

**TESIS**

**PENERAPAN JARINGAN SYARAF TIRUAN UNTUK  
DIAGNOSIS CIRI KERUSAKAN BERDASARKAN  
KARAKTERISTIK GETARAN PADA ALAT *ROTATING*  
*MOTOR***

*The Application of Artificial Neural Network for Diagnosing Fault  
Based on Vibration Characteristics in Rotating Motor*

**AGUS EDWIN SARAGIH  
D022201008**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**PENGAJUAN TESIS**

**PENERAPAN JARINGAN SYARAF TIRUAN UNTUK  
DIAGNOSIS CIRI KERUSAKAN BERDASARKAN  
KARAKTERISTIK GETARAN PADA ALAT *ROTATING*  
*MOTOR***

Tesis  
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

**AGUS EDWIN SARAGIH  
D022201008**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

# TESIS

## **PENERAPAN JARINGAN SYARAF TIRUAN UNTUK DIAGNOSIS CIRI KERUSAKAN BERDASARKAN KARAKTERISTIK GETARAN PADA ALAT *ROTATING MOTOR***

**AGUS EDWIN SARAGIH  
D022201008**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 3 Agustus 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT  
NIP : 19520706 197802 1 001

Pembimbing Pendamping



Fauzan, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP : 19770103 200801 1 009

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli,  
ST., MT.,IPM.,ASEAN. Eng.  
NIP : 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Mesin



Dr.Eng. Novriany Amaliyah, S.T.,M.T.  
NIP : 19791112 200812 2 002

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Agus Edwin Saragih

Nomor mahasiswa : D022201008

Program studi : Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Penerapan Jaringan Syaraf Tiruan Untuk Diagnosis Ciri Kerusakan Berdasarkan Karakteristik Getaran pada Alat *Rotating Motor*” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT. sebagai Pembimbing Utama dan Fauzan, S.T., M.T., Ph.D. sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah disetujui dalam *Paper International symposium on advanced and innovation in mechanical engineering* sebagai artikel dengan judul “*Application of Artificial Neural Network on Vibration Spectrum Identification using the Backpropagation Method*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 3 Agustus 2023

Yang menyatakan



Agus Edwin Saragih

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan yang Maha Esa, yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT. selaku pemimbing utama dan Bapak Fauzan Djamaluddin, ST., MT., Ph.D. selaku pembimbing pendamping, yang penuh ketulusan meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan dan membimbing penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

Penelitian ini juga tidak lepas dari bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak, untuk itu izinkan penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Hammada Abbas, MSME. sebagai Penguji Pertama, Bapak Dr. Ir. Ahmad Yusran Aminy, MT. sebagai Penguji Kedua, dan Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST., MT. sebagai Penguji Ketiga atas masukan dan arahnya selama penelitian ini dilaksanakan.
2. Bapak Rektor Universitas Hasanuddin dan Bapak Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi penulis menempuh program Magister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
3. Ibu Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT. sebagai Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin yang telah memfasilitasi kami dengan baik sehingga penyelesaian tesis ini dapat terlaksana dengan tertib.
4. Kepada Kementerian Pendidikan Republik Indonesia, penulis mengucapkan terima kasih atas pemberian Beasiswa Unggulan selama menempuh program magister.

Melalui tesis ini perkenalkan penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya untuk kedua orang tua tercinta, Ayahanda Jatiarman Saragih dan Almarhumah Ibunda Saida Simanjuntak yang selama ini menyayangi, mendidik, membesarkan penulis dengan penuh kasih dan hati yang tulus, serta dukungan secara moril dan materi selama penulis menuntut ilmu. Kepada saudara

dan saudari (Chanda Heri Saragih dan Susi Andriani Saragih) yang selalu perhatian dan memberikan motivasi kepada penulis agar terus berjuang.

Tesis ini disusun dengan keterbatasan penulis sebagai manusia biasa, oleh karena itu dengan penuh kerendahan hati penulis mengharapkan kritik membangun dan saran dari semua pihak. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk menyempurnakan thesis ini. Semoga thesis ini bermanfaat bagi semua pihak.

Gowa, 3 Agustus 2023

Penulis

Agus Edwin Saragih

## ABSTRAK

**AGUS EDWIN SARAGIH.** *Penerapan Jaringan Syaraf Tiruan Untuk Diagnosis Ciri Kerusakan Berdasarkan Karakteristik Getaran Pada Alat Rotating Motor* (dibimbing oleh **Onny Sutresman, Fauzan Djameluddin**)

Motor berputar merupakan salah satu komponen dalam sebuah sistem industri yang kondisinya harus terjaga dengan baik. Kondisi motor yang normal, *unbalance*, *misalignment* serta *mechanical looseness* dapat dideteksi dengan melakukan diagnosis awal melalui analisis spektrum getaran. Spektrum getaran memberikan informasi yang unik mengenai kondisi motor dimana identifikasinya memerlukan keahlian khusus. Agar diagnosis ini dapat dilakukan dengan efektif dan efisien, maka diperlukan metode yang cepat dan akurat dalam mengidentifikasi kondisi motor tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem cerdas dalam mendiagnosis getaran motor berputar menggunakan jaringan syaraf tiruan. Pengujian dilakukan pada kondisi sistem *unbalance* dan *alignment* dengan variasi putaran motor 700 RPM, 1200 RPM dan 1795 RPM. Data spektrum getaran diambil dari hasil *software Omnitrend* serta pembuatan model jaringan menggunakan Matlab R2018a. Eksperimen dilakukan menggunakan metode jaringan syaraf tiruan tipe *backpropagation* dimana *data set* spektrum getaran kondisi *unbalance*, *misalignment*, *mechanical looseness* yang digunakan sebagai data pelatihan. *Backpropagation* merupakan algoritma pembelajaran dalam jaringan syaraf tiruan yang terbentuk dari tiga lapisan lapisan utama yaitu *input layer*, *hidden layer* serta *output layer*. Model arsitektur yang digunakan adalah 6-12-3 dengan tingkat akurasi kinerja model tersebut adalah 100% dengan *epoch* sejumlah 52 *iterasi* sedangkan pada *training confusion matrix* data yang dipergunakan 70% sejumlah 42 data, pada *validation* dan *test confusion matrix* data yang dipergunakan 30% sejumlah 18 data, total keseluruhan data yang dipergunakan sebanyak 60 data. Hasil pengujian menunjukkan bahwa diagnosis 36 data spektrum getaran memberikan hasil prediksi yang akurat dalam waktu yang singkat. Peningkatan kualitas hasil prediksi menggunakan jaringan syaraf tiruan ini dapat dilakukan dengan menambahkan data pelatihan.

Kata kunci: motor berputar, spektrum getaran, jaringan syaraf tiruan, *backpropagation*

## ABSTRACT

**AGUS EDWIN SARAGIH.** *The Application of Artificial Neural Network for Diagnosing Fault Based on Vibration Characteristics in Rotating Motor* (supervised by **Onny Sutresman, Fauzan Djameluddin**)

Rotating motor is one of the components in an industrial system that must be well-maintained. The motor's condition, whether it is normal, unbalanced, misaligned, or experiencing mechanical looseness, can be detected through an initial diagnosis using vibration spectrum analysis. Vibration spectrum provides unique information about the motor's condition, and its identification requires specialized expertise. To conduct this diagnosis effectively and efficiently, a fast and accurate method is needed to identify the motor's condition. This research aims to design an intelligent system for diagnosing the vibrations of rotating motors using artificial neural networks. The testing is conducted under unbalance and alignment conditions, with motor rotations varied at 700 RPM, 1200 RPM, and 1795 RPM. Vibration spectrum data is collected from Omnitrend software, and the neural network model is created using Matlab R2018a. The experiment employs the backpropagation neural network method, where the vibration spectrum dataset of unbalance, misalignment, and mechanical looseness conditions is used as the training data. Backpropagation is a learning algorithm used in artificial neural networks, consisting of three main layers: the input layer, hidden layer, and output layer. The architecture model used is 6-12-3, with a performance accuracy of 100% achieved after 52 iterations (epochs). During training, the confusion matrix uses 70% of the data, totaling 42 data points, while the validation and test confusion matrices use 30% of the data, totaling 18 data points. In total, there are 60 data points used for the entire process. The testing results show that diagnosing 36 data points of vibration spectra provides accurate predictions in a short period. To further enhance the quality of predictions using this artificial neural network, additional training data can be added.

