah sensor, dengan memperkecil ukuran sensor maka dapat memperluas kegunaan dari sensor tersebut dan mudah untuk diintegrasikan ke dalam sistem elektikal dimana sensor dengan teknologi MEMS dapat digunakan dengan *Embedded system*. Sehingga itu sensor *accelerometer* MEMS memiliki keunggulan yang dapat diaplikasikan sebagai alat ukur alternatif pengukuran getaran pada mesin selain menggunakan sensor *accelerometer* konvensional untuk industri.

Pada penelitian ini akan menggunakan sensor MEMS akselerometer sebagai alternatif sensor pengukuran getaran untuk mesin rotari.

## II.8 MEMS Akselerometer

*Micro Electrical Mechanical System* (MEMS) merupakan sebuah instrument yang digunakan untuk menangkap berbagai keperluan fisis dimana sensor-sensor pada saat ini banyak menggunakan teknologi MEMS. Sistem ini banyak digunakan dalam beberapa teknologi diantaranya sistem pengendalian, kesehatan, robotik dan masih banyak pemanfaatan dari MEMS (Adistya, 2014).

MEMS akselerometer merupakan salah satu tipe sensor akselerometer yang menggunakan prinsip *Micro Electrical Mechanical System*. MEMS akselerometer memiliki ukuran  $\pm 1 \text{ mm}$  sehingga MEMS akselerometer disebut dengan *micro accelerometer*. MEMS akselerometer dirancang untuk dapat mencapai fungsi teknis khususnya fungsi elektromekanik dan elektrokimia. MEMS memiliki dua inti dasar yaitu elemen *sensing* atau *actuating* dan *transducer*. Gambar II.23 Menggambarkan blok diagram dari MEMS yang digunakan untuk *microsensor* sebagai pemanfaatan MEMS akselerometer (Hsu, 2008).



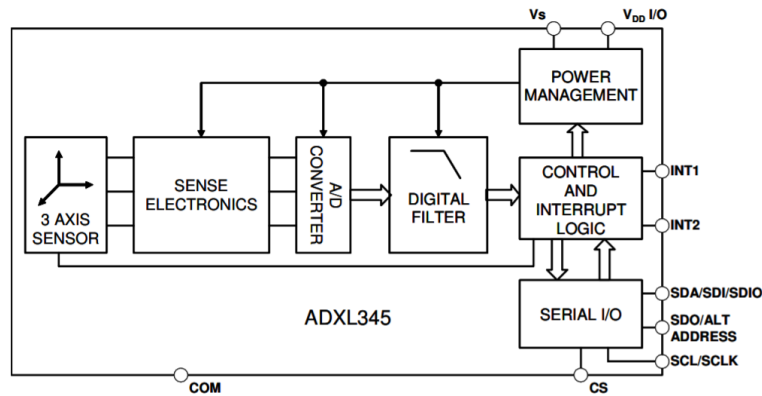
Gambar II. 23 MEMS Sebagai Mikrosensor

MEMS akselerometer sendiri memiliki beberapa jenis berdasarkan prinsip kerjanya, diantaranya adalah *piezoresistor*, *hit air bubble* dan *differential capacitive*. Pada penelitian ini akan menggunakan sensor MEMS akselerometer tipe ADXL345 produk dari *Analog Device*.

### II.8.1 Sensor Accelerometer ADXL345

Sensor *Accelerometer* ADXL345 merupakan sensor percepatan yang mampu mengukur percepatan linier dalam tiga sumbu (x, y dan z). Sensor ini

memiliki resolusi hingga 13-bit ( $2^{13} = 8194$  tingkat presisi) pada sensitivitas tertingginya. *Accelerometer* ADXL345 dapat mendeteksi pengukuran dari  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  dan  $\pm 16g$ , dimana  $1g$  merupakan satuan percepatan rata-rata gravitasi bumi. Aplikasinya mencakup deteksi kemiringan dengan melihat perubahan gaya statik (*static gravity acceleration on tilt sensing application*) dan percepatan dinamik (*dynamic acceleration*) yang terjadi akibat gerakan atau tumbukan. Blok diagram *accelerometer* ADXL345 ditunjukkan pada Gambar II.24 (Data, 2008).

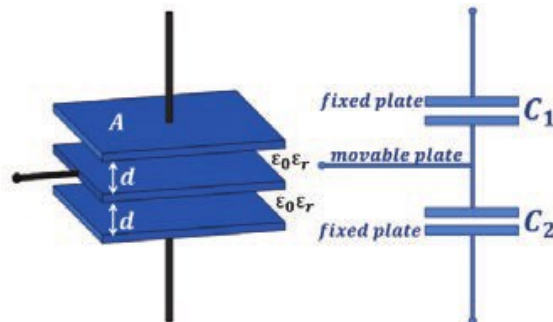


Gambar II. 24 Blok Diagram Akselerometer ADXL345

Dari blok diagram Gambar II.19 penjelasan untuk bagian masing-masing blok dijelaskan sebagai berikut (Rohman, 2015):

1. *3-Axis Sensor*

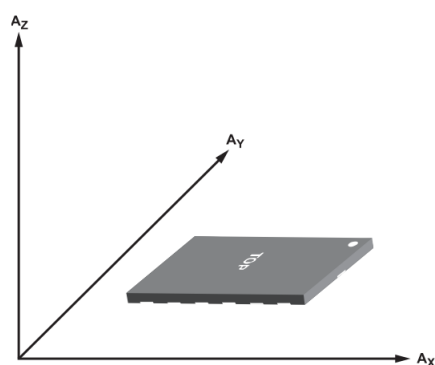
Dalam *accelerometer* ADXL345 *datasheet* (Analog Devices, 2009), *accelerometer* ADXL345 bekerja menggunakan prinsip kerja *differential capacitive sensor*. Bagian *3-Axis Sensor* pada *accelerometer* ADXL345 ditunjukkan pada Gambar II.25 (Ferri et al., 2016).



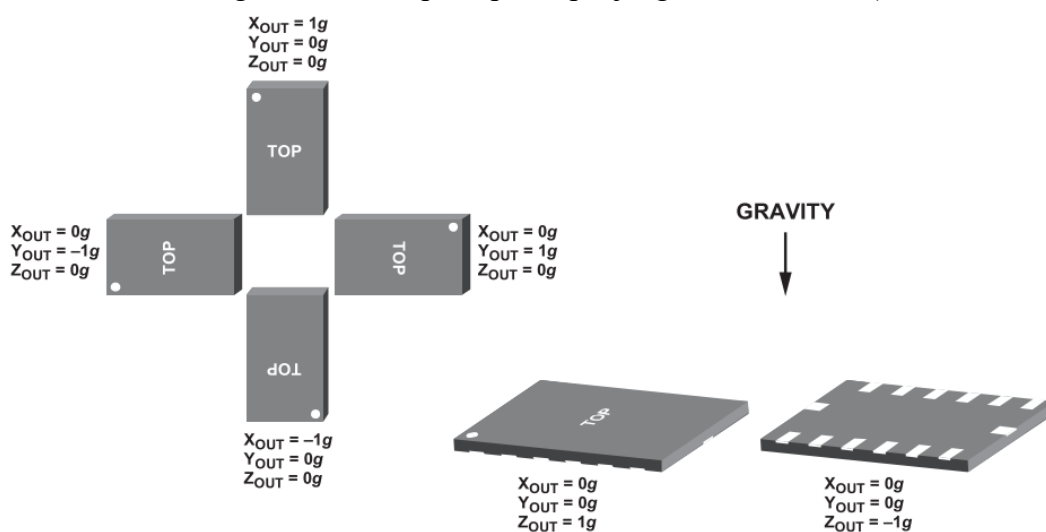
Gambar II. 25 Skema *Differential Capacitive Sensor*

Prinsip kerja sederhana dari *differential capacitive sensor* adalah bentuk dari susunan dua buah kapasitor yang dirangkai seri seperti pada Gambar

II.20. Nilai dari kapasitansi  $C_1$  dan  $C_2$  merupakan suatu variabel yang ditentukan oleh jarak antara *moving dielectric* terhadap kedua *fixed dielectric*, perubahan jarak *moving dielectric* ini sebanding dengan perubahan kecepatan. Gambar II.26 dan Gambar II.27 akan menunjukkan orientasi *accelerometer* ADXL345 terhadap sumbu kartesian (Analog Devices, 2009).



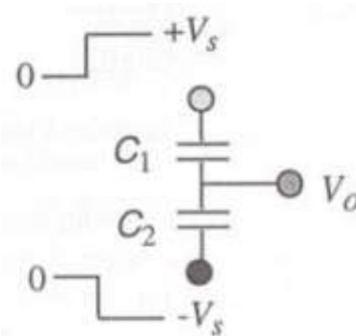
Gambar II. 26 Sumbu Sensitivitas Akselerasi (Tegangan Output Terkait Meningkat Ketika Dipercepat Sepanjang Sumbu Sensitif)



Gambar II. 27 Respon *Output* dan Orientasi ke Gravitasi

## 2. Sense Electronic

Untuk menggunakan sensor dengan cara kerja *differential capacitive sensor* diperlukan rangkaian tambahan berupa osilator. Kedua ujung kapasitor diberikan tegangan dengan perbedaan fase  $180^\circ$ . Penggunaan osilator ditunjukkan pada Gambar II.28 (Rohman, 2015).



Gambar II. 28 Prinsip *Sense Electronic*

### 3. A/D Converter

*Analog Digital Converter* (ADC) adalah suatu rangkaian yang terdapat pada *accelerometer* ADXL345 yang memiliki fungsi untuk mengkonversi data analog menjadi data digital. Konversi ini dilakukan karena mikrokontroler menggunakan data digital untuk pengolahan data.

### 4. Digital Filter

*Digital Filter* adalah filter yang digunakan pada *accelerometer* ADXL345 pada rangkaian A/D Converter. Filter digital berfungsi untuk menghilangkan *noise* pada proses konversi analog ke digital seperti fungsi aliasing.

### 5. Power Management

*Power Management* pada *accelerometer* ADXL345 adalah bagian yang mengelola sumber daya untuk kerja *accelerometer* ADXL345.

### 6. Control and Interrupt Logic

*Control and Interrupt Logic* pada *accelerometer* ADXL345 merupakan bagian pengontrol utama dari *accelerometer* ADXL345.

### 7. Serial I/O

*Serial I/O* pada *accelerometer* ADXL345 adalah port *input* dan *output* yang digunakan untuk dihubungkan pada mikrokontroler. *Accelerometer* ADXL345 memiliki dua cara *interface* yaitu SPI dan I2C, keduanya merupakan *digital interfac*. Dalam penelitian ini akan menggunakan metode I2C sebagai *interface* penghubung antara *accelerometer* ADXL345 dengan mikrokontroler. Gambar II.29 adalah gambar dari *accelerometer* ADXL345.



Gambar II. 29 MEMS Accelerometer ADXL345

Dari spesifikasi pada datasheet *accelerometer ADXL345* (Analog Devices, 2009) *accelerometer ADXL345* sudah memiliki *A/D Converter* dan *digital filter* sendiri sehingga *accelerometer ADXL345* merupakan sensor siap untuk dijadikan sebuah sensor untuk mendeteksi getaran pada mesin rotari.

### II.8.2 Spesifikasi MEMS Accelerometer ADXL345

Spesifikasi dari sensor *accelerometer ADXL345* dijabarkan pada Tabel II.5 sebagai berikut (Analog Devices, 2009):

Tabel II. 4 Spesifikasi Accelerometer ADXL345

Parameter	Test Conditions	Min	Typ <sup>1</sup>	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis User selectable		$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$		g
Nonlinearity	Percentage of full scale		$\pm 0.5$		%
Inter-Axis Alignment Error			$\pm 0.1$		Degrees
Cross-Axis Sensitivity <sup>2</sup>			$\pm 1$		%
<b>OUTPUT RESOLUTION</b>					
All g Ranges	Each axis 10-bit resolution		10		Bits
$\pm 2$ g Range	Full resolution		10		Bits
$\pm 4$ g Range	Full resolution		11		Bits
$\pm 8$ g Range	Full resolution		12		Bits
$\pm 16$ g Range	Full resolution		13		Bits
<b>SENSITIVITY</b>					
Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$					
	All g-ranges, full resolution	230	256	282	LSB/g
	$\pm 2$ g, 10-bit resolution	230	256	282	LSB/g
	$\pm 4$ g, 10-bit resolution	115	128	141	LSB/g
	$\pm 8$ g, 10-bit resolution	57	64	71	LSB/g
	$\pm 16$ g, 10-bit resolution	29	32	35	LSB/g
Sensitivity Deviation from Ideal			$\pm 1.0$		%
Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$					
	All g-ranges, full resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 2$ g, 10-bit resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 4$ g, 10-bit resolution	7.1	7.8	8.7	mg/LSB
	$\pm 8$ g, 10-bit resolution	14.1	15.6	17.5	mg/LSB
	$\pm 16$ g, 10-bit resolution	28.6	31.2	34.5	mg/LSB
Sensitivity Change Due to Temperature			$\pm 0.01$		%/°C
<b>0 g OFFSET</b>					
0 g Output for $X_{OUT}, Y_{OUT}$	Each axis	-150	0	+150	mg
0 g Output for $Z_{OUT}$		-250	0	+250	mg
0 g Output Deviation from Ideal, $X_{OUT}, Y_{OUT}$			$\pm 35$		mg
0 g Output Deviation from Ideal, $Z_{OUT}$			$\pm 40$		mg
0 g Offset vs. Temperature for X-, Y-Axes			$\pm 0.4$		mg/°C
0 g Offset vs. Temperature for Z-Axis			$\pm 1.2$		mg/°C
<b>NOISE</b>					
X-, Y-Axes	ODR = 100 Hz for $\pm 2$ g, 10-bit resolution or all g-ranges, full resolution		0.75		LSB rms
Z-Axis	ODR = 100 Hz for $\pm 2$ g, 10-bit resolution or all g-ranges, full resolution		1.1		LSB rms
<b>OUTPUT DATA RATE AND BANDWIDTH</b>					
Output Data Rate (ODR) <sup>3,4,5</sup>	User selectable	0.1		3200	Hz
<b>SELF-TEST<sup>6</sup></b>					
Output Change in X-Axis		0.20		2.10	g
Output Change in Y-Axis		-2.10		-0.20	g
Output Change in Z-Axis		0.30		3.40	g
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range ( $V_S$ )		2.0	2.5	3.6	V
Interface Voltage Range ( $V_{DDIO}$ )		1.7	1.8	$V_S$	V
Supply Current	ODR $\geq$ 100 Hz		140		$\mu$ A
	ODR < 10 Hz		30		$\mu$ A
Standby Mode Leakage Current			0.1		$\mu$ A
Turn-On and Wake-Up Time <sup>7</sup>	ODR = 3200 Hz		1.4		ms
<b>Parameter</b>					
<b>TEMPERATURE</b>					
Operating Temperature Range		-40		+85	°C
<b>WEIGHT</b>					
Device Weight			30		mg

Dari spesifikasi *accelerometer* ADXL345 sensitivitas sensor adalah salah satu faktor yang harus diperhatikan, karena akan sangat menentukan respon dari sistem itu sendiri, dengan jangauan  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  dan  $\pm 16g$ . *Accelerometer* ADXL345 yang mudah diaplikasikan dengan mikrokontroler dengan komunikasi dengan menggunakan metode I2C dan dengan kemampuan oprasional dari  $-40^{\circ}C$  sampai  $85^{\circ}C$  maka *accelerometer* ADXL345 bisa digunakan untuk mendeteksi getaran pada mesin rotari. Untuk pengaplikasiannya dengan menggunakan mikrokontroler *accelerometer* ADXL345 memiliki 8 pin yang memiliki fungsi berbeda-beda Tabel II.6 menunjukkan fungsi pin yang dimiliki oleh *accelerometer* ADXL345 (Analog Devices, 2009).

Tabel II. 5 Fungsi-fungsi Pin dari Accelerometer ADXL345

Pin ke-	Simbol Pada ADXL345	Keterangan/Fungsi
1	GND	Penghubung ke ground
2	VCC	Power Supply <i>accelerometer</i> ADXL345
3	CS	Digunakan untuk komunikasi I2C sebagai <i>Chhip Select</i>
4	INT 1	Interupsi 1 output
5	INT 2	Interupsi 2 output
6	SDO	Serial data output, alternatif alamat komunikasi data I2C
7	SDA	Serial data input pada I2C
8	SCL	Merupakan serial komunikasi clock pada I2C

Pin-pin tersebut berfungsi untuk penghubung dengan mikrokontroler, pada penelitian ini akan menggunakan mikrokontroler berbasis Arduino dengan mikrokontroler ATmega 328P dengan komunikasi I2C untuk mendapatkan pengindraan karakteristik dari getara pada mesin rotari

### II.8.3 Perbandingan Sensor MEMS Akselerometer ADXL345 Dengan Sensor Akselerometer Konvensional

Pada dasarnya sensor MEMS akselerometer ADXL345 dan sensor akselerometer konvensional pada umumnya keduanya adalah sensor yang bekerja untuk mendeteksi sebuah gerakan atau getaran dengan menghasilkan nilai akselerasi, kinerja setiap sensor tergantung dengan bagaimana parameter spesifikasi dari sensor tersebut. Karena itu adapun perbedaan antara sensor MEMS akselerometer ADXL345 dengan sensor akselerometer konvensional pada umumnya dapat ditunjukkan pada TABEL berikut ini

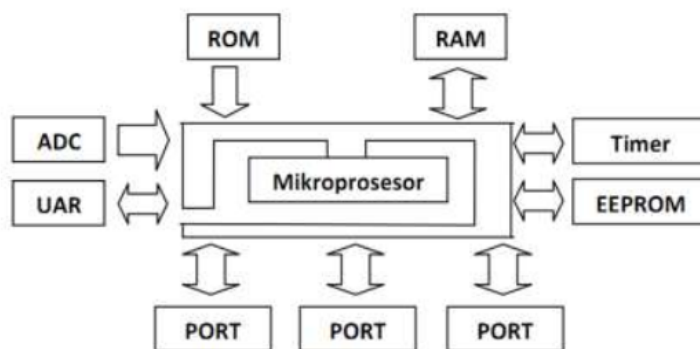
Tabel II. 6 Perbandingan MEMS Akselerometer ADXL345 dengan Akselerometer Konvensional

No.	Parameter Spesifikasi	MEMS ADXL345	Konvensional
1.	Harga	Relatif Murah ( <i>low cost</i> )	Relatif Mahal
2.	<i>Axis</i>	<i>Triaxial</i>	Umumnya 1 <i>axis</i> tetapi jenis tertentu ada yang 3 <i>axis</i>
3.	Proses Data	Digital	Analog
4.	<i>Sensitivity</i>	Least Significant Bit per <i>g</i> (LSB/ <i>g</i> )	mV/ <i>g</i> atau pC/ <i>g</i>
5.	<i>Nonlinearity</i>	±0.5 %	±0.5% – 1% (tergantung jenisnya)

Perbandingan ini berdasarkan dari data sheet MEMS Akselerometer ADXL345 (Analog Devices, 2009) dengan parameter spesifikasi umum sensor akselerometer konvensional (Poinsot, 1984) (Transmitters and Sensors, 2012).

## II.9 Mikrokontroler

Mikrokontroler dapat dianalogikan dengan sebuah sistem komputer yang dikemas dalam sebuah chip. Artinya adalah didalam sebuah IC mikrokontroler sudah terdapat kebutuhan minimal dari mikroprosesor, yaitu mikroprosesor, ROM, RAM, I/O dan clock seperti yang biasa dimiliki oleh sebuah komputer. Gambar II.30 menunjukkan diagram dari rangkaian internal sebuah mikroprosesor (Rohman, 2015).

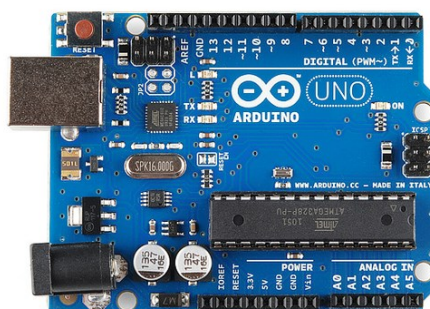


Gambar II.30 Diagram blok rangkaian internal mikrokontroler

Gambar II.30 adalah diagram dasar dari mikrokontroler, pada penelitian ini mikrokontroler Arduino Uno akan digunakan sebagai alat untuk memproses data dari sensor getaran.

### II.9.1 Arduino

Menurut Nurfalah (Nurfalah, n.d.) Arduino adalah peralatan elektronik atau papan rangkaian elektronik *open source* yang didalamnya terdapat komponen utama yaitu sebuah *chip* mikrokontroler dengan jenis AVR. Mikrokontroler tersebut adalah *chip* atau *integrated circuit* (IC) yang dapat deprogram menggunakan komputer. Tujuan dari menanamkan program pada mikrokontroler adalah agar rangkaian elektronik dapat membaca input, memproses input dan kemudian dapat menghasilkan output yang diinginkan. Pada penelitian ini akan menggunakan Arduino Uno sebagai mikrokontroler untuk mengakuisisi dan memproses data sensor. Gambar II.31 adalah gambar dari Arduino Uno R3 yang akan digunakan untuk penelitian.



Gambar II. 31 Arduino UNO R3

Untuk spesifikasi dari Arduino Uno R3 yang digunakan dalam penelitian dijabarkan pada Tabel II.8 (Rohman, 2015).

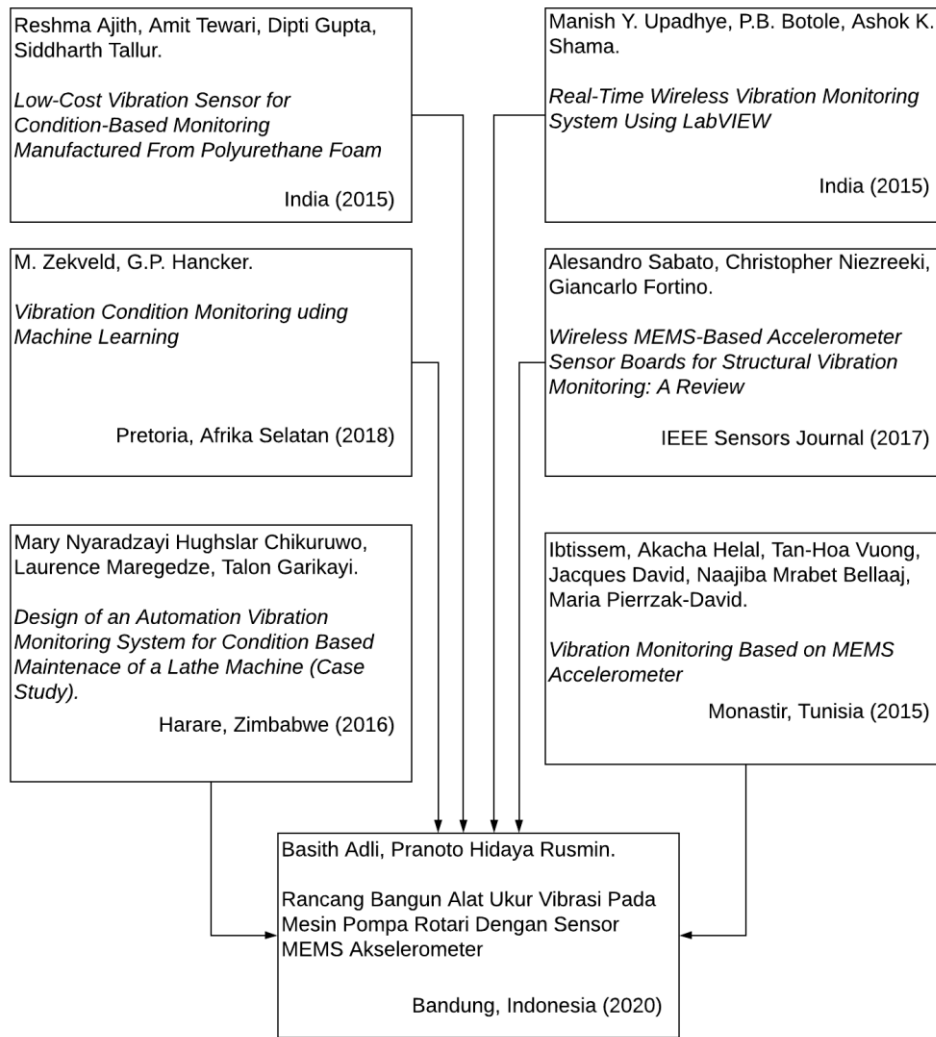
Tabel II. 7 Spesifikasi Arduino UNO R3

Parameter	Spesifikasi
Mikrokontroler	Atmega 328P
Tegangan Operasi	5 Volt
Tegangan Input (Disarankan)	7 Volt - 13 Volt
Batas Tegangan Input	6 Volt - 20 Volt
Pin Digital I/O	14 (6 diantaranya output PWM)
Pin Analog Input	6
Arus DC per Pin I/O	40 mA
Arus DC untuk 3.3 Volt	50 mA
Flash Memory	32 KB dan 0,5 KB digunakan sebagai <i>bootloader</i>
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock	16 MHz

Jadi, mikrokontroler bertugas sebagai otak yang mengendalikan input, proses dan output sebuah rangkaian elektronik. Karena komponen utama Arduino adalah mikrokontroler maka Arduino dapat deprogram menggunakan komputer sesuai dengan kebutuhan.

## II.10 Posisi Penelitian (*State of The Art*)

*State of The Art* adalah pernyataan yang menjelaskan tentang penyelesaian masalah yang akan dilakukan merupakan hal yang berbeda dengan penelitian-penelitian yang telah dikerjakan oleh pihak lain. Gambar II.32 dibawah ini menguraikan secara singkat tentang penelitian terdahulu sehingga dapat memperkuat alasan penelitian ini dilakukan.



Gambar II. 32 *State of The Art* Penelitian

Adapun acuan referensi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini terdapat pada Tabel II.8 sebagai berikut:

Tabel II. 8 Referensi Acuan Penelitian

Judul	Penulis	Ringkasan Singkat
<i>Low-Cost Vibration Sensor for Condition-Based Monitoring</i>	Reshma Ajith, Amit Tewari, Dipti Gupta, Siddharth Tallur	Pada artikel ini, penulis menyajikan sensor vibrasi yang murah dari bahan busa <i>polyurethane</i> dengan melapisi pori-pori busa dengan tinta

<p><i>Manufactured from Polyurethane Foam</i></p>		<p>karbon konduktif untuk memberikan sifat piezo-resistif pada material. Hasil realisasi konsep sensor tersebut dapat menyajikan <i>bandwidth</i> penginderaan sampai 80 Hz (Ajith et al., 2017).</p>
<p><i>Real-Time Wireless Vibration Monitoring System Using LabVIEW</i></p>	<p>Manish Y. Upadhye, P.B. Borole, Ashok K. Sharma.</p>	<p>Makalah ini menjelaskan pengembangan <i>vibration monitoring system</i> dengan biaya rendah. Dengan memantau kondisi alat berat secara otomatis. Pengukuran getaran yang dilakukan menggunakan MEMS <i>accelerometer</i> MMA7455L. Sensor <i>accelerometer</i> tersebut dihubungkan dengan mikrokontroler menggunakan komunikasi nirkabel dan menggunakan LabVIEW sebagai GUI untuk pemantauan secara real-time (Upadhye et al., 2015).</p>
<p><i>Vibration Condition Monitoring using Machine Learning</i></p>	<p>M. Zekveld, G.P. Hancke</p>	<p>Makalah ini menjelaskan dan mengimplementasikan perangkat <i>vibration condition monitoring</i> nirkabel. Dengan menggunakan sensor MEMS <i>acceletometer</i> LSM6DS3, yang terpasang pada mikrokontroler. Dan bertujuan untuk</p>

		merancang perangkat yang menggunakan <i>mechine learning</i> untuk mendiagnosis kesalahan atau kerusakan dari analisis FFT (Zekveld and Hancke, 2019).
<i>Wireless MEMS-Based Accelerometer Sensor Boards for Structural Vibration Monitoring: A Review</i>	Alessandro Sabato, Christopher Niezreeki, Giancarlo Fortino.	Makalah ini memantau dan menganalisis sistem MEMS <i>accelerometer</i> memiliki kemungkinan digabungkan dengan perangkat nirkabel. Makalah ini menyajikan tinjauan ringkasan sistem yang dikembangkan dalam sepuluh tahun dari 2006, dengan penekanan khusus pada karakteristik penginderaan, kinerja dan aplikasi MEMS <i>accelerometer</i> yang dirancang untuk deteksi dan analisis mikrovibrasi. Dan beberapa prototipe MEMS <i>accelerometer</i> telah diusulkan untuk mencapai pemantauan getaran yang akurat (Sabato et al., 2017).
<i>Design of an Automated Vibration Monitoring System for Condition Based Maintenance of a</i>	Mary Nyaradzayi Hughslar Chikuruwo, Laurence Maregedze, Talon Garikayi.	Makalah ini bertujuan untuk menghasilkan sistem pemantauan vibrasi dari mesin bubut secara otomatis. Dimana sistem menggunakan berbagai indikator yang dihubungkan

<i>Lathe Machine (Case Study)</i>		dengan prosesor utama dari rangkaian yang memantai kinerja <i>real-time</i> pada mesin bubut. Ketika mesin bergetar dan getarannya berada di luar jangkauan maka mesin akan mati seketika (Chikuruwo et al., 2016).
<i>Vibration Monitoring Based on MEMS Accelerometer</i>	Ibtissem.Akacha Helal, Tan-Hoa Vuong, Jacques David, Najiba Mrabet Bellaaj, Maria Pietrzak-David	Makalah ini menyajikan pendekatan untuk mendeteksi karakteristik vibrasi pada motor listrik dengan menggunakan MEMS <i>accelerometer</i> ADXL203. Dengan sistem komunikasi nirkabel dan menggunakan spectral analisis untuk mengetahui karakteristik dari vibrasi motor listrik tersebut (Helal et al., 2016).

Dari uraian diatas para beberapa peneliti terdahulu menggunakan MEMS *accelerometer* sebagai sensor vibrasi. Dengan tujuan untuk membangun sistem *vibration condition monitoring* yang sesuai dengan masing-masing kasus. Dengan metode analisis yang berbeda-beda. Dengan demikian penelitian ini akan menyajikan sensor vibrasi menggunakan MEMS *accelerometer* ADXL345 dengan mikrokontroler sebagai alat akuisisi data sensor, pada mesin pompa rotari dengan menganalisis spektrum frekuensi getaran mesin dengan metode *fast fourier transform* (FFT).

## Bab III Perancangan Alat Ukur Vibrasi

### III.1 Spesifikasi Sensor Alat Ukur Vibrasi

Dalam perancangan alat ukur, terdapat beberapa spesifikasi yang menjadi pertimbangan dasar sensor akselerometer. Spesifikasi – spesifikasi tersebut digunakan untuk mengetahui batasan kerja atau acuan kerja dari sensor tersebut diantaranya adalah (Analog Devices, 2020) (Hanly, 2018):

#### 1. Tipe Akselerometer

Ada tiga jenis utama akselerometer, yaitu *piezoresistive accelerometer*, *piezoelectric accelerometer* dan *MEMS accelerometer*. Setiap tipe akselerometer memiliki karakteristik masing-masing dan kegunaannya disesuaikan terhadap pengaplikasiannya.

#### 2. *Measurement Range*

Spesifikasi ini mendefinisikan percepatan amplitudo akselerometer dapat mengukur berbanding lurus dengan sensitivitas. Tingkat percepatan akselerometer didukung oleh spesifikasi sinyal output sensor yang biasanya ditentukan dalam  $\pm g$ .

#### 3. *Sensitivity*

*Sensitivity* ditentukan pada tegangan suplai tertentu dan biasanya dinyatakan dalam satuan  $mV/g$  untuk *accelerometer analog-output* dan  $LBS/g$  atau  $mg/LBS$  untuk *accelerometer digital-output*.

#### 4. *Bandwidth*

*Bandwidth*, atau frekuensi respon adalah parameter penting dalam pemilihan *accelerometer*. Pengukuran tidak akan mendapatkan hasil yang akurat jika *bandwidth* dari *accelerometer* tidak masuk ke dalam rentan frekuensi gerakan, getaran atau guncangan yang diukur. Spesifikasi respons frekuensi menunjukkan penyimpangan maksimum sensitivitas pada rentan frekuensi.

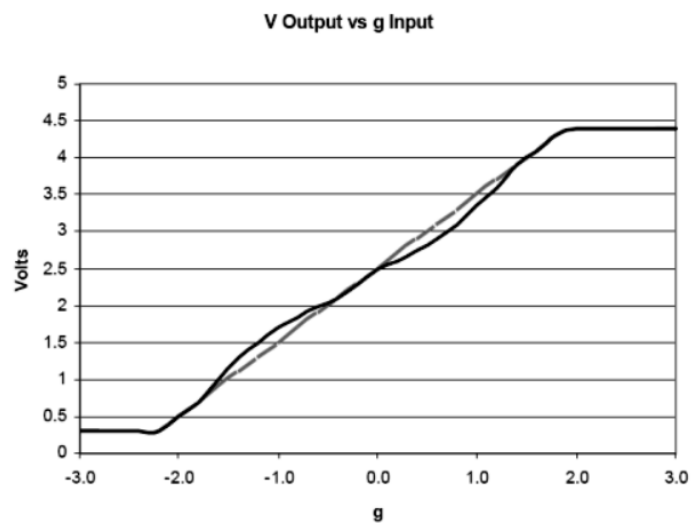
#### 5. *Resolution*

*Resolution* pada *accelerometer* umumnya hanya terdapat pada *accelerometer digital-output* atau sistem yang menggabungkan *analog-*

*digital converter*. *Resolution* biasanya ditentukan sebagai *bit* yang kemudian dapat digunakan untuk menghitung resolusi dalam unit akselerasi.

#### 6. *Nonlinearity*

*Nonlinearity* pada *accelerometer* adalah pengukuran penyimpangan dari sensitivitas konstan sempurna, ditentukan sebagai persentase sehubungan dengan *full-scale range* (%FSR) atau  $\pm$  *full scale* (%FS). Biasanya, FSR = FS + FS. Gambar I.1 menunjukkan *Nonlinearity* (Analog Devices, 2020).



Gambar III. 1 *Accelerometer Nonlinearity*

Nonlinear adalah pengukuran penyimpangan respons akselerometer (garis hitam) dari respons linear sempurna (garis putus-putus abu-abu). Grafik ini hanya adalah ilustrasi dan tidak menunjukkan data akselerometer nyata.

#### 7. *Noise*

Tingkatan *noise* dapat didefinisikan dalam sejumlah cara berbeda, Beberapa *accelerometer* akan menetapkan *noise* sebagai nilai RMS *broadband*, biasanya dengan satuan  $\text{m/s}^2$ . *Noise* dihitung dengan mengambil kuadrat akar dari sinyal tanpa eksitasi mekanis. Akselerasi di bawah tingkat *noise broadband* tidak dapat diatasi.

#### 8. Sensitivitas Suhu

Sensitivitas suhu menentukan bagaimana sensitivitas *accelerometer* bergeser dengan suhu. *Accelerometer* adalah sistem mekanis, sehingga suhu akan mempengaruhi sifat mekanik perangkat. Sensitivitas suhu biasanya

didefinisikan sebagai persentase pergeseran per derajat Celcius ( $\%/^{\circ}C$ ). Biasanya *accelerometer* memiliki spesifikasi batas suhu operasi.

#### 9. *Triaxial*

*Triaxial* menunjukkan bahwa *accelerometer* dapat mengukur percepatan di ketiga arah. *Accelerometer* konvensional biasanya hanya memiliki satu sumbu yang mungkin mengharuskan untuk menggunakan tiga unit untuk pengujian, hal ini memakan biaya dan waktu. Sensor MEMS *accelerometer* biasanya sudah difasilitasi spesifikasi *triaxial*.

#### 10. *Transverse Sensitivity*

*Transverse sensitivity* menentukan berapa sensitif *accelerometer* terhadap akselerasi  $90^{\circ}$  (atau ortogonal) terhadap sumbu sensitif sensor. Spesifikasi ini dinyatakan dengan persentase. Idealnya harus 0% tetapi karena toleransi manufaktur *transverse sensitivity* dikisaran 5% atau 10%.

#### 11. *Zero-g Bias Level*

*Zero-g bias level* adalah spesifikasi untuk menentukan level output ketika tidak ada akselerasi. Sensor analog biasanya menyatakannya dalam volt (atau *mV*) dan sensor digital menyatakannya dalam kode (LBS). *Zero-g bias level* ditentukan pada tegangan supply tertentu dan biasanya ratiometrik dengan tegangan supply (*zero-g bias level* secara nominal pang sering bernilai setengah dari tegangan supply).

#### 12. *Operating Voltage Range*

Batas tegangan yang diperlukan dari sensor akselerometer berbeda-beda dan kebutuhan dari sensor ada yang membutuhkan tegangan AC atau DC. Sensor yang memerlukan tegangan yang terbilang kecil dapat mengurangi kebutuhan daya dalam penggunaannya.

### III.1.1 Parameter Spesifikasi Sensor MEMS Akselerometer ADXL345

Dalam penelitian ini sensor yang akan digunakan adalah *accelerometer* MEMS ADXL345. Spesifikasi atau batasan kerja dari sensor yang akan digunakan dalam perancangan alat ukur vibrasi ditunjukkan pada Tabel III.1 sebagai berikut (Analog Devices, 2009).

Tabel III. 1 Parameter Spesifikasi Sensor MEMS Akselerometer ADXL345

No.	Parameter	Nilai	Keterangan
1.	Tipe Akselerometer	-	MEMS Akselerometer
2.	<i>Measurement Range</i>	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$ (g)	Dipilih sesuai dengan kebutuhan
3.	<i>Sensitivity</i> ( <i>sensitivity</i> pada $x_{out}, y_{out}$ dan $z_{out}$ )	Untuk tiap sumbu: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Semua <math>g</math> range = 256 LBS/g</li> <li>• <math>\pm 2 g = 256</math> LBS/g</li> <li>• <math>\pm 4 g = 128</math> LBS/g</li> <li>• <math>\pm 8 g = 64</math> LBS/g</li> <li>• <math>\pm 16 g = 32</math> LBS/g</li> </ul>	10 – bit resolution
4.	<i>Bandwidth</i>	0.1 – 3200 (Hz)	Dipilih sesuai dengan kebutuhan
5.	<i>Resolution</i>	Resolusi tiap sumbu: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Semua <math>g</math> range = 10 – bit</li> <li>• <math>\pm 2 g = 10</math> - bit</li> <li>• <math>\pm 4 g = 11</math> - bit</li> <li>• <math>\pm 8 g = 12</math> - bit</li> <li>• <math>\pm 16 g = 13</math> - bit</li> </ul>	<i>Full resolution</i>
6.	<i>Nonlinearity</i>	$\pm 0.5$ %	Persentase dari <i>full scale</i>
7.	<i>Noise</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>x</math> – axis dan <math>y</math> – axis = 0.75 LSB rms</li> <li>• <math>z</math> – axis = 1.1 LSB rms</li> </ul>	<i>Output Data Rate</i> = 100 Hz untuk 10 – bit resolution atau semua $g$ range, pada <i>full resolution</i>
8.	Sensitivitas Suhu	• Batas suhu kerja - 40 sampai +85 ( $^{\circ}C$ )	Suhu pada akselerometer

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensitivitas Berubah Karena Suhu = <math>\pm 0.01\%/^{\circ}C</math></li> </ul>	
9.	<i>Triaxial</i>	3- Axis	$x, y$ dan $z$ axis
10.	<i>Transverse Sensitivity</i>	$\pm 1\%$	Didefinisikan sebagai <i>coupling</i> antara dua sumbu
11.	<i>Zero-g Bias Level</i>	<i>Typical</i> = 0 mg, dengan range -150 sampai +150 (mg)	<i>Zero-g</i> output untuk $x_{out}$ dan $y_{out}$
		<i>Typical</i> = 0 mg, dengan range -250 sampai +250 (mg)	<i>Zero - g</i> output untuk $z_{out}$
		$\pm 35$ mg	<i>Zero - g</i> Output deviasi ideal dari $x_{out}$ dan $y_{out}$
		$\pm 40$ mg	<i>Zero - g</i> Output deviasi ideal dari $z_{out}$
		$\pm 0.4$ mg/ $^{\circ}C$	<i>Zero - g</i> berbanding dengan temperatur $x_{out}$ dan $y_{out}$
		$\pm 1.2$ mg/ $^{\circ}C$	<i>Zero - g</i> berbanding dengan temperatur $z_{out}$
12.	<i>Operating Voltage Range</i>	2 – 3.6 (volt)	Tegangan DC

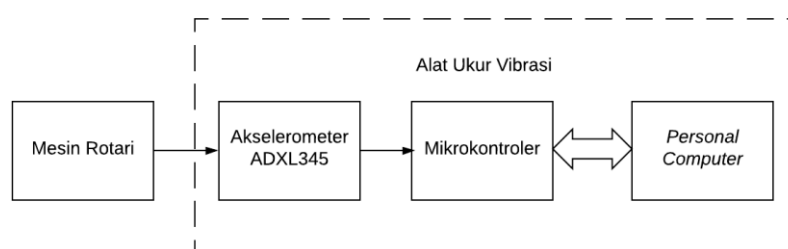
Dari parameter spesifikasi kerja sensor MEMS *Accelerometer* ADXL345 pada Tabel III. 2 maka spesifikasi sistem yang akan dirancang pada perancangan alat ukur vibrasi ditunjukkan pada Tabel III.4 sebagai berikut:

Tabel III. 2 Spesifikasi Sistem Alat Ukur Vibrasi

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Axis	Triaxial
2.	Frekuensi Analisa	0 Hz – 107 Hz
3.	Resolusi <i>Output</i>	$\pm 2g - 10$ bit
4.	Error data	< 0.5%
5.	Akurasi	> 95%
6.	Presisi	> 95%
7.	Operating Voltage	3.3 Volt
8.	Analisa Getaran	Spektrum Frekuensi Domain

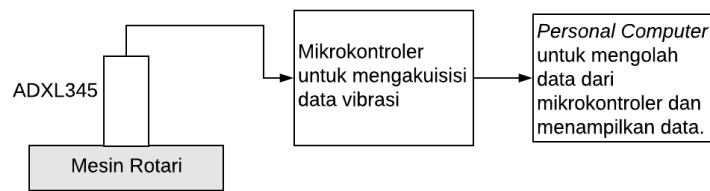
### III.2 Desain Sistem Pengukuran

Desain sistem pengukuran akan dijabarkan dengan diagram blok perancangan yang merupakan bagian dari proses perancangan alat ukur vibrasi. Alat ukur akan mensimulasikan getaran yang terjadi pada kondisi mesin. *Accelerometer* ADXL345 akan menginderakan fenomena getaran yang terjadi pada mesin berputar. Arduino Uno menjadi pemroses sinyal untuk mengakuisisi data yang diperoleh dari *Accelerometer* ADXL345. Komputer digunakan untuk meng-*upload* program ke dalam Arduino dan menampilkan data sensor. Skema desain sistem pengukuran ditunjukkan pada Gambar III.2 sebagai berikut:



Gambar III.2 Desain sistem pengukuran getaran

Dari Gambar III.1 dapat disederhanakan kembali pada Gambar III.2 dimana menjelaskan tentang proses pengambilan data getaran. Yang ditunjukkan seperti di bawah ini:



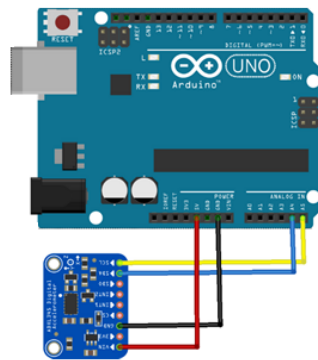
Gambar III.3 Sistem sensor dalam pengukuran vibrasi

Pada Gambar III.3 menunjukkan bahwa sensor *accelerometer* ADXL345 sudah terpasang pada mesin rotari sebagai alat untuk menginderakan fenomena vibrasi. Mikrokontroler berfungsi untuk pengakuisisian data dan untuk menampilkan grafik dari karakteristik getaran mesin pompa berputar menggunakan PC. Untuk menampilkan dan mengolah data vibrasi dilakukan pada PC, karena bertujuan untuk mengurangi terjadinya *delay* pengolahan data bila dilakukan di mikrokontroler. Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah:

1. Perangkat Keras:
  - a. Mesin Pompa Rotary
  - b. Sensor *accelerometer* ADXL345
  - c. Arduino UNO R3
  - d. *Personal Computer*
2. Perangkat Lunak:
  - a. Arduino IDE
  - b. MATLAB

### III.3 Perancangan Rangkaian Sensor Akselerometer ADXL345

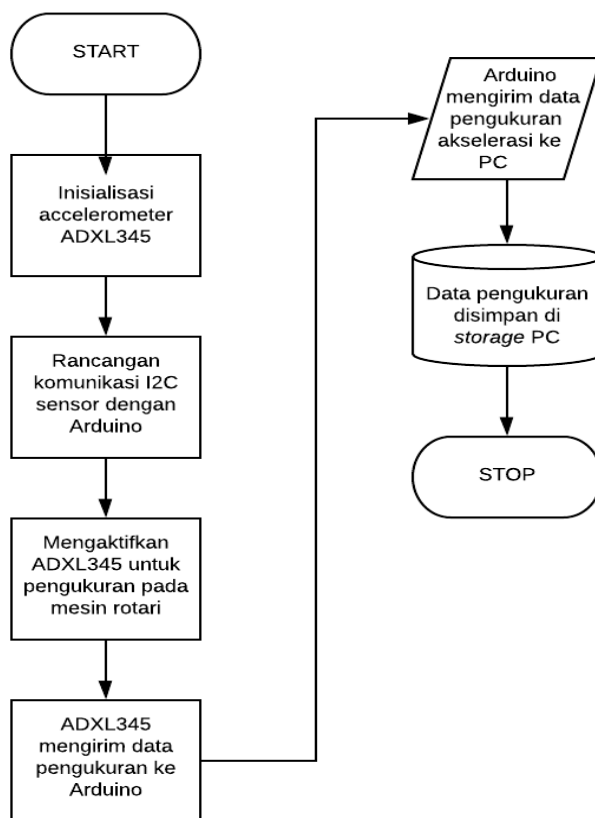
Rangkaian sensor *accelerometer* ADXL345 memiliki fungsi utama pada penelitian ini yaitu untuk mengukur nilai getaran akselerasi pada mesin rotari. Sensor *accelerometer* ADXL345 pada penelitian ini akan menggunakan jalur komunikasi I2C. Pin SCL dan SDA *accelerometer* ADXL345 dihubungkan dengan pin Analog in 4 dan 5 yang merupakan pin I2C pada arduino. Untuk mengakses sensor *accelerometer* ADXL345 menggunakan komunikasi I2C pada Gambar III.4 dijabarkan koneksi antara mikrokontroler dan sensor *accelerometer* ADXL345.



Gambar III. 4 Rangkaian Sensor Akselerometer ADXL345

### III.3.1 Pemograman Sensor Akselerometer ADXL345

Program yang dibuat akan mengatur komunikasi sensor *accelerometer* ADXL345 dengan Arduino dengan menggunakan komunikasi I2C. Gambar III.5 merupakan *flowchart* program yang digunakan untuk sensor *accelerometer* ADXL345:

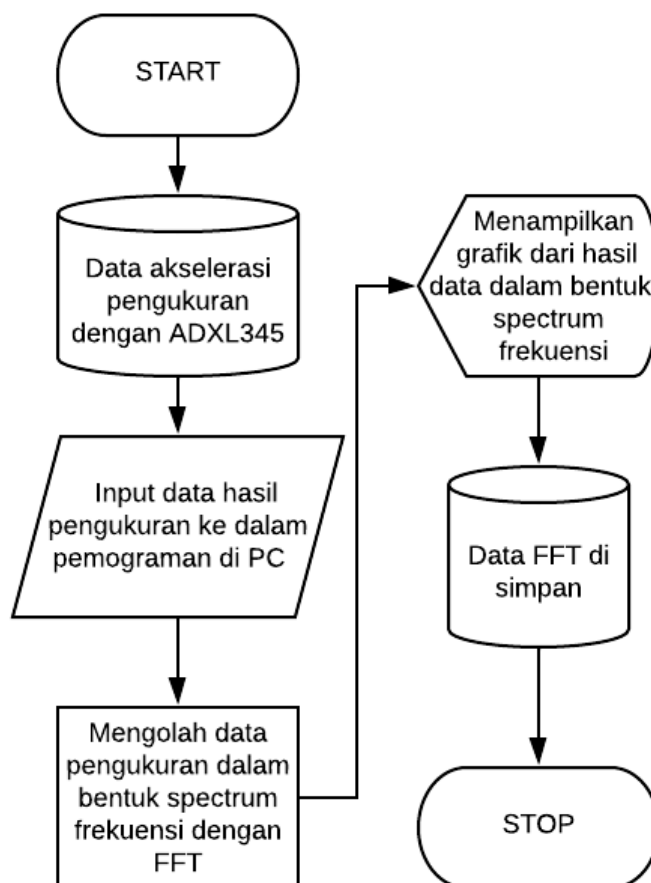


Gambar III. 5 Diagram Alir Program pada Arduino IDE untuk Sensor Akselerometer ADXL345

### III.4 Desain Sistem Pengolahan dan Penyimpanan Data Analisis

Desain sistem pengolahan dan penyimpanan data akan dijabarkan dengan diagram blok sistem penyimpanan data. Setelah data vibrasi yang sudah didapatkan dari sensor *accelerometer* ADXL345 yang telah diproses pada mikrokontroler maka data akselerasi akan diterima oleh *Personal Computer* (PC).

Di dalam PC akan mengolah data akselerasi dari bentuk sinyal domain waktu diolah menjadi sinyal domain frekuensi dengan FFT. Setelah itu data akan disimpan pada *storage* dan data siap ditampilkan untuk dianalisis. Skema desain sistem pengolahan dan penyimpanan data Gambar III.6 sebagai berikut:



Gambar III. 6 Diagram Alir Sistem Pengolahan dan Penyimpanan Data Analisis

Tujuan dari penyimpanan data adalah untuk dapat mengamati perubahan yang terjadi pada mesin. Pemantauan yang dilakukan bertujuan untuk dapat melakukan pendataan keadaan mesin sebagai salah satu cara *predictive maintenace*.

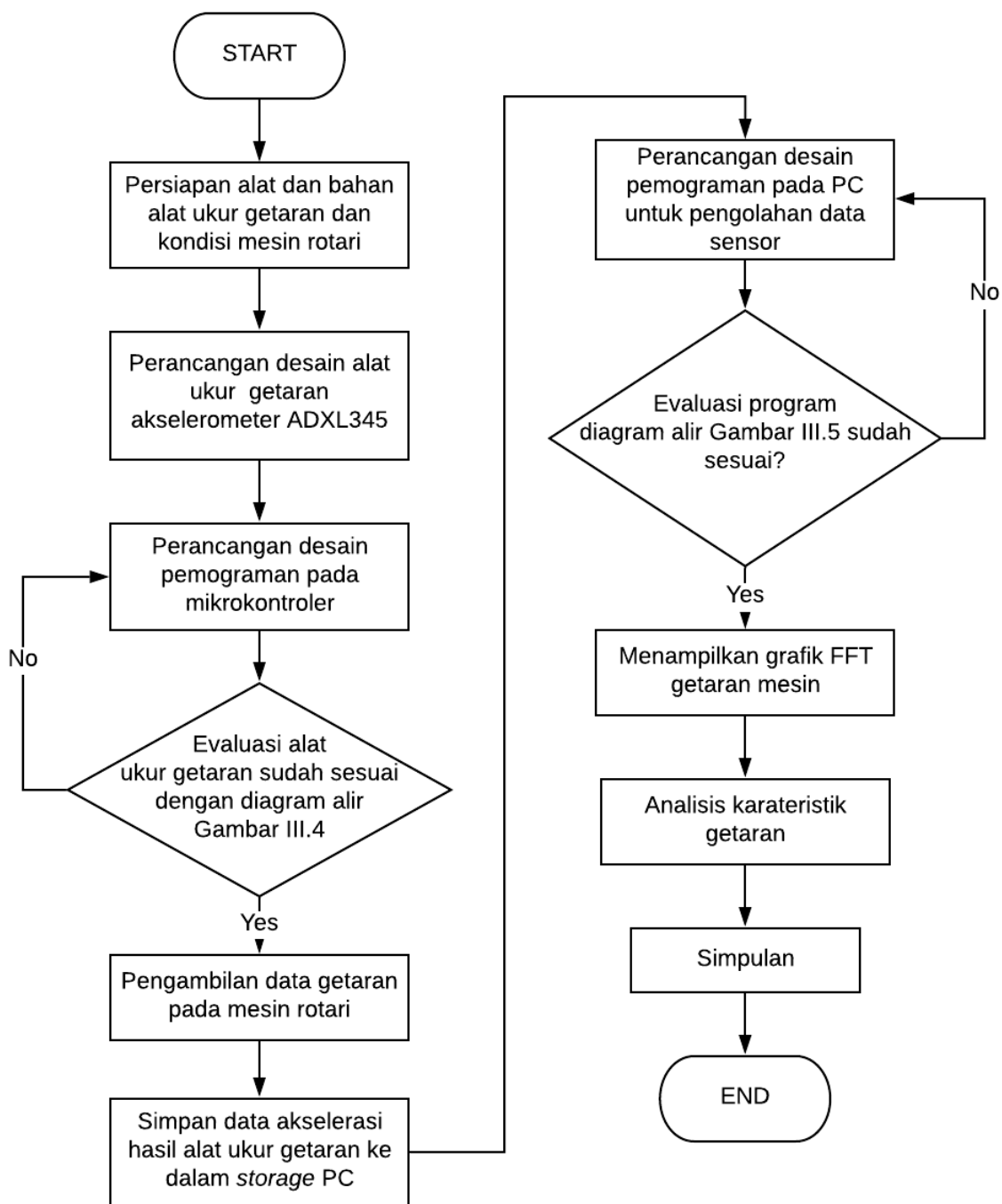
### III.5 Perancangan Kondisi Mesin

Pada penelitian ini akan mendeteksi kondisi mesin dalam keadaan mesin yang sudah terpasang dan digunakan untuk memompa air dan kondisi mesin tanpa dipasang penyanggah pondasi.

Tujuan dari perancangan kondisi mesin ini adalah untuk melihat kondisi mesin yang berbeda-beda dengan menggunakan sensor *accelerometer* ADXL345. Selain itu adalah untuk membuktikan akan terjadinya perubahan karakteristik perbedaan getaran pada mesin dalam kondisi kerusakan yang berbeda-beda. Sehingga dapat memberikan penjelasan perbedaan pada getaran mesin untuk dapat dianalisis.

### III.6 Cara Kerja Penelitian

Dalam penelitian ini, program sangat penting, karena alat yang digunakan adalah sebuah mikrokontroler. Dalam mikrokontroler, pemograman akan terfokuskan untuk dapat mendapatkan hasil data sensor yang akurat. Pemograman pertama adalah bagaimana cara menerima mendapatkan data akselerasi dari getaran mesin pompa rotary menggunakan sensor *accelerometer* ADXL345 dengan Arduino. Selanjutnya adalah bagaimana data dapat diproses kedalam bentuk domain frekuensi dalam bentuk grafik FFT yang akan digunakan untuk analisis kondisi mesin. Dalam pemograman di PC juga akan terdapat pemograman, yang digunakan untuk menyimpan data secara penyimpanan lokal. Data FFT yang disimpan dari hasil skema pemograman tersebut, akan digunakan untuk menganalisis kerusakan yang terjadi pada mesin secara berkala, hal tersebut bertujuan untuk memberikan referensi kerusakan yang terjadi. Skema diagram alir semua tahapan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar III.7 Sebagai berikut:



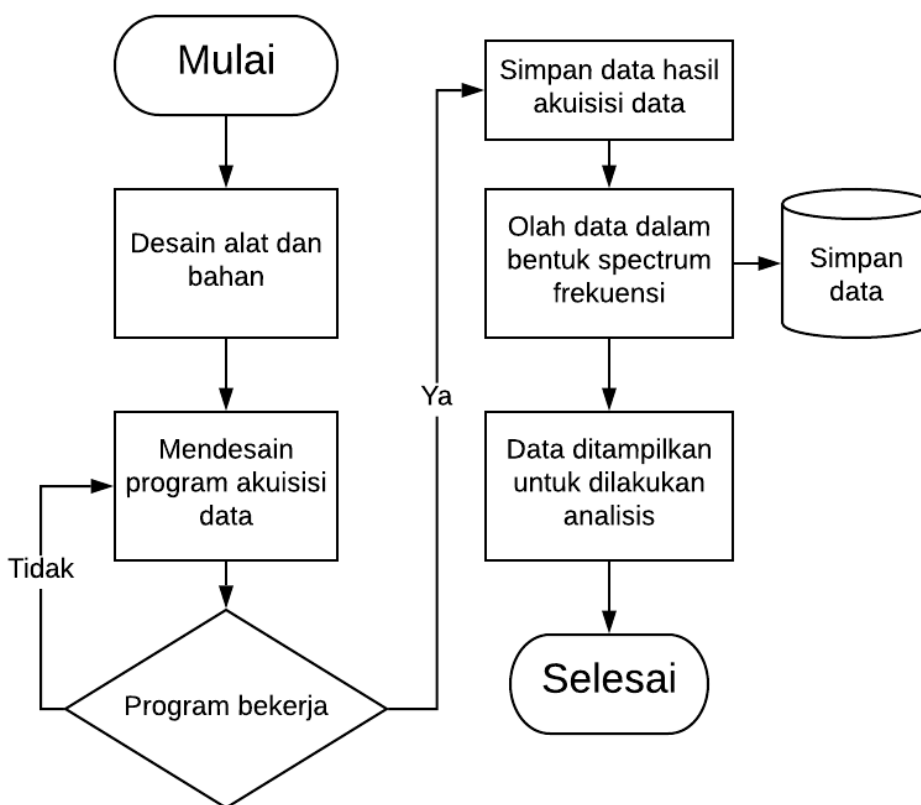
Gambar III.7 Tahapan Penelitian

Dalam proses pengerjaan dari desain perancangan alat ukur getaran menggunakan sensor *acclerometer* ADXL345 tersebut harus dipastikan setiap elemen dapat berkerja dengan fungsinya masing-masing. Dari hasil diagram alir pada Gambar III.6 tersebut data FFT akan digunakan untuk menganalisis keadaan mesin dengan menggunakan analisa FFT.

## Bab IV Implementasi Dan Pembahasan

### IV.1 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan memantau hasil spektrum frekuensi dengan analisa FFT pada kondisi mesin yang sedang beroperasi (bekerja). Pengukuran kondisi mesin akan dilakukan dengan dua kondisi mesin yaitu, dalam kondisi pertama mesin sudah terpasang sebelumnya, dan kondisi kedua adalah dengan melepas penyanggah pondasi mesin. Alur dalam pengambilan data hingga proses keseluruhan dari penelitian ini secara singkat ditunjukkan pada Gambar IV.1 sebagai berikut:



Gambar IV. 1 Diagram Alir Implementasi Penelitian

Dari dua kondisi mesin yang berbeda tersebut hasil getaran akan dianalisis sehingga didapatkan prediksi jenis kerusakan apa yang terjadi. Analisis kerusakan yang terjadi mengacu pada referensi kerusakan yang sudah ditetapkan (“Vibration Analysis Definitions - Mobius Institute,” 2019).

## IV.2 Pengujian Kinerja Parameter Sensor

Dalam penelitian ini sensor terlebih dahulu dilakukan pengujian terhadap parameter sensor. Hal ini bertujuan untuk dapat mengetahui kinerja dari sensor yang digunakan. Dalam penelitian ini metode uji yang dilakukan adalah dengan merubah sudut *roll* dan *pitch* untuk mendapatkan parameter-parameter kinerja sensor, diantaranya adalah, akurasi, presisi, error dan linearitas. Prosedur uji sensor ADXL345 akselerometer diantaranya adalah:

1. Data akuisisi sensor digunakan untuk mendapatkan nilai sudut *roll* dan *pitch*.
2. Melakukan pembacaan pada kondisi kemiringan tertentu untuk mendapatkan sebaran nilai dari sensor.
3. Melakukan pembacaan pada kemiringan yang berbeda untuk mendapatkan rata-rata nilai dari sensor.
4. Data – data tersebut digunakan untuk mencari nilai akurasi, presisi, error dan linearitas.

Adapun persamaan dalam mendapatkan nilai-nilai tersebut yaitu:

- a. Akurasi:

$$A = 1 - \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \quad (4.1)$$

$$\% \text{ Akurasi} = 100\% - \% \text{ Kesalahan} = A \times 10$$

- b. Presisi:

$$P = 1 - \left| \frac{X_n - \overline{X_n}}{\overline{X_n}} \right| \quad (4.2)$$

- c. Error:

$$e = \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \quad (4.3)$$

$$\% \text{ Kesalahan} = e \times 100\%$$

Dimana :

$A$ = Akurasi	$X_n$ = Nilai yang didapatkan	$\overline{X_n}$ = Rata – rata Nilai
$P$ = Presisi	$Y_n$ = Nilai yang diinginkan	$e$ = Error

Dengan persamaan – persamaan diatas parameter – parameter kinerja sensor akan didapatkan dan menjadi nilai kinerja yang dapat dihasilkan dari spesifikasi sensor, atau kemampuan sensor dalam mendapatkan data – data getaran pada mesin.

#### IV.2.1 Pengukuran Pitch

Pengukuran pertama dengan mengatur sudut *pitch* pada  $40^\circ$  dengan nilai yang diinginkan ( $Y_n=40$ ). Tabel IV.1 Adalah data yang didapatkan dari pengukuran sudut *pitch* pada  $40^\circ$ :

Tabel IV. 1 Data Pengukuran *Pitch* Pada  $40^\circ$

$X_n$	%Kesalahan	%Akurasi	%Presisi
40,2	0,497512438	99,50248756	99,84553291
40,22	0,546991546	99,45300845	99,79570482
40,21	0,522258145	99,47774186	99,82061886
40,17	0,423201394	99,57679861	99,92027505
40,18	0,447984072	99,55201593	99,895361
40,22	0,546991546	99,45300845	99,79570482
40,22	0,546991546	99,45300845	99,79570482
40,2	0,497512438	99,50248756	99,84553291
40,16	0,398406375	99,60159363	99,9451891
40,11	0,274245824	99,72575418	99,93024067
40,06	0,149775337	99,85022466	99,80567044
40,03	0,074943792	99,92505621	99,7309283
40,04	0,0999001	99,9000999	99,75584234
40,03	0,074943792	99,92505621	99,7309283
40,02	0,049975012	99,95002499	99,70601425

Berdasarkan data pengukuran pada Tabel IV.1 dengan pengukuran *pitch* didapatkan rata-rata dari nilai masing – masing karakteristik static sebagai berikut:

1. Akurasi : 99.65656 %
2. Presisi : 99.82128 %
3. Error : 0.343442 %

Dari hasil pengukuran bahwa kinerja sensor ADXL345 *accelerometer* pada sudut *pitch* menunjukkan bahwa sensor memiliki korelasi yang baik dalam menerima dengan nilai akurasi 99.95959% , presisi 99.82128 % dan dengan nilai error 0.34344 %.

#### IV.2.2 Pengukuran Roll

Pengukuran kedua dengan mengatur sudut *roll* pada 60° dengan nilai yang diinginkan ( $Y_n=60$ ). Tabel IV.2 Adalah data yang didapatkan dari pengukuran sudut *roll* pada 60°:

Tabel IV. 2 Data Pengukuran *Roll* Pada 60°

$X_n$	%Kesalahan	%Akurasi	%Presisi
59,66	0,569896078	99,43010392	99,16998194
59,77	0,384808432	99,61519157	99,35282971
59,77	0,384808432	99,61519157	99,35282971
59,83	0,284138392	99,71586161	99,45256486
59,92	0,133511348	99,86648865	99,60216758
59,99	0,016669445	99,98333056	99,71852525
60,07	0,116530714	99,88346929	99,85150545
60,15	0,249376559	99,75062344	99,98448564
60,2	0,332225914	99,66777409	99,93240173

60,33	0,546991546	99,45300845	99,71630891
60,4	0,662251656	99,33774834	99,59995124
60,48	0,793650794	99,20634921	99,46697104
60,55	0,908340215	99,09165979	99,35061337
60,61	1,006434582	98,99356542	99,25087822
60,66	1,088031652	98,91196835	99,1677656

Berdasarkan data pengukuran pada Tabel IV.2 dengan pengukuran sudut *roll* didapatkan rata-rata dari nilai masing – masing karakteristik static sebagai berikut:

1. Akurasi : 99.501489 %
2. Presisi : 99.531319 %
3. Error : 0.498511 %

Dari hasil pengukuran bahwa kinerja sensor *ADXL345 accelerometer* pada sudut *roll* menunjukkan bahwa sensor memiliki korelasi yang baik dalam menerima dengan nilai akurasi 99.501489 % , presisi 99.531319 % dan dengan nilai error 0.498511 %.

Dari hasil pengujian parameter sensor pada sudut *pitch* dan *roll*, maka diperoleh nilai rata-rata hasil pengujian tersebut diperoleh karakteristik static sebagai berikut:

1. Akurasi : 99%
2. Presisi : 99%
3. Error : 0.4%

Dari hasil ini dapat diketahui bahwa kemampuan dari parameter sensor akselerometer *ADXL345* memiliki korelasi yang baik dalam memberikan data yang diperoleh oleh sensor, sehingga data yang didapatkan alat ukur akan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

### IV.3 Peralatan Penelitian

Pada penelitian ini peralatan yang digunakan adalah mesin pompa rotari dengan spesifikasi sebagai berikut :

Merk /Tipe	: Wasser PC-380 E
Tegangan	: 220V / 50Hz
Arus Masukan	: 3.7 A
Kategori mesin	: Mesin Kecil “Class 1”

Mesin pompa rotari pada penelitian ini adalah mesin pompa yang digunakan untuk menarik air dari dalam tanah. Deteksi vibrasi akan dilakukan saat mesin bekerja menarik air dari dalam tanah. Gambar IV.2 adalah gambar dari mesin pompa rotari yang akan digunakan sebagai alat dalam penelitian ini.



Gambar IV. 2 Mesin Pompa Rotari Wasser PC-380 E

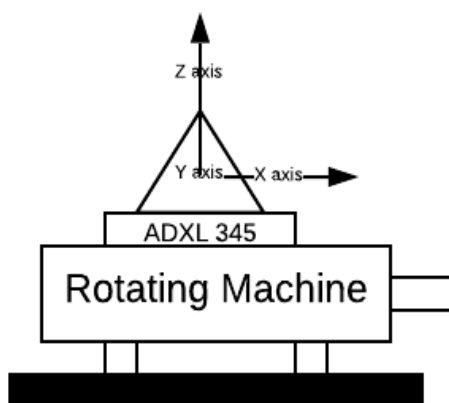
Pada Gambar IV.2 sekaligus menunjukkan keadaan atau kondisi pertama dalam pengujian dalam mendeteksi getaran pada mesin, dimana mesin sudah terpasang dan bekerja untuk menarik air dari dalam tanah. Untuk kondisi kedua ditunjukkan pada Gambar IV.3 dimana penopang mesin dilepas, hal ini bertujuan untuk mendeteksi mesin dalam keadaan lain. Gambar mesin tanpa penopang pondasi sebagai berikut:

(gambar mesin lepas baut)

Pada kondisi mesin seperti Gambar IV.2 tentu ini bukanlah kondisi mesin yang ideal, sehingga kemungkinan terjadinya kerusakan pada mesin dapat terjadi.

#### IV.4 Posisi Pemasangan Sensor dalam Pengukuran Vibrasi

Dalam pengukuran getaran pada *rotary pumping machine*, pengukuran yang direkomendasikan diukur dalam tiga arah sumbu. Dalam kondisi ideal, sebagian besar gaya getaran dihasilkan dari posisi tegak lurus terhadap poros. Tetapi pada sumbu lainnya, getaran *misalignment* dan masalah pada poros dapat terbentuk dari pada bidang sumbu yang lainnya (S K F Reliability Systems, n.d.). Ilustrasi pemasangan sensor dengan 3 sumbu (*triaxial*) ditunjukkan pada Gambar IV.2 sebagai berikut:



Gambar IV. 3 Pemasangan Triaxial Sensor

Dengan menggunakan ADXL345 *accelerometer*, dapat diperoleh data getaran dari 3 sumbu. Gambar IV.4 menunjukkan pemasangan akselerometer ADXL345 pada mesin rotari sebagai berikut:



Gambar IV. 4 Posisi Pemasangan Akselerometer ADXL345 pada Mesin Pompa Rotari

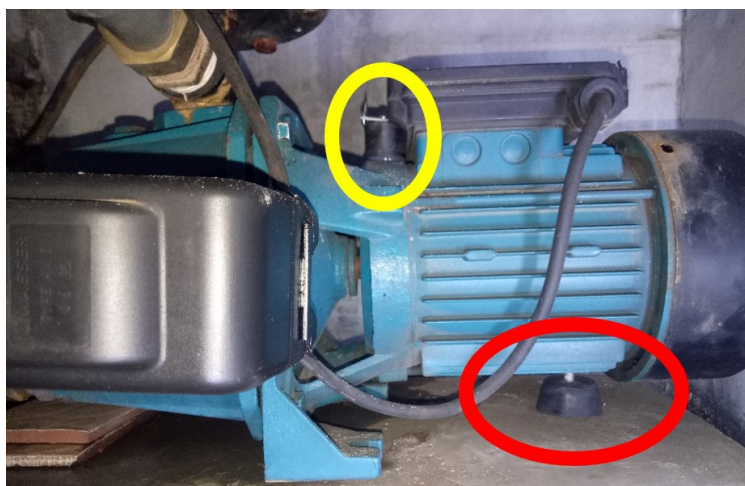
Pada Gambar IV.4 sensor akselerometer ADXL345 diletakan secara verikal dengan poros mesin rotari, dan dipasang dengan menempelkan sensor pada bahan isolator dengan cara dikunci menggunakan skrup.

#### IV.5 Pengukuran Getaran

Pada penelitian ini pengukuran dilakukan pada 2 keadaan berbeda, yaitu pengukuran getaran mesin dengan posisi pondasi mesin yang terpasang dan pengukuran getaran mesin ketika tidak menggunakan penopang pondasi mesin.

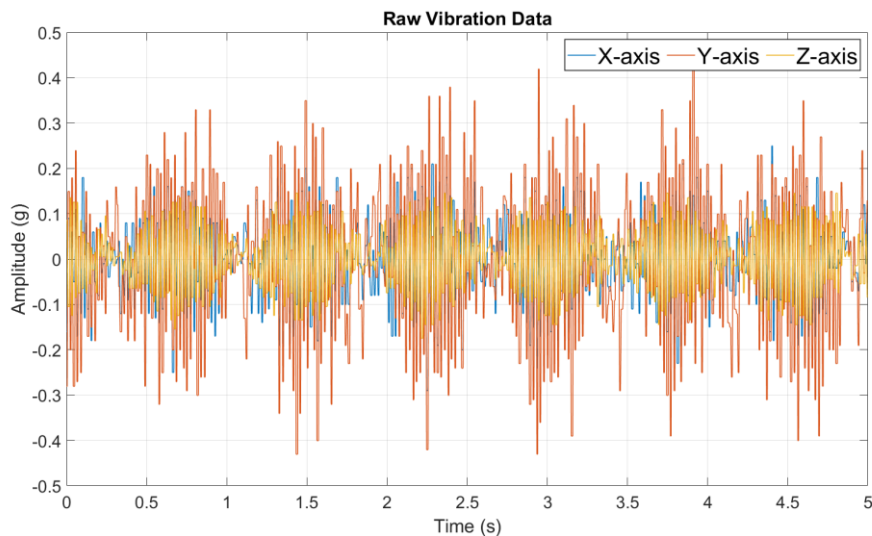
##### IV.5.1 Pengukuran Getaran Mesin Dengan Penopang Pondasi

Pada pengukuran yang pertama, akan dilakukan pengukuran vibrasi pada mesin pompa rotari dengan keadaan mesin dipasang penopang pondasi. Gambar IV.4 adalah kondisi mesin pertama sebagai berikut:



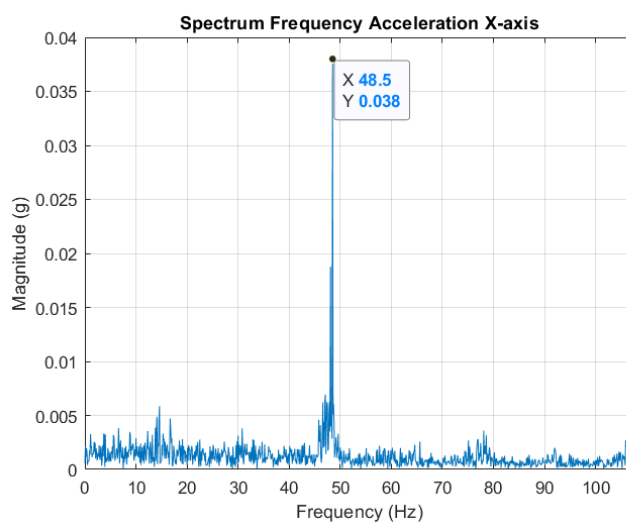
Gambar IV. 5 Kondisi Mesin Rotari dengan Ponopang Pondasi

Pada Gambar IV.5, lingkaran kuning adalah sensor akselerometer ADXL345 dan lingkaran merah adalah penopang pondasi dari mesin rotari. Gambar IV.6 berikut adalah hasil dari akuisisi *raw data* menggunakan ADXL345 *accelerometer* pada pengukuran getaran mesin pompa rotari dengan penopang pondasi:

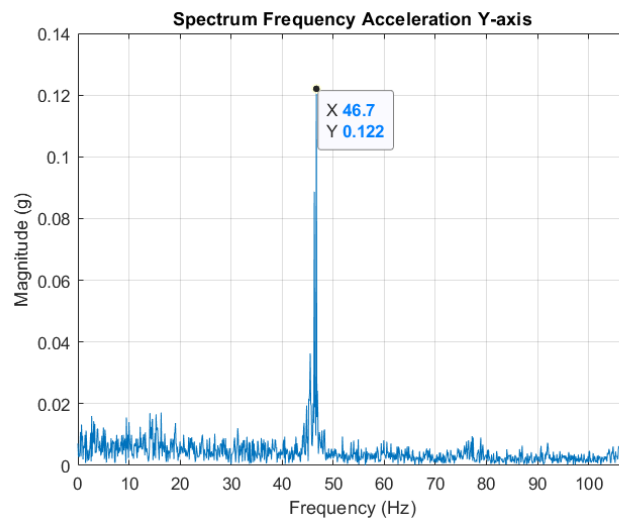


Gambar IV. 6 Vibrasi Data Mesin Dengan Penopang Pondasi

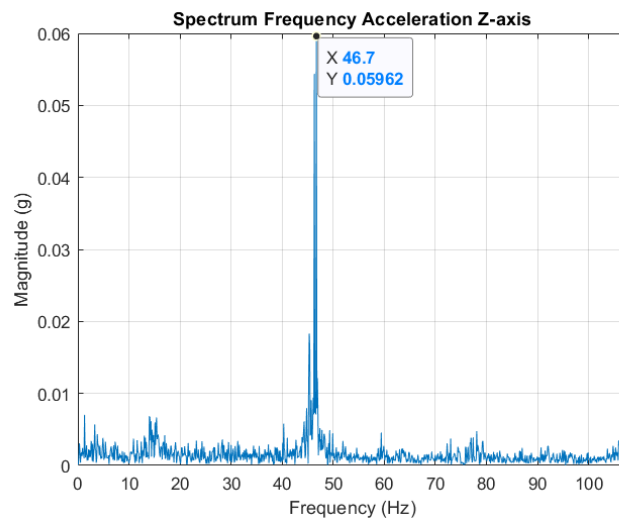
Gambar IV.6 adalah hasil *raw data* dari hasil pengukuran sensor akselerometer ADXL345. Setelah diperoleh data getaran selanjutnya data diolah untuk diubah kedalam bentuk spektrum frekuensi dengan FFT. Data spektrum frekuensi pada setiap sumbu ditunjukkan pada Gambar IV.7 untuk spektrum frekuensi sumbu-X, Gambar IV.8 untuk spektrum frekuensi sumbu-Y dan Gambar IV.9 untuk spektrum frekuensi sumbu-Z.



Gambar IV. 7 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-X Kondisi Mesin Menggunakan Penopang Pondasi



Gambar IV. 8 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-Y Kondisi Mesin Menggunakan Penopang Pondasi



Gambar IV. 9 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-Z Kondisi Mesin Menggunakan Penopang Pondasi

Dari hasil pengolahan *raw data* yang diubah ke dalam bentuk spektrum frekuensi akselerasi dengan FFT. Pada Gambar IV.5, Gambar IV.6 dan Gambar IV.7 diperoleh data getaran yang menunjukkan getaran yang dominan pada frekuensi 1x dari mesin pompa rotari. Tabel IV.1 adalah data 1x dari hasil getaran mesin dalam spektrum frekuensi akselerasi dari 3 sumbu yang dihasilkan oleh sensor *accelerometer* ADXL345 :

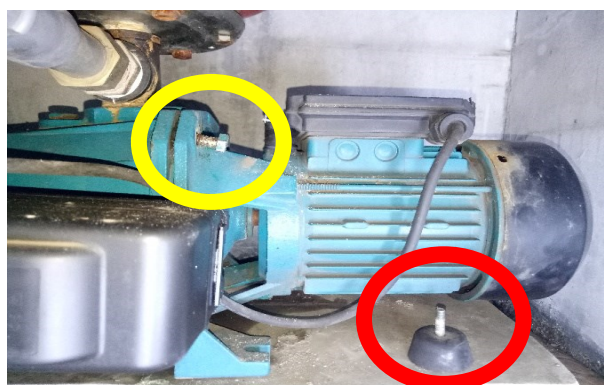
Tabel IV. 3 Tabel Kemunculan Frekuensi Pada 1x *Running Speed*

Sumbu	Frekuensi (Hz)	Magnitude (g)
X	48.5	0.038
Y	46.7	0.122
Z	46.7	0.05962

Dari hasil spektrum frekuensi akselerasi pada kondisi mesin pompa rotari menggunakan penopang pondasi, dapat diketahui bahwa pada setiap data dari 3 sumbu sensor *accelerometer* ADXL345 memberikan gambaran pada 1x *running speed* memiliki *vibration amplitude* yang besar. Dari hasil sensor nilai *vibration amplitude* yang terbesar dapat terdeteksi oleh sumbu Y dengan besar *vibration amplitude* 0,122 g. Dengan hasil data yang diperlihatkan oleh Gambar IV.5, Gambar IV.6 dan Gambar IV.7 menunjukkan bahwa mesin pompa rotari mengalami ciri-ciri kondisi kerusakan *Unbalance*, hal ini dapat diketahui dengan mengacu pada referensi dan ciri-ciri kerusakan pada mesin, dimana kerusakan *Unbalance* dapat terlihat dari besarnya amplitudo getaran pada 1x *running speed*. (“Vibration Analysis Definitions - Mobius Institute,” 2019).

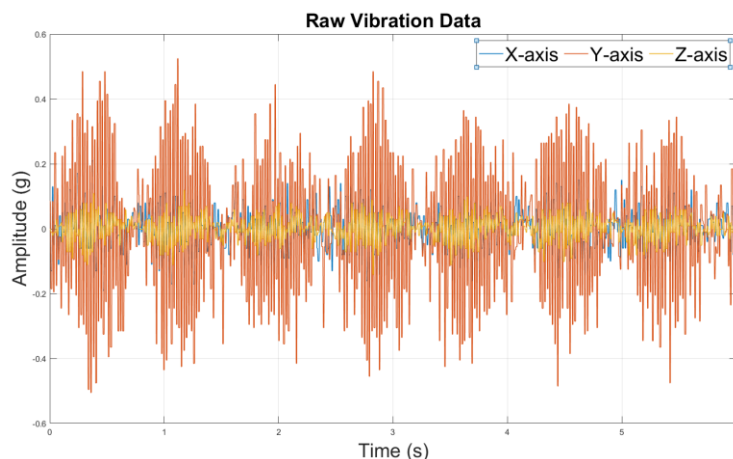
#### IV.5.2 Pengukuran Getaran Mesin Tanpa Penopang Pondasi

Pada pengukuran yang kedua, akan dilakukan pengukuran vibrasi pada mesin pompa rotari dengan keadaan mesin tanpa dipasang penopang pondasi dan melonggarkan baut penghubung antara bagian motor mesin dan bagian penghisap mesin. Gambar IV.10 menunjukkan kondisi kedua dimana mesin tidak menggunakan penopang pondasi dan melonggarkan baut penghubung.



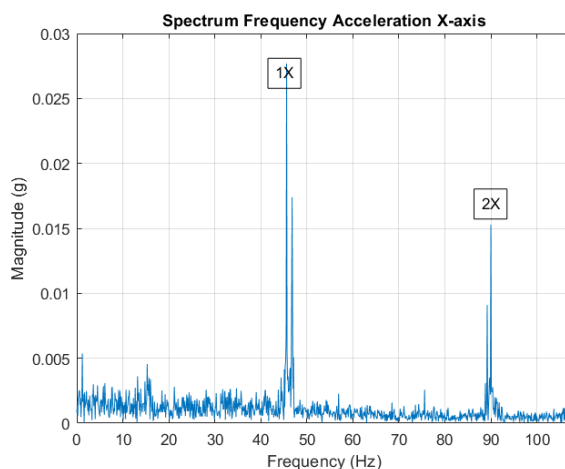
Gambar IV. 10 Kondisi Mesin Rotari Tanpa Menggunakan Ponopang Pondasi

Pada Gambar IV.10, lingkaran kuning menunjukkan baut yang dilonggarkan dan lingkaran merah menunjukkan pondasi mesin yang dilepas. Gambar IV.11 berikut adalah hasil dari akuisisi *raw data* menggunakan ADXL345 *accelerometer* pada pengukuran getaran mesin pompa rotari tanpa penopang pondasi:

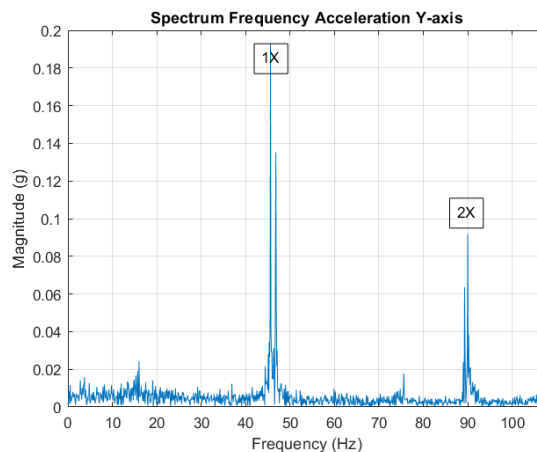


Gambar IV. 11 Vibrasi Data Mesin Tanpa Penopang Pondasi

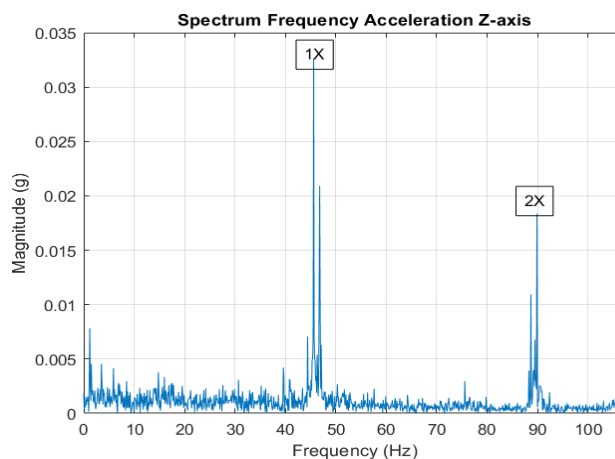
Gambar IV.11 adalah hasil *raw data* dari hasil pengukuran sensor akselerometer ADXL345 pada kondisi mesin tidak menggunakan penopang pondasi. Setelah diperoleh data getaran selanjutnya data diolah untuk diubah kedalam bentuk spektrum frekuensi dengan FFT. Data spektrum frekuensi pada setiap sumbu ditunjukkan pada Gambar IV.12 untuk spektrum frekuensi sumbu-X , Gambar IV.13 untuk spektrum frekuensi sumbu-Y dan Gambar IV.14 untuk spektrum frekuensi sumbu-Z.



Gambar IV. 12 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-X Kondisi Mesin Tidak Menggunakan Penopang Pondasi



Gambar IV. 13 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-Y Kondisi Mesin Tidak Menggunakan Penopang Pondasi



Gambar IV. 14 Spektrum Frekuensi Akselerasi Sumbu-Z Kondisi Mesin Tidak Menggunakan Penopang Pondasi

Dari hasil pengolahan *raw data* getaran mesin tanpa penopang pondasi yang diubah ke dalam bentuk spektrum frekuensi akselerasi dengan FFT. Pada Gambar IV.9, Gambar IV.10 dan Gambar IV.11 diperoleh data yang menunjukkan getaran yang dominan pada frekuensi 1x dan 2x *running speed* dari mesin pompa rotari. Tabel IV.2 adalah data 1x dan Tabel IV.3 adalah data 2x dari hasil getaran mesin dalam spektrum frekuensi akselerasi dari 3 sumbu yang dihasilkan oleh sensor *accelerometer ADXL345* :

Tabel IV. 4 Tabel Kemunculan Frekuensi Pada 1x *Running Speed* Pada Kondisi Mesin Tanpa Penopang Pondasi

Sumbu	Frekuensi (Hz)	Magnitude (g)
X	45.6	0.02769
Y	45.6	0.1928
Z	45.6	0.02769

Tabel IV. 5 Tabel Kemunculan Frekuensi Pada 1x *Running Speed* Pada Kondisi Mesin Tanpa Penopang Pondasi

Sumbu	Frekuensi (Hz)	Magnitude (g)
X	89.9	0.01526
Y	90	0.09171
Z	90	0.01526

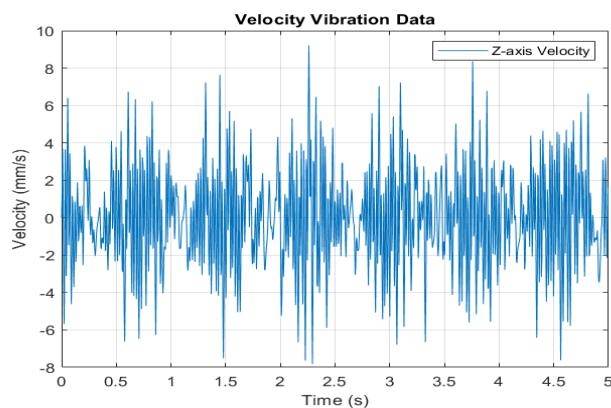
Dari hasil spektrum frekuensi akselerasi pada kondisi mesin pompa rotari tanpa menggunakan penopang pondasi, dapat diketahui bahwa pada setiap data dari 3 sumbu sensor *accelerometer* ADXL345 memberikan gambaran kemunculan frekuensi pada 1x *running speed* memiliki *vibration amplitude* yang besar dan terdapat kemunculan frekuensi pada 2x *running speed*. Dengan hasil data yang diperlihatkan oleh Gambar IV.9, Gambar IV.10 dan Gambar IV.11 menunjukkan bahwa mesin pompa rotari mengalami ciri-ciri kondisi kerusakan *Bent Shaft*, hal ini dapat diketahui dengan mengacu pada referensi dan ciri-ciri kerusakan pada mesin, dimana kerusakan *Bent Shaft* dapat terlihat dari munculnya frekuensi pada 1x dan 2x. (“Vibration Analysis Definitions - Mobius Institute,” 2019)

#### IV.6 Analisis Tingkat Kerusakan Mesin

Setelah mengetahui jenis kerusakan yang terjadi pada mesin, dengan memilih salah satu data vibrasi dari 3 sumbu, tingkat kerusakan pada mesin dapat diketahui dengan menghitung nilai RMS Velocity (mm/s). Untuk mengetahuinya dipilih sumbu Z, karena sumbu Z adalah sumbu yang tegak lurus dengan gravitasi bumi, dimana sesuai dengan referensi dari (S K F Reliability Systems, n.d.), bahwa sumbu yang tegak lurus dengan gravitasi akan memberikan gaya getaran yang maksimal.

#### IV.6.1 Tingkat Kerusakan Kondisi Mesin Pompa Rotari Menggunakan Penopang Pondasi

Dengan memanfaatkan kemampuan Triaxial dari Akselerometer ADX1345, getaran mesin pompa rotari dapat dideteksi dari 3 arah. Pada kondisi menggunakan penopang podasi, tingkat kerusakannya diketahui dengan menyesuaikan nilai RMS Velocity dari Tabel II.3. Gambar IV.15 Menunjukkan data sinyal getaran velocity dari mesin dengan menggunakan penopang pondasi:

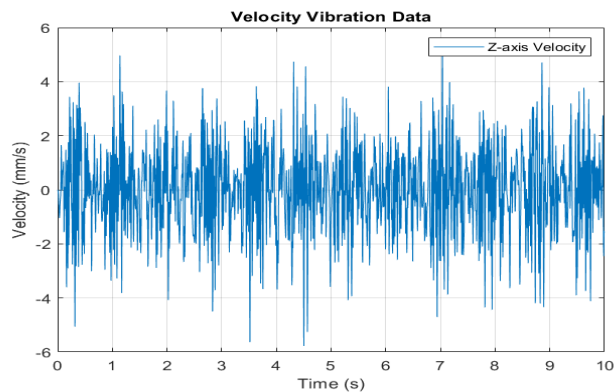


Gambar IV. 15 Data Getaran Velocity Sumbu-Z

Berdasarkan data dari Gambar IV.15 diperoleh nilai RMS sebesar 2.5884 mm/s. Dengan menyesuaikan nilai RMS dari Tabel II.3 maka tingkat kerusakan dari mesin masuk diantara 2 kategori yaitu *Satisfactory* dan *Unsatisfactory*. Dengan keadaan mesin menggunakan penopang pondasi, mesin memiliki kerusakan dengan jenis *Unbalance*, dah tingkat kerusakanya berada di antara 2 kategori yaitu *Satisfactory* dan *Unsatisfactory*.

#### IV.6.2 Tingkat Kerusakan Kondisi Mesin Pompa Rotari Tidak Menggunakan Penopang Pondasi

Dengan memanfaatkan kemampuan Triaxial dari Akselerometer ADX1345, getaran mesin pompa rotari dapat dideteksi dari 3 arah. Pada kondisi tanpa menggunakan penopang podasi, tingkat kerusakannya diketahui dengan menyesuaikan nilai RMS Velocity dari Tabel II.3. Gambar IV.16 Menunjukkan data sinyal getaran velocity dari mesin tanpa menggunakan penopang pondasi:



Gambar IV. 16 Data Getaran Velocity Sumbu-Z

Berdasarkan data dari Gambar IV.16 diperoleh nilai RMS sebesar 2.9674 mm/s. Dengan menyesuaikan nilai RMS dengan Tabel II.3 maka tingkat kerusakan dari mesin masuk dalam kategori *Unsatisfactory*. Dengan keadaan mesin tanpa menggunakan penopang pondasi, mesin memiliki kerusakan dengan jenis *Bent Shaft*, dan tingkat kerusakannya masuk ke dalam tingkatan *Unsatisfactory*.

## Bab V Kesimpulan dan Saran

### V.1 Simpulan

Hasil dari penelitian rancang bangun alat ukur getaran pada mesin pompa rotari dengan menggunakan MEMS akselerometer ADXL345. Penelitian yang dilakukan adalah mendeteksi karakteristik getaran yang terjadi pada mesin pompa rotari dengan dua kondisi yaitu kondisi mesin dengan menggunakan penopang pondasi dan kondisi mesin tanpa menggunakan penopang pondasi, dengan memanfaatkan kinerja komputasi sensor akselerometer ADXL345 dan dengan memanfaatkan spesifikasi Triaxial dari sensor, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada pengujian uji coba parameter sensor, sensor akselerometer ADXL345 didapatkan nilai akurasi 99.65656 %, presisi 99.82128% dan error 0.343442% pada pengujian sudut *pitch*. Dan didapatkan nilai akurasi 99.501489 % , presisi 99.531319 % dan error 0.498511 % pada pengujian sudut *roll*. Hasil ini membuktikan bahwa sensor akselerometer yang digunakan memiliki korelasi yang baik antara nilai yang diinginkan dan nilai yang didapat dari sensor. Dengan demikian rata-rata dari karakteristik statik yang diperoleh dari pengujian parameter sensor yaitu presisi 99%, akurasi 99% dan error data 0.4%.
2. Pada pengukuran getaran mesin dengan menggunakan penopang pondasi didapatkan data getaran mesin, dengan merubah data mentah getaran mesin ke dalam bentuk spektrum frekuensi dengan metode *fast fourier transform* diperoleh hasil yang menunjukkan meningkatnya amplitudo frekuensi pada 1x *running speed*, diantaranya sumbu X pada frekuensi 48,5 Hz dengan amplitudo 0,038g, sumbu Y pada frekuensi 46,7 Hz dengan amplitudo 0.122g dan pada sumbu Z pada frekuensi 46,7 Hz dengan amplitudo 0,05962 Hz. Dari ciri-ciri spektrum frekuensi tersebut dapat diketahui bahwa mesin mengalami ciri-ciri kerusakan *unbalance*. Untuk tingkat kerusakan yang terjadi pada pengukuran getaran mesin dengan menggunakan penopang pondasi didapatkan nilai RMS sebesar 2.5884

mm/s, dengan menyesuaikan dengan Tabel II.3 tingkat kerusakan dari mesin masuk kedalam 2 kategori yaitu *satisfactory* dan *unsatisfactory*.

3. Pada pengukuran getaran mesin tanpa menggunakan penopang pondasi didapatkan data getaran mesin, dengan merubah data mentah getaran mesin ke dalam bentuk spektrum frekuensi dengan metode *fast fourier transform* diperoleh hasil yang menunjukkan munculnya amplitudo frekuensi pada 1x dan 2x *running speed*, diantaranya pada 1x *running speed* sumbu X pada frekuensi 45.6 Hz dengan amplitudo 0.02769g, sumbu Y pada frekuensi 45.6 Hz dengan amplitudo 0.1928g dan pada sumbu Z pada frekuensi 45.6 Hz dengan amplitudo 0.02769 Hz. Dan pada 2x *running speed* sumbu X pada frekuensi 89.9 Hz dengan amplitudo 0.01526g, sumbu Y pada frekuensi 90 Hz dengan amplitudo 0.09171g dan pada sumbu Z pada frekuensi 90 Hz dengan amplitudo 0.01526 Hz. Dari ciri-ciri spektrum frekuensi tersebut dapat diketahui bahwa mesin mengalami cir-ciri kerusakan *bent shaft*. Untuk tingkat kerusakan yang terjadi pada pengukuran getaran mesin tanpa menggunakan penopang pondasi didapatkan nilai RMS sebesar 2.9674 mm/s, dengan menyesuaikan dengan Tabel II.3 tingkat kerusakan dari mesin masuk kedalam kategori *unsatisfactory*.

## V.2 Saran

Pada penelitian ini terdapat kendala, sehingga terdapat beberapa saran yang perlu dikemukakan yaitu:

1. Diperlukan mesin rotari yang dapat diatur kecepatan RPM agar dapat membandingkan performa dari pendeteksian getaran oleh sensor.
2. Dapat dikembangkan lebih lanjut kemasannya alat ukur agar terlihat lebih baik dan lebih praktis untuk digunakan.
3. Perlu dilakukan analisa lebih lanjut terhadap beberapa jenis kerusakan yang lebih kompleks.
4. Menguji lebih banyak data sample untuk *data base*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adistya, I. S. (2014): *Pengembangan sistem monitoring vibrasi pada kipas pendingin menggunakan accelerometer adxl345 dengan metode fft berbasis labview*, Jakarta.
- Ajith, R., Tewari, A., Gupta, D., and Tallur, S. (2017): Low-Cost Vibration Sensor for Condition-Based Monitoring Manufactured From Polyurethane Foam, *IEEE Sensors Letters*, **1**(6), 1–4.  
<https://doi.org/10.1109/lens.2017.2773652>
- Alsalaet, J (2012): *Vibration Analysis and Diagnostic Guide*.
- Alsalaet, Jaafar (2012): *Vibration analysis and diagnostic guide*, (December).
- Analog Devices (2009): *Digital Accelerometer ADXL345 Data Sheet*, 40.
- Analog Devices (2020): *Accelerometer Specifications - Quick Definitions*, retrieved May 5, 2020, from internet:  
<https://www.analog.com/en/products/landing-pages/001/accelerometer-specifications-definitions.html>.
- Audio, Nt. (n.d.): *Fast Fourier Transformation FFT - Basics*, retrieved June 14, 2020, from internet: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>.
- Chikuruwo, M. N. H., Maregedze, L., and Garikayi, T. (2016): *Design of an automated vibration monitoring system for condition based maintenance of a lathe machine (Case study) BT - 2016 International Conference on System Reliability and Science, ICSRS 2016, November 15, 2016 - November 18, 2016, 60–63*. <https://doi.org/10.1109/ICSRS.2016.7815838>
- Condition Based Maintenance & Monitoring (CBM Maintenance) | Fiix. (n.d.): , retrieved April 1, 2019, from internet:  
<https://www.fiixsoftware.com/condition-based-maintenance/>.
- Connection Technology Center, I. (n.d.): *Industrial Vibration Analysis for Predictive Maintenance and Improved Machine Reliability*, (800), 5.
- Data, P. T. (2008): *Digital Accelerometer ADXL345*.
- de Silva, C. W. (1999): *Vibration: Fundamentals and Practice*, Washington D.C.
- Dunton, T. a (1999): *An Introduction to Time Waveform Analysis Biography*,

*Biography An Interdisciplinary Quarterly*, 1.

- Ferri, G., Parente, F. R., Stornelli, V., Barile, G., and Pantoli, L. (2016): Automatic Bridge-based Interface for Differential Capacitive Full Sensing, *Procedia Engineering*, **168**(September), 1585–1588.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.466>
- Girdhar, P., and Scheffer, C. (2004): *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, London.
- Hanly, S. (2016): Accelerometers: Taking the Guesswork out of Accelerometer Selection, retrieved May 4, 2020, from internet:  
<https://blog.endaq.com/accelerometer-selection>.
- Hanly, S. (2018): Accelerometer Specifications: Deciphering an Accelerometer's Datasheet, retrieved May 5, 2020, from internet:  
<https://blog.endaq.com/accelerometer-specifications-decoding-a-datasheet>.
- Helal, I. A., Vuong, T. H., David, J., Bellaaj, N. M., and Pietrzak-David, M. (2016): Vibration monitoring based on MEMS accelerometers, *16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, STA 2015*, 240–245.  
<https://doi.org/10.1109/STA.2015.7505226>
- Hsu, T.-R. (2008): *Lectures on MEMS and Microsystems Design and Manufacture*, California.
- Instrument, N. (2019): Measuring Vibration with Accelerometers, retrieved May 4, 2020, from internet: <https://www.ni.com/en-id/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>.
- Luo, S., Cheng, J., and Fu, J. (2015): Application of Self-Adaptive Wavelet Ridge Demodulation Method Based on LCD to Incipient Fault Diagnosis, *Shock and Vibration*, **2015**, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2015/735853>
- Mohanty, S., Gupta, K. K., Raju, K. S., Mishra, V., Kumar, V., and Prasad, P. B. (2014): Characterization of wireless accelerometer sensor and its industrial applications, *2014 20th National Conference on Communications, NCC 2014*, (1). <https://doi.org/10.1109/NCC.2014.6811373>
- Nurfalah, F.: Arduino dan Raspberry.
- P.Bloch, H., and K.Geitner, F. (1999): *Machinery Failure Analysis and*

- Troubleshooting* (Third Edit), Gulf Professional Publishing, Houston, Texas.
- Poinsot, S. (1984): Vibration sensors., 84–91.
- Proakis, J. G., and Manolakis, D. G. (1990): *Digital Signal Processing Principles, Algorithms, and Applications* (Third Edis), *Digital Signal Processing: principles, devices and applications*, New Jersey.  
<https://doi.org/10.1049/pbce042e>
- Rohman, A. Z. (2015): Rancang Bangun Alat Ukur Getaran Mesin berbasis Arduino, *Teknik Elektro UNNES*, **16**(1), 35–44.
- Rohman, A. Z., and Djuniadi (2015): Rancang Bangun Alat Ukur Getaran Menggunakan Sensor Micro Electro Mechanical System (Mems) Akselerometer, *Edu ElektriKa*, **4**(1), 8–16.
- S K F Reliability Systems (n.d.): SKF Reliability Systems ® Vibration Diagnostic Guide CM5003.
- Sabato, A., Niezrecki, C., and Fortino, G. (2017): Wireless MEMS-Based Accelerometer Sensor Boards for Structural Vibration Monitoring: A Review, *IEEE Sensors Journal*, **17**(2), 226–235.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2630008>
- Scheffer, C., and Girdhar, P. (2004): *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, London.
- Sunarko, B. K. (2010): *Analisis Getaran Pada Mesin Sepeda Motor Berbasis Labview*, Depok.
- Sutar, S., Warudkar, V., and Sukathankar, R. (2018): Vibration Analysis Of Rotating Machines With Case Studies, *International Journal of Scientific & Technology Research*, **7**(7), 70–76.
- Transmitters, V., and Sensors, P. (2012): *Industrial Vibration Sensors , Switches & Instrumentation*.
- Upadhye, M. Y., Borole, P. B., and Sharma, A. K. (2015): Real-time wireless vibration monitoring system using LabVIEW, *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control, ICIC 2015*, (Icic), 925–928.  
<https://doi.org/10.1109/IIC.2015.7150876>
- Vibration Analysis Definitions - Mobius Institute. (2019): , retrieved May 15, 2019, from internet:

<https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=2001>.

Zekveld, M., and Hancke, G. (2019): Vibration Condition Monitoring Using Machine Learning, *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, **1**, 4742–4747.

<https://doi.org/10.1109/iecon.2018.8591167>

## LAMPIRAN

### Lampiran I



## 3-Axis, $\pm 2\text{ g}/\pm 4\text{ g}/\pm 8\text{ g}/\pm 16\text{ g}$ Digital Accelerometer

### Data Sheet

### ADXL345

#### FEATURES

- Ultralow power:** as low as 23  $\mu\text{A}$  in measurement mode and 0.1  $\mu\text{A}$  in standby mode at  $V_{\text{S}} = 2.5\text{ V}$  (typical)
- Power consumption scales automatically with bandwidth**
- User-selectable resolution**
- Fixed 10-bit resolution
- Full resolution, where resolution increases with  $g$  range, up to 13-bit resolution at  $\pm 16\text{ g}$  (maintaining 4 mg/LSB scale factor in all  $g$  ranges)
- Embedded memory management system with FIFO technology minimizes host processor load**
- Single tap/double tap detection
- Activity/inactivity monitoring
- Free-fall detection
- Supply voltage range: 2.0 V to 3.6 V
- I/O voltage range: 1.7 V to  $V_{\text{S}}$
- SPI (3- and 4-wire) and I<sup>2</sup>C digital interfaces
- Flexible interrupt modes mappable to either interrupt pin
- Measurement ranges selectable via serial command
- Bandwidth selectable via serial command
- Wide temperature range ( $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ )
- 10,000  $g$  shock survival
- Pb free/RoHS compliant
- Small and thin: 3 mm  $\times$  5 mm  $\times$  1 mm LGA package

#### APPLICATIONS

- Handsets
- Medical instrumentation
- Gaming and pointing devices
- Industrial instrumentation
- Personal navigation devices
- Hard disk drive (HDD) protection

#### GENERAL DESCRIPTION

The ADXL345 is a small, thin, ultralow power, 3-axis accelerometer with high resolution (13-bit) measurement at up to  $\pm 16\text{ g}$ . Digital output data is formatted as 16-bit twos complement and is accessible through either a SPI (3- or 4-wire) or I<sup>2</sup>C digital interface.

The ADXL345 is well suited for mobile device applications. It measures the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion or shock. Its high resolution (3.9 mg/LSB) enables measurement of inclination changes less than 1.0°.

Several special sensing functions are provided. Activity and inactivity sensing detect the presence or lack of motion by comparing the acceleration on any axis with user-set thresholds. Tap sensing detects single and double taps in any direction. Free-fall sensing detects if the device is falling. These functions can be mapped individually to either of two interrupt output pins. An integrated memory management system with a 32-level first in, first out (FIFO) buffer can be used to store data to minimize host processor activity and lower overall system power consumption. Low power modes enable intelligent motion-based power management with threshold sensing and active acceleration measurement at extremely low power dissipation.

The ADXL345 is supplied in a small, thin, 3 mm  $\times$  5 mm  $\times$  1 mm, 14-lead, plastic package.

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

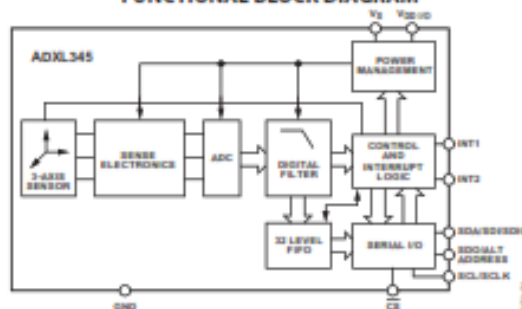


Figure 1.

Rev. E  
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.

#### Document Feedback

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 ©2009–2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.  
Technical Support [www.analog.com](http://www.analog.com)

# ADXL345

# Data Sheet

## SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 2.5\text{ V}$ ,  $V_{DDIO} = 1.8\text{ V}$ , acceleration = 0 g,  $C_0 = 10\ \mu\text{F}$  tantalum,  $C_{IO} = 0.1\ \mu\text{F}$ , output data rate (ODR) = 800 Hz, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Test Conditions	Min	Typ <sup>1</sup>	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis User selectable		$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$		g
Nonlinearity	Percentage of full scale		$\pm 0.5$		%
Inter-Axis Alignment Error			$\pm 0.1$		Degrees
Cross-Axis Sensitivity <sup>2</sup>			$\pm 1$		%
<b>OUTPUT RESOLUTION</b>					
All g Ranges	Each axis 10-bit resolution		10		Bits
$\pm 2\text{ g}$ Range	Full resolution		10		Bits
$\pm 4\text{ g}$ Range	Full resolution		11		Bits
$\pm 8\text{ g}$ Range	Full resolution		12		Bits
$\pm 16\text{ g}$ Range	Full resolution		13		Bits
<b>SENSITIVITY</b>					
Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	Each axis All g-ranges, full resolution	230	256	282	LSB/g
	$\pm 2\text{ g}$ , 10-bit resolution	230	256	282	LSB/g
	$\pm 4\text{ g}$ , 10-bit resolution	115	128	141	LSB/g
	$\pm 8\text{ g}$ , 10-bit resolution	57	64	71	LSB/g
	$\pm 16\text{ g}$ , 10-bit resolution	29	32	35	LSB/g
Sensitivity Deviation from Ideal	All g-ranges		$\pm 1.0$		%
Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	All g-ranges, full resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 2\text{ g}$ , 10-bit resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 4\text{ g}$ , 10-bit resolution	7.1	7.8	8.7	mg/LSB
	$\pm 8\text{ g}$ , 10-bit resolution	14.1	15.6	17.5	mg/LSB
	$\pm 16\text{ g}$ , 10-bit resolution	28.6	31.2	34.5	mg/LSB
Sensitivity Change Due to Temperature			$\pm 0.01$		%/°C
<b>0 g OFFSET</b>					
0 g Output for $X_{OUT}, Y_{OUT}$	Each axis	-150	0	+150	mg
0 g Output for $Z_{OUT}$		-250	0	+250	mg
0 g Output Deviation from Ideal, $X_{OUT}, Y_{OUT}$			$\pm 35$		mg
0 g Output Deviation from Ideal, $Z_{OUT}$			$\pm 40$		mg
0 g Offset vs. Temperature for X-, Y-Axes			$\pm 0.4$		mg/°C
0 g Offset vs. Temperature for Z-Axis			$\pm 1.2$		mg/°C
<b>NOISE</b>					
X-, Y-Axes	ODR = 100 Hz for $\pm 2\text{ g}$ , 10-bit resolution or all g-ranges, full resolution		0.75		LSB rms
Z-Axis	ODR = 100 Hz for $\pm 2\text{ g}$ , 10-bit resolution or all g-ranges, full resolution		1.1		LSB rms
<b>OUTPUT DATA RATE AND BANDWIDTH</b>					
Output Data Rate (ODR) <sup>3, 4, 5</sup>	User selectable	0.1		3200	Hz
<b>SELF-TEST<sup>6</sup></b>					
Output Change in X-Axis		0.20		2.10	g
Output Change in Y-Axis		-2.10		-0.20	g
Output Change in Z-Axis		0.30		3.40	g
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range ( $V_S$ )		2.0	2.5	3.6	V
Interface Voltage Range ( $V_{DDIO}$ )		1.7	1.8	$V_S$	V
Supply Current	ODR $\geq 100\text{ Hz}$		140		$\mu\text{A}$
	ODR < 10 Hz		30		$\mu\text{A}$
Standby Mode Leakage Current			0.1		$\mu\text{A}$
Turn-On and Wake-Up Time <sup>7</sup>	ODR = 3200 Hz		1.4		ms

<b>Data Sheet</b>	<b>ADXL345</b>
-------------------	----------------

Parameter	Test Conditions	Min	Typ <sup>1</sup>	Max	Unit
TEMPERATURE Operating Temperature Range		-40		+85	°C
WEIGHT Device Weight			30		mg

<sup>1</sup> The typical specifications shown are for at least 68% of the population of parts and are based on the worst case of mean  $\pm 1 \sigma$ , except for 0 g output and sensitivity, which represents the target value. For 0 g offset and sensitivity, the deviation from the ideal describes the worst case of mean  $\pm 1 \sigma$ .

<sup>2</sup> Cross-axis sensitivity is defined as coupling between any two axes.

<sup>3</sup> Bandwidth is the -3 dB frequency and is half the output data rate, bandwidth = ODR/2.

<sup>4</sup> The output format for the 3200 Hz and 1600 Hz ODRs is different than the output format for the remaining ODRs. This difference is described in the Data Formatting of Upper Data Rates section.

<sup>5</sup> Output data rates below 6.25 Hz exhibit additional offset shift with increased temperature, depending on selected output data rate. Refer to the Offset Performance at Lowest Data Rates section for details.

<sup>6</sup> Self-test change is defined as the output (g) when the SELF\_TEST bit = 1 (in the DATA\_FORMAT register, Address 0x31) minus the output (g) when the SELF\_TEST bit = 0. Due to device filtering, the output reaches its final value after  $4 \times \tau$  when enabling or disabling self-test, where  $\tau = 1/(\text{data rate})$ . The part must be in normal power operation (LOW\_POWER bit = 0 in the BW\_RATE register, Address 0x2C) for self-test to operate correctly.

<sup>7</sup> Turn-on and wake-up times are determined by the user-defined bandwidth. At a 100 Hz data rate, the turn-on and wake-up times are each approximately 11.1 ms. For other data rates, the turn-on and wake-up times are each approximately  $\tau + 1.1$  in milliseconds, where  $\tau = 1/(\text{data rate})$ .

# ADXL345

# Data Sheet

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 2.

Parameter	Rating
Acceleration	
Any Axis, Unpowered	10,000 g
Any Axis, Powered	10,000 g
$V_s$	-0.3 V to +3.9 V
$V_{DDIO}$	-0.3 V to +3.9 V
Digital Pins	-0.3 V to $V_{DDIO} + 0.3$ V or 3.9 V, whichever is less
All Other Pins	-0.3 V to +3.9 V
Output Short-Circuit Duration (Any Pin to Ground)	Indefinite
Temperature Range	
Powered	-40°C to +105°C
Storage	-40°C to +105°C

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

## THERMAL RESISTANCE

Table 3. Package Characteristics

Package Type	$\theta_{JA}$	$\theta_{JC}$	Device Weight
14-Terminal LGA	130°C/W	85°C/W	30 mg

## PACKAGE INFORMATION

The information in Figure 2 and Table 4 provide details about the package branding for the ADXL345. For a complete listing of product availability, see the Ordering Guide section.

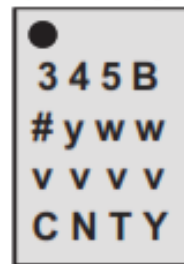


Figure 2. Product Information on Package (Top View)

Table 4. Package Branding Information

Branding Key	Field Description
345B	Part Identifier for ADXL345
#	RoHS-compliant designation
yww	Date code
vvv	Factory lot code
CNTY	Country of origin

## 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.

**PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS**

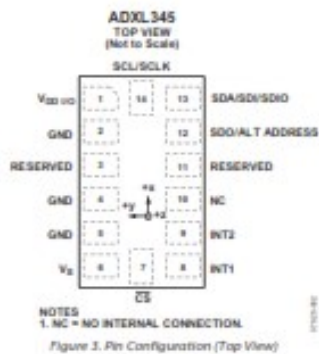


Table 5. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	V <sub>DDIO</sub>	Digital interface Supply Voltage.
2	GND	This pin must be connected to ground.
3	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to V <sub>I</sub> or left open.
4	GND	This pin must be connected to ground.
5	GND	This pin must be connected to ground.
6	V <sub>I</sub>	Supply Voltage.
7	$\overline{\text{CS}}$	Chip Select.
8	INT1	Interrupt 1 Output.
9	INT2	Interrupt 2 Output.
10	NC	Not Internally Connected.
11	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to ground or left open.
12	SDO/ALT ADDRESS	Serial Data Output (SPI 4-Wire)/Alternate I <sup>2</sup> C Address Select (I <sup>2</sup> C).
13	SDA/SDI/SDIO	Serial Data (I <sup>2</sup> C)/Serial Data Input (SPI 4-Wire)/Serial Data Input and Output (SPI 3-Wire).
14	SCL/SCLK	Serial Communications Clock. SCL is the clock for I <sup>2</sup> C, and SCLK is the clock for SPI.

**AXES OF ACCELERATION SENSITIVITY**

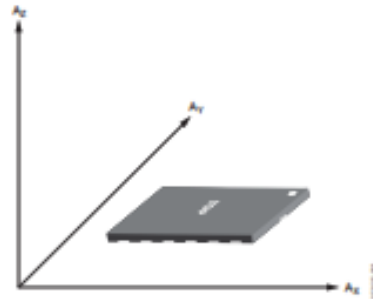


Figure 57. Axes of Acceleration Sensitivity (Corresponding Output Voltage Increases When Accelerated Along the Sensitive Axis)

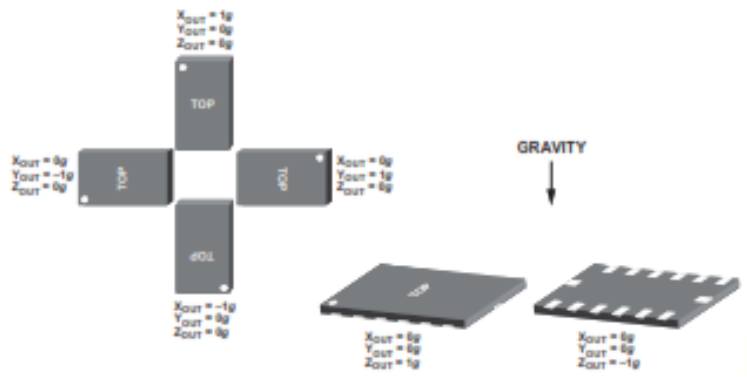


Figure 58. Output Response vs. Orientation to Gravity

## Lampiran 2

//ADXL345

```
#include <Wire.h>

int ADXL345 = 0x53;
float X_out, Y_out, Z_out;
void setup() {
  Serial.begin(38400);
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x2D);
  Wire.write(8);
  Wire.endTransmission();
  delay(10);

  //Sumbu-X
  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x1E);
  Wire.write(-4);
  Wire.endTransmission();
  delay(10);
  //Sumbu-Y
  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x1F);
  Wire.write(+4);
  Wire.endTransmission();
  delay(10);
  //Sumbu-Z
  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x20);
  Wire.write(-55);
  Wire.endTransmission();
  delay(10);
}
```

```
void loop() {  
  Wire.beginTransaction(ADXL345);  
  Wire.write(0x32);  
  Wire.endTransmission(false);  
  Wire.requestFrom(ADXL345, 6, true);  
  X_data = ( Wire.read() | Wire.read() << 8);  
  X_data = X_data/256;  
  Y_data = ( Wire.read() | Wire.read() << 8);  
  Y_data = Y_data/256;  
  Z_data = ( Wire.read() | Wire.read() << 8);  
  Z_data = Z_data/256 ;  
  Serial.print(X_data);  
  Serial.print(",");  
  Serial.print(Y_data);  
  Serial.print(",");  
  Serial.println(Z_data);  
}
```

### Lampiran 3

```

clear
close
clc

cd('file location')
data=load('.....txt');

dt=1/215;
T=10;
t=0:dt:(T-dt);

datax=data(:,1);
datax=datax-mean(datax);
datax=datax(431:430+(length(t)));
RMS_x_acc=rms(datax)

datay=data(:,2);
datay=datay-mean(datay);
datay=datay(431:430+(length(t)));
RMS_y_acc=rms(datay)

dataz=data(:,3);
dataz=dataz-mean(dataz);
dataz=dataz(431:430+(length(t)));
RMS_z_acc=rms(dataz)

figure(1)
plot(t,datax,t,datay,t,dataz)
grid on
title('Raw Vibration Data')
legend('X-axis','Y-axis','Z-axis')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Amplitude (g)')

Fs=1/dt;
N=length(t);
f=Fs*(0:N/2-1)/N;

datax_fft=(abs(fft(datax)))/(length(datax));
datax_fft=datax_fft(1:N/2);
figure(2)
plot(f,datax_fft)
grid on
title('Spectrum Frequency Acceleration X-axis')

```

```

xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Magnitude (g)')
xlim([0 max(f)])

datay_fft=(abs(fft(datay)))/(0.5*length(datay));
datay_fft=datay_fft(1:N/2);
figure(3)
plot(f,datay_fft)
grid on
title('Spectrum Frequency Acceleration Y-axis')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Magnitude (g)')
xlim([0 max(f)])

dataz_fft=(abs(fft(dataz)))/(0.5*length(dataz));
dataz_fft=dataz_fft(1:N/2);
figure(4)
plot(f,dataz_fft)
grid on
title('Spectrum Frequency Acceleration Z-axis')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Magnitude (g)')
xlim([0 max(f)])

%%%%%% Integral ACC to VEL
datax2=datax*9.8*1000;
datay2=datay*9.8*1000;
dataz2=dataz*9.8*1000;

datax_vel=get_velocity(datax2,dt,10);
RMS_x_vel=rms(datax_vel) % dalam satuan mm/s

datay_vel=get_velocity(datay2,dt,10);
RMS_y_vel=rms(datay_vel) % dalam satuan mm/s

dataz_vel=get_velocity(dataz2,dt,10);
RMS_z_vel=rms(dataz_vel) % dalam satuan mm/s

Fs=1/dt;
N=length(t);
f=Fs*(0:N/2-1)/N;
datax_vel_fft=(abs(fft(datax_vel)))/(0.5*length(datax_vel));

```

```

datax_vel_fft=datax_vel_fft(1:N/2);
figure(5)
plot(f,datax_vel_fft)
grid on
title('Spectrum Frequency Velocity X-axis')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Velocity (mm/s)')
xlim([0 max(f)])

Fs=1/dt;
N=length(t);
f=Fs*(0:N/2-1)/N;
dataz_vel_fft=(abs(fft(dataz_vel)))/(0.5*length(dataz_vel));
dataz_vel_fft=dataz_vel_fft(1:N/2);
figure(7)
plot(f,dataz_vel_fft)
grid on
title('Spectrum Frequency Velocity Z-axis')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Velocity (mm/s)')
xlim([0 max(f)])

Fs=1/dt;
N=length(t);
f=Fs*(0:N/2-1)/N;
datay_vel_fft=(abs(fft(datay_vel)))/(0.5*length(datay_vel));
datay_vel_fft=datay_vel_fft(1:N/2);
figure(6)
plot(f,datay_vel_fft)
grid on
title('Spectrum Frequency Velocity Y-axis')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Velocity (mm/s)')
xlim([0 max(f)])

```

## Lampiran 4

```
function vel = get_velocity(a,T,fo)
    a2 = 0.0;
    a1 = 0.0;
    v2 = 0.0;
    v1 = 0.0;

    wco = 2.0*pi()*fo;

    n = length(a) - 1;
    v = zeros(n,1);

    for i = 1:n
        v(i,1) = (2*(4 - (wco*T)^2)*v1 - (wco*T -
2)^2*v2 + 2*T*(a(i)-a2))/(wco*T + 2)^2;
        a2 = a1;
        a1 = a(i);
        v2 = v1;
        v1 = v(i,1);
    end
    vel = v;
end
```