

**ANALISIS PENGARUH *MISALIGNMENT* TERHADAP
VIBRASI DAN KINERJA MOTOR INDUKSI**

TESIS

**NAMA : ANDI ULFIANA
NPM : 0806420764**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JULI 2010**

**ANALISIS PENGARUH *MISALIGNMENT* TERHADAP
VIBRASI DAN KINERJA MOTOR INDUKSI**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Fisika

**NAMA : ANDI ULFIANA
NPM : 0806420764**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
KEKHUSUSAN FISIKA INSTRUMENTASI
DEPOK
JULI 2010**

PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Andi Ulfiana

NPM : 0806420764

Tanda Tangan :






Tanggal : 19 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Andi Ulfiana
NPM : 0806420764
Program Studi : Magister Fisika
Judul Tesis : Analisis Pengaruh *Misalignment* terhadap Vibrasi dan Kinerja Motor Induksi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Sastra Kusuma Wijaya ()
Pembimbing II : Dr. Prawito ()
Penguji I : Dr. Santoso Sukirno ()
Penguji II : Dr. rer. nat. Martarizal ()
Penguji III : Dr. Dianta Mustofa Kamal ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 19 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT., karena atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Fisika Kekhususan Instrumentasi pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Tesis ini dapat diselesaikan atas bantuan banyak pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Sastra Kusuma Wijaya, selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tesis ini.
2. Bapak Dr. Prawito, selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tesis ini.
3. Teman-teman kuliah di Fisika Instrumentasi yang banyak memberi dukungan.
4. Teman-teman di Politeknik Negeri Jakarta yang telah banyak memberi dukungan.
5. Keluarga yang telah memberikan dukungan moril dan materil.
6. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tesis ini.

Atas semua bantuan yang diberikan penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.

Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 11 Juni 2010

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andi Ulfiana

NPM : 0806420764

Program Studi : Magister Fisika

Departemen : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Analisis Pengaruh *Misalignment* terhadap Vibrasi dan Kinerja Motor Induksi beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 19 Juli 2010

Yang menyatakan

(Andi Ulfiana)

ABSTRAK

Nama : Andi Ulfiana
Program Studi : Fisika Instrumentasi
Judul Tesis : Analisis Pengaruh *Misalignment* terhadap Vibrasi dan Kinerja Motor Induksi.

Vibrasi akibat *misalignment* pada motor induksi dideteksi menggunakan sensor *Micro-Electro-Mechanical System* (MEMS) dan piezoelektrik. Pengukuran dilakukan saat kondisi *alignment* dan *misalignment*. Sinyal vibrasi ditampilkan menggunakan *LabVIEW* melalui *Data Aquisition (DAQ) Card*. Dilakukan pengamatan tegangan, arus, daya listrik dan putaran motor. Analisis vibrasi dilakukan dengan mengamati amplitudo dan frekwensi sinyal untuk kondisi *alignment* dan *misalignment*. Analisis vibrasi dilakukan menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)*, *Short Time Fourier Transform (STFT)* dan *Wavelet Transform (WT)*. Dilakukan perbandingan konsumsi energi saat *alignment* dan *misalignment*.

Kata kunci : *misalignment*, vibrasi, motor induksi, MEMS, piezoelektrik, *LabVIEW*, *Fast Fourier Transform*, *Short Time Fourier Transform*, *Wavelet Transform*.

ABSTRACT

Name : Andi Ulfiana
Study Programme : Instrumentation Physics
Title of Thesis : Analysis of The Effect of Misalignment on Vibration and Performance of Induction Motor.

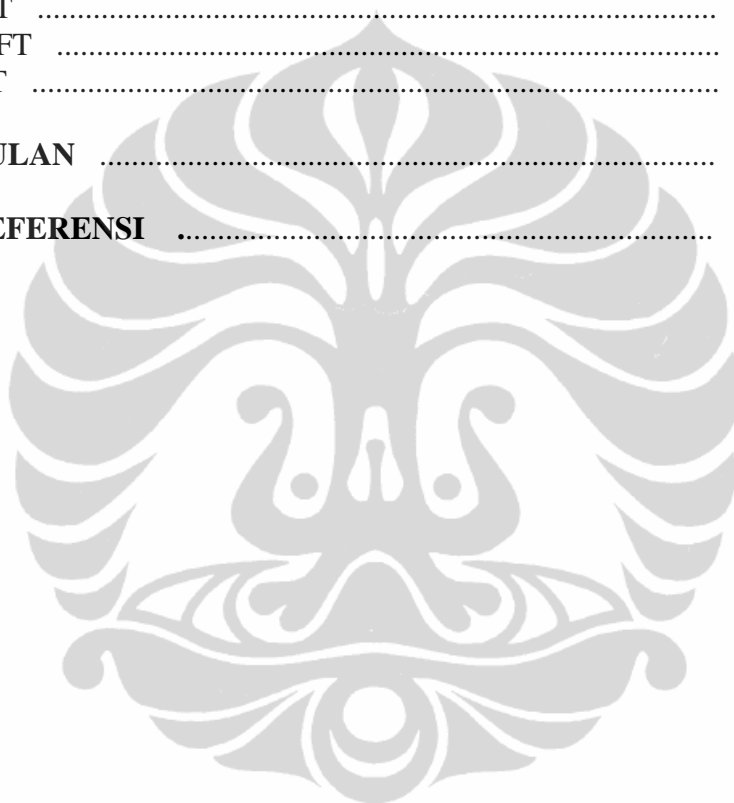
Vibration caused by misalignment of induction motor is detected by using Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) and piezoelectric sensor. Measurement is done with alignment and misalignment. Vibration signal is presented by using *LabVIEW* through *Data Aquisition (DAQ) Card* and by monitoring variable of, voltage, current, electric power and motor speed. Vibration analysis is done by perceiving frequency and amplitude of signal with alignment and misalignment. Vibration analysis is done by using *Fast Fourier Transform (FFT)* and *Wavelet Transform (WT)*. Calculation of energy consumption is done with alignment and misalignment.

Keyword : misalignment, vibration, induction motor, MEMS, piezoelectric, *LabVIEW*, *Fast Fourier Transform*, *Short Time Fourier Transform*, *Wavelet Transform*.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	3
1.6 Metode Penelitian	3
2. DASAR TEORI	4
2.1 Motor Induksi	4
2.2 Vibrasi	5
2.3 Algnment	6
2.4 Misalignment	8
2.5 Teknik Maintenance	11
2.5.1 Breakdown Maintenance	12
2.5.2 Predictive Maintenance	12
2.5.3 Preventive Maintenance	13
2.5.4 Proactive Maintenance	14
2.6 Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)	14
2.7 Piezoelektrik	15
2.8 Signal Processing	15
2.8.1 Fast Fourier Transform (FFT)	15
2.8.2. Wavelet Transform (WT)	16
3. METODE PENELITIAN	19
3.1 Diagram Alir	19
3.2 Data Motor Listrik	21
3.3 Metode Alignment dan Misalignment	22
3.4 Sensor	23
3.5 NI-DAQ 6009	25
3.6 Pengukuran Tegangan, Arus dan Daya	28
3.7 Pengukuran Sinyal Vibrasi	30
3.8 Sinyal Analysis	30
4. ANALISIS VIBRASI AKIBAT MISALIGNMENT	35
4.1 Metode Pengukuran	35

4.2 Blok Diagram Program	36
4.3 Konsumsi Energi	40
4.4 Deteksi Vibrasi dengan Sensor MEMS saat <i>Alignment</i> dan <i>Misalignment</i>	41
4.4.1. Sinyal Sumber	41
4.4.2. FFT	42
4.4.3. STFT	43
4.4.4. WT	45
4.5 Deteksi Vibrasi dengan Sensor Piezoelektrik saat <i>Alignment</i> dan <i>Misalignment</i>	47
4.5.1 Sinyal Sumber	47
4.5.2. FFT	48
4.5.3. STFT	50
4.5.4. WT	52
5. KESIMPULAN	54
DAFTAR REFERENSI	56



DAFTAR TABEL

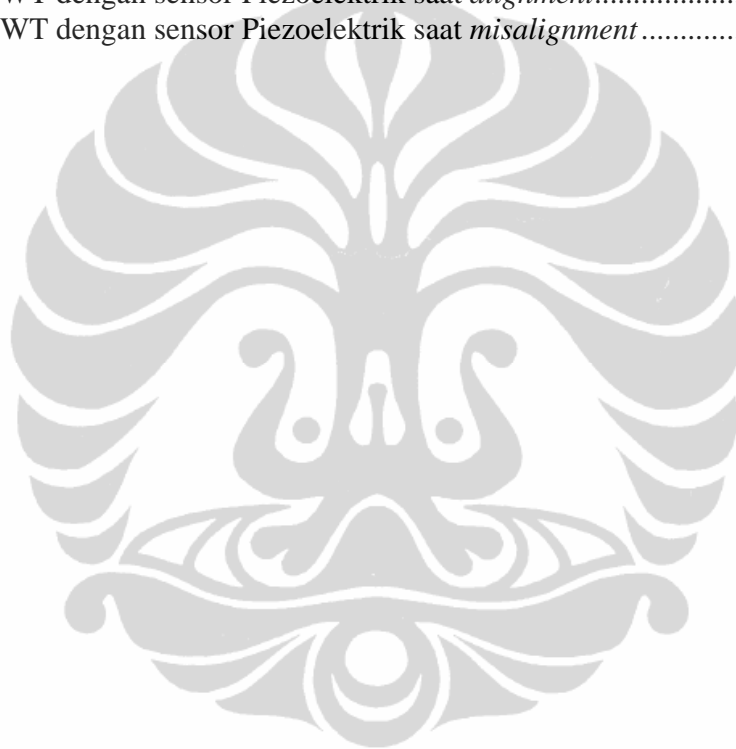
Tabel 3.1. Pemilihan Kapasitor Filter untuk C_x, C_y, C_z	25
Tabel 3.2. Deskripsi Sinyal USB 6008/6009 DAQ.....	27
Tabel 4.1. Data hasil FFT pada axis x dengan sensor MEMS	43
Tabel 4.2. Data hasil FFT dengan sensor piezoelektrik	49



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Skema alat	3
Gambar 2.1.	Motor Induksi	4
Gambar 2.2.	<i>Alignment</i>	7
Gambar 2.3.	Perbaikan komponen mesin berkurang 65%	7
Gambar 2.4.	Perbaikan pompa menurun 30% setelah dilakukan alignment	8
Gambar 2.5.	<i>Misalignment</i>	9
Gambar 2.6.	Hasil survey tentang kondisi alignment	10
Gambar 2.7.	Konsumsi energi akibat misalignment	10
Gambar 2.8.	Umur mesin akibat misalignment	11
Gambar 2.9.	Teknik Perawatan Mesin	11
Gambar 2.10.	Biaya perawatan mesin menurut survey dari Florida Bearings, Inc	12
Gambar 2.11.	MEMS Accelerometer	14
Gambar 2.12.	Piezoelektrik	15
Gambar 2.13.	FFT	16
Gambar 2.14.	Pengurangan noise dengan Wavelet	17
Gambar 2.15.	Wavelet Transform	18
Gambar 3.1.	Diagram Alir Pengukuran	19
Gambar 3.2.	Rangkaian Pengukuran	20
Gambar 3.3.	<i>Flexible Disc Coupling</i>	21
Gambar 3.4.	Metode <i>Reverse Dial Indicator</i>	22
Gambar 3.5.	Prosedur <i>Misalignment</i>	23
Gambar 3.6.	Blok Diagram Sensor MEMS	24
Gambar 3.7.	Rangkaian Pengubah sinyal pada NI-DAQ 6009	26
Gambar 3.8.	Rangkaian Sinyal Tegangan Diffrensial	28
Gambar 3.9.	Rangkaian <i>Reference Signal-Ended</i>	28
Gambar 3.10.	<i>Digital Clamp On Power HiTeste</i>	29
Gambar 3.11.	Pengawatan alat ukur <i>Clamp On Power HiTester</i>	29
Gambar 3.12.	Window pada FFT	31
Gambar 3.13.	Dekomposisi Sinyal	33
Gambar 3.14.	Metode WT	33
Gambar 3.15.	Tingkatan energi berdasarkan warna pada STFT dan WT	34
Gambar 4.1.	Blok Diagram DAQ, Filter dan FFT	36
Gambar 4.2.	Blok Diagram Hasil FFT dengan sensor MEMS	37
Gambar 4.3.	Blok Diagram STFT dengan sensor MEMS	37
Gambar 4.4.	Blok Diagram WT dengan sensor MEMS	38
Gambar 4.5.	Blok Diagram FFT dengan sensor Piezoelektrik	38
Gambar 4.6.	Blok Diagram STFT dengan sensor Piezoelektrik	39
Gambar 4.7.	Blok Diagram WT dengan sensor MEMS	39
Gambar 4.8.	Blok Diagram Indikator Kerusakan pada Mesin	40
Gambar 4.9.	Sinyal sumber dari sensor MEMS saat <i>alignment</i>	41
Gambar 4.10.	Sinyal sumber dari sensor MEMS saat <i>misalignment</i>	41
Gambar 4.11.	FFT dengan sensor MEMS saat <i>alignment</i>	42
Gambar 4.12.	FFT dengan sensor MEMS saat <i>misalignment</i>	42

Gambar 4.13. STFT dengan sensor MEMS saat <i>alignment</i>	43
Gambar 4.14. STFT dengan sensor MEMS saat <i>misalignment</i>	44
Gambar 4.15. WT dengan sensor MEMS saat <i>alignment</i>	45
Gambar 4.16. WT dengan sensor MEMS saat <i>misalignment</i>	46
Gambar 4.17. Sinyal sumber dari sensor Piezoelektrik saat <i>alignment</i>	47
Gambar 4.18. Sinyal sumber dari sensor Piezoelektrik saat <i>misalignment</i>	47
Gambar 4.19. FFT dengan sensor Piezoelektrik saat <i>alignment</i>	48
Gambar 4.20. FFT dengan sensor Piezoelektrik saat <i>misalignment</i>	48
Gambar 4.21. STFT dengan sensor Piezoelektrik saat <i>alignment</i>	50
Gambar 4.22. STFT dengan sensor Piezoelektrik saat <i>misalignment</i>	51
Gambar 4.23. WT dengan sensor Piezoelektrik saat <i>alignment</i>	52
Gambar 4.24. WT dengan sensor Piezoelektrik saat <i>misalignment</i>	53



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Motor induksi banyak digunakan di industri dan di rumah tangga karena konstruksinya sederhana, pengoperasian mudah dan mempunyai kecepatan yang relatif konstan. Contoh penggunaan pada rumah tangga dan industri adalah pada kipas angin, *vacum cleaner*, mesin cuci, *conveyor*, *elevator* dan mesin bubut.

Pemeliharaan/perawatan mesin sangat dibutuhkan untuk memperpanjang umur pemakaian motor induksi. Tindakan preventif harus didahulukan untuk mencegah kerusakan yang lebih besar pada mesin. Salah satu tindakan preventif yang dapat dilakukan adalah monitoring vibrasi pada mesin.

Kerusakan pada motor induksi yang tidak terdeteksi pada tahap awal dapat menyebabkan kerusakan lebih parah. Kerusakan motor di industri dapat mengakibatkan kerugian yang sangat besar karena proses produksi berhenti, bahan baku produksi yang seharusnya diolah akan terbuang dan pekerja akan dirumahkan karena mesin berhenti beroperasi.

Vibrasi pada motor induksi dapat disebabkan oleh *misalignment* maupun ketidaknormalan pada *bearing* (bantalan), dan lain-lain. Vibrasi yang berlebihan menyebabkan :

- mengendornya sambungan-sambungan pada mesin
- menimbulkan suara bising
- meningkatnya beban pada komponen-komponen mesin.
- mempercepat ausnya bagian-bagian mesin

Pengaruh *misalignment* pada mesin listrik ::

- Meningkatnya beban *bearing*
- Menyebabkan poros bengkok atau patah
- Meningkatnya kebisingan dan vibrasi
- Meningkatnya konsumsi energi

1.2. Perumusan Masalah

- Bagaimana mendeteksi vibrasi pada motor induksi akibat *misalignment*
- Bagaimana menentukan kondisi motor induksi berdasarkan vibrasi yang dihasilkan.

1.3. Tujuan Penelitian

- Membuat data akuisisi monitoring vibrasi motor induksi.
- Mendeteksi ketidaknormalan pada motor induksi akibat *misalignment*.
- Menurunkan tingkat konsumsi energi listrik.

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian dapat digunakan untuk memonitor keadaan mesin listrik secara kontinyu sehingga keadaan abnormal pada mesin listrik dapat diketahui secara dini. Keadaan abnormal pada mesin yang diketahui pada tahap dini dapat mencegah kerusakan lebih parah. Kerusakan pada mesin mengakibatkan mesin berhenti beroperasi dan tidak dapat digunakan lagi.

1.5. Batasan Penelitian

Pada penelitian ini akan dibahas tentang vibrasi akibat *misalignment* dan pengaruhnya terhadap kinerja mesin.

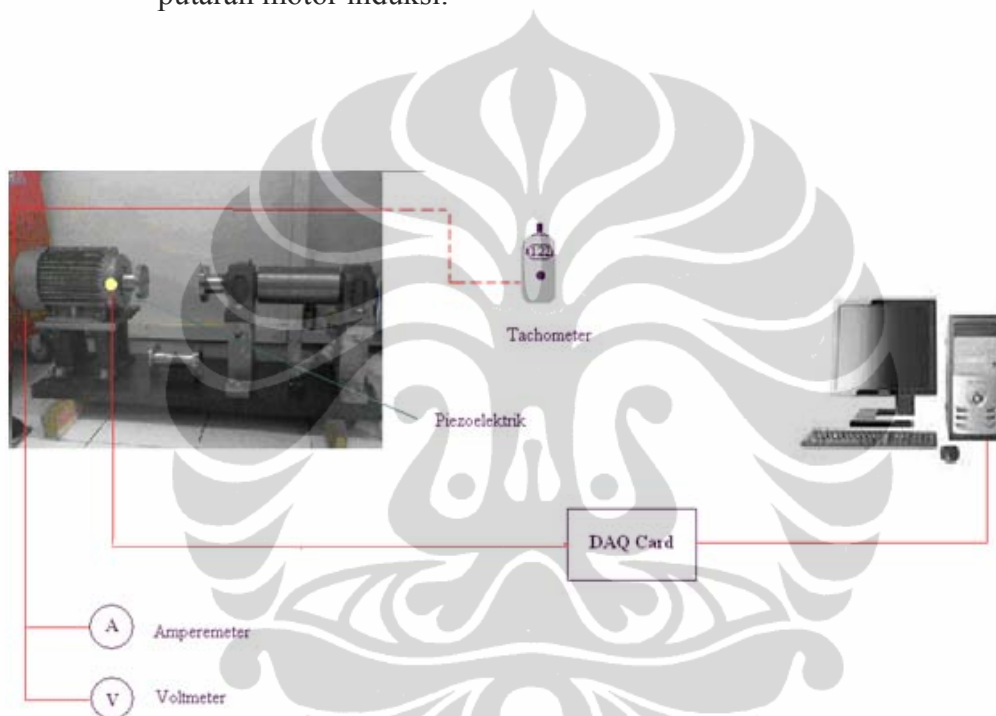
1.6. Metode Penelitian

Pelaksanaan penelitian meliputi beberapa tahapan, yaitu :

- Studi referensi tentang motor induksi, *misalignment*, sensor, vibrasi mikrokontroler dan *LabVIEW*.
- Penyiapan alat dan bahan penelitian.
- Melakukan pengukuran *misalignment*.
- Melakukan pengukuran vibrasi pada motor induksi menggunakan sensor *accelerometer*. Sinyal dari sensor ditampilkan

di layar komputer menggunakan software *LabVIEW*. Sinyal frekwensi yang ditampilkan dianalisa.

- Melakukan pengukuran tegangan dan arus motor induksi untuk mengetahui pengaruh *misalignment* pada konsumsi daya motor induksi.
- Melakukan pengukuran putaran motor induksi menggunakan tachometer untuk mengetahui pengaruh *misalignment* terhadap putaran motor induksi.



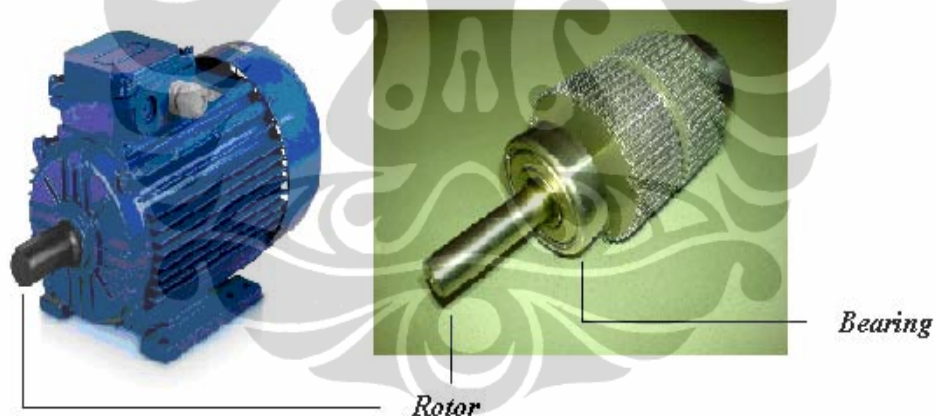
Gambar 1.1. Skema alat

BAB 2 DASAR TEORI

2.1. Motor Induksi

Motor induksi sangat banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga karena konstruksinya sederhana, harganya relative murah dan mudah dalam pengoperasian dan perawatan. Motor induksi yang umum dipakai adalah motor induksi tiga fasa dan motor induksi satu fasa. Motor induksi tiga fasa dioperasikan pada sistem tiga fasa dan banyak digunakan di industri, sedangkan motor induksi satu fasa dioperasikan pada sistem satu fasa yang banyak digunakan terutama pada penggunaan untuk peralatan rumah tangga seperti pompa air, mesin cuci dan sebagainya.

Bentuk fisik dari motor induksi dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 2.1. Motor Induksi ^[15]

Motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya. Ketika Tegangan AC 3 fasa yang diberikan ke stator menghasilkan medan putar (*rotating magnetic field*) pada stator. Medan putar tersebut memotong konduktor pada rotor sehingga menghasilkan induksi ggl (gaya gerak listrik) pada rotor (berdasarkan hukum Faraday). Karena kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup maka ggl akan menghasilkan arus I . Adanya arus di dalam medan magnet menimbulkan gaya F pada rotor sehingga rotor berputar. ^[7].

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad [19] \quad \dots\dots\dots 2.1)$$

Dimana :

- n_s = kecepatan sinkron [rpm]
 f = frekwensi sumber [Hz]
 p = jumlah kutub

Jika motor induksi bekerja pada frekuensi 50 Hz dengan jumlah kutub 2 maka kecepatan putar motor tersebut adalah $n_s = 120.50/2 = 3000$ rpm.
 Perbedaan antara kecepatan sinkron dan kecepatan rotor disebut slip.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [19] \quad \dots\dots\dots 2.2)$$

Dimana :

- s = slip
 n_s = kecepatan sinkron [r/min]
 n = kecepatan rotor [r/min]

2.2. Vibrasi (Getaran)

Vibrasi adalah suatu gerak bolak-balik di sekitar kesetimbangan. Kesetimbangan adalah keadaan dimana suatu benda berada pada posisi diam jika tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut .

Vibrasi dapat ditunjukkan dengan cara yang sederhana yaitu dengan pegas yang diberi beban. Kemudian pegas ditarik dan dilepaskan. Pada pegas akan tampak gerakan bolak balik dari atas ke bawah.

Mesin yang ideal tidak akan bergetar karena energi yang diterimanya digunakan sepenuhnya oleh mesin itu sendiri. Mesin yang dirancang dengan baik akan menghasilkan vibrasi yang relatif rendah tetapi dengan bertambahnya usia mesin dan dengan pengoperasian dalam jangka waktu lama akan menyebabkan mesin tersebut mengalami :

- Keausan pada elemen mesin

- Perubahan struktur pondasi akibat usia maupun akibat lingkungan. Hal ini akan menyebabkan terjadinya misalignment pada poros.
- Perubahan perilaku dinamik pada mesin sehingga terjadi perubahan frekuensi.

Beberapa parameter penyebab vibrasi pada mesin listrik ;

- *misalignment* (titik pusat antara dua poros yang tidak terletak pada satu sumbu)
- kondisi tidak seimbang (*unbalance*)
- cacat yang terjadi pada bagian mesin antara lain pada bearing, roda gigi, dan lain-lain
- kekurangan pelumasan
- kurang baiknya transmisi sabuk atau rantai
- kurang baiknya kinerja bantalan.

Vibrasi yang berlebihan menyebabkan :

- mengendornya sambungan-sambungan pada mesin
- menimbulkan suara bising
- meningkatnya beban pada komponen-komponen mesin.
- mempercepat ausnya bagian-bagian mesin

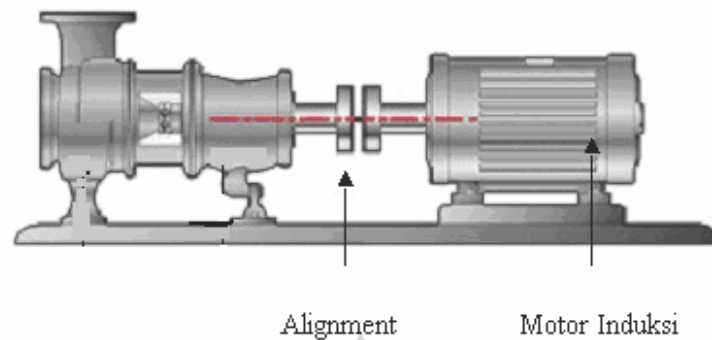
Parameter vibrasi :

- Simpangan (*displacement*)
- Kecepatan (*velocity*)
- Percepatan (*acceleration*)

Setiap mesin memiliki level vibrasi tertentu dan dalam domain frekuensi memiliki spektrum dengan ciri tertentu.

2.3 Alignment

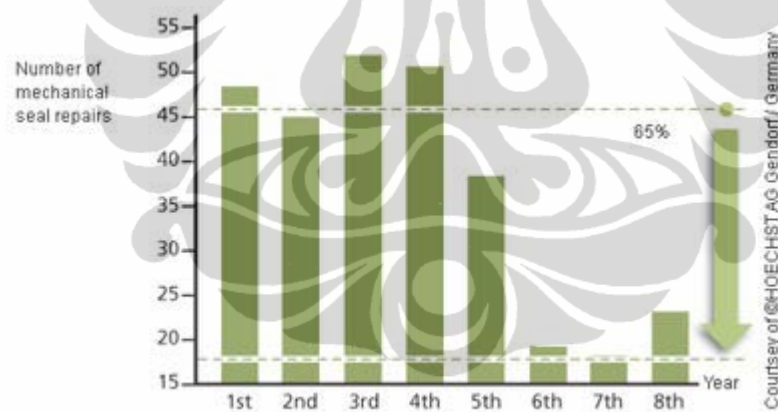
Alignment adalah kondisi dimana titik pusat antara dua poros yang dihubungkan terletak pada satu sumbu. Mesin dengan kondisi baru diharapkan porosnya pada kondisi alignment. Kondisi alignment ini dijaga sampai proses instalasi dan operasi.



Gambar 2.2. *Alignment* ^[7]

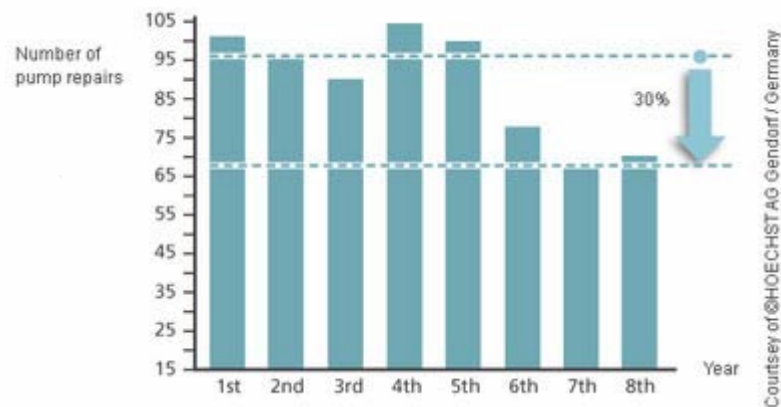
Keuntungan jika mesin selalu pada kondisi alignment :

- Alignment pada mesin akan mengurangi perbaikan komponen sampai 65 %.



Gambar 2.3. Perbaikan komponen mesin berkurang 65% ^[13]

- Setelah dilakukan alignment, perbaikan pompa menurun 30%.



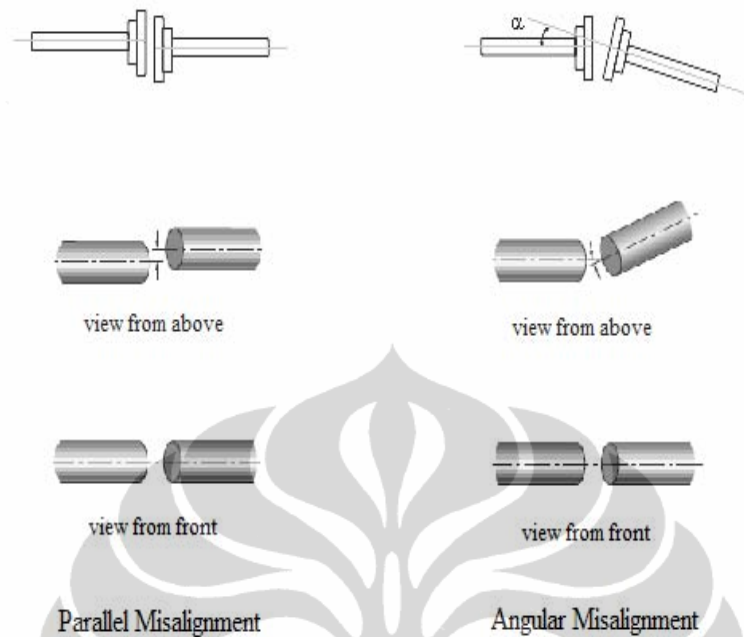
Gambar 2.4. Perbaikan pompa menurun 30% setelah dilakukan alignment [13]

Toleransi Alignment :

Terdapat banyak metode yang digunakan untuk align mesin. Metode tersebut dipilih berdasarkan jenis mesin, kecepatan putar, fungsi mesin, perawatan dan toleransi alignment. Pada mesin dengan putaran kurang dari 1500 rpm dan daya rendah dengan pondasi kurang kokoh, toleransi alignment 0,3 – 0,8 mm. Mesin yang beroperasi pada kecepatan putar ≥ 3000 rpm dengan daya pada tingkat menengah (20 kW – 1 MW) dengan pondasi yang kokoh, toleransi alignment 0,1 mm.

2.4 Misalignment

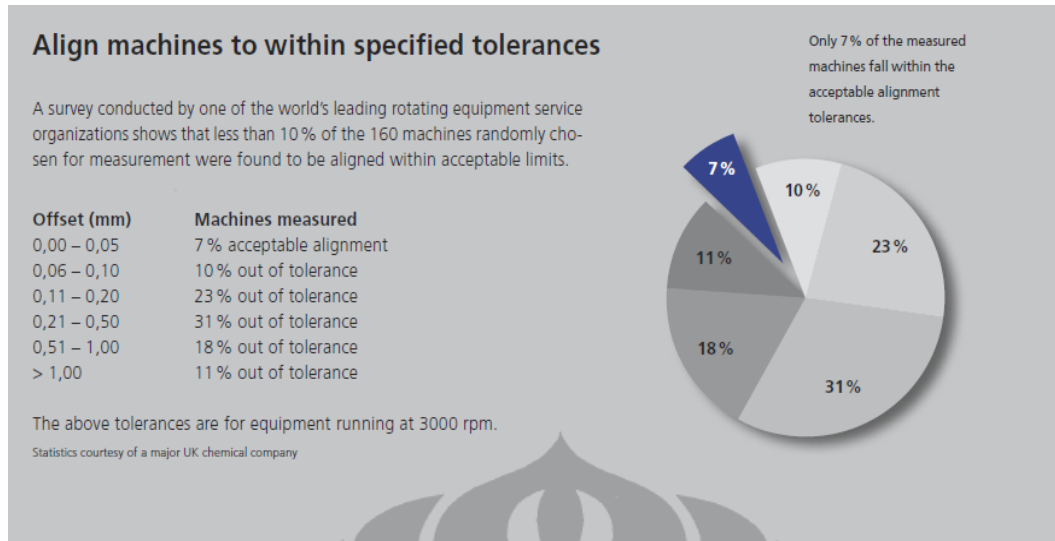
Misalignment adalah kondisi dimana terjadi penyimpangan pada titik pusat antara dua poros yang dihubungkan (dua poros terletak tidak pada satu sumbu). Jika *misalignment* terjadi pada kopling maka akan mempercepat kerusakan kopling, bearing dan menimbulkan vibrasi berlebihan [7].



Gambar 2.5. *Misalignment* ^[7]

- **Offset/Paralel Misalignment**
Offset misalignment terjadi jika garis sumbu dua poros berputar sejajar tetapi tidak berada dalam satu garis sumbu. Kondisi ini terjadi akibat kedua garis tengah antara poros tidak dalam keadaan satu sumbu.
- **Angular Misalignment.** Terjadi jika poros pada kopling tidak segaris dan berpotongan membentuk sudut tertentu.
- **Combination Misalignment** terjadi jika dua poros motor tidak berhadapan secara sejajar dan saling membentuk sudut yang berbeda.

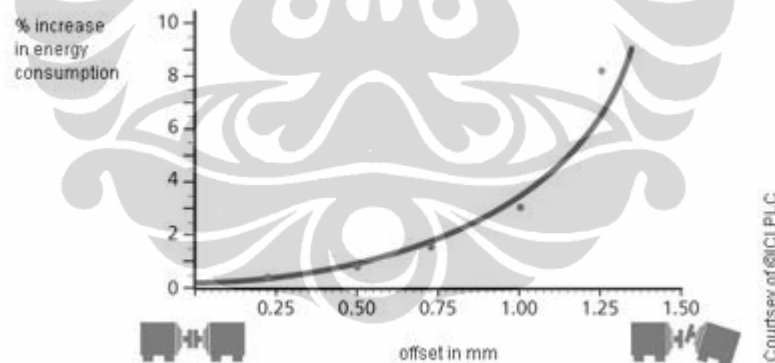
Survey yang dilakukan oleh salah satu organisasi dunia bidang servis peralatan berputar menunjukkan kurang dari 10% dari 160 mesin yang dipilih secara acak dalam kondisi alignment ^[5].



Gambar 2.6. Hasil survey tentang kondisi alignment ^[5]

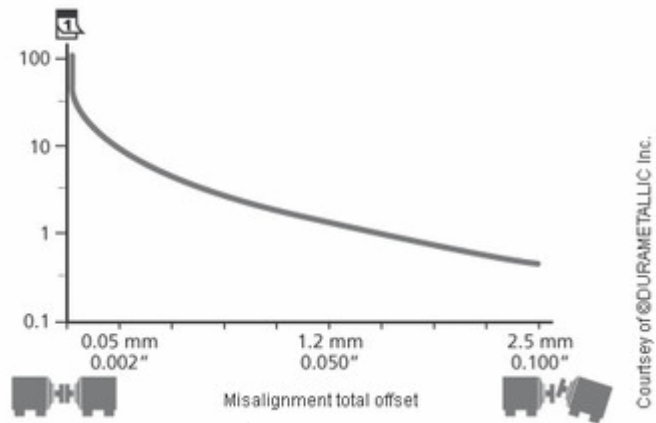
Kerugian akibat misalignment :

- Konsumsi energi semakin bertambah.



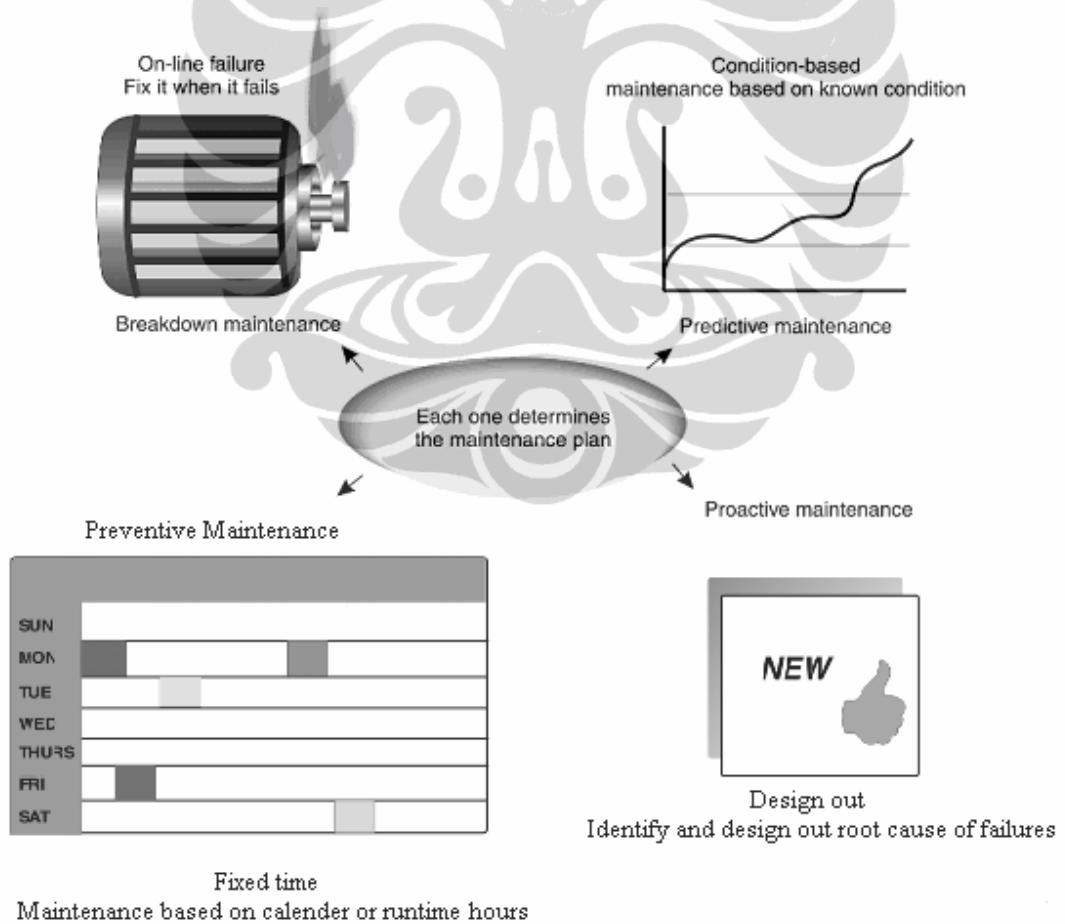
Gambar 2.7. Konsumsi energi akibat misalignment ^[13]

- Menambah biaya produksi disebabkan oleh meningkatnya tingkat vibrasi
- Mengurangi umur komponen mesin.



Gambar 2.8. Umur mesin akibat misalignment [13]

2.5. Teknik Maintenance :



Gambar 2.9. Teknik Perawatan Mesin [14]

2.5.1 Breakdown maintenance.

Perawatan dan perbaikan mesin dilakukan setelah terjadi kerusakan pada mesin. Pabrik yang menggunakan mesin yang harganya murah pada umumnya melengkapai prosesnya dengan mesin cadangan sehingga jika terjadi kerusakan pada mesin, ada mesin cadangan sebagai pengganti mesin yang rusak. Pada jenis perawatan ini umumnya sudah diketahui jenis kerusakan apa saja yang sering terjadi pada mesin dan kapan kerusakan tersebut kemungkinan akan terjadi, sehingga suku cadang dapat disiapkan.

2.5.2. Predictive maintenance

Perawatan dilakukan dengan mengamati sinyal dari mesin. Predictive maintenance dapat menurunkan biaya perawatan mesin (Florida Bearings, Inc.).

Reactive Maintenance costs
\$17/horsepower/year

Preventive Maintenance costs
\$12/horsepower/year

Predictive Maintenance costs
\$8/horsepower/year



Gambar 2.10. Biaya perawatan mesin menurut survey dari Florida Bearings, Inc.^[5]

Beberapa teknik Predictive Maintenance :

- Vibration monitoring. Cara ini sangat efektif untuk mendeteksi kerusakan mekanik pada mesin listrik.
- Acoustic emission. Digunakan untuk mendeteksi, melokalisir dan memonitor struktur dan pemipaan yang retak.
- Oil analysis. Partikel-partikel kecil yang terdapat pada minyak pelumas dapat digunakan untuk menganalisa kondisi mesin.
- Particle analysis. Partikel-partikel kecil yang terlepas dari komponen mesin digunakan untuk menganalisa kondisi mesin.

- Corrosion monitoring. Pengukuran ketebalan ultrasonic pada komponen mesin untuk mengetahui adanya korosi pada komponen mesin. Korosi dapat menyebabkan kerusakan mesin.
- Thermography. Thermography digunakan untuk menganalisa peralatan mekanik dan elektrik yang sedang beroperasi.
- Performance monitoring. Teknik ini sangat efektif untuk menentukan permasalahan pada operasi peralatan. Efisiensi mesin ditentukan oleh kondisi internal mesin.

2.5.3 Preventive maintenance.

Perawatan dilakukan rutin sesuai jadwal yang telah ditetapkan. Pabrik-pabrik yang menggunakan mesin-mesin kritis tanpa ada mesin cadangan serta jadwal produksi yang ketat sehingga pemberhentian tidak terjadwal akan menyebabkan kerugian yang besar maka aspek perawatan menjadi sangat penting. Teknik perawatan yang digunakan berupa perawatan pencegahan berbasis waktu. Dalam hal ini kegiatan perawatan dilakukan berdasarkan jadwal waktu tertentu misalnya setiap 3000 jam kerja atau sekali setahun.

Penentuan waktu perawatan dilakukan oleh pembuat mesin berdasarkan pertimbangan statistik. Dalam hal ini produsen mesin meramalkan bahwa hanya 2% dari populasi mesin akan gagal dalam selang waktu dari saat mesin beroperasi penuh sampai jadwal perawatan tiba.

Teknik perawatan ini mempunyai kekurangan :

- Tidak ekonomis.
Fakta menunjukkan bahwa laju kegagalan tidak sepenuhnya tergantung hanya dengan mengganti komponen yang aus secara periodik. Mengetahui penyebab kerusakan lebih penting dibanding dengan hanya mengganti komponen yang aus.
- Berkurangnya keandalan mesin
Hal ini disebabkan karena pola kegagalan suatu mesin tidak dapat ditentukan tanpa informasi yang lengkap dan akurat. Dapat terjadi penggantian komponen mesin yang masih baik serta pemasangan kembali yang kurang sempurna.

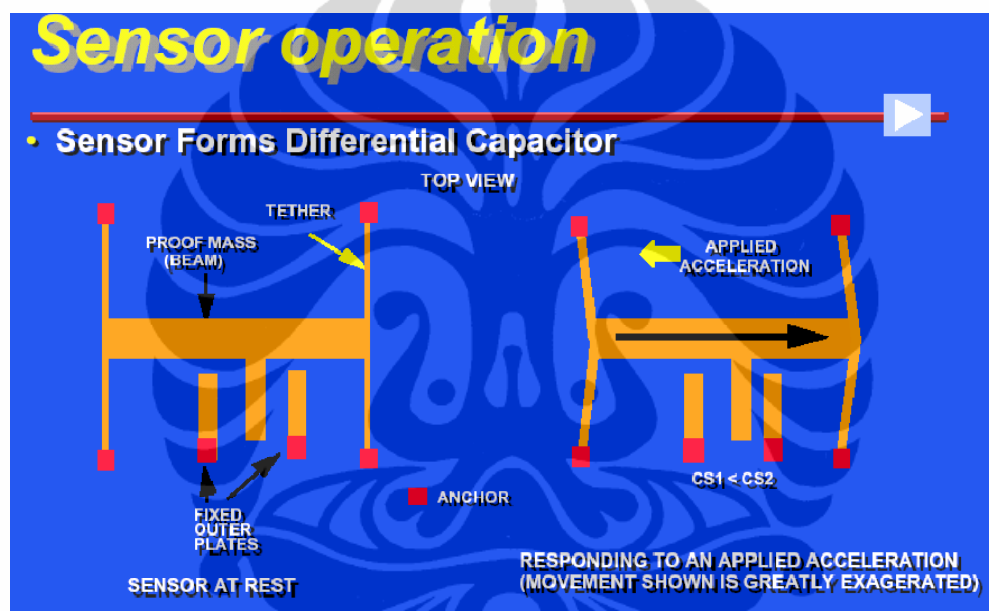
2.5.4. Proactive maintenance.

Perawatan dilakukan dengan menganalisa kegagalan sebelumnya sehingga kegagalan tersebut tidak terulang lagi.

2.6 Sensor

2.6.1. Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)

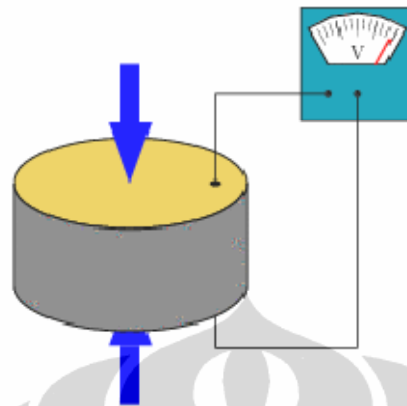
Sensor vibrasi digunakan untuk mendeteksi sinyal vibrasi dan mengubahnya menjadi sinyal listrik. Sinyal listrik memudahkan dalam proses pengolahan sinyal selanjutnya seperti penguatan sinyal, filtering dan sebagainya. Salah satu jenis sensor untuk deteksi vibrasi adalah MEMS.



Gambar 2.11. MEMS Accelerometer ^[6]

Sensor ini bekerja berdasarkan efek kapasitor. Sensor ini terdiri dari bagian yang diam dan bagian yang bergerak. Vibrasi akan menggerakkan bagian sensor sehingga mengubah jarak antara bagian diam dan bagian yang bergerak. Hal ini akan mengubah sinyal tegangan yang dihasilkan.

2.6.2. Piezoelektrik



Gambar 2.12. Piezoelektrik ^[17]

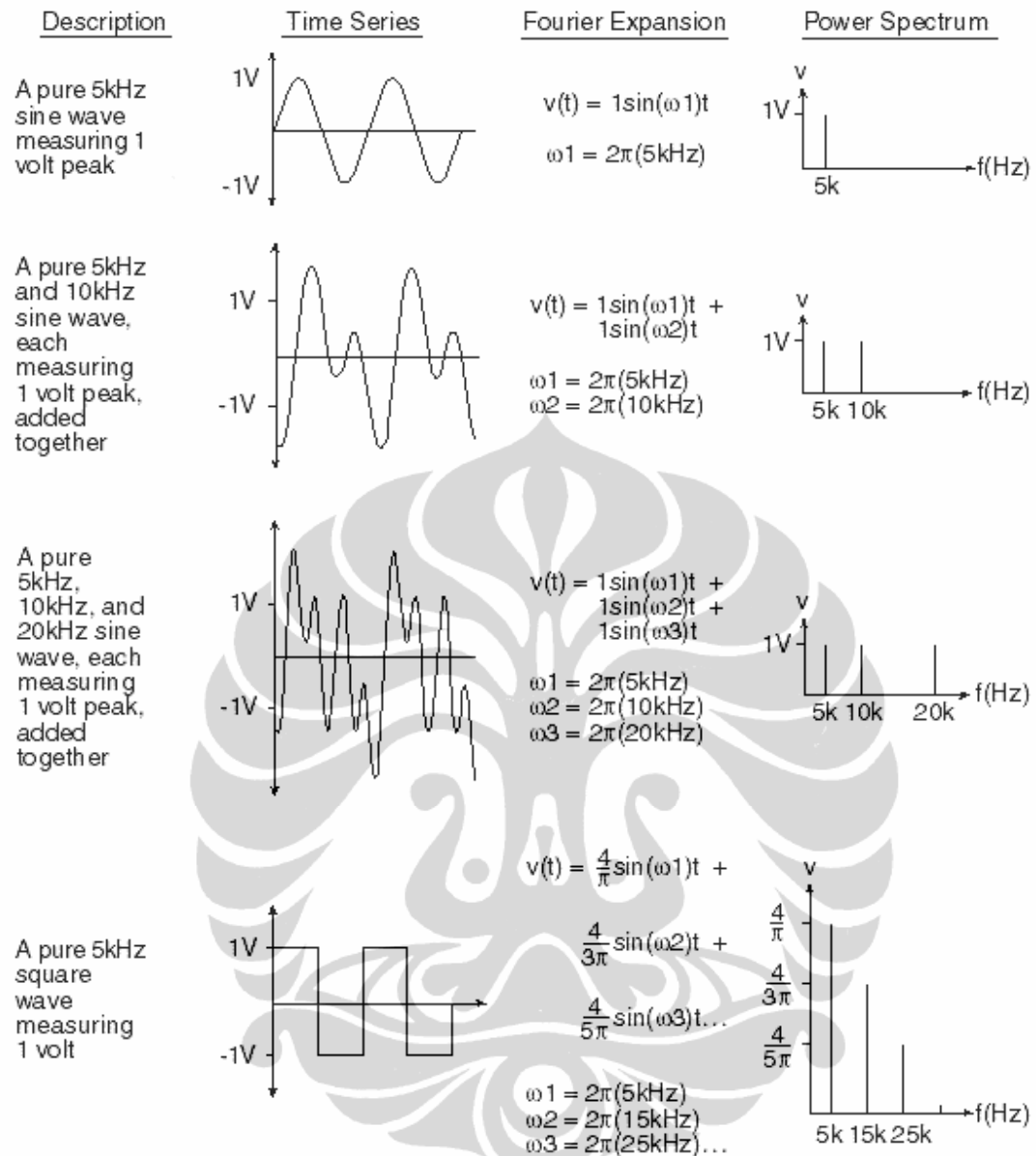
Piezoelektrik merupakan sensor yang akan menghasilkan tegangan listrik jika mendapatkan perlakuan tekanan.

Pemilihan piezoelektrik karena penggunaannya mudah dan range frekwensi yang terdeteksi cukup tinggi.

2.7 Signal Processing

2.7.1 Fast Fourier Transform (FFT)

FFT adalah algoritma matematika yang dikomputerisasi untuk mentransformasi sinyal vibrasi dari domain waktu (time waveform) ke domain frekuensi. FFT menghasilkan gambaran amplitude vibrasi terhadap frekuensi. Pada analisa vibrasi, frekuensi merupakan parameter yang dianalisa untuk menemukan gangguan pada mesin. Analisa dapat dilakukan saat mesin sedang beroperasi.

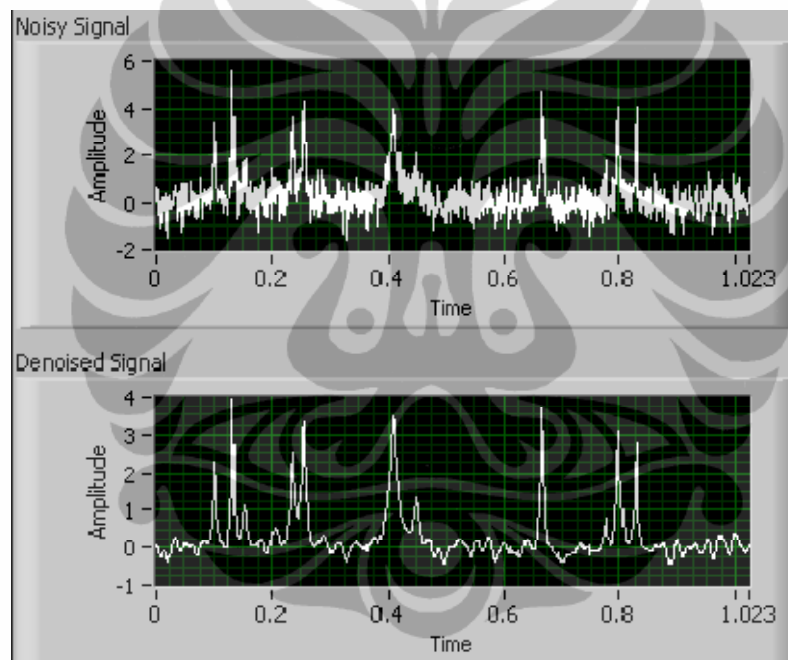


Gambar 2.13. FFT

2.7.2. Wavelet Transform

Transformasi wavelet merupakan perbaikan dari transformasi Fourier. Transformasi Fourier hanya dapat menangkap informasi apakah suatu sinyal memiliki frekuensi tertentu atau tidak, tapi tidak dapat menangkap kapan frekuensi itu terjadi. Jika Transformasi Fourier hanya memberikan informasi tentang frekuensi suatu sinyal, maka transformasi wavelet memberikan informasi tentang kombinasi skala dan frekuensi.

Metode Transformasi berbasis Wavelet merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisis sinyal-sinyal vibrasi. Transformasi Fourier hanya menampilkan resolusi frekuensi saja dan tidak memiliki resolusi waktu. Dengan transformasi Fourier frekuensi dapat dideteksi tapi kapan dan berapa lama terjadinya frekuensi tersebut tidak dapat diketahui. Transformasi Wavelet merupakan pengembangan dari Transformasi Fourier yang mampu menampilkan sinyal dalam domain frekuensi dan waktu secara bersamaan. Wavelet juga memiliki resolusi waktu dan resolusi frekuensi sehingga disebut multiresolusi. Metode Transformasi Wavelet ini dapat digunakan untuk mengurangi noise atau meningkatkan kualitas data.

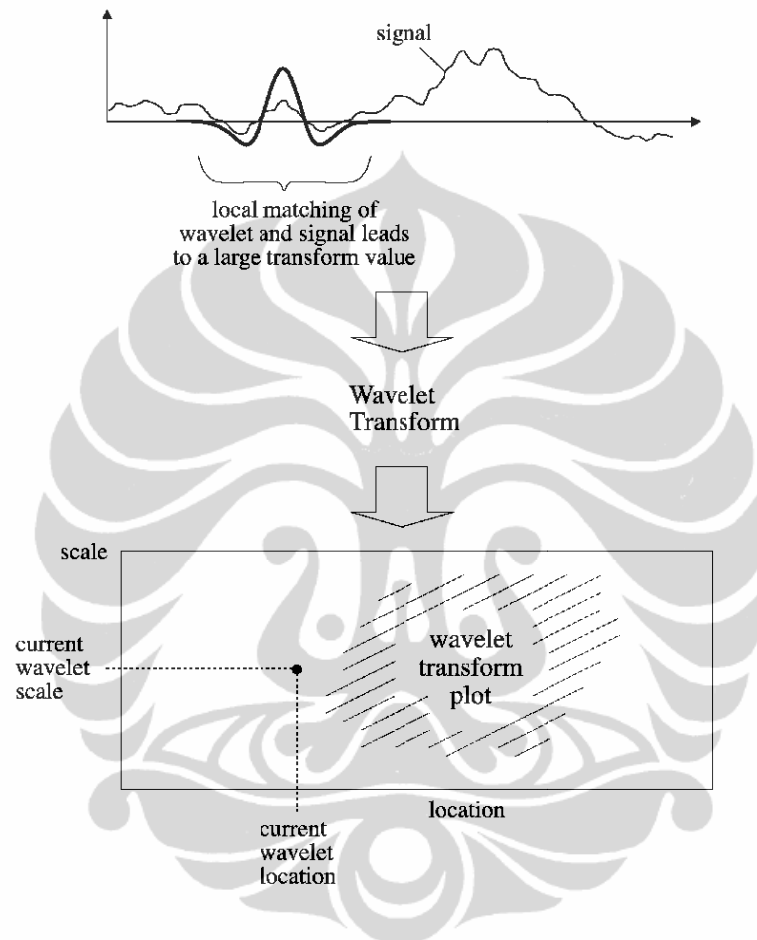


Gambar 2.14. Pengurangan noise dengan Wavelet ^[9]

Transformasi Wavelet juga dapat digunakan untuk analisis sinyal-sinyal non-stasioner (yaitu sinyal yang kandungan frekuensinya bervariasi terhadap waktu), karena berkaitan dengan kemampuannya untuk memisah-misahkan berbagai macam karakteristik pada berbagai skala.

Konsep Transformasi Wavelet telah dirumuskan sejak awal 1980-an oleh beberapa ilmuwan seperti Morlet, Grossmann, Daubechies dan lain-lain.

Transformasi Wavelet dilakukan dengan memotong-motong sinyal dengan jendela waktu yang sangat pendek, kemudian potongan-potongan sinyal tersebut dianalisa. Metode ini menghasilkan resolusi waktu yang baik untuk frekuensi tinggi dan resolusi frekuensi yang baik untuk frekuensi rendah.



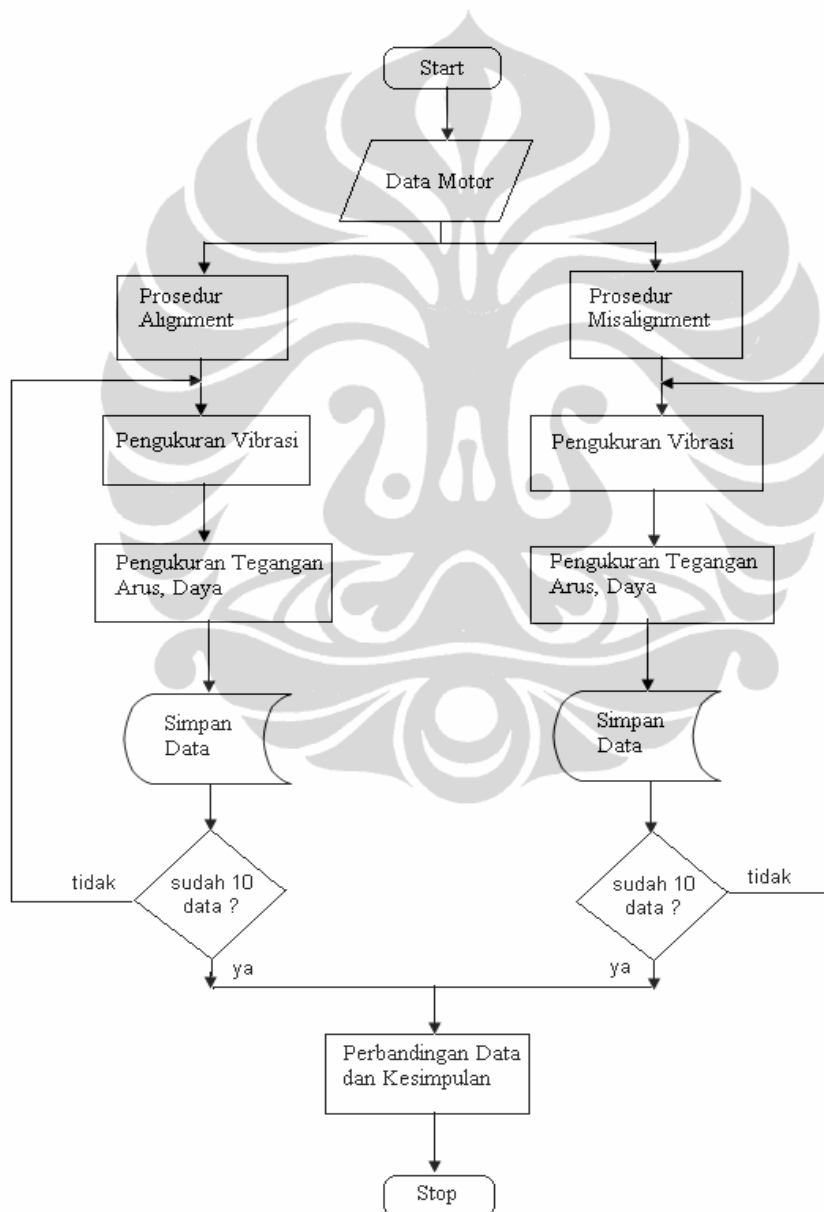
Gambar 2.15. Wavelet Transform^[1]

Transformasi wavelet merupakan proses dekomposisi yang menawarkan berbagai kemungkinan analisa sinyal yang lebih luas.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan adalah studi literatur dan eksperimen. Studi literatur dilakukan dengan mengambil teori-teori vibrasi dari berbagai referensi dan eksperimen yang dilakukan pada motor induksi dengan data akuisisi menggunakan NI-DAQ 6009 untuk melihat fenomena vibrasi.

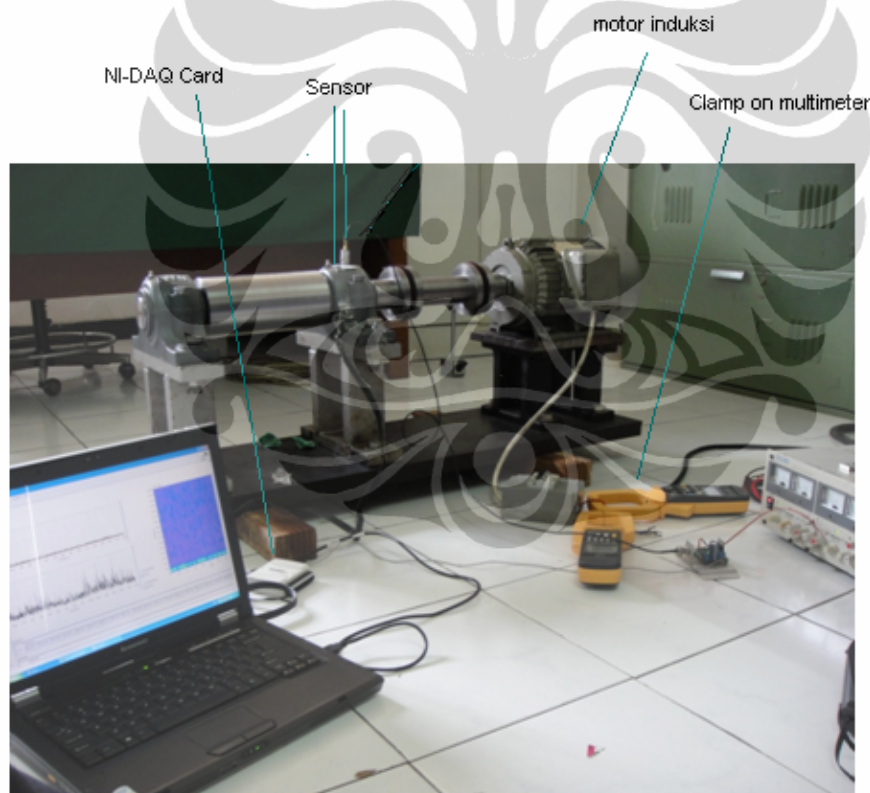
3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1. Diagram Alir Pengukuran

Langkah pengambilan data :

- a. Mencatat data motor untuk mencegah motor dioperasikan diluar batas nominalnya.
- b. Dilakukan prosedur *alignment*.
- c. Pengukuran vibrasi.
- d. Pengukuran arus, tegangan dan daya listrik.
- e. Data disimpan.
- f. Langkah b sampai e diulang sampai 10 kali.
- g. Dilakukan prosedur *misalignment*.
- h. Dilakukan prosedur pengukuran seperti langkah c sampai f.
- i. Dilakukan perbandingan data saat *alignment* dan *misalignment*.
- j. Membuat kesimpulan.



Gambar 3.2. Rangkaian Pengukuran

Pengukuran yang dilakukan adalah :

- vibrasi pada motor induksi menggunakan sensor MEMS dan piezoelektrik yang ditempelkan berdampingan. Penempatan sensor pada motor pada lokasi dimana terjadi vibrasi yang paling besar. Pada penelitian ini sensor dipasang pada rumah bearing pada sambungan antara dua kopling. Penempatan sensor MEMS dilakukan setelah putaran motor stabil karena sensor ini terdiri dari komponen elektronik sehingga dikhawatirkan hentakan motor yang tinggi saat pertama kali dinyalakan dapat merusak sensor.
- tegangan, arus dan daya menggunakan clamp on multimeter. Digunakan dua buah clamp on multimeter untuk mengukur daya tiga fasa. Tang ampere dimasukkan pada penghantar. 3 buah kabel jepit dijepitkan pada masing-masing penghantar. Daya yang terukur pada kedua multimeter tersebut kemudian dijumlahkan.

Dari hasil pengukuran dilakukan :

- perhitungan konsumsi energi
- analisa menggunakan metode FFT, STFT dan WT.

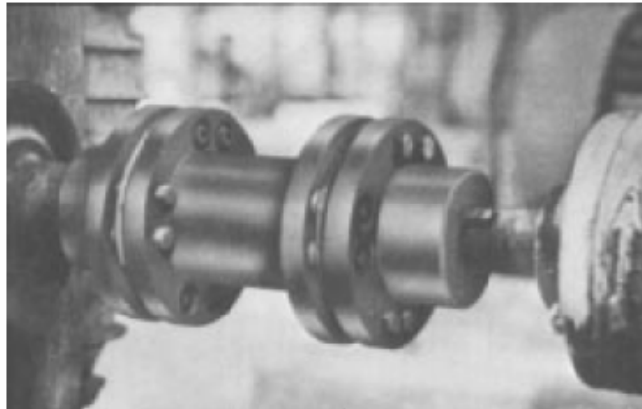
3.2 Data Motor Listrik

Spesifikasi motor listrik yang digunakan :

- Jenis Motor Listrik : 3 - Phase Induction Motor
- Daya : 3 HP
- Tegangan : 220/380 V
- Frekuensi : 50 Hz
- Kecepatan Putar : 1430 rpm

Motor listrik yang digunakan adalah motor induksi 3 fasa jenis rotor sangkar. Motor listrik jenis rotor sangkar pengoperasiannya mudah karena langsung dihubungkan ke sumber listrik tiga fasa dan putarannya relatif konstan.

Kopling yang digunakan adalah jenis *flexible disc coupling*.



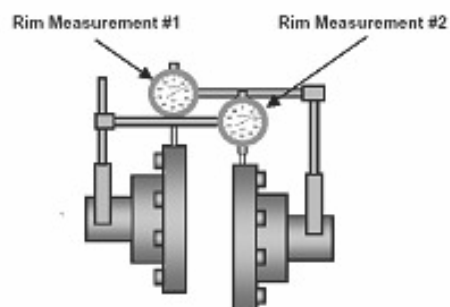
Gambar 3.3. *Flexible Disc Coupling*

Beberapa kelebihan dari kopling ini adalah :

- Tidak memerlukan pelumas
- Perawatan hanya memerlukan Visual Inspection, tidak perlu dilakukan pembongkaran komponen.
- Komponen pada kopling mudah dibongkar pasang
- *Minimum maintenance*
- Memiliki torsi yang tinggi

3.3 Metode *Alignment* dan *Misalignment*

Metode *alignment* dilakukan dengan metode *reverse dial indicator*. Metode ini dilakukan dengan memasang dua buah *dial indicator* pada kedua sisi kopling. Kopling diputar dan nilai pengukuran dibaca pada *dial indicator*. Perbedaan nilai pengukuran antara dua *dial indicator* menunjukkan besarnya penyimpangan kondisi *alignment*.



Gambar 3.4. Metode *Reverse Dial Indicator*

Pengambilan data akan dilakukan pada kondisi *alignment* dan *misalignment*, maka terlebih dahulu dilakukan prosedur *alignment*. Jika kedua *dial indicator* menunjukkan nilai berbeda maka salah satu mesin digeser sehingga diperoleh posisi *alignment*.

Setelah dilakukan pengambilan data dengan posisi *alignment*, dilakukan prosedur *misalignment* yaitu dengan menggeser posisi salah satu motor dengan jarak 3 mm. Setelah motor digeser, dikencangkan kembali sebelum memulai menjalankan motor.



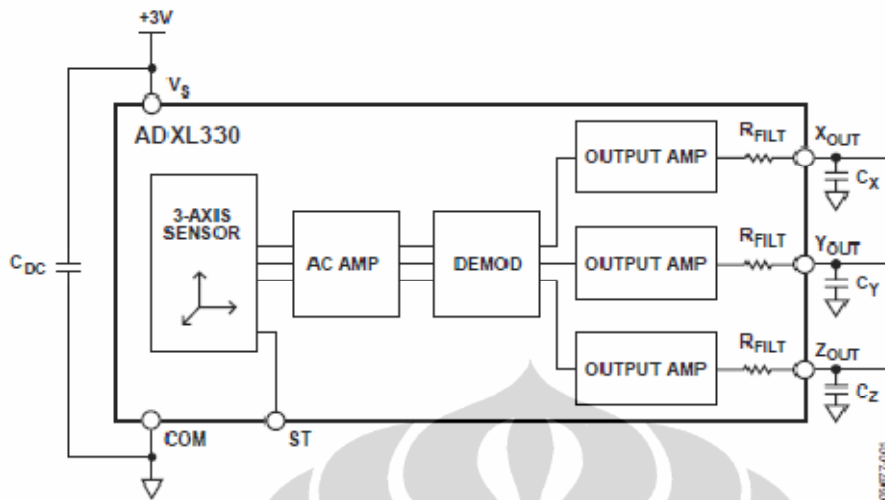
Gambar 3.5. Prosedur *Misalignment*

3.4 Sensor

Sensor merupakan komponen yang sangat penting dalam pengukuran vibrasi karena berada pada sisi terdepan dari proses pemantauan vibrasi mesin. Sensor getaran akan mengubah besaran sinyal vibrasi menjadi sinyal analog dalam besaran listrik dan umumnya berbentuk tegangan listrik.

Pada penelitian ini digunakan sensor MEMS (*Microelectromechanical Systems*). MEMS yang digunakan adalah ADXL330 dalam bentuk modul yang menyatu dengan pengkondisi sinyal sehingga dapat langsung digunakan untuk deteksi vibrasi.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



Gambar 3.6. Blok Diagram Sensor MEMS [2]

ADXL330 mempunyai ukuran kecil, tipis, daya rendah, merupakan accelerometer 3 axis sehingga dapat mengukur vibrasi dalam tiga arah, dengan output tegangan yang sudah diperkuat. Bandwith diatur menggunakan C_x , C_y , C_z .

Sensor MEMS yang digunakan dapat mengukur sinyal vibrasi dengan rentang frekuensi sampai 1600 Hz. Temperatur Operasi – 40 sampai 80 °C.

ADXL330 merupakan sistem pengukuran percepatan (acceleration) 3-axis yang lengkap yang terpadu dalam satu IC. ADXL330 mempunyai range pengukuran minimum ± 3 g, terdiri dari sensor *micromachined* dengan permukaan polysilicon dan rangkaian penguat. Sinyal keluaran berupa tegangan analog yang sebanding dengan besar percepatan. Sensor ini dapat mengukur percepatan statis dari gaya gravitasi dan percepatan dinamik yang dihasilkan oleh pergerakan (motion), benturan (shock) atau getaran (vibration).

Teknik demodulasi phase-sensitive digunakan untuk menentukan besaran dan arah percepatan.

Keluaran demodulator diperkuat dan dihubungkan ke terminal keluaran sensor melalui resistor 32 k Ω . Bandwith dapat diatur dengan menambahkan kapasitor.

Pada umumnya sebuah kapasitor, C_{DC} ditambahkan pada sumber tegangan sensor. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi *noise* dari sumber.

ADXL330 mempunyai batasan bandwidth untuk X_{OUT} , Y_{OUT} , dan Z_{OUT} . Kapasitor pada sisi keluaran digunakan untuk mengurangi noise dan mengatur bandwidth. Toleransi dari resistor internal (R_{FILT}) $\pm 15\%$ dari nilai nominal ($32k\Omega$). Direkomendasikan untuk menggunakan kapasitansi minimum $0,0047 \mu F$ untuk C_x, C_y, C_z .

Tabel 3.1. Pemilihan Kapasitor Filter untuk C_x, C_y, C_z .^[2]

Bandwidth (Hz)	Capacitor (μF)
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

Pemilihan bandwidth sensor akan mempengaruhi resolusi pengukuran. Filter digunakan untuk menurunkan tingkat noise serendah mungkin untuk meningkatkan resolusi pengukuran.

Selain MEMS, digunakan juga piezoelektrik. Temperatur operasi 0 sampai $50^\circ C$. Karena keluaran piezoelektrik sangat kecil, maka digunakan rangkaian penguat sinyal.

Keluaran kedua sensor (MEMS dan piezoelektrik) dihubungkan ke komputer melalui NI-DAQ 6009 dari National Instrument.

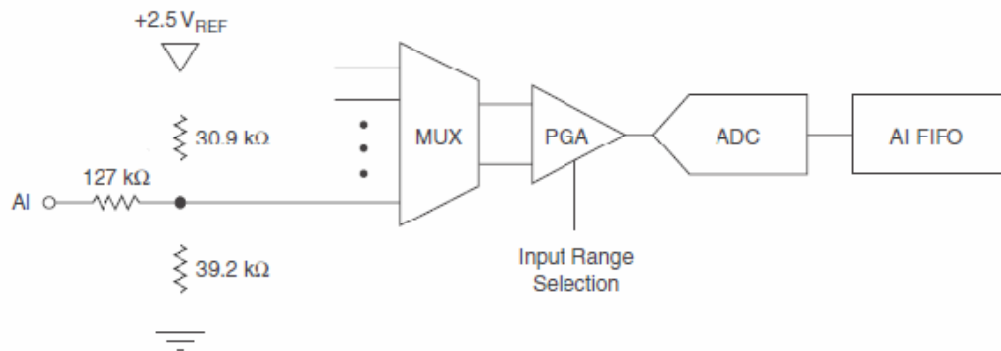
3.5 NI-DAQ 6009

NI-DAQ 6009 digunakan sebagai interface antara sensor dan komputer. NI-DAQ 6009 mengubah sinyal analog dari sensor menjadi sinyal digital sehingga sinyal dari sensor dapat diolah oleh komputer. Spesifikasi NI-DAQ 6009 [10].

Analog Input (AI) Resolution 14 bits differential, 13 bits single-ended.

Maximum AI Sample Rate : 48 kS/s (Single Channel)

42 kS/s (Multiple Channel)



Gambar 3.7. Rangkaian Pengubah sinyal pada NI-DAQ 6009 ^[10]

Cara kerja NI-DAQ 6009 :

- MUX (Multiplexer) mengirimkan satu analog input setiap waktu ke PGA.
- PGA (programmable-gain amplifier) mempunyai input gain 1, 2, 5, 8, 10, 16 atau 20 yang dikonfigurasi untuk pengukuran differential dan gain 1 untuk konfigurasi single-ended. PGA gain diatur secara otomatis. Pada umumnya sistem akuisisi data dengan range dinamik yang lebar memerlukan beberapa metode untuk mengatur level sinyal input ke ADC (analog-to-digital-converter). Range tegangan input *full-scale* pada ADC adalah 2 V sampai 10 V. Untuk mencapai rating converter, input sinyal maksimum harus mendekati tegangan *full-scale*. Transducer mempunyai tegangan output dengan range yang sangat lebar sehingga dibutuhkan gain (penguatan) tinggi untuk tegangan output sensor yang kecil, tapi jika tegangan output sensor tinggi, gain tinggi akan menyebabkan *amplifier* atau ADC berada pada keadaan saturasi. Oleh karena itu dibutuhkan komponen penguat yang dapat dikontrol. Komponen penguat yang dapat dikontrol disebut programmable gain amplifier (PGA).
- A/D (analog/digital) Converter mengubah sinyal input analog menjadi sinyal digital.
- AI FIFO (analog-input first-in-first-out) mengatur keluar masuk data agar tidak ada data yang hilang selama akuisisi.

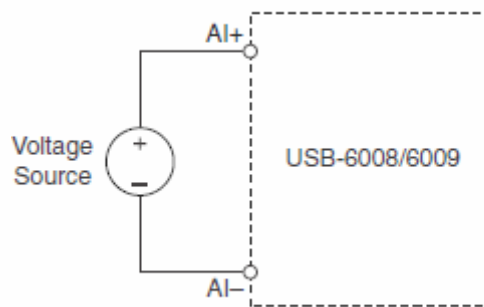
Pada penelitian ini, karena frekuensi maksimum yang akan diukur adalah 1600 Hz sesuai dengan kemampuan sensor, maka digunakan sampling rate 3,2 KHz (2 kali dari frekuensi maksimum) sesuai dengan teori Nyquist yang menyatakan bahwa sampling rate yang digunakan minimal 2 kali dari sampling rate maksimum frekuensi yang akan diukur.

Terminal analog input dapat dikonfigurasi untuk digunakan pada pengukuran single-ended atau differential.

Tabel 3.2. Deskripsi Sinyal USB 6008/6009 DAQ ^[10]

Signal Name	Reference	Direction	Description
GND	—	—	Ground —The reference point for the single-ended AI measurements, bias current return point for differential mode measurements, AO voltages, digital signals at the I/O connector, +5 VDC supply, and the +2.5 VDC reference.
AI <0..7>	Varies	Input	Analog Input Channels 0 to 7 —For single-ended measurements, each signal is an analog input voltage channel. For differential measurements, AI 0 and AI 4 are the positive and negative inputs of differential analog input channel 0. The following signal pairs also form differential input channels: <AI 1, AI 5>, <AI 2, AI 6>, and <AI 3, AI 7>.
AO 0	GND	Output	Analog Channel 0 Output —Supplies the voltage output of AO channel 0.
AO 1	GND	Output	Analog Channel 1 Output —Supplies the voltage output of AO channel 1.
P1.<0..3> P0.<0..7>	GND	Input or Output	Digital I/O Signals —You can individually configure each signal as an input or output.
+2.5 V	GND	Output	+2.5 V External Reference —Provides a reference for wrap-back testing.
+5 V	GND	Output	+5 V Power Source —Provides +5 V power up to 200 mA.
PFI 0	GND	Input	PFI 0 —This pin is configurable as either a digital trigger or an event counter input.

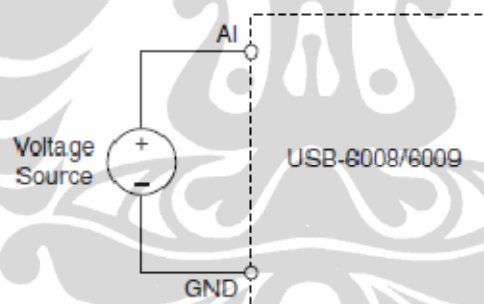
Koneksi sinyal tegangan differensial adalah dengan menghubungkan kebel positif ke terminal AI+ dan kabel negatif ke terminal AI-.



Gambar 3.8. Rangkaian Sinyal Tegangan Diffrensial ^[10]

Input differensial dapat mengukur sinyal ± 20 V dalam range ± 20 V. Akan tetapi tegangan maksimum pada satu pin adalah ± 10 V terhadap GND.

Untuk sinyal tegangan *reference single-ended* (RSE), hubungan terminalnya adalah dengan menghubungkan sinyal tegangan positif ke terminal AI yang diinginkan dan sinyal ground ke terminal ground.



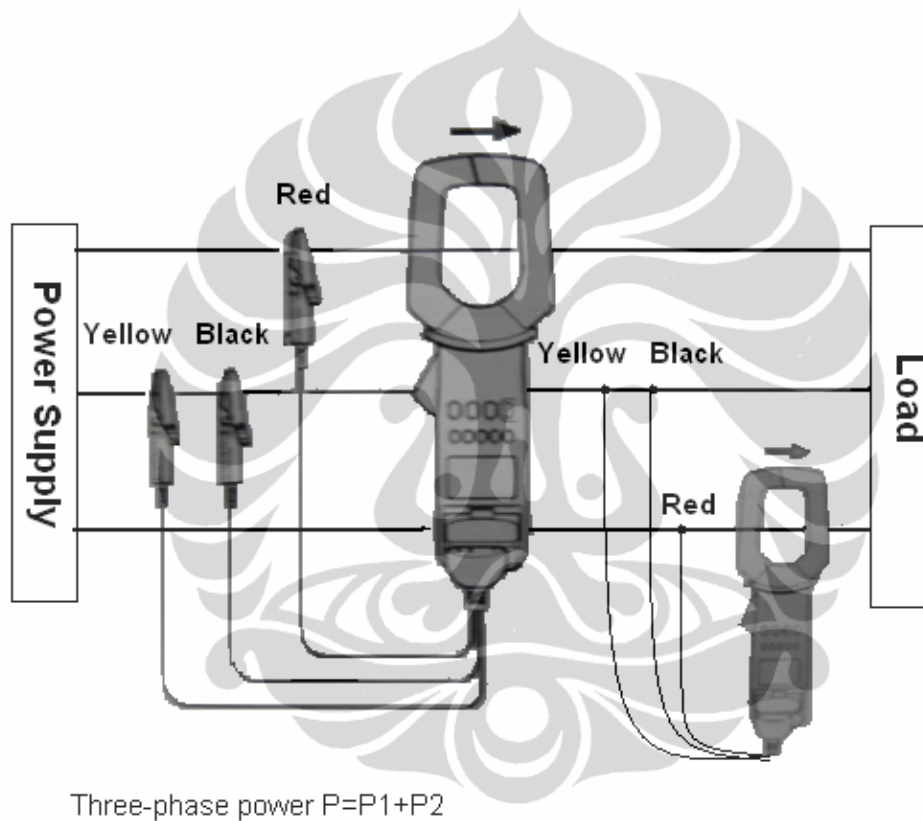
Gambar 3.9. Rangkaian *Reference Signal-Ended* ^[10]

3.6 Pengukuran Tegangan, Arus dan Daya.

Pengukuran tegangan, arus dan daya menggunakan alat ukur *Digital Clamp On Power HiTester*. Besaran tegangan, arus dan daya ditampilkan pada layar display



Gambar 3.10. *Digital Clamp On Power HiTeste* ^[3]



Gambar 3.11. Pengawatan alat ukur *Clamp On Power HiTester*

Gambar 3.6 adalah cara pemasangan alat ukur tegangan, arus dan daya. Untuk pengukuran daya tiga phasa dibutuhkan 2 buah alat ukur. Tang ampere pada clamp on dihubungkan ke salah satu penghantar, dan 3 kabel pada clamp on dihubungkan ke masing-masing penghantar.

3.7 Pengukuran Sinyal Vibrasi

Pengukuran sinyal vibrasi dilakukan dengan menggunakan sinyal getaran dalam domain waktu dan domain frekuensi. Pada penelitian ini digunakan software LabVIEW yang dapat digunakan untuk konversi sinyal vibrasi dari domain waktu ke domain frekuensi.

Pengukuran sinyal vibrasi dilakukan dalam beberapa tahap. Tahap awal dilakukan pengukuran *alignment*. Setelah posisi *alignment* diperoleh, dilakukan deteksi vibrasi. Tahap berikutnya deteksi vibrasi dilakukan pada keadaan *misalignment*.

Pengukuran sinyal dilakukan dengan menggunakan 2 sensor yaitu MEMS dan Piezoelektrik. Hal ini dilakukan untuk membandingkan kemampuan kerja kedua sensor tersebut.

3.8 Signal Analysis

Perangkat analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah software LabVIEW. LabVIEW adalah bahasa programming berbasis grafik yang disupport oleh National Instruments. Sinyal vibrasi akan ditampilkan di layar monitor berupa sinyal gelombang dan spektrum.

Analisis sinyal dengan LabVIEW dilakukan dalam beberapa tahap antara lain :

- Konversi sinyal analog menjadi digital menggunakan Data Acquisition (DAQ) Card dari National Instrument (NI) oleh karena itu DAQ Card yang digunakan disebut juga NI-DAQ. Kedua sensor dihubungkan ke *port* analog DAQ Card. Kedua sensor dihubungkan ke *port* yang berbeda.
- Konversi data domain waktu ke domain frekuensi. Proses ini dilakukan dengan menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) yang fasilitasnya sudah tersedia di *software LabView*.
- Konversi data menggunakan metode STFT. Metode STFT akan mengkonversi data dari domain waktu ke domain frekuensi-waktu.
- Konversi data menggunakan Wavelet Transform.

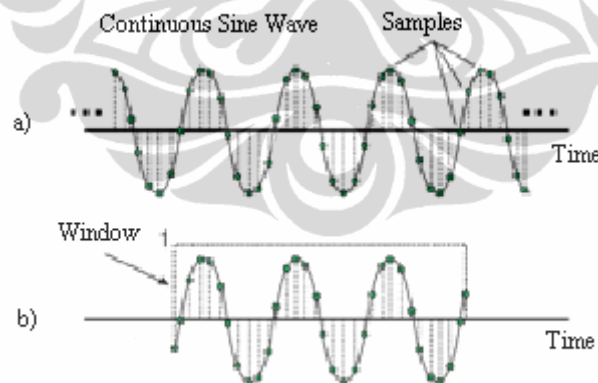
Umumnya mesin bertumpu pada bearing sehingga gaya vibrasi pada elemen tersebut diteruskan ke bearing. Oleh karena itu pemantauan sinyal vibrasi dilakukan pada rumah bearing. Sinyal vibrasi yang dipantau berupa sinyal vibrasi dalam domain waktu. Sinyal getaran ini kemudian dikonversi kedalam domain frekuensi.

Analisa sinyal vibrasi menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) dan Wavelet Transform.

3.8.1 FFT

Pada penelitian ini FFT digunakan untuk menghasilkan sinyal spektrum yang menampilkan nilai-nilai frekuensi tertentu dari sinyal vibrasi. Transformasi sinyal menggunakan fasilitas FFT pada LabVIEW.

FFT mengubah sinyal yang dihasilkan oleh sensor dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Jendela (window) yang digunakan adalah Hanning. Fungsi jendela adalah untuk memotong sinyal sehingga hanya sebagian sinyal yang diambil untuk dianalisa.



Gambar 3.12. Window pada FFT [8]

3.8.2 STFT dan WT

Pada penelitian ini wavelet transform digunakan untuk mengubah sinyal vibrasi dari domain waktu menjadi domain waktu-frekuensi. Dengan transformasi

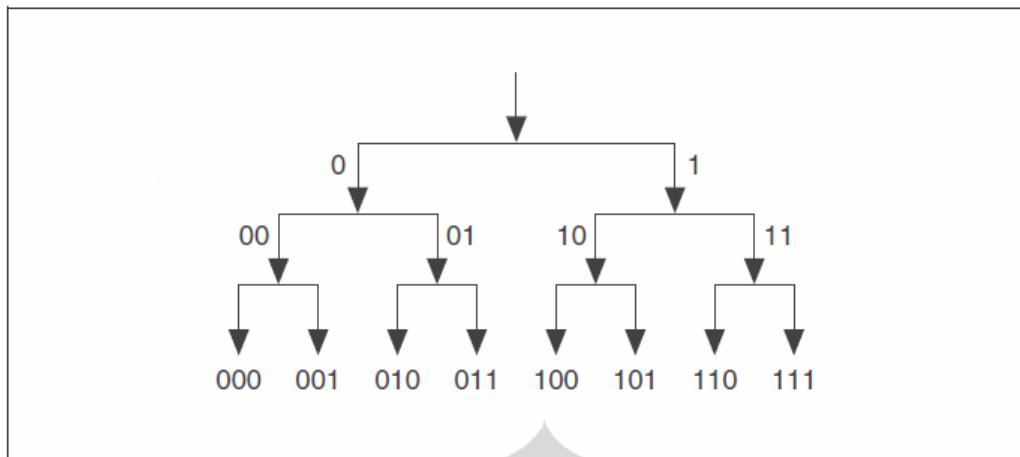
wavelet selain diketahui pada frekuensi berapa sinyal tersebut muncul juga dapat diketahui kapan dan berapa lama sinyal tersebut muncul.

Dengan metode Fast Fourier Transform (FFT) dapat diketahui frekuensi-frekuensi yang muncul. Dengan metode Short Time Fourier Transform (STFT) dan Wavelet Transform (WT) selain frekuensi, juga dapat diketahui kapan dan berapa lama frekuensi tersebut muncul.

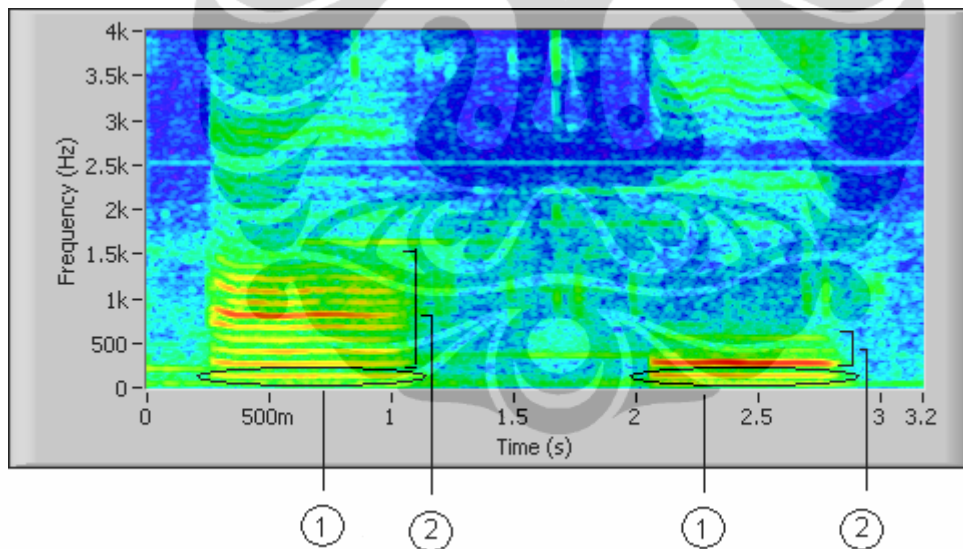
Wavelet dapat melokalisasi waktu-frekuensi (time-frequency localization). Kelebihan dari analisis sinyal menggunakan wavelet adalah karakteristik sinyal dapat dipelajari secara lokal dan detil. Sifat ini sangat berguna untuk sinyal-sinyal non-stasioner atau memiliki komponen transien dengan waktu-hidup (lifetime) yang pendek. Transformasi data menggunakan wavelet dilakukan dengan cara ekspansi dari wavelet yang diulur (dilated) dan digeser (translated).

Wavelet merupakan fungsi matematik yang membagi-bagi data menjadi beberapa komponen frekuensi yang berbeda-beda, kemudian dilakukan analisis untuk masing-masing komponen menggunakan resolusi yang sesuai dengan skalanya. Dengan Transformasi Wavelet akan diperoleh resolusi waktu dan frekuensi yang jauh lebih baik daripada metode-metode lainnya seperti Transformasi Fourier maupun Transformasi Fourier Waktu Pendek (STFT=Short Time Fourier Transform), selain itu analisis data pada domain waktu dan frekuensi penting dan harus dilakukan untuk mempelajari sifat sinyal-sinyal non-stasioner.

Dalam analisa wavelet, sebuah sinyal didekomposisi menjadi bagian aproksimasi dan detil, kemudian bagian aproksimasi ini dibagi lagi menjadi tingkat kedua aproksimasi dan detil, kemudian proses ini diulang-ulang. Pada analisa wavelet yang lebih lengkap, bagian detil juga ikut didekomposisi lebih lanjut seperti ditunjukkan pada gambar 3.13.



Gambar 3.13. Dekomposisi Sinyal ^[9]

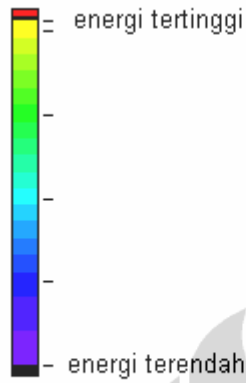


1 = frekuensi fundamental

2 = frekuensi harmonik

3.14. Metode WT ^[9]

Pada STFT dan WT dapat diketahui besaran energi dari sinyal pada saat t dan frekuensi f berdasarkan warna. Warna merah menunjukkan energi tertinggi, kemudian warna kuning, hijau, biru muda, biru tua dan yang terendah ungu.



Gambar 3.15. Tingkatan energi berdasarkan warna pada STFT dan WT

BAB 4

ANALISIS VIBRASI AKIBAT *MISALIGNMENT*

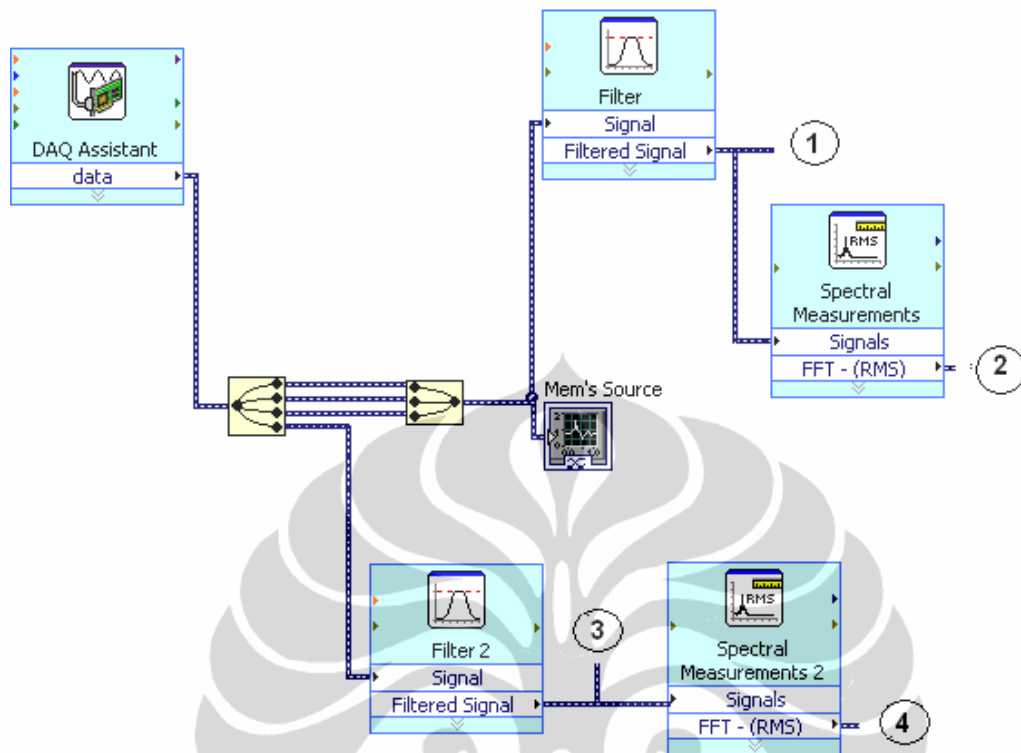
Analisa vibrasi akibat *misalignment* dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran saat kondisi *alignment* dan *misalignment* dengan menggunakan metode FFT, STFT dan WT.

4.1 Metode Pengukuran

Metode pengukuran pada penelitian ini adalah dengan menempatkan sensor MEMS dan piezoelektrik berdampingan pada rumah *bearing*. MEMS dan piezoelektrik masing-masing digunakan untuk mendeteksi vibrasi motor induksi. Penempatan sensor pada rumah *bearing* karena setelah dilakukan pengukuran di beberapa lokasi pada motor induksi, ternyata vibrasi paling besar dihasilkan jika sensor ditempatkan pada rumah *bearing* pada sambungan antara dua kopling. Keluaran sensor dilewatkan melalui NI-DAQ 6009 untuk selanjutnya diolah menggunakan software *LabVIEW*. *LabVIEW* akan mengubah sinyal sumber menjadi domain frekuensi menggunakan metode FFT. Sinyal sumber juga diubah menjadi domain frekuensi-waktu menggunakan STFT dan WT. Pengukuran dilakukan saat *alignment* dan *misalignment*. Analisa data dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran saat *alignment* dan *misalignment* dengan metode FFT, STFT dan WT. Analisa data dilakukan untuk masing-masing sensor./

Selain pengukuran vibrasi, dilakukan juga pengukuran putaran, tegangan, arus dan daya motor induksi. Parameter-parameter yang diukur pada kondisi *alignment* akan dibandingkan dengan parameter-parameter yang diukur pada kondisi *misalignment*.

4.2 Blok Diagram Program



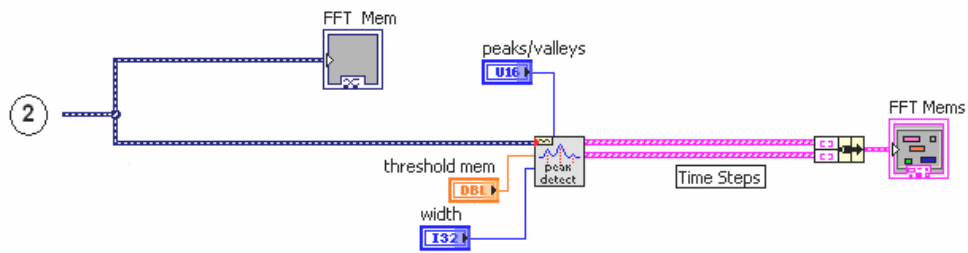
Gambar 4.1. Blok Diagram DAQ, Filter dan FFT

Blok diagram dibagi menjadi beberapa bagian untuk memudahkan pembahasan.

Blok diagram pada gambar 4.1 menunjukkan output dari DAQ Card (DAQ Assistant) yang terdiri dari 4 output yaitu:

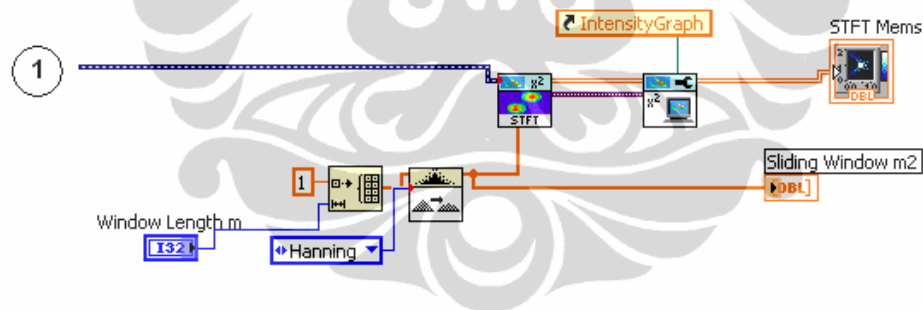
- output dari MEMS yang terdiri dari 3 axis x, y, z melalui Filter kemudian dikonversi dengan FFT (Spectral Measurements).
- output dari piezoelektrik yang terdiri dari 1 axis melalui Filter 2 kemudian dikonversi dengan FFT (Spectral Measurement 2).

Output dari masing-masing sensor melewati filter sebelum dikonversi ke bentuk spektrum menggunakan FFT. Frekuensi rendah yang berupa sinyal dc dipotong sehingga yang dianalisa adalah sinyal 11 Hz sampai 1600 Hz. Oleh karena itu digunakan *highpass filter* dengan frekuensi *cutoff* 10 Hz untuk menghilangkan sinyal dc. Angka 1, 2, 3 dan 4 menunjukkan hubungan antara terminal dengan terminal pada program berikut.



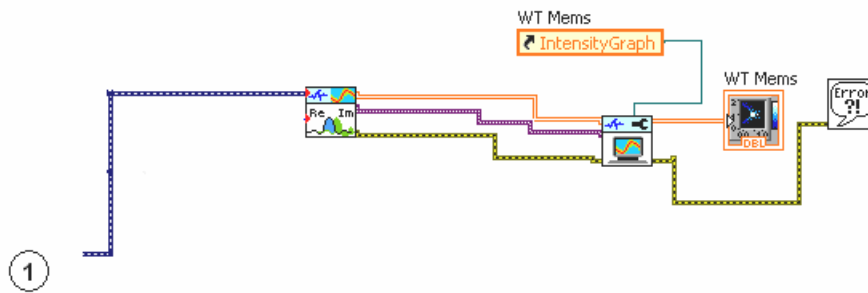
Gambar 4.2. Blok Diagram Hasil FFT dari Sensor MEMS

Gambar 4.2 merupakan blok diagram tampilan grafik hasil FFT serta tabel amplitudo dan frekuensi hasil FFT. Spektrum yang dihasilkan dari hasil konversi sinyal dengan FFT sangat banyak oleh karena itu digunakan fasilitas *peak detector* untuk mendeteksi puncak-puncak spektrum hasil FFT dan membatasi jumlah spektrum yang akan dianalisa.. *Threshold* diset pada nilai tertentu untuk memberi batasan agar hanya data spektrum yang diinginkan yang ditampilkan dalam tabel.



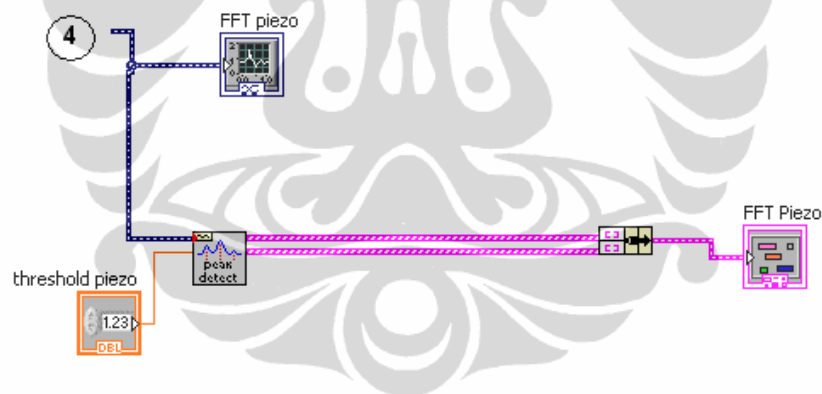
Gambar 4.3. Blok Diagram STFT dengan sensor MEMS

Gambar 4.3 merupakan blok diagram proses konversi sinyal vibrasi menggunakan metode STFT. Jendela yang digunakan adalah *Hanning*. *Sliding window* digunakan untuk mengatur resolusi frekuensi.



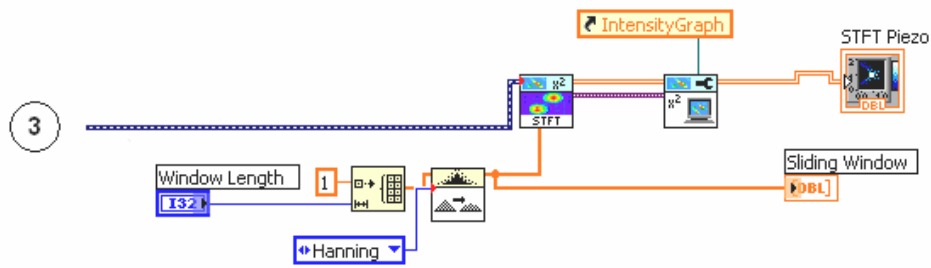
Gambar 4.4. Blok Diagram WT dengan Sensor MEMS

Gambar 4.4. menunjukkan blok diagram WT. Pada pemrograman ini digunakan fasilitas Analytic Wavelet Transform yang disediakan oleh *LabVIEW*. Selain itu digunakan *Configure Scalogram Indicator* sebagai fasilitas untuk menampilkan sinyal hasil transformasi wavelet.



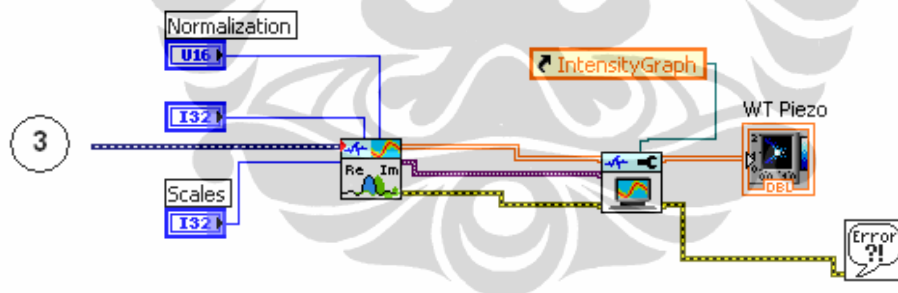
Gambar 4.5. Blok Diagram FFT Piezoelektrik

Gambar 4.5. menunjukkan blok diagram terminal grafik FFT dan output besaran frekuensi dan amplitudo FFT dengan menggunakan sensor piezoelektrik. Blok diagramnya sama dengan gambar 4.2. hanya sinyal input yang berasal dari sensor berbeda.



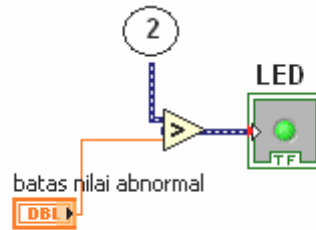
Gambar 4.6. Blok Diagram STFT untuk sensor piezoelektrik

Gambar 4.6 merupakan blok diagram proses konversi sinyal vibrasi menggunakan metode STFT. Blok diagram ini sama dengan blok diagram STFT untuk sensor MEMS. Jendela yang digunakan adalah *Hanning*. *Sliding window* digunakan untuk mengatur resolusi frekuensi.



Gambar 4.7. Blok Diagram WT dengan Sensor MEMS

Gambar 4.7. menunjukkan blok diagram WT. Blok diagram ini sama dengan blok diagram WT untuk sensor MEMS.



Gambar 4.8. Blok Diagram Indikator Kerusakan pada Mesin

Indikator kerusakan pada mesin dapat diketahui dengan menambahkan alarm yang akan berbunyi jika terjadi kerusakan. Alarm akan berbunyi jika amplitudo melebihi batas amplitudo normal yang telah ditentukan.

4.3 Konsumsi Energi

Saat *alignment* :

$$P = 0,733 \text{ kW}$$

$$V = 386 \text{ Volt}$$

$$I = 2,5 \text{ A}$$

$$n = 1500 \text{ rpm}$$

Motor induksi dijalankan selama 30 menit (30 menit = 0,5 hour (h)).

$$\text{Konsumsi energi} = P \cdot t = 0,733 \text{ kW} \times 0,5 \text{ h} = 0,367 \text{ kWh.}$$

Saat *misalignment* :

$$P = 0,747 \text{ kW}$$

$$V = 388 \text{ Volt}$$

$$I = 2,51 \text{ A}$$

$$n = 1500 \text{ rpm}$$

Motor induksi dijalankan selama 30 menit saat *misalignment*.

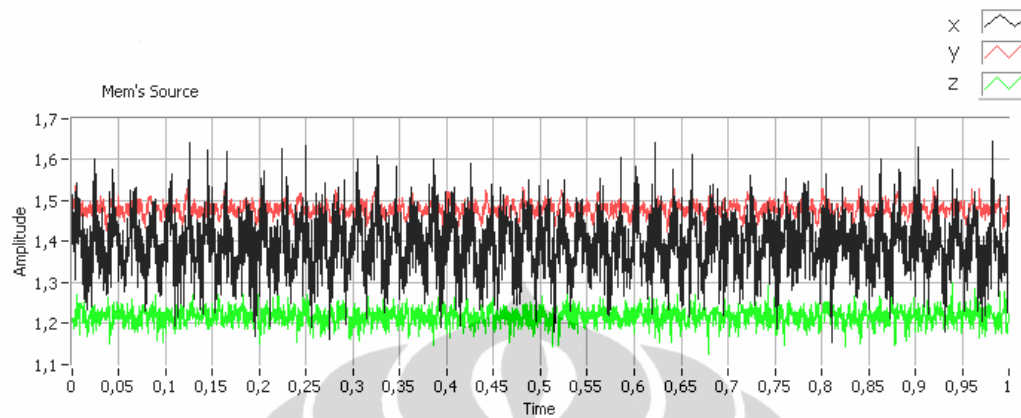
$$\text{Konsumsi energi} = P \cdot t = 0,747 \text{ kW} \times 0,5 \text{ h} = 0,374 \text{ kWh.}$$

Konsumsi energi saat *misalignment* lebih besar dibanding konsumsi energi saat *alignment*.

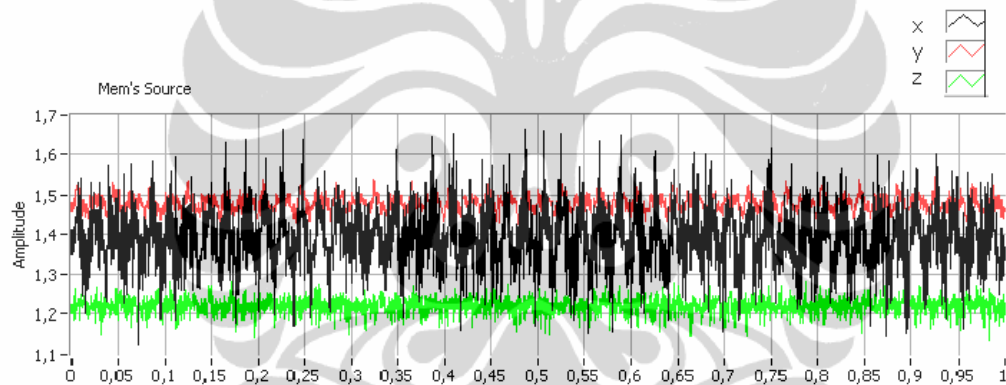
Putaran motor induksi saat *alignment* dan *misalignment* sama sebesar 1500 rpm.

4.4 Deteksi Vibrasi dengan Sensor MEMS saat *Alignment* dan *Misalignment*.

4.4.1. Sinyal Sumber



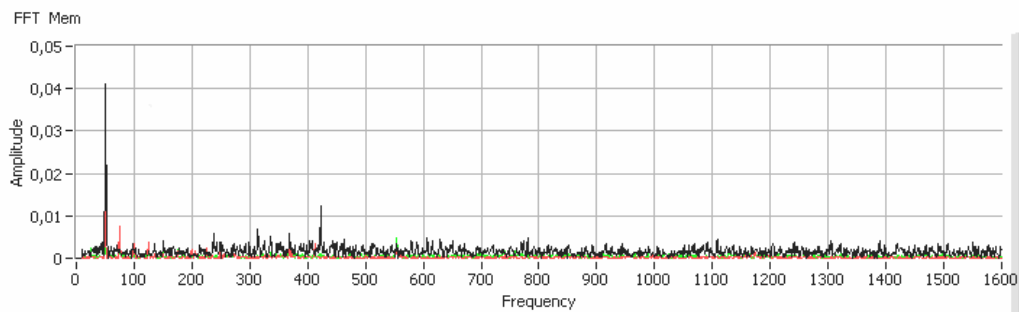
Gambar 4.9. Sinyal sumber dari sensor MEMS saat *alignment*



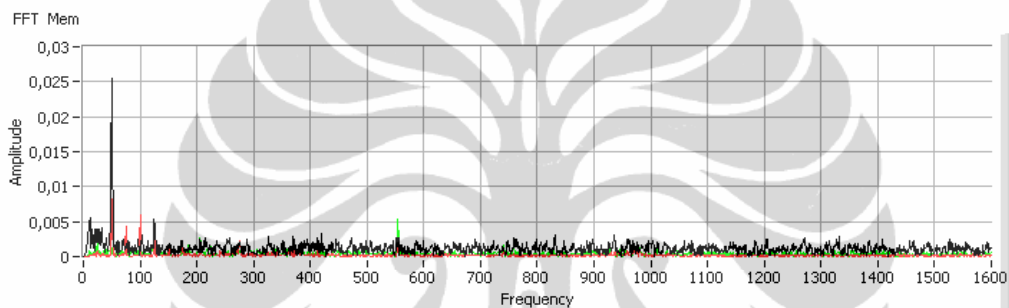
Gambar 4.10. Sinyal sumber dari sensor MEMS saat *misalignment*

Sensor MEMS menghasilkan tiga sinyal vibrasi yaitu x (warna hitam), y (warna merah) dan z (warna hijau). Pada kurva diatas, sumbu horizontal menunjukkan perubahan waktu dalam satuan ms (milisecond) dan sumbu vertikal menunjukkan nilai tegangan dalam satuan volt. Dari gambar 4.9 dan 4.10. terlihat sinyal dengan amplitudo terbesar terdeteksi oleh x. Sinyal dengan amplitudo terkecil dideteksi oleh z.

4.4.2. FFT



Gambar 4.11. FFT dengan sensor MEMS saat *alignment*



Gambar 4.12. FFT dengan sensor MEMS saat *misalignment*

Gambar 4.11 dan 4.12, merupakan hasil konversi dari sinyal sumber ke bentuk spektrum dalam domain frekuensi. Sumbu horizontal menunjukkan frekuensi dalam satuan Hz, dan sumbu vertikal menunjukkan amplitudo tegangan dalam satuan volt.

Gambar 4.11. FFT saat *alignment* terlihat :

- pada x terdeteksi frekuensi sampai 422 Hz (tabel 4.1.). Terlihat frekuensi 50 Hz dengan amplitudo cukup besar (0,04 V) .
- Pada y dan z terdeteksi frekuensi dengan amplitudo yang sangat kecil.

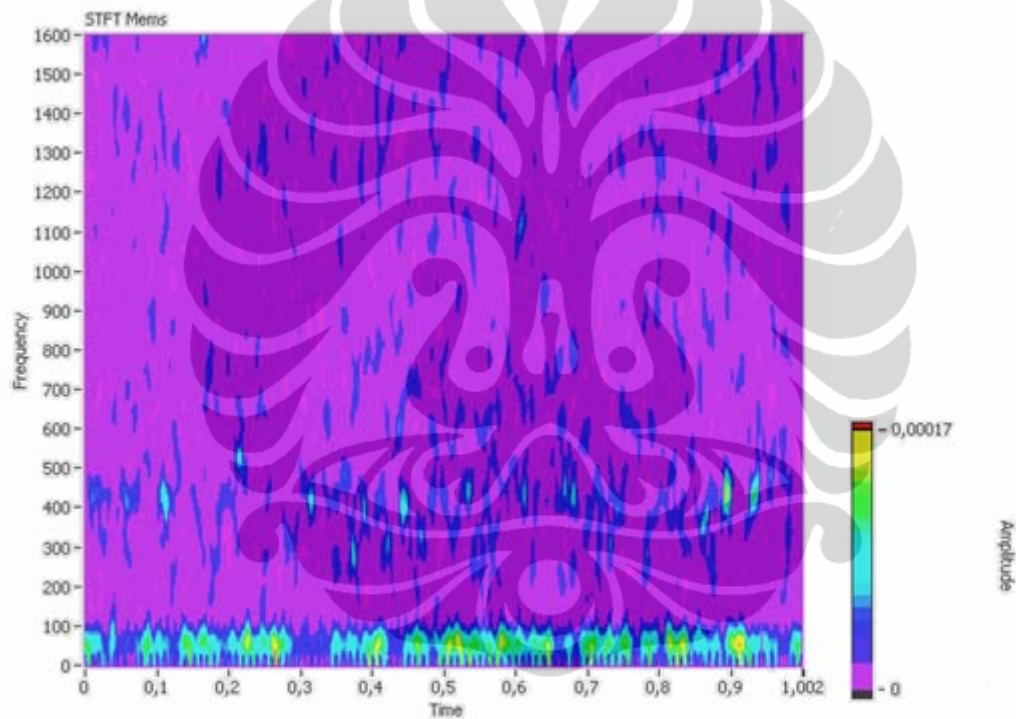
Gambar 4.12. FFT saat *misalignment* terlihat :

- Pada x terdeteksi frekuensi 11 Hz, 50 Hz dan 125 Hz.
- Pada y terdeteksi frekuensi 75 Hz dan 100 Hz.
- Pada z terdeteksi frekuensi 550 Hz.
- Saat *misalignment*, amplitudo x mengecil dan amplitudo z membesar.

Tabel 4.1. Data hasil FFT pada axis x dengan sensor MEMS.

<i>Alignment</i>		<i>Misalignment</i>	
Frekuensi	Amplitudo	Frekuensi	Amplitudo
50	0,041	11	0,006
238	0,006	50	0,03
314	0,007	125	0,005
336	0,005		
368	0,006		
422	0,013		

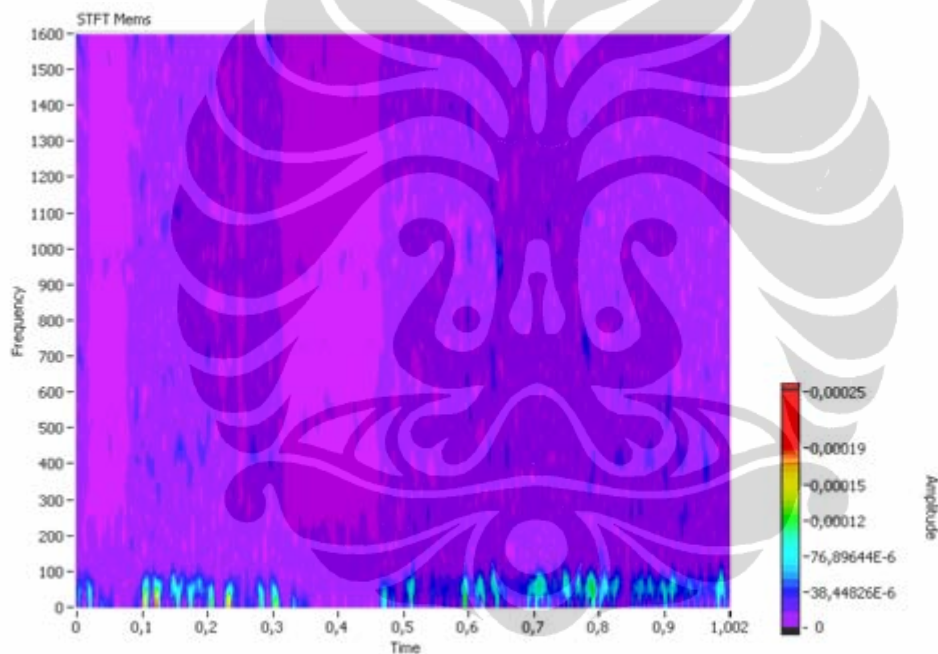
4.4.3. STFT

Gambar 4.13. STFT dengan sensor MEMS saat *alignment*

Gambar 4.13 menunjukkan hasil konversi dari sinyal sumber ke domain frekuensi-waktu menggunakan metode STFT. Sumbu horizontal menunjukkan waktu dalam satuan ms dan sumbu vertikal menunjukkan frekuensi dalam satuan Hz. Hal yang sama juga ditunjukkan pada metode STFT lainnya dan WT pada semua pembahasan pada bab 4.

Metode STFT dengan sensor MEMS terlihat :

- Frekuensi fundamental 50 Hz dengan energi tinggi (kuning), cukup tinggi (hijau) dan sedang (biru muda) pada sekitar 0,92 ms dan energi dalam tingkatan sedang (biru tua) hampir merata pada hampir sepanjang waktu 0 ms sampai 1,002 ms, kecuali pada saat sekitar 0,03 ms, 0,05 - 0,07 ms, 0,2 ms, 0,3 – 0,34 ms, 0,44 ms, 0,48 ms, 0,66 ms, 0,68 ms, 0,76 ms, 0,8 ms dan 0,99 ms mempunyai energi cukup rendah yang ditandai dengan warna biru.
- Frekuensi 420 Hz saat 0,12 ms, 0,32 ms, 0,44 ms, 0,91 ms dan 0,94 ms dengan energi cukup tinggi.
- Frekuensi-frekuensi lain dengan tingkat energi sedang sampai rendah.

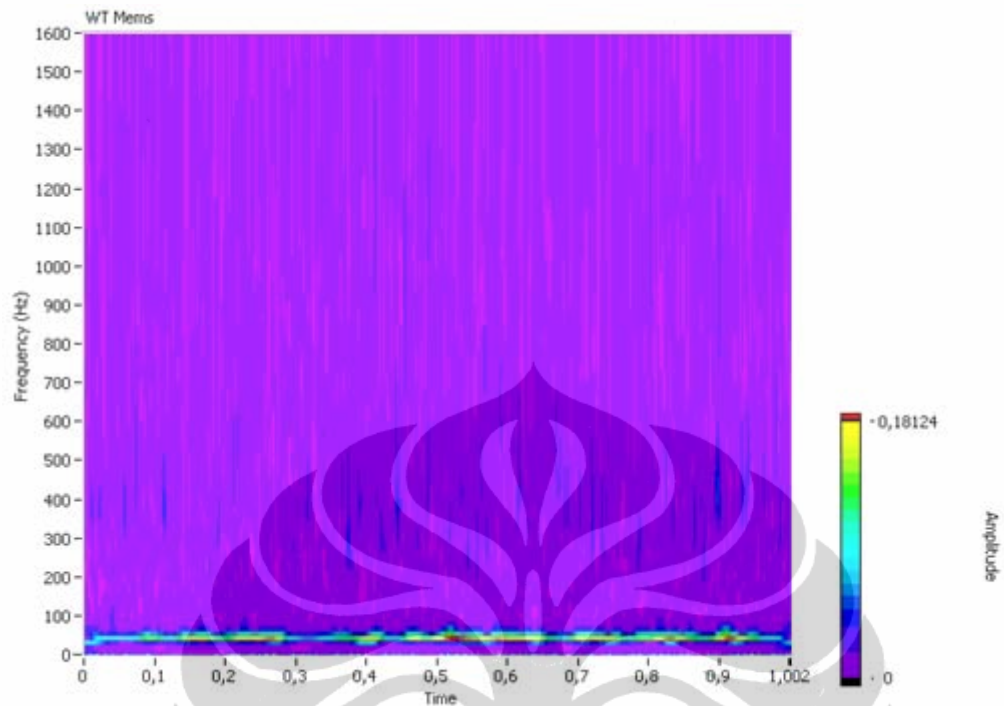


Gambar 4.14. STFT dengan sensor MEMS saat *misalignment*

Metode STFT dengan sensor MEMS saat *misalignment* terlihat :

- Frekuensi fundamental dengan energi yang cukup tinggi hampir merata pada sepanjang waktu 0 ms sampai 1,002 ms.
- Frekuensi-frekuensi lain dengan tingkat energi agak rendah (biru tua), rendah (ungu tua) sampai sangat rendah (ungu muda).
- Frekuensi 250 Hz sampai 1600 Hz dengan frekuensi sangat rendah pada saat 0,02 ms sampai 0,08 ms dan 0,33 sampai 0,47 ms.

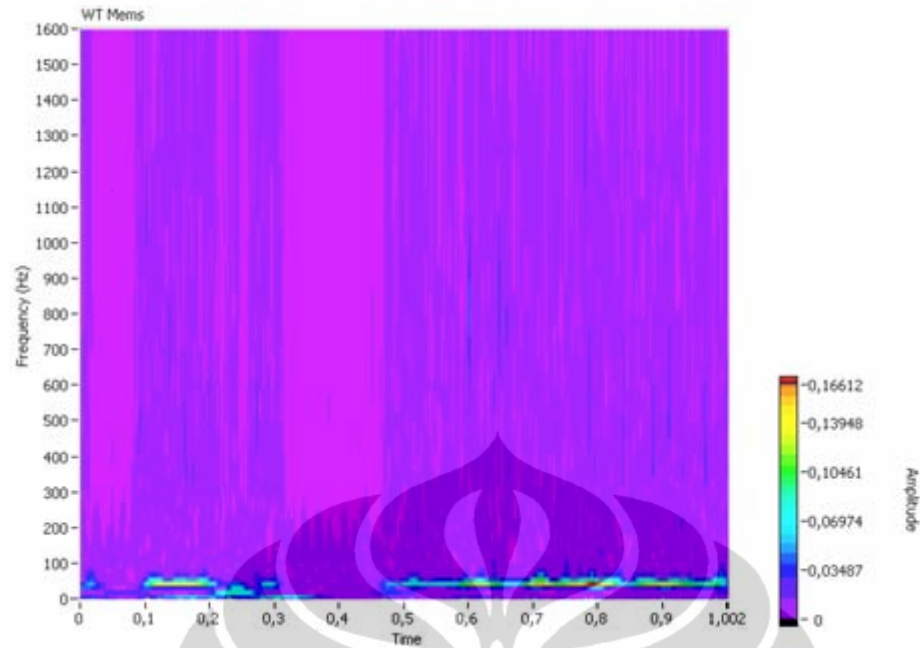
4.3.4. WT



Gambar 4.15. WT dengan sensor MEMS saat *alignment*

Metode WT dengan sensor MEMS terlihat :

- Frekuensi fundamental pada setiap saat dengan energi cukup tinggi sampai sangat tinggi. Terdapat energi yang sangat tinggi (merah) pada saat 0,27; 0,52; 0,59; 0,83; dan 0,92 ms.
- Frekuensi 300 Hz dan 400 Hz dengan energi agak rendah (biru tua).
- Frekuensi-frekuensi lain dengan energi yang rendah sampai sangat rendah.



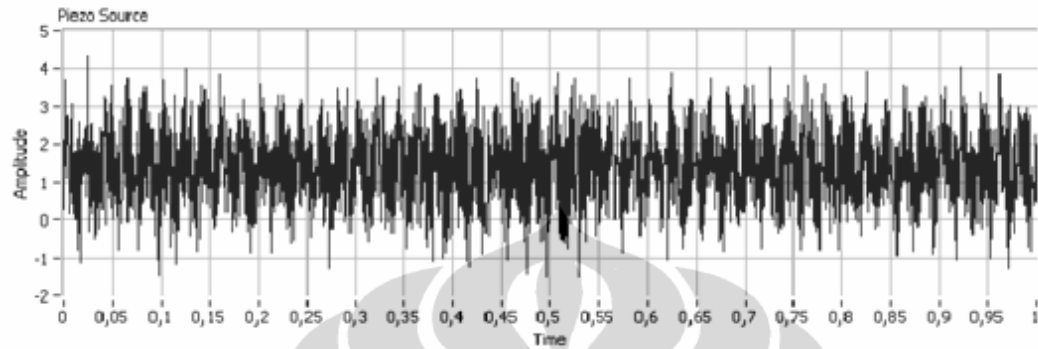
Gambar 4.16. WT dengan sensor MEMS saat *misalignment*

Metode WT dengan sensor MEMS saat *misalignment* terlihat :

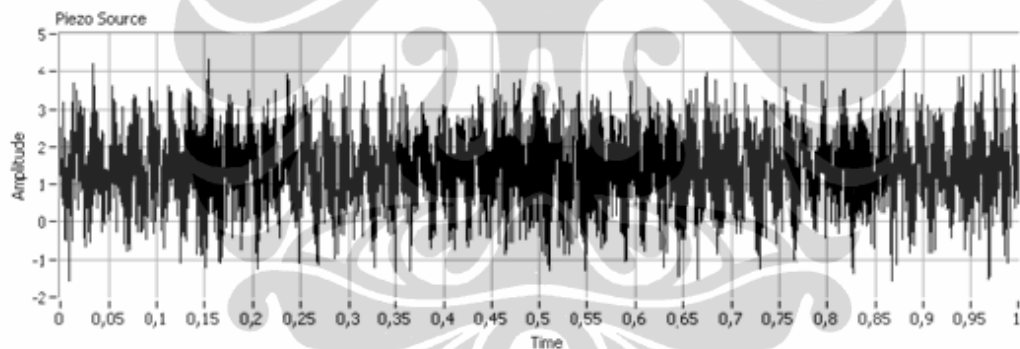
- Frekuensi fundamental dengan energi yang cukup tinggi sampai sangat tinggi hampir merata pada sepanjang waktu 0 ms sampai 1,002 ms.
- Frekuensi-frekuensi lain dengan tingkat energi agak rendah sampai rendah.
- Frekuensi 250 Hz sampai 1600 Hz dengan frekuensi sangat rendah pada saat 0,02 ms sampai 0,08 ms dan 0,33 sampai 0,47 ms.
- Terdapat energi yang sangat tinggi (merah) pada frekuensi 50 Hz saat 0,795 ms.

4.4 Deteksi Vibrasi dengan Sensor Piezoelektrik saat *Alignment* dan *Misalignment*

4.4.1 Sinyal Sumber



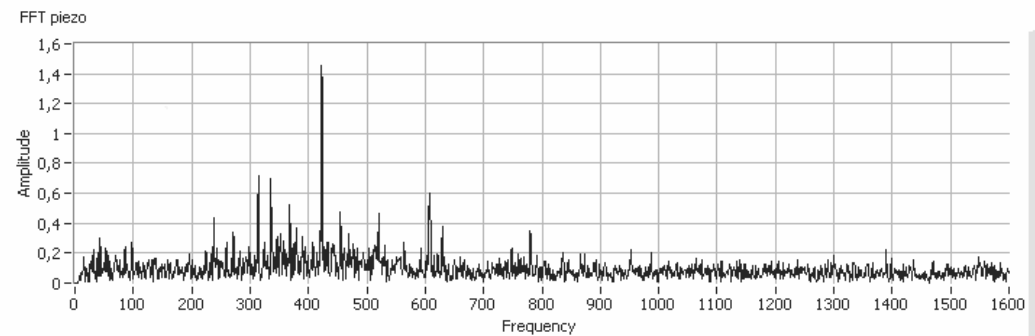
Gambar 4.17. Sinyal sumber dari sensor Piezoelektrik saat *alignment*



Gambar 4.18. Sinyal sumber dari sensor Piezoelektrik saat *misalignment*

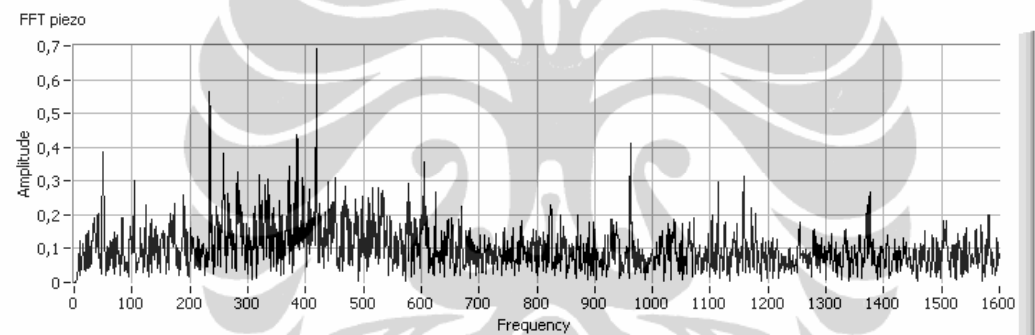
Sinyal dari sensor piezoelektrik hanya terdiri dari satu sinyal karena hanya menggunakan sensor 1 axis.

4.4.2. FFT



Gambar 4.19. FFT dengan Piezoelektrik saat *alignment*

Pada kondisi *alignment*, sinyal yang terdeteksi sampai frekuensi 780 Hz dengan amplitudo 0,28. Amplitudo terbesar pada frekuensi 422 Hz.



Gambar 4.20. FFT dengan piezoelektrik saat *misalignment*

Pada kondisi *misalignment*, sinyal yang terdeteksi sampai 1380 Hz dengan amplitudo sebesar 0,28 V. Amplitudo terbesar pada frekuensi 419 Hz.

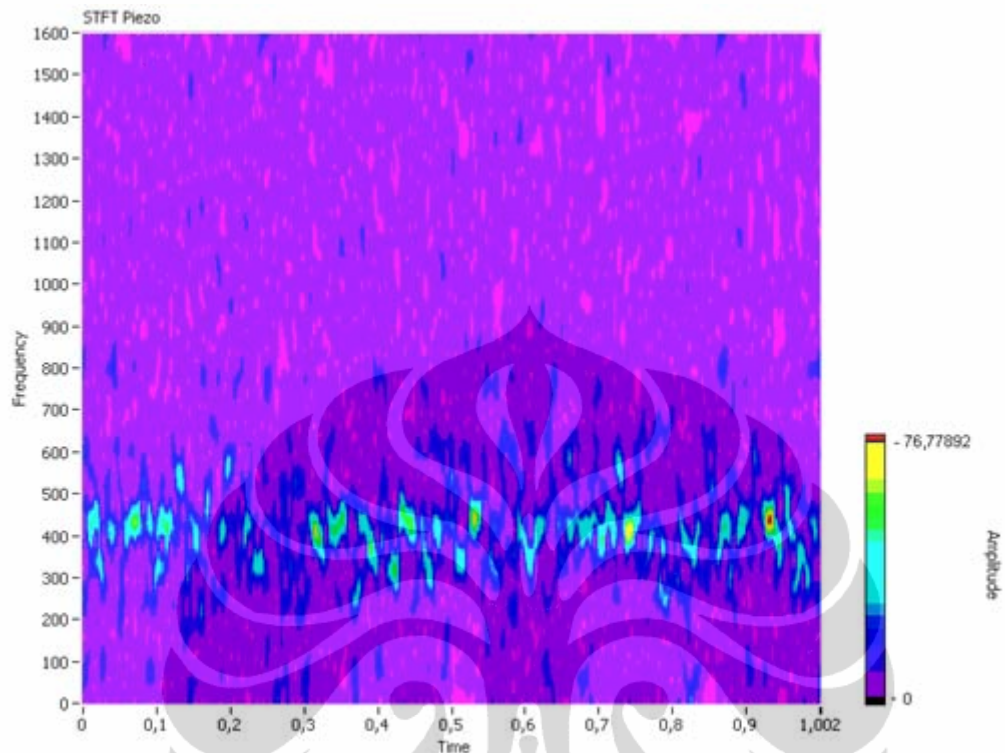
Pada FFT, sumbu horizontal menunjukkan waktu dengan satuan ms dan sumbu vertikal menunjukkan frekuensi dengan satuan Hz.

Tabel 4.2. Data hasil FFT dengan sensor piezoelektrik.

<i>Alignment</i>		<i>Misalignment</i>	
Frekuensi	Amplitudo	Frekuensi	Amplitudo
43	0,312	50	0,41
238	0,429	103	0,31
271	0,359	234	0,58
314	0,718	258	0,38
336	0,727	282	0,33
347	0,321	320	0,32
352	0,338	336	0,32
368	0,525	371	0,35
379	0,371	381	0,31
390	0,330	385	0,47
420	0,350	395	0,32
422	1,561	419	0,71
455	0,476	451	0,32
470	0,333	605	0,36
520	0,421	962	0,41
607	0,611	1158	0,31
629	0,381	1380	0,28
780	0,369		

Data pada tabel 4.2 menunjukkan hasil pengukuran pada axis x. Banyaknya data pengukuran diperoleh berdasarkan batas threshold. Penentuan batas threshold tergantung pada data pengukuran yang ingin disimpan untuk dianalisa. Batas threshold diperlukan untuk membatasi data yang akan disimpan. Hasil pengukuran pada axis y dan z tidak ditampilkan pada tabel karena amplitudonya sangat kecil sehingga kurang dari batas threshold yang ditentukan.

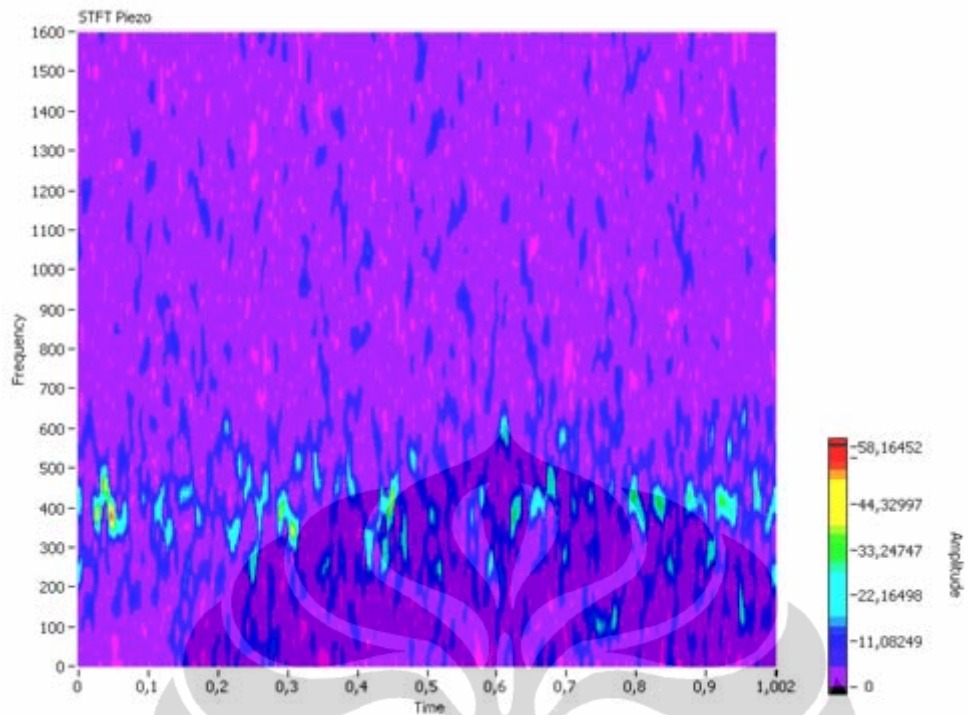
4.4.3. STFT



Gambar 4.21. STFT dengan piezoelektrik saat *alignment*

Metode STFT dengan sensor piezoelektrik saat *alignment* terlihat :

- Energi pada frekuensi fundamental agak rendah sampai rendah.
- Frekuensi sekitar 420 Hz yang menyebar hampir merata pada saat 0 ms sampai 1,002 ms dengan energi yang cukup tinggi, kecuali pada saat-saat tertentu terlihat energinya lebih rendah. Pada saat 0,94 ms tingkat energinya sangat tinggi (merah).
- Frekuensi 600 Hz dan 800 Hz pada beberapa saat tertentu dengan energi cukup rendah.

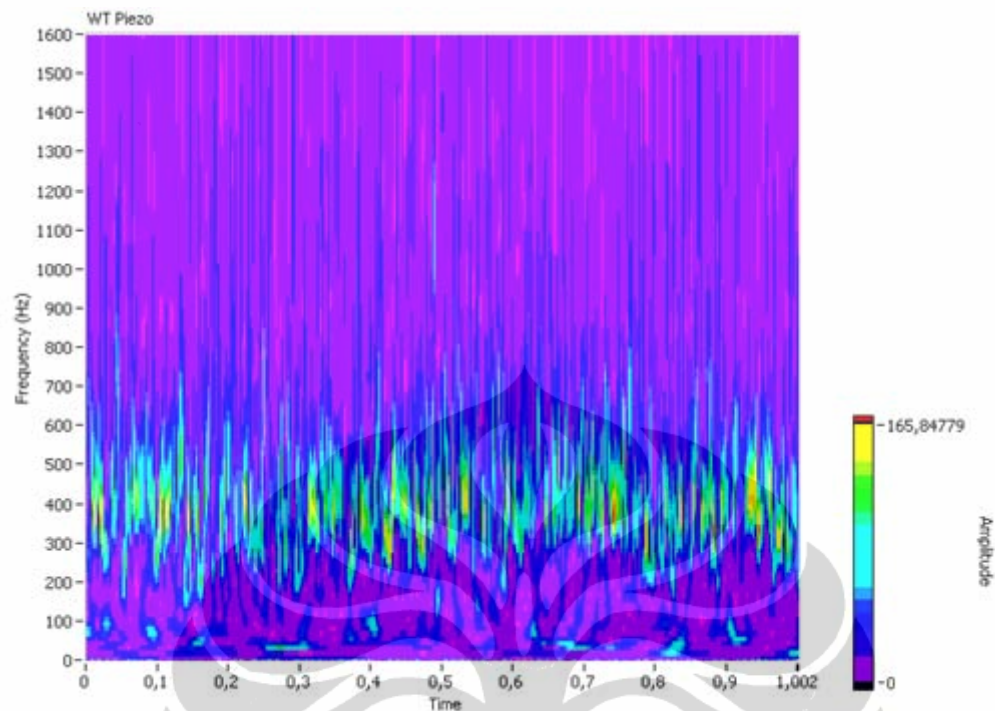


Gambar 4.22. STFT dengan sensor Piezoelektrik saat *misalignment*

Metode STFT dengan sensor piezoelektrik saat *misalignment* terlihat :

- Energi pada frekuensi fundamental agak rendah (biru) sampai sangat rendah (ungu muda).
- Frekuensi sekitar 400 Hz yang menyebar hampir merata pada saat 0 ms sampai 1,002 ms dengan energi yang rendah sampai sangat tinggi.
- Frekuensi-frekuensi lain dengan energi sedang sampai sangat rendah.

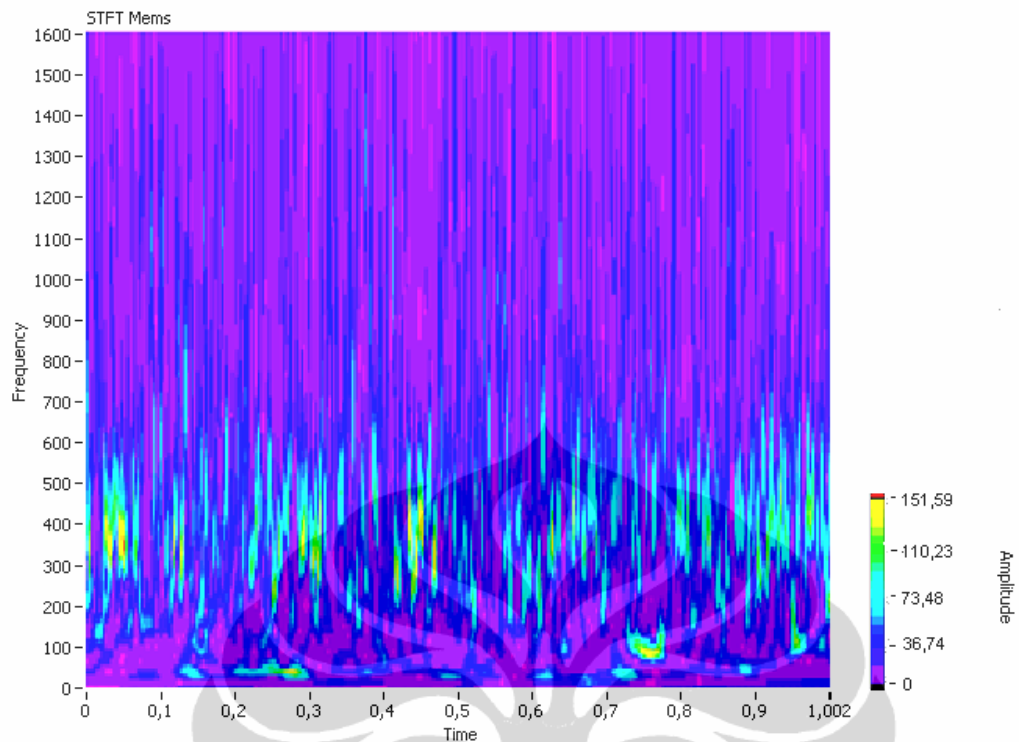
4.4.4. WT



Gambar 4.23. WT dengan sensor piezoelektrik saat *alignment*

WT dengan sensor piezoelektrik saat *alignment* terlihat :

- Energi pada frekuensi fundamental pada tingkatan sedang (biru muda) sampai sangat rendah (ungu muda).
- Frekuensi pada sekitar 150 Hz sampai 600 Hz dengan energi sedang (biru muda) sampai sangat tinggi.
- Pada frekuensi 700 Hz sampai 1600 Hz terdapat tingkat energi agak rendah (biru tua) dengan kerapatan kurang.



Gambar 4.24. WT dengan sensor piezoelektrik saat *misalignment*

WT dengan sensor piezoelektrik saat *misalignment* terlihat :

- Energi pada frekuensi fundamental pada tingkatan tinggi (kuning) sampai sangat rendah (ungu muda).
- Frekuensi pada sekitar 150 Hz sampai 600 Hz dengan energi agak rendah (biru tua) sampai sangat tinggi.
- Pada frekuensi 700 Hz sampai 1600 Hz terdapat tingkat energi agak rendah (biru tua) dengan kerapatan lebih tinggi dibanding saat *alignment*.

BAB 5 KESIMPULAN

Dari hasil analisa diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Dengan sensor MEMS :
 - Dengan metode FFT, saat *misalignment* terlihat sinyal pada y (75 dan 100 Hz) dan pada z (550 Hz). Saat *alignment* sinyal tertinggi terdeteksi pada axis x pada frekuensi 422 Hz dengan amplitudo 0,013 V. Sinyal dari axis lain (y dan z) sangat kecil sehingga diabaikan.
 - Dengan metode STFT, saat *misalignment* terlihat sinyal dengan tingkat energi sangat rendah (ungu muda) pada frekuensi 250 Hz sampai 1600 Hz pada saat 0,02 ms sampai 0,08 ms dan 0,33 sampai 0,47 ms. Hal ini tidak terjadi saat *alignment*.
 - Dengan metode WT saat *misalignment* terlihat sinyal dengan tingkat energi sangat rendah (ungu muda) pada frekuensi 250 Hz sampai 1600 Hz pada saat 0,02 ms sampai 0,08 ms dan 0,33 sampai 0,47 ms. Hal ini tidak terjadi saat *alignment*.
2. Dengan sensor piezoelektrik :
 - Dengan metode FFT, sinyal terdeteksi saat *misalignment* lebih tinggi (sampai 1350 Hz) dibanding saat *alignment* (sampai 780 Hz).
 - Dengan metode STFT, saat *misalignment* terlihat tingkat energi sedang dengan tingkatan warna biru pada frekuensi 0 sampai 1600 Hz hampir sepanjang waktu 0 sampai 1,002 ms, sedang pada saat *alignment*, tingkat energi sedang pada frekuensi tinggi lebih sedikit.
 - Dengan metode WT, saat *misalignment* terlihat sinyal dengan tingkat energi agak rendah (biru) pada frekuensi tinggi lebih banyak dibanding saat *alignment*.
3. Dengan metode STFT dan WT, saat munculnya frekuensi dapat diketahui. Hal ini tidak dapat ditunjukkan dengan metode FFT, Metode WT menampilkan frekuensi lebih banyak dibanding metode STFT.

4. Konsumsi energi lebih tinggi saat *misalignment* dibanding jika motor induksi dalam kondisi *alignment*. Konsumsi energi saat *alignment* sebesar 0,367 kWh. Konsumsi energi saat *misalignment* sebesar 0,374 kWh.

Berdasarkan hasil penelitian disarankan beberapa hal berikut :

1. Motor induksi yang digunakan sebagai obyek uji menggunakan *double flexible disc coupling*. Kopling jenis ini dapat mengurangi tingkat vibrasi sehingga dengan pergeseran posisi *alignment* yang kecil akan menyebabkan pengaruh *misalignment* terhadap vibrasi kemungkinan tidak terdeteksi. Jika menginginkan sinyal vibrasi yang cukup besar untuk keperluan penelitian, disarankan untuk menggunakan kopling kaku agar dengan pergeseran *alignment* yang kecil, sinyal vibrasi yang terdeteksi cukup besar.
2. Motor induksi yang digunakan mempunyai putaran 1500 rpm. Pada putaran 1500 rpm, vibrasi yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan motor dengan putaran lebih tinggi. Jika menginginkan untuk mendeteksi sinyal vibrasi cukup besar disarankan menggunakan motor dengan putaran 3000 rpm.

DAFTAR REFERENSI

1. Addison, Paul S. 2002. *The Illustrated Wavelet Transform Handbook*. Institute of Physics Publishing.
2. Analog Devices. 2006. *ADXL330 Accelerometer*.
www.analog.com
3. *Digital-Clamp-On-Power-HiTester*.
www.geraiproduk.com/hioki-3286-20-digital-clamp-power-hitester.html
4. Elsevier, 2001. *Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*. Proceedengs of the 14th Intrnational Congress.
5. Florida Bearings, Inc. 2004. *Vibration Analysis*.
<http://www.floridabearings.com/vibration-analysis.htm>
6. Furman, BJ. 2005. *Vibration Measurement*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering San Jose State University.
7. Hili, Molka Attia, 2005. *Shaft Misalignment Effect on Bearings Dynamical Behavior*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26, 1433-3015.
<<http://www.springerlink.com/content/k=shaft+misalignment+effect>>
8. Lyons, Richard TRW, 1998. *Windowing Funtions Improve FFT Result*. Sunnyvale, CA
9. National Instrument, 2005. *Advanced Signal Processing Toolkit. Wavelet Analysis Tools User Manual*.
10. National Instruments, 2008. *Using LabView for Machine Diagnostics, Portable Test, and Condition Monitoring*.
<<http://zone.ni.com/wv/app/doc/p/id/wv-110>>
11. National Instruments, *USB-6008/6009 User Guide and Spesifications*.
www.ni.com.
12. PRÜFTECHNIK, *Effect of Misalignment*.
<http://www.pruftechnik.com/en/alignment-systems/alignment-knowledge/effects-of-misalignment.html>
13. PRÜFTECHNIK, *Benefits*
<http://www.pruftechnik.com/en/alignment-systems/alignment-knowledge>.

14. Scheffer, Cornelius and Girdhar Paresh, 2004. *Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*. Elsevier.
15. Storey, John, 9 September 2005. *How Electric Motor Work*. Ed. George Hatsidimitris.
<http://www.phys.unsw.edu.au/hsc/hsc/electric_motors1.html>
16. Vibra.Metrics. 2010. *Accelerometers (Vibration Sensors) and Vibration Monitoring Solutions*.
<http://www.vibrametrics.com/indexs.aspx?go=resources&focus=Users>
17. Wikipedia. *Piezoelectric sensor*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_sensor
18. Wikipedia. *Short Time Fourier Transform*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Short-time_Fourier_transform.
19. Wildi, Theodore. 1981. *Electrical Power Technology*. John Storey and Sons.



DAFTAR REFERENSI

1. Addison, Paul S. 2002. *The Illustrated Wavelet Transform Handbook*. Institute of Physics Publishing.
2. Analog Devices. 2006. *ADXL330 Accelerometer*.
www.analog.com
3. *Digital-Clamp-On-Power-HiTester*. [Www.geraiproduk.com/hioki-3286-20-digital-clamp-power-hitester.html](http://www.geraiproduk.com/hioki-3286-20-digital-clamp-power-hitester.html)
4. Elsevier, 2001. *Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*. Proceedengs of the 14th Intrnational Congress.
5. Florida Bearings, Inc. 2004. *Vibration Analysis*.
<http://www.floridabearings.com/vibration-analysis.htm>
6. Furman, BJ. 2005. *Vibration Measurement*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering San Jose State University.
7. Hili, Molka Attia, 2005. *Shaft Misalignment Effect on Bearings Dynamical Behavior*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26, 1433-3015.
<<http://www.springerlink.com/content/k=shaft+misalignment+effect>>
8. Lyons, Richard TRW, 1998. *Windowing Funtions Improve FFT Result*. Sunnyvale, CA
9. National Instrument, 2005. *Advanced Signal Processing Toolkit. Wavelet Analysis Tools User Manual*.
10. National Instruments, 2008. *Using LabView for Machine Diagnostics, Portable Test, and Condition Monitoring*.
<<http://zone.ni.com/wv/app/doc/p/id/wv-110>>
11. National Instruments, *USB-6008/6009 User Guide and Spesifications*.
www.ni.com.
12. PRÜFTECHNIK, *Effect of Misalignment*.
<http://www.pruftechnik.com/en/alignment-systems/alignment-knowledge/effects-of-misalignment.html>
13. PRÜFTECHNIK, *Benefits*
<http://www.pruftechnik.com/en/alignment-systems/alignment-knowledge>.

14. Scheffer, Cornelius and Girdhar Paresh, 2004. *Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*. Elsevier.
15. Storey, John, 9 September 2005. *How Electric Motor Work*. Ed. George Hatsidimitris.
<http://www.phys.unsw.edu.au/hsc/hsc/electric_motors1.html>
16. Vibra.Metrics. 2010. *Accelerometers (Vibration Sensors) and Vibration Monitoring Solutions*.
<http://www.vibrametrics.com/indexs.aspx?go=resources&focus=Users>
17. Wikipedia. *Piezoelectric sensor*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_sensor
18. Wikipedia. *Short Time Fourier Transform*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Short-time_Fourier_transform.
19. Wildi, Theodore. 1981. *Electrical Power Technology*. John Storey and Sons.