**Keywords:** Rotating motor, Vibration spectrum, Artificial neural network, Backpropagation



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN TESIS .....</b>	<b>ii</b>
<b>PERSETUJUAN TESIS .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xiiiv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xixx</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....</b>	<b>xx</b>
<b>BAB I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Pemahaman Umum Dasar <i>Predictive Maintenance</i> .....	5
2.1.1 <i>Breakdown atau run to failure maintenance</i> .....	5
2.1.2 <i>Preventive atau time-based maintenance</i> .....	6
2.1.3 <i>Predictive atau condition-based maintenance</i> .....	6
2.1.4 <i>Proactive or prevention maintenance</i> .....	7
2.2 Prinsip <i>Predictive Maintenance</i> .....	7
2.3 Teknik <i>Predictive Maintenance</i> .....	8
2.3.1 Pemantauan parameter mesin dan proses .....	8
2.3.2 Pemantauan suhu .....	8
2.3.3 Pemantauan pelumas .....	8
2.3.4 Pemantauan deteksi kebocoran .....	9

2.3.5	Pemantauan kebisingan .....	9
2.3.6	Pemantauan emisi akustik.....	9
2.3.7	Pemantauan getaran .....	9
2.4	Deteksi Kesalahan Rotor .....	10
2.4.1	<i>Unbalance</i> .....	10
2.4.2	<i>Shaft bow or bend</i> .....	10
2.4.3	<i>Misalignment</i> .....	11
2.4.4	<i>Shaft crack</i> .....	11
2.4.5	<i>Shaft rub</i> .....	12
2.4.6	<i>Mechanical looseness</i> .....	13
2.5	Analisa Getaran .....	13
2.5.1	Getaran <i>sinusoidal</i> .....	13
2.5.2	Getaran periodik .....	15
2.5.3	Getaran harmonik .....	15
2.5.4	Getaran bebas.....	15
2.5.5	Dasar gelombang ( <i>wave fundamentals</i> ).....	17
2.5.6	Frekuensi ( <i>frequency</i> ) .....	20
2.5.7	Panjang gelombang ( <i>wavelength</i> ).....	20
2.5.8	Amplitudo ( <i>amplitude</i> ) .....	21
2.5.9	Frekuensi dan waktu ( <i>frequency and time</i> ).....	21
2.5.10	Fase ( <i>phase</i> ) .....	22
2.5.11	Bentuk gelombang ( <i>waveforms</i> ) .....	22
2.5.12	Harmonik ( <i>harmonics</i> ).....	22
2.6	Sinyal Getaran .....	23
2.6.1	Sinyal getaran domain waktu.....	23
2.6.2	Sinyal getaran domain frekuensi .....	23
2.7	Sensor Getaran.....	24
2.7.1	<i>Mounting</i> untuk pemantauan secara <i>continuous</i> .....	25
2.7.2	<i>Mounting</i> untuk pemantauan secara berkala .....	25
2.8	<i>Fast Fourier Transform(FFT)</i> dan <i>Discrete Fourier Transform(DFT)</i> ..	27
2.9	<i>Bump Test</i> .....	27
2.10	Satuan-satuan Pengukuran Getaran .....	28

2.11	Standarisasi Analisa Vibrasi .....	30
2.12	Diagnosis Mesin Dengan Analisis Getaran .....	32
2.12.1	<i>Unbalance</i> .....	32
2.12.2	<i>Misalignment</i> .....	32
2.12.3	<i>Mechanical looseness</i> .....	33
2.13	Konsep Dasar Arsitektur Jaringan Syaraf Tiruan .....	34
2.13.1	Jaringan lapisan tunggal ( <i>single layer network</i> ) .....	35
2.13.2	Jaringan banyak lapisan ( <i>multilayer network</i> ) .....	36
2.13.3	Kelebihan dan kelemahan jaringan syaraf tiruan.....	37
2.13.4	<i>Backpropagation</i> .....	38
2.13.5	Arsitektur <i>backpropagation</i> .....	38
2.13.6	Algoritma pelatihan <i>backpropagation</i> .....	39
<b>BAB III.</b>	<b>METODE PENELITIAN .....</b>	<b>43</b>
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	43
3.2	Simulator .....	44
3.3	Komponen Eksperimen .....	44
3.4	Prosedur Pengambilan Data.....	48
3.5	Jaringan Syaraf Tiruan <i>Backpropagation</i> .....	57
3.6	Waktu dan Tempat Penelitian.....	58
<b>BAB IV.</b>	<b>PEMBAHASAN .....</b>	<b>59</b>
4.1	Hasil Pengujian <i>Bump Test</i> .....	59
4.1.1	Hasil pengujian pada <i>bump test</i> .....	59
4.2	Hasil Pengujian Nilai RMS ( <i>Root Means Square</i> ) Pada Kecepatan 1795 RPM, 1200 RPM dan 700 RPM .....	62
4.2.1	Hasil pengujian pada spektrum getaran.....	66
4.2.2	Data konversi hasil pengujian.....	87
4.3	Prediksi Ciri Kerusakan Getaran Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan.....	123
4.3.1	Hasil pengukuran kinerja sistem pelatihan JST .....	125
4.3.2	Hasil uji akurasi sistem prediksi berdasarkan klasifikasi data ...	126
4.3.3	Hasil ambang batas akurasi sistem klasifikasi.....	127
4.4	Hasil Prediksi Sistem Jaringan Syaraf Tiruan .....	129

<b>BAB V. PENUTUP .....</b>	<b>132</b>
5.1 Kesimpulan.....	132
5.2 Saran.....	133
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>134</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>136</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.</b> Satuan pengukur getaran.....	29
<b>Tabel 2.</b> Standarisasi ISO untuk analisa getaran.....	30
<b>Tabel 3.</b> Spesifikasi motor listrik .....	45
<b>Tabel 4.</b> Spesifikasi <i>variable frequency drive (VFD)</i> .....	46
<b>Tabel 5.</b> Data teknik alat ukur <i>VibXpert II</i> .....	48
<b>Tabel 6.</b> Hasil pengukuran nilai <i>root means square</i> .....	63
<b>Tabel 7.</b> Ciri kerusakan getaran .....	86
<b>Tabel 8.</b> Data getaran motor <i>DE</i> horizontal kecepatan 1795 RPM.....	87
<b>Tabel 9.</b> Data getaran motor <i>DE</i> vertikal kecepatan 1795 RPM.....	88
<b>Tabel 10.</b> Data getaran motor <i>DE</i> aksial kecepatan 1795 RPM.....	89
<b>Tabel 11.</b> Data getaran motor <i>NDE</i> horizontal kecepatan 1795 RPM .....	90
<b>Tabel 12.</b> Data getaran motor <i>NDE</i> vertikal kecepatan 1795 RPM .....	91
<b>Tabel 13.</b> Data getaran motor <i>NDE</i> aksial kecepatan 1795 RPM.....	92
<b>Tabel 14.</b> Data getaran <i>pillow block DE</i> horizontal kecepatan 1795 RPM.....	93
<b>Tabel 15.</b> Data getaran <i>pillow block DE</i> vertikal kecepatan 1795 RPM.....	94
<b>Tabel 16.</b> Data getaran <i>pillow block DE</i> aksial kecepatan 1795 RPM.....	95
<b>Tabel 17.</b> Data getaran <i>pillow block NDE</i> horizontal kecepatan 1795 RPM .....	96
<b>Tabel 18.</b> Data getaran <i>pillow block NDE</i> vertikal kecepatan 1795 RPM .....	97
<b>Tabel 19.</b> Data getaran <i>pillow block NDE</i> aksial kecepatan 1795 RPM.....	98
<b>Tabel 20.</b> Data getaran motor <i>DE</i> horizontal kecepatan 1200 RPM.....	99
<b>Tabel 21.</b> Data getaran motor <i>DE</i> vertikal kecepatan 1200 RPM.....	100
<b>Tabel 22.</b> Data getaran motor <i>DE</i> aksial kecepatan 1200 RPM.....	101
<b>Tabel 23.</b> Data getaran motor <i>NDE</i> horizontal kecepatan 1200 RPM .....	102
<b>Tabel 24.</b> Data getaran motor <i>NDE</i> vertikal kecepatan 1200 RPM .....	103
<b>Tabel 25.</b> Data getaran motor <i>NDE</i> axial kecepatan 1200 RPM.....	104
<b>Tabel 26.</b> Data getaran <i>pillow block DE</i> horizontal kecepatan 1200 RPM.....	105
<b>Tabel 27.</b> Data getaran <i>pillow block DE</i> vertikal kecepatan 1200 RPM.....	106
<b>Tabel 28.</b> Data getaran <i>pillow block DE</i> aksial kecepatan 1200 RPM.....	107
<b>Tabel 29.</b> Data getaran <i>pillow block NDE</i> horizontal kecepatan 1200 RPM .....	108
<b>Tabel 30.</b> Data getaran <i>pillow block NDE</i> vertikal kecepatan 1200 RPM .....	109

<b>Tabel 31.</b> Data getaran <i>pillow block NDE</i> aksial kecepatan 1200 RPM.....	110
<b>Tabel 32.</b> Data getaran motor <i>DE</i> horizontal kecepatan 700 RPM.....	111
<b>Tabel 33.</b> Data getaran motor <i>DE</i> vertikal kecepatan 700 RPM.....	112
<b>Tabel 34.</b> Data getaran motor <i>DE</i> aksial kecepatan 700 RPM.....	113
<b>Tabel 35.</b> Data getaran motor <i>NDE</i> horizontal kecepatan 700 RPM .....	114
<b>Tabel 36.</b> Data getaran motor <i>NDE</i> vertikal kecepatan 700 RPM .....	115
<b>Tabel 37.</b> Data getaran motor <i>NDE</i> aksial kecepatan 700 RPM.....	116
<b>Tabel 38.</b> Data getaran <i>pillow block DE</i> horizontal kecepatan 700 RPM.....	117
<b>Tabel 39.</b> Data getaran <i>pillow block DE</i> vertikal kecepatan 700 RPM.....	118
<b>Tabel 40.</b> Data getaran <i>pillow block DE</i> aksial kecepatan 700 RPM.....	119
<b>Tabel 41.</b> Data getaran <i>pillow block NDE</i> horizontal kecepatan 700 RPM .....	120
<b>Tabel 42.</b> Data getaran <i>pillow block NDE</i> vertikal kecepatan 700 RPM .....	121
<b>Tabel 43.</b> Data getaran <i>pillow block NDE</i> aksial kecepatan 700 RPM.....	122
<b>Tabel 44.</b> Data <i>training</i> .....	123
<b>Tabel 45.</b> Data <i>target</i> .....	124
<b>Tabel 46.</b> Hasil prediksi sistem jaringan syaraf tiruan.....	130

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b> Filosofi pemeliharaan .....	5
<b>Gambar 2.</b> Jenis ketidaksejajaran rotor .....	11
<b>Gambar 3.</b> Plot orbit pada kecepatan rotor yang berbeda .....	12
<b>Gambar 4.</b> Gelombang sinusoidal .....	13
<b>Gambar 5.</b> Perbedaan phase antara sinusoidal displacement, velocity dan acceleration .....	15
<b>Gambar 6.</b> Spektrum <i>sinusoidal</i> (spektrum garis).....	15
<b>Gambar 7.</b> Spektrum sinyal periodik .....	16
<b>Gambar 8.</b> Proyeksi gerak harmonik pada lingkaran .....	18
<b>Gambar 9.</b> Getaran bebas dengan 1 <i>DOF</i> .....	19
<b>Gambar 10.</b> Perbandingan gelombang dengan amplitudo yang berbeda .....	20
<b>Gambar 11.</b> Frekuensi dan waktu.....	21
<b>Gambar 12.</b> Hubungan fase antara dua gelombang yang serupa .....	22
<b>Gambar 13.</b> Sinyal getaran domain waktu .....	23
<b>Gambar 14.</b> Sinyal getaran domain frekuensi .....	23
<b>Gambar 15.</b> Hubungan antara domain waktu dengan domain frekuensi .....	24
<b>Gambar 16.</b> Sensor stud mounting .....	25
<b>Gambar 17.</b> Sensor <i>hand probe</i> .....	25
<b>Gambar 18.</b> Sensor magnet .....	26
<b>Gambar 19.</b> <i>Quick disconnect sensor</i> .....	26
<b>Gambar 20.</b> <i>Time waveform of a bump test</i> .....	28
<b>Gambar 21.</b> FFT spektrum of a bump test .....	28
<b>Gambar 22.</b> <i>Peak to Peak, Average, dan RMS</i> .....	29
<b>Gambar 23.</b> <i>Root mean square</i> .....	29
<b>Gambar 24.</b> Standar vibrasi DIN ISO 10816-3 .....	31
<b>Gambar 25.</b> Spektrum akibat <i>unbalance</i> .....	32
<b>Gambar 26.</b> Ciri kerusakan angular dan parallel misalignment.....	33
<b>Gambar 27.</b> Spektrum <i>mechanical loosenees</i> akibat salah perakitan.....	33
<b>Gambar 28.</b> Spektrum <i>mechanical loosenees</i> akibat salah struktur mesin .....	34
<b>Gambar 29.</b> Arsitektur <i>single layer network</i> .....	35

<b>Gambar 30.</b> Arsitektur <i>multilayer network</i> .....	36
<b>Gambar 31.</b> Arsitektur backpropagation .....	39
<b>Gambar 32.</b> Diagram alir penelitian .....	43
<b>Gambar 33.</b> Simulator <i>rotating motor</i> .....	44
<b>Gambar 34.</b> Motor listrik 3 phasa .....	45
<b>Gambar 35.</b> Variable frequency drive (VFD) .....	45
<b>Gambar 36.</b> Pillow block bearing HBF P204.....	46
<b>Gambar 37.</b> Fleksible coupling .....	46
<b>Gambar 38.</b> VibXpert II vibration analyzer .....	47
<b>Gambar 39.</b> Rangkaian simulator.....	49
<b>Gambar 40.</b> Rancangan pengujian <i>bump test</i> .....	50
<b>Gambar 41.</b> Letak pengujian <i>bump test</i> .....	50
<b>Gambar 42.</b> Pengujian spektrum pada kecepatan putar kerja pada motor dan <i>pillow block</i> .....	51
<b>Gambar 43.</b> Letak pengujian spektrum kecepatan .....	52
<b>Gambar 44.</b> Skema alat ukur vibrasi .....	52
<b>Gambar 45.</b> Letak tombol “On/Off” <i>VIBXpert II</i> .....	53
<b>Gambar 46.</b> Tombol “route” .....	53
<b>Gambar 47.</b> Layar “select route” .....	54
<b>Gambar 48.</b> Layar “measurement location” .....	54
<b>Gambar 49.</b> Layar “measurement task selection” .....	55
<b>Gambar 50.</b> Posisi pemasangan sensor alat ukur .....	55
<b>Gambar 51.</b> Layar “measurement process” .....	56
<b>Gambar 52.</b> Prosedur “save result” .....	56
<b>Gambar 53.</b> Arsitektur jaringan <i>backpropagation</i> .....	57
<b>Gambar 54.</b> Arah pengujian <i>bump test</i> pada motor dan <i>pillow block</i> .....	59
<b>Gambar 55.</b> Spektrum <i>bump test</i> arah vertikal pada motor.....	59
<b>Gambar 56.</b> Spektrum <i>bump test</i> arah vertikal pada motor.....	60
<b>Gambar 57.</b> Spektrum <i>bump test</i> arah vertikal pada <i>pillow block</i> 1 sebelum dilakukan <i>alignment</i> .....	60
<b>Gambar 58.</b> Spektrum <i>bump test</i> arah vertikal pada <i>pillow block</i> 1.....	61



<b>Gambar 59.</b> Spektrum <i>bump test</i> arah vertikal pada <i>pillow block</i> 2 sebelum dilakukan <i>alignment</i> .....	61
<b>Gambar 60.</b> Spektrum <i>bump test</i> arah vertikal pada <i>pillow block</i> 2 sesudah dilakukan <i>alignment</i> .....	62
<b>Gambar 61.</b> Arah pengujian pada motor dan <i>pillow block</i> .....	62
<b>Gambar 62.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>DE (Drive End)</i> horizontal.....	66
<b>Gambar 63.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>DE (Drive End)</i> vertikal.....	66
<b>Gambar 64.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>DE (Drive End)</i> aksial.....	67
<b>Gambar 65.</b> Ciri kerusakan <i>unbalance</i> .....	67
<b>Gambar 66.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>NDE (Non Drive End)</i> horizontal	68
<b>Gambar 67.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>NDE (Non Drive End)</i> vertikal ....	68
<b>Gambar 68.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>NDE (Non Drive End)</i> aksial .....	69
<b>Gambar 69.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block DE (Drive End)</i> horizontal.	69
<b>Gambar 70.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block DE (Drive End)</i> vertikal.....	70
<b>Gambar 71.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block DE (Drive End)</i> aksial.....	70
<b>Gambar 72.</b> Ciri kerusakan <i>misalignment</i> .....	71
<b>Gambar 73.</b> Ciri kerusakan <i>mechanical looseness</i> .....	71
<b>Gambar 74.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block NDE</i> .....	71
<b>Gambar 75.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block NDE</i> .....	72
<b>Gambar 76.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block NDE (Non Drive End)</i> aksial.....	72
<b>Gambar 77.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>DE (Drive End)</i> horizontal.....	73
<b>Gambar 78.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>DE (Drive End)</i> vertikal.....	74
<b>Gambar 79.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>DE (Drive End)</i> aksial.....	74
<b>Gambar 80.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>NDE (Non Drive End)</i> horizontal	75
<b>Gambar 81.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>NDE (Non Drive End)</i> vertikal ....	75
<b>Gambar 82.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>NDE (Non Drive End)</i> aksial .....	76
<b>Gambar 83.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block DE (Drive End)</i> horizontal.	76
<b>Gambar 84.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block DE (Drive End)</i> vertikal.....	77
<b>Gambar 85.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block DE (Drive End)</i> aksial.....	77
<b>Gambar 86.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block NDE</i> .....	78

<b>Gambar 87.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block NDE (Non Drive End)</i> vertikal.....	78
<b>Gambar 88.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block NDE (Non Drive End)</i> aksial.....	79
<b>Gambar 89.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>DE (Drive End)</i> horizontal.....	79
<b>Gambar 90.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>DE (Drive End)</i> vertikal.....	80
<b>Gambar 91.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>DE (Drive End)</i> aksial.....	80
<b>Gambar 92.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>NDE (Non Drive End)</i> horizontal	81
<b>Gambar 93.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>NDE (Non Drive End)</i> vertikal ....	81
<b>Gambar 94.</b> Spektrum pengujian pada motor <i>NDE (Non Drive End)</i> aksial .....	82
<b>Gambar 95.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block DE (Drive End)</i> horizontal.	83
<b>Gambar 96.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block DE (Drive End)</i> vertikal.....	83
<b>Gambar 97.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block DE (Drive End)</i> aksial.....	84
<b>Gambar 98.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block NDE</i> .....	84
<b>Gambar 99.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block NDE</i> .....	85
<b>Gambar 100.</b> Spektrum pengujian pada <i>pillow block NDE (Non Drive End)</i> aksial .....	85
<b>Gambar 101.</b> Arsitektur jaringan syaraf tiruan .....	125
<b>Gambar 102.</b> Cross-entropy .....	126
<b>Gambar 103.</b> <i>Confusion matrix</i> .....	127
<b>Gambar 104.</b> <i>Receiver operating characteristic</i> .....	129

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1.</b> Illustrated vibration diagnostic chart .....	136
<b>Lampiran 2.</b> <i>Report shaft alignment rotating motor</i> .....	141
<b>Lampiran 3.</b> <i>Coding</i> program MATLAB jaringan syaraf tiruan.....	144
<b>Lampiran 4.</b> <i>Graphical User Interface</i> pada MATLAB .....	146
<b>Lampiran 5.</b> Pengambilan data spektrum getaran.....	148

## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
JST	= jaringan syaraf tiruan
ERM	= empiris risk minimization
RPM	= revolution per minute
kHz	= kilohertz
$\ell(t)$	= parameter yang digunakan untuk mendefinisikan gerakan
Sin	= sinus
Cos	= cosinus
Hz	= hertz
$\pi$	= Pi dengan nilai 3.14
RMS	= root means square
ISO	= international organization for standarzation
kW	= kilowatt
MW	= megawatt
PC	= personal computer
PB RV	= motor pada arah vertikal
PB1 RV	= pillow block 1 pada arah vertikal
PB2 RV	= pillow block 2 pada arah vertikal
NDE V	= non drive end pada arah vertikal
NDE H	= non drive end pada arah horizontal
NDE A	= non drive end pada arah aksial
DE V	= drive end pada arah vertikal
DE H	= drive end pada arah horizontal
DE A	= drive end pada arah aksial

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Mesin berputar banyak digunakan di industri saat ini. Kerusakan mesin dapat mengakibatkan waktu perbaikan yang mahal. Sistem perbaikan yang efisien diperlukan untuk memprediksi kondisi dan *lead time* yang konsisten dari mesin. Oleh karena itu, pemantauan kondisi yang efektif dan efisien dan sistem diagnosis kesalahan sangat patut ditiru dalam suatu industri, analisis getaran sebagian besar digunakan untuk deteksi kesalahan di mesin berputar (Vishwakarma et al., 2017).

Mengenali dan mengkategorikan pola-pola kerusakan sebelum kegagalan peralatan adalah tujuan dari deteksi kesalahan dan pemeliharaan prediktif, dan memungkinkan perusahaan dan industri untuk mengurangi pengeluaran dalam perbaikan peralatan dan penggantian. Konsep ini berkorelasi dengan metode pemeliharaan berbasis prediktif (Plante et al., 2015). Akurasi diagnosis mesin dibuat menggunakan analisis getaran tergantung pada kemampuan benar menganalisis data getaran, terutama spektrum frekuensi (Tsyarkin, 2017).

Strategi perawatan yang benar akan memastikan peralatan beroperasi dengan kondisi baik dan memberikan tingkat produksi yang lebih tinggi (Waarli, 2010). Analisis getaran memiliki peran penting untuk mengetahui kondisi setiap bagian mesin. Analisis getaran dapat memberikan solusi terbaik untuk mengidentifikasi awal dari setiap cacat sebelum terjadi kerusakan secara permanen dan dapat membantu mencegah kegagalan serius dari mesin. Jadi, harus ada pengecekan & analisis yang berkesinambungan atau terjadwal, supaya bisa dengan mudah mengidentifikasi cacat seperti kerusakan, kelurusan, atau kondisi getaran yang rusak setiap bagian mesin untuk menentukan kondisi suku cadang saat ini (Of et al., 2019).

Elemen yang sering digunakan pada sebuah mesin berputar yaitu bantalan (*bearing*). Bantalan merupakan bagian yang sangat penting dari bagian mesin berputar dimana memiliki fungsi untuk menumpu sebuah poros agar poros tidak mengalami gesekan yang berlebihan. Penelitian ini menyajikan berbagai

eksperimen analisis data yang didapat melalui penggunaan sensor yang mengambil data. Data getaran diambil pada alat simulator rotating motor.

Prediksi pada dasarnya adalah praduga tentang terjadinya suatu peristiwa di masa yang akan datang. Prediksi sangat membantu dalam kegiatan perencanaan dan pengambilan keputusan suatu kebijakan. Oleh karena itu diperlukan analisa yang baik dengan menggunakan metode yang telah teruji, sehingga akurasi yang dihasilkan dapat benar-benar di pertanggungjawabkan.

Analisa model JST adalah representasi skematis jaringan syaraf tiruan yang terdiri dari, *input layer* (variabel bebas), *hidden layer* dan *output layer* (variabel terkait). Akurasi generalisasi dioptimalkan atas kesalahan empiris dan kerataan regresi. Di sisi lain, model JST didasarkan pada prinsip *empiris risk minimization* (ERM) yang hanya meminimalkan kesalahan empiris dan tidak mempertimbangkan kapasitas mesin pembelajaran. JST adalah metode cerdas dalam komputasi tingkat lanjut yang menganalisa informasi secara kuantitatif dengan pembelajaran dan pelatihan, dengan cara yang sama seperti sistem kecerdasan manusia.

Algoritma *backpropagation* merupakan metode yang dapat memberikan hasil yang lebih akurat dalam peramalan karena metode ini melakukan latihan berulang-ulang untuk mendapatkan model terbaik dan juga dapat dianalisa dalam matematika. *Backpropagation* adalah algoritma untuk *training* JST, yang dapat digunakan untuk memprediksi dengan tingkat *error* yang kecil.

Algoritma *Backpropagation* digunakan untuk mengembangkan model jaringan syaraf tiruan. Topologi khas jaringan syaraf tiruan *backpropagation* terdiri dari tiga jenis *layer*: *layer* pertama adalah *input layer*, tempat data dimasukkan ke jaringan; *layer* kedua adalah *hidden layer*, tempat data diproses; dan *layer* ketiga adalah *output layer*, tempat hasil input yang diberikan diproduksi. Algoritma *backpropagation* baik digunakan untuk pelatihan. Ini adalah algoritma berulang yang mudah dan sederhana yang biasanya bekerja dengan baik, bahkan dengan data yang kompleks. Tidak seperti algoritma pembelajaran lainnya (seperti pembelajaran *Bayesian*), algoritma ini memiliki sifat komputasi yang baik ketika menangani data berskala besar. Metode pelatihan *backpropagation* melibatkan umpan maju pola pelatihan *input*, perhitungan dan kesalahan *backpropagation*, dan penyesuaian bobot dalam sinapsis.

Penelitian ini menyajikan berbagai eksperimen analisis data. Data dari sensor dianalisis. Hasil analisis tersebut untuk membantu proses pengambilan keputusan perbaikan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dikemukakan, maka rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini ialah:

1. Bagaimana menentukan karakteristik getaran pada alat *rotating motor* ?
2. Bagaimana menganalisis getaran *unbalance, misalignment* dan *mechanical looseness* pada alat *rotating motor* menggunakan alat *VibXpertII* ?
3. Bagaimana menerapkan model jaringan syaraf tiruan untuk memprediksi kondisi *unbalance, misalignment* dan *mechanical loosenees* pada alat simulator *rotating motor* ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini ialah:

1. Menentukan karakteristik getaran pada alat *rotating motor*.
2. Menganalisis getaran *unbalance, misalignment* dan *mechanical loosenees* pada alat *rotating motor* menggunakan alat *VibXpertII*.
3. Menerapkan model Jaringan Syaraf Tiruan untuk memprediksi kondisi *unbalance, misalignment* dan *mechanical loosenees* pada alat *rotating motor*.

## 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi hal-hal berikut:

1. Pengukuran getaran menggunakan alat ukur *VibXpertII*.
2. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan sensor jenis *accelerator* pada arah vertikal, horizontal dan aksial.
3. Transfer data dilakukan dengan menggunakan software *Omnitrend* kemudian diolah menggunakan *MATLAB*.
4. Kecepatan putaran poros yang dilakukan pada penelitian ini 1795 rpm, 1200 rpm dan 700 rpm.

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian analisa getaran pada alat *rotating motor* ialah hasil dari penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya dengan pengujian analisa getaran yang berbeda atau jenis kerusakan-kerusakan komponen yang lebih luas dan spesifik.



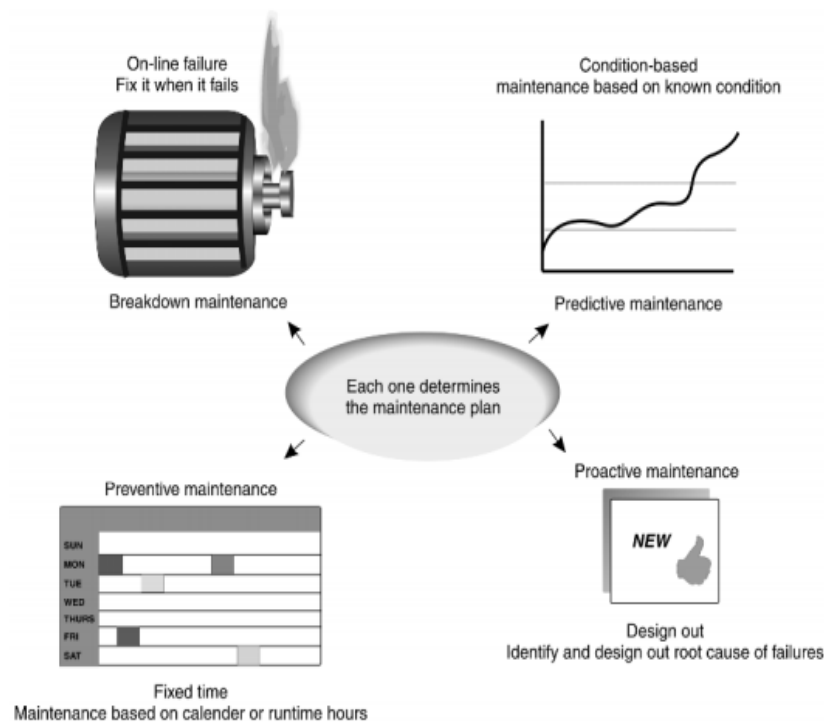
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pemahaman Umum Dasar *Predictive Maintenance*

Jika kita melakukan survei filosofi pemeliharaan (*maintenance*) yang diterapkan di berbagai pabrik, maka kita akan menemukan sejumlah kesamaan, di samping banyak variasi dalam sifat operasinya.

Berbagai kategori filosofi pemeliharaan secara singkat dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1** Filosofi pemeliharaan

Menurut (Scheffer & Girdhar, 2004) menyebutkan filosofi pemeliharaan dapat digolongkan menjadi 4 kategori:

##### 2.1.1 *Breakdown* atau *run to failure maintenance*

Filosofi di balik *Breakdown* atau *run to failure maintenance* membiarkan mesin bekerja sampai mengalami kegagalan, dan melakukan perbaikan atau penggantian sesaat sebelum atau jika mesin berhenti bekerja. Pendekatan ini hanya bermanfaat bila biaya tenaga kerja dan material bukan masalah. Kerugiannya

adalah bahwa departemen *maintenance* akan mengalami krisis yang tidak terencana. Tentu saja kegiatan perawatan seperti ini adalah yang paling tidak efisien.

### **2.1.2 Preventive atau *time-based maintenance***

Filosofi *Preventive* atau *run time-based maintenance* adalah menjadwalkan kegiatan pemeliharaan pada interval waktu yang telah ditentukan, berdasarkan kalender atau jam kerja (*running hours*) mesin. Di sini perbaikan atau penggantian mesin dilakukan sebelum masalah sebenarnya terjadi. Filosofi ini baik untuk mesin atau peralatan yang tidak bekerja secara kontinu, dan jika personil mempunyai cukup keterampilan (*skill*) dan waktu untuk melakukan pekerjaan perawatan. Kerugiannya, adalah bahwa pekerjaan pemeliharaan mungkin saja dilakukan terlalu cepat atau teralalu lambat. Sangat mungkin terjadi, meskipun suatu peralatan dapat diganti sekalipun masih mempunyai sisa umur pemakaian.

### **2.1.3 Predictive atau *condition-based maintenance***

Filosofi *Predictive* atau *condition based maintenance*(CBM) adalah bahwa aktivitas pemeliharaan dilakukan hanya bila dideteksi adanya kegagalan fungsi. Kondisi operasional dan fungsional secara periodik dimonitor, jika ditemukan adanya kecenderungan ke arah yang tidak sehat, maka bagian-bagian mesin yang mengalami kelainan diidentifikasi dan dijadwalkan untuk pemeliharaan. Mesin tersebut kemudian dimatikan pada waktu yang paling memungkinkan, dan komponen yang rusak diganti.

Keuntungan filosofi ini adalah:

- Kegiatan pemeliharaan dapat dilakukan secara tertib.
- Suku cadang dapat dipersiapkan sebelumnya dan dibeli hanya yang diperlukan saja sehingga mengurangi jumlah suku cadang di gudang penyimpanan (*inventory*),
- Kapasitas produksi bisa ditingkatkan karena perawatan hanya dilakukan jika diperlukan.

Kerugiannya:

- Adanya kemungkinan bertambahnya pekerjaan pemeliharaan akibat adanya kesalahan dalam mendeteksi tingkat kerusakan mesin.

- Diperlukan berbagai peralatan dan personil khusus untuk memonitor kecenderungan peningkatan vibrasi, temperatur dan librikasi.

#### **2.1.4 Proactive or prevention maintenance**

Filosofi *Proactive* atau *prevention maintenance* adalah terletak pada penekanan penelusuran akar penyebab kegagalan. Setiap kegagalan dianalisis, dan pencegahan proaktif dilakukan untuk menjamin kejadian serupa tidak terulang. Hal ini memerlukan semua teknik pemeliharaan *prediktif* dan *preventif* yang telah didiskusikan di atas, dilanjutkan dengan analisis akar penyebab kegagalan atau *root cause failure analysis* (RCFA). *RCFA* akan mendeteksi dan menentukan penyebab kegagalan, sehingga dapat diketahui dan implementasikan instalasi dan teknik perbaikan/reparasi yang tepat, bahkan mempertimbangkan kemungkinan redesign atau modifikasi mesin untuk menghindari kemungkinan kerusakan yang sama.

Keuntungan dari penerapan Filosofi *Proactive* atau *prevention maintenance* adalah mencakup keuntungan filosofi *prediktif*, bahkan lebih menyeluruh. Kerugiannya, diperlukan peralatan yang lebih khusus dan personil yang memiliki kemampuan.

## **2.2 Prinsip Predictive Maintenance**

Menurut (Scheffer & Girdhar, 2004) menyebutkan *Predictive Maintenance* pada dasarnya adalah pemeliharaan *preventif* yang digerakkan oleh kondisi. Statistik umur rata-rata industri atau di dalam pabrik tidak digunakan untuk menjadwalkan kegiatan pemeliharaan dalam kasus ini. Pemeliharaan prediktif memantau kondisi mekanis, efisiensi peralatan, dan parameter lainnya serta berupaya mendapatkan perkiraan waktu kegagalan fungsional.

Program perawatan prediktif yang komprehensif menggunakan kombinasi alat yang paling hemat biaya untuk mendapatkan kondisi operasi aktual dari peralatan dan sistem instalasi. Berdasarkan data yang dikumpulkan ini, jadwal pemeliharaan dipilih. Dengan cara yang sama, kerusakan yang terjadi pada mesin selalu menunjukkan gejala berupa getaran atau parameter lainnya. Teknik-teknik ini mendeteksi gejala cacat yang terjadi pada mesin dan membantu dalam

mendiagnosis cacat yang tepat yang telah terjadi. Dalam banyak kasus, juga memungkinkan untuk memperkirakan tingkat keparahan cacat. Teknik khusus yang digunakan tergantung pada jenis peralatan pabrik, dampaknya terhadap produksi atau parameter kunci lainnya dari operasi pabrik. Yang lebih penting adalah tujuan dan sasaran yang perlu dicapai oleh program pemeliharaan prediktif.

Pemeliharaan prediktif menggunakan berbagai teknik seperti analisis getaran, analisis puing-puing oli dan keausan, ultrasonik, termografi, evaluasi kinerja, dan teknik lainnya untuk menilai kondisi peralatan. Teknik pemeliharaan prediktif sebenarnya memiliki analogi yang sangat dekat dengan teknik diagnostik medis.

### **2.3 Teknik *Predictive Maintenance***

Beberapa teknik perawatan prediktif (Sinha, 2020) menyebutkan:

#### **2.3.1 Pemantauan parameter mesin dan proses**

Ini sering ditemukan sebagai indikator terbaik kondisi kesehatan mesin dan kinerjanya misalnya, informasi putaran mesin per menit, level dan suhu cairan pendingin, kondisi mesin, dll.

#### **2.3.2 Pemantauan suhu**

Suhu juga berguna dalam banyak kasus untuk mengidentifikasi cacat seperti gesekan mekanis pada mesin, cacat pada bantalan anti-gesekan, kebocoran pada pipa, dll.

Sensor suhu dapat mengukur suhu pada titik mesin dan struktur. Oleh karena itu diperlukan lebih banyak sensor untuk memetakan distribusi temperatur dari suatu mesin atau permukaan struktural.

#### **2.3.3 Pemantauan pelumas**

Pelumas digunakan di beberapa mesin. Kondisi pelumas terus memburuk selama penggunaannya yang dapat mempengaruhi kinerja mesin; Oleh karena itu diperlukan pendampingan secara berkala agar dapat tergantikan pada waktunya.

Dua proses pemantauan berikut berguna.

#### 1. Sifat pelumas

Ini terutama terkait dengan pemantauan konsentrasi aditif dan sifat pelumas lainnya.

#### 2. Analisis puing

Ini adalah ukuran jumlah partikel logam dan ukurannya dalam pelumas. Partikel keausan dari permukaan gosok dalam pelumas dapat digunakan untuk mengidentifikasi cacat pada bantalan, roda gigi, dll.

### **2.3.4 Pemantauan deteksi kebocoran**

Deteksi kebocoran pada cairan pengangkut pipa sangat penting untuk beberapa aplikasi. Sensor tekanan, pantulan gelombang akustik, dll. bisa untuk mendeteksi kebocoran. Teknik ultrasound mungkin berguna tetapi merupakan proses yang memakan waktu untuk pipa yang panjang. Teknik tracer gas juga dapat digunakan pada interval waktu tertentu.

### **2.3.5 Pemantauan kebisingan**

Pemantauan kebisingan: Mikrofon atau hidrofون digunakan untuk tujuan ini tergantung pada media di sekitarnya. Ini berguna untuk memantau mesin, kerusakan pada pipa, dll.

### **2.3.6 Pemantauan emisi akustik**

Diamati bahwa terjadinya retak, penyebaran kerusakan pada struktur apa pun, cacat bantalan, dll. umumnya melepaskan energi pada frekuensi yang sangat tinggi jangkauan (lebih dari 70-80 kHz). Sinyal tersebut dapat ditangkap oleh sensor emisi akustik; namun proses deteksi sangat bergantung pada frekuensi resonansi sensor. Oleh karena itu pemilihan sensor yang tepat sangat penting untuk aplikasi tertentu.

### **2.3.7 Pemantauan getaran**

Pemantauan getaran banyak digunakan dalam *Condition Monitoring*(CM) mesin dan struktur di industri. Getaran dapat mendeteksi perubahan benda apapun (mesin atau struktur) yang dapat dijelaskan melalui teori getaran mekanis; karenanya, pengukuran, pengujian, dan analisis getaran sudah menjadi alat yang

populer untuk beberapa aplikasi seperti kualifikasi desain, optimalisasi desain, pemantauan kondisi struktur dan mesin, insulasi dan kontrol getaran.

## **2.4 Deteksi Kesalahan Rotor**

Identifikasi dan prosedur untuk setiap kesalahan rotor yang umum digunakan dalam industri dapat diuraikan secara sederhana menurut (Sinha, 2020).

### **2.4.1 *Unbalance***

Dalam praktiknya, rotor tidak pernah seimbang sempurna karena kesalahan manufaktur seperti: porositas dalam pengecoran, kepadatan material yang tidak seragam, toleransi manufaktur, dan kehilangan atau perolehan material (misalnya, endapan kerak pada bilah, kehilangan material karena erosi, dll.) selama operasi. Jelas, faktor-faktor ini sering mengakibatkan gaya sentrifugal yang tinggi pada rotor dan karenanya getaran yang tinggi pada mesin. Sentrifugal ini gaya tidak lain adalah gaya ketidakseimbangan rotor.

Gaya ketidakseimbangan ini umumnya menghasilkan komponen  $1x$  yang dominan dari rotor getaran selama operasi normal. Plot kutub komponen  $1 \times$  untuk keduanya, arah horizontal dan vertikal pada semua bantalan dapat menunjukkan peningkatan amplitudo dengan atau tanpa perubahan fase yang signifikan terhadap waktu.

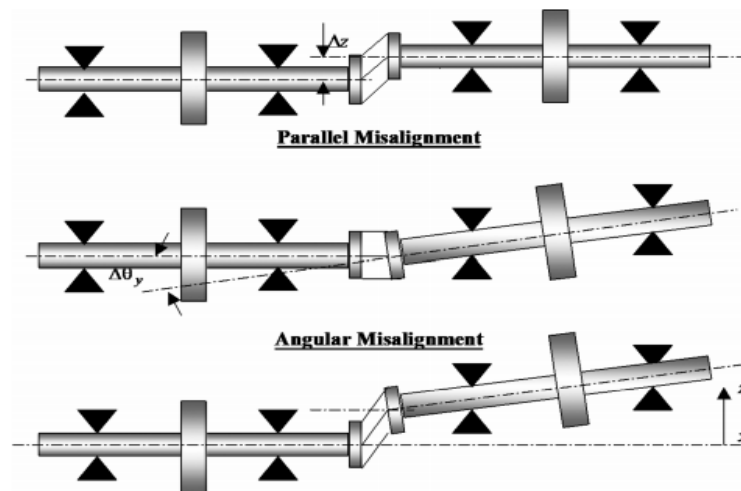
### **2.4.2 *Shaft bow or bend***

Poros bengkok dapat disebabkan oleh beberapa cara, misalnya karena distorsi termal atau gaya ketidakseimbangan besar sebelumnya. Gaya yang disebabkan oleh tikungan serupa, meskipun sedikit berbeda, dengan yang disebabkan oleh ketidakseimbangan massa. Spektrum getaran poros umumnya didominasi oleh komponen  $1x$ . Cara terbaik untuk mendeteksi keberadaan busur poros adalah dengan tren getaran aksial secara keseluruhan dan  $1 \times$  komponen. Itu selalu lebih baik untuk memperbaiki tikungan poros dan kemudian melakukan penyeimbangan kembali sebelum mengembalikan mesin ke operasi atau, jika tikungannya kecil dan koreksinya mungkin mahal, maka lakukan saja penyeimbangan rotor di kecepatan operasi.

Hal ini kemungkinan akan mengurangi getaran mesin saat pengoperasian kecepatan, tetapi mungkin tidak menyeimbangkan rotor di semua frekuensi saat mesin rusak.

### 2.4.3 Misalignment

Ketidaksejajaran terjadi di lokasi kopling dua poros, atau *off-set* pada posisi bantalan selama proses perakitan mesin setelah perawatan aktivitas. Dalam praktiknya, *misalignment* poros dapat terdiri dari tiga jenis-paralel, *Parallel*, *Angular* atau *Coupled Misalignment*. Secara umum diterima bahwa signifikan Komponen  $2\times$  bersama dengan  $1\times$  merupakan indikasi ketidaksejajaran poros. Namun, sering diamati bahwa *misalignment* menghasilkan  $1x$ ,  $2x$ ,  $3x$ ,...komponen. Tren amplitudo komponen ini mungkin tidak berubah secara signifikan dengan waktu operasi mesin. Itu karena *misalignment* diperkirakan akan tetap ada tidak berubah selama periode waktu pengoperasian mesin. Plot orbit poros sinyal getaran perpindahan relatif (diukur dengan probe kedekatan) yang terdiri dari: dari  $1\times$  dan  $2\times$  komponen.



Gambar 2 Jenis ketidaksejajaran rotor

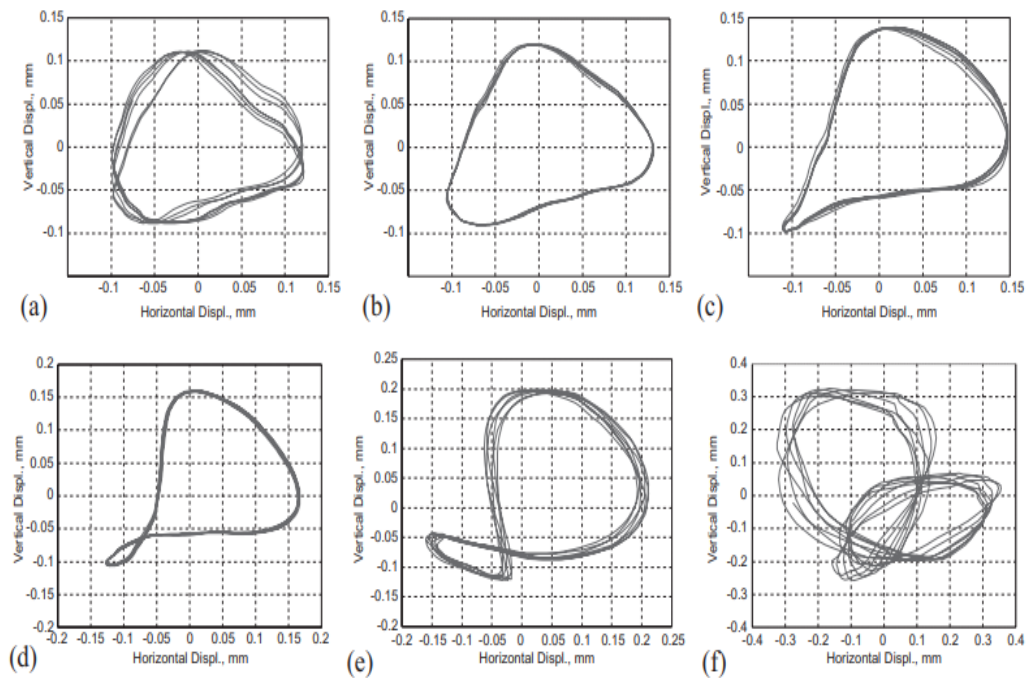
### 2.4.4 Shaft crack

Jika retak melintang berkembang di poros, kekakuan poros akan bervariasi dari: tinggi-ke-rendah-ke-tinggi dalam rotasi lengkap poros yang disebabkan oleh *Crack* (membuka dan menutup) retakan karena berat dari rotor. Perilaku retak ini

poros juga menghasilkan komponen  $2x$  mirip dengan poros *misalignment*. Tapi tidak seperti poros tidak sejajar, baik amplitudo dan fase komponen  $1 \times$  dan  $2 \times$  berubah dengan waktu operasi mesin akibat perambatan retak melintang. Ini dapat diamati baik dalam plot kutub atau fase amplitudo versus waktu plot. Plot orbit yang terdiri dari komponen  $1x$  dan  $2x$  dapat berubah dari loop tunggal menjadi loop ganda. Namun, selama operasi transien dari mesin, getaran poros mungkin sangat tinggi ketika mesin melewati hampir setengah dari kecepatan kritis mesin. Pada saat ini, bentuk plot orbit akan berubah menjadi loop yang berisi loop kecil di dalamnya yang menunjukkan perubahan signifikan dalam fase dan amplitudo getaran poros.

### 2.4.5 Shaft rub

*Shaft Rub* terjadi ketika sebuah rotor bersentuhan dengan stator mesin. *Shaft Rub* umumnya diklasifikasikan sebagai kerusakan sekunder karena biasanya disebabkan oleh malfungsi primer; seperti rotor yang tidak seimbang, kegagalan sudut turbin, bantalan dan/atau seal yang rusak, *misalignment* rotor, poros bengkok baik mekanis maupun termal, casing cacat, dll. *Rub* sering kali merupakan perilaku tipe *hit-and-bounce* dari sebuah rotor. Pengamatan umum bahwa *Rub* menghasilkan komponen subharmonik  $\times/2$ ,  $\times/3$  dalam spektrum getaran.



**Gambar 3** Plot orbit pada kecepatan rotor yang berbeda



### 2.4.6 Mechanical looseness

Baut, sambungan, dan rakitan bantalan dapat kendur selama periode pengoperasian mesin. Kelonggaran ini awalnya menghasilkan komponen  $1\times$ ,  $2\times$ ,  $3\times$ , dll, tetapi karena kelonggaran dapat merambat selama mesin berjalan, sub-harmonik ( $\times/2$  atau  $\times/3$ ) komponen mungkin mulai muncul bersama dengan  $1\times$ ,  $2\times$ ,  $3\times$ , dll. Oleh karena itu tren data ini penting untuk diidentifikasi dengan benar.

## 2.5 Analisa Getaran

### 2.5.1 Getaran sinusoidal

Banyak yang bisa dipelajari tentang kondisi mesin dan kemungkinan masalah mekanis dengan memperhatikan karakteristik getarannya. Kita sekarang dapat mempelajari karakteristik, yang mencirikan sinyal getaran.

Getaran sinusoidal adalah bentuk gerakan periodik yang paling sederhana dan dasar (Lalanne, 2014). Gerakan ini dapat direpresentasikan sebagai persamaan analitis dalam bentuk:

$$\ell(t) = \ell_m \sin(\Omega t + \varphi) \quad (1)$$

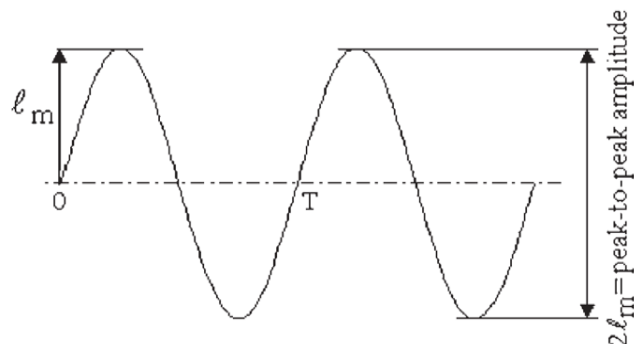
keterangan:

$t$  : Waktu (detik)

$\ell_m$  : Amplitudo

$\Omega$  : Pulse (rad/detik), dan terhubung dengan frekuensi  $f$  oleh  $\Omega = 2\pi f$ . Frekuensi  $f$  dinyatakan dalam Hertz (Hz) atau dalam siklus per detik (cps). Kebalikan dari frekuensi  $f$  adalah periode  $T$ ;

$\varphi$  : Phase (terkait dengan nilai untuk  $t = 0$ ). dinyatakan dalam radian. Dalam praktiknya, diasumsikan bahwa  $\varphi = 0$ .



**Gambar 4** Gelombang sinusoidal

$\ell(t)$  umumnya adalah percepatan, tetapi bisa juga berupa kecepatan, perpindahan (linier atau sudut), atau gaya.

Displacement merujuk pada variasi jarak atau posisi suatu objek dari suatu titik tertentu atau sumbu referensi. Satuan displacement adalah meter (m) dan subkelipatannya seperti mikron ( $\mu\text{m}$ ) dan milimeter (mm). Amplitudo displacement dapat mengindikasikan rentang nilai displacement, yang berada antara nol (untuk displacement nol dari sistem) dan nilai perpindahan maksimum (zero – peak displacement). Amplitudo displacement juga dapat mengindikasikan interval yang ada antara nilai minimum dan maksimum (peak to peak displacement), yang berarti interval tersebut mencakup semua nilai displacement.

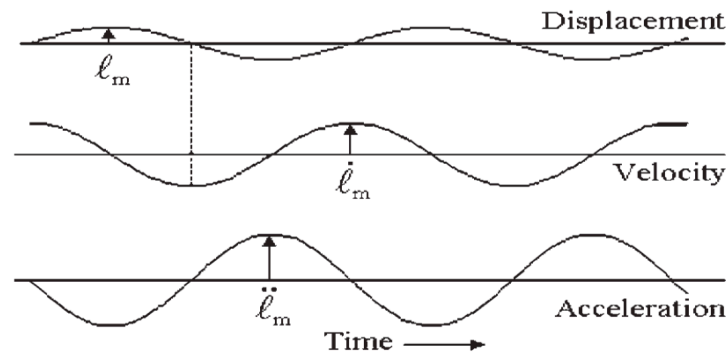
Velocity merujuk pada variasi displacement (ini adalah turunan pertama dari displacement). Velocity dinyatakan dalam meter per detik (m/s) dan subkelipatannya (cm/s dan mm/s). Seperti halnya displacement, kita dapat mempertimbangkan nilai-nilai velocity berikut: zero – peak and peak to peak.

Acceleration merujuk pada variasi velocity. Acceleration sama dengan turunan pertama dari velocity atau turunan kedua dari displacement. Acceleration dinyatakan dalam  $\text{m/s}^2$  atau lebih umum sebagai nilai g, di mana g adalah acceleration akibat gravitasi ( $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$ ).

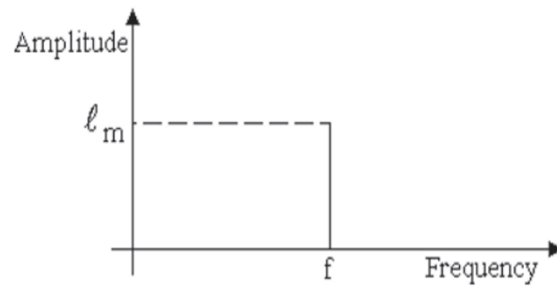
Beberapa parameter melalui integrasi atau diferensiasi:

$$\begin{cases} \dot{\ell}(t) = \frac{d\ell}{dt} = \ell_m \Omega \cos \Omega t = \dot{\ell} \cos \Omega t = \dot{\ell}_m \sin\left(\Omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ \ddot{\ell}(t) = \frac{d^2\ell}{dt^2} = -\ell_m \Omega^2 \sin \Omega t = -\ddot{\ell}_m \sin \Omega t = \ddot{\ell}_m \sin(\Omega t + \pi) \end{cases} \quad (2)$$

Dari persamaan diatas, dapat diamati bahwa acceleration, velocity, dan displacement semuanya bersifat sinusoidal, dengan periode T, dan bahwa velocity dan displacement memiliki perbedaan phase  $\frac{\pi}{2}$ , seperti halnya velocity dan acceleration.



**Gambar 5** Perbedaan *phase* antara *sinusoidal displacement*, *velocity* dan *acceleration*



**Gambar 6** Spektrum *sinusoidal* (spektrum garis)

Sinyal seperti gambar 6 disebut harmonik sederhana. Spektrumnya hanya terdiri dari satu garis pada frekuensi tertentu. Spektrum sinyal yang terdiri dari beberapa sinusoid dikenal sebagai diskrit

### 2.5.2 Getaran periodik

Gerakan yang ditemui di lingkungan nyata jarang murni sinusoidal. Beberapa hanya periodik, sinyal diulang pada interval waktu reguler  $T_1$  (periode).

Amplitudo sesaatnya dapat ditulis dalam bentuk:

$$\ell(t) = \ell(t + n T_1) \quad (3)$$

di mana  $n$  adalah konstanta positif bilangan bulat.

Sinyal periodik dapat diwakili oleh deret Fourier, yaitu dengan jumlah sinyal sinusoidal murni:

$$\ell(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2 \pi n f_1 t + b_n \sin 2 \pi n f_1 t) \quad (4)$$

Di mana :

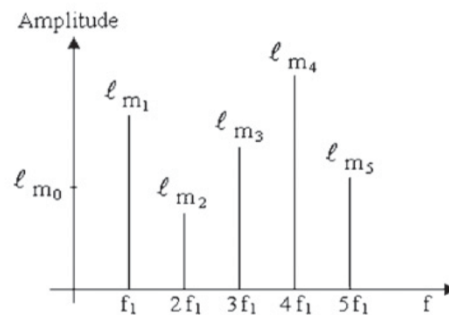
$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \text{frekuensi dasar} \quad (5)$$

$$a_n = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} \ell(t) \cos 2 \pi n f t dt \quad (6)$$

$$b_n = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} \ell(t) \sin 2 \pi n f t dt \quad (7)$$

(n 0, 1, 2, 3...).

Semua frekuensi  $f_n = n f_1$  adalah beberapa bilangan bulat dari frekuensi dasar  $f_1$ . Untuk sebagian besar aplikasi praktis, cukup mengetahui amplitudo dan frekuensi dari berbagai komponen, fasa diabaikan. Representasi sinyal periodik seperti itu kemudian dapat dibuat, seperti pada Gambar 7, dengan spektrum diskrit yang memberikan amplitudo  $\ell_{m_n}$  masing-masing komponen sesuai dengan frekuensinya.



**Gambar 7** Spektrum sinyal periodik

Sinyal periodik  $\ell(t)$  dapat dianggap sebagai jumlah dari komponen konstan dan jumlah tak terhingga (atau tidak) dari komponen sinusoidal, yang disebut harmonik, yang frekuensinya adalah bilangan bulat dari  $f$ . Deret Fourier dapat sepenuhnya dicirikan oleh koefisien  $a_n$  dan  $b_n$  pada frekuensi  $n f_1$  dan dapat direpresentasikan dengan pemberian spektrum garis  $a_n$  dan  $b_n$  terhadap frekuensi. Jika kita tidak mempertimbangkan fase  $\varphi_n$  seperti yang sering terjadi dalam praktik, kita juga dapat menggambar spektrum garis yang memberikan koefisien terhadap frekuensi.

Sumbu vertikal dapat menunjukkan amplitudo setiap komponen atau nilai rmsnya.

$$\bar{\ell} = \ell_{m_0}$$

$$\ell(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \ell_{m_n} \sin(2 \pi f_n t + \varphi_n) \quad (8)$$

$$\ell_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{T_1} \sum \int_0^{T_1} \ell_{mn}^2 \sin^2(2 \pi n f_1 t + \varphi_n) dt \quad (9)$$

$$+ \frac{2}{T_1} \sum \int_0^{T_1} \ell_{mp} \ell_{mq} \sin(2 \pi p f_1 t + \varphi_p) \sin(2 \pi q f_1 t + \varphi_q) dt \quad (10)$$

Suku kedua, integral selama satu periode dari perkalian dua fungsi sinusoidal, adalah nol:

$$\ell_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{T_1} \sum \ell_{mn}^2 \int_0^{T_1} \frac{1}{2} \{1 - \cos[2(2 \pi n f_1 t + \varphi_n)]\} dt = \frac{1}{T_1} \sum \ell_{mn}^2 \int_0^{T_1} \frac{dt}{2} \quad (11)$$

Jika nilai rata-rata adalah nol

$$\ell_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{T_1} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{T_1} \ell_{mn}^2 \frac{dt}{2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\ell_{mn}^2}{2} \quad (12)$$

Setiap komponen memiliki nilai kuadrat rata-rata

$$\overline{\ell_n^2} = \frac{1}{2} \ell_{mn}^2 \quad (13)$$

Jika nilai rata-rata tidak nol

$$\overline{\ell^2} = \ell_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \ell_{mn}^2 \quad (14)$$

Disederhanakan menjadi:

$$S_{\ell}^2 = \overline{\ell^2} - (\overline{\ell})^2 = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \ell_{mn}^2 \quad (15)$$

### 2.5.3 Getaran harmonik

Gerak harmonik merupakan gerak yang paling sederhana dari gerak periodik. Gerak periodik merupakan gerak gelombang yang berulang-ulang dalam selang waktu yang sama. Waktu yang digunakan untuk melakukan gerak periodik disebut dengan period ( $\tau$ ). Frekuensi merupakan banyaknya getaran yang dilakukan dalam satu detik. Frekuensi dapat dirumuskan :

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (16)$$

Gerak harmonik dapat diperagakan melalui gambar dibawah ini. Jika massa yang melekat pada pegas ditarik dari keadaan diamnya dan kemudian dilepaskan, maka massa tersebut akan melakukan gerak bolak-balik melalui garis keadaan diamnya. Dengan menempatkan suatu sumber cahaya pada massa yang beresilasi, maka gerakanya dapat direkam pada suatu keping film peka cahaya yang bergerak pada kecepatan konstan.

Gerakan dapat dinyatakan dalam persamaan  $x = A \sin\left(2\pi \frac{t}{\tau}\right)$  dengan  $A$  adalah amplitudo atau simpangan terbesar diukur pada posisi setimbang dan  $\tau$  adalah periode. Gerak diulang pada  $t = \tau$ .

Gerak harmonik sering dinyatakan sebagai proyeksi suatu titik yang bergerak melingkar dengan kecepatan konstan terhadap suatu garis lurus, Dengan kecepatan sudut sebesar  $\omega$ , perpindahan simpangan  $x$  dapat dituliskan sebagai berikut :

$$x = A \sin(\omega t) \quad (17)$$

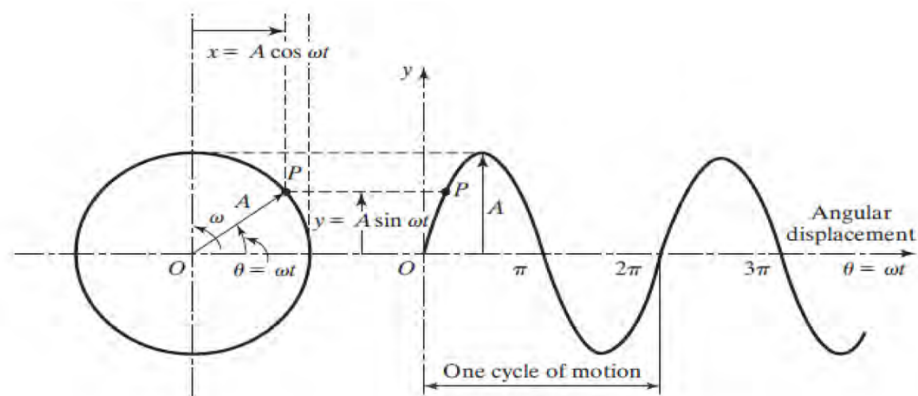
Besaran  $\omega$  diukur dalam radian per detik dan disebut frekuensi lingkaran. Karena gerakannya berulang sebesar  $2\pi$  radian, maka didapat persamaan :

$$\omega = \frac{2\pi}{f} = 2\pi t \quad (18)$$

Kecepatan dan percepatan gerak harmonik dapat diperoleh secara mudah dengan menurunkan persamaan diatas sehingga didapat persamaan :

$$\dot{X} = A\omega \cos(\omega t) = A\omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (19)$$

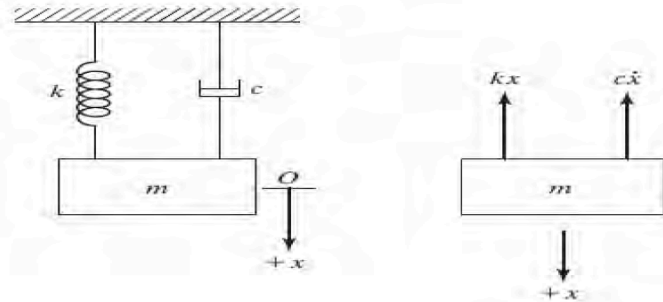
$$\ddot{X} = -A\omega^2 \sin(\omega t) = A\omega^2 \sin(\omega t + \pi) \quad (20)$$



**Gambar 8** Proyeksi gerak harmonik pada lingkaran

### 2.5.4 Getaran bebas

Getaran bebas adalah kemampuan suatu benda untuk melakukan getaran tanpa diberikan gaya luar yang merupakan fungsi waktu



**Gambar 9** Getaran bebas dengan 1 DOF

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F(t) \quad (21)$$

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0 \quad (22)$$

Misalkan  $x = e^{st}$ , maka  $\dot{x} = se^{st}$ , dan  $\ddot{x} = s^2 e^{st}$

Persamaan diatas akan menjadi :

$$(ms^2 + cs + k)e^{st} = 0 \quad (23)$$

Agar persamaan tersebut dapat diselesaikan, maka :

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (24)$$

$$s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m} = 0 \quad (25)$$

$$s_{1,2} = \frac{-\frac{c}{m} \pm \sqrt{\frac{c^2}{m} - 4 \frac{k}{m}}}{2} \quad (26)$$

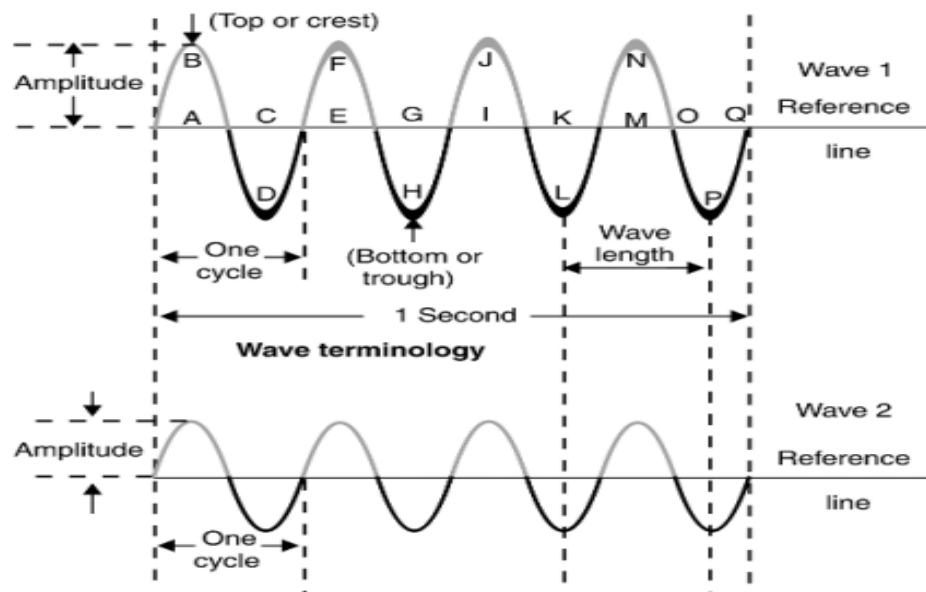
$$x = A e^{s_1 t} + B e^{s_2 t}$$

Dimana A dan B adalah konstanta

### 2.5.5 Dasar gelombang (*wave fundamentals*)

Istilah seperti siklus, frekuensi, panjang gelombang, amplitudo dan fase sering digunakan ketika menggambarkan bentuk gelombang, juga akan membahas bentuk gelombang, harmonik, transformasi *Fourier* dan getaran keseluruhan nilai, karena ini adalah konsep yang terhubung ke diagnostik mesin menggunakan analisis getaran.

Garis referensi (garis perpindahan nol) adalah posisi di mana partikel materi akan menjadi jika tidak terganggu oleh gerakan gelombang.



**Gambar 10** Perbandingan gelombang dengan amplitudo yang berbeda

### 2.5.6 Frekuensi (*frequency*)

Di titik E, gelombang mulai berulang dengan siklus kedua, yang selesai di titik I, siklus ketiga di titik M, dll. Puncak pergantian positif (nilai maksimum di atas garis) kadang-kadang disebut sebagai puncak atau puncak, dan puncak negative pergantian (nilai maksimum di bawah garis) kadang-kadang disebut bagian bawah atau palung.

### 2.5.7 Panjang gelombang (*wavelength*)

Panjang gelombang adalah jarak dalam ruang yang ditempati oleh satu siklus gelombang transversal pada setiap diberikan instan. Jika gelombang dapat dibekukan dan diukur, panjang gelombangnya adalah jarak dari ujung depan satu siklus ke titik yang sesuai pada siklus berikutnya.

Panjang gelombang bervariasi dari beberapa ratus inci pada frekuensi yang sangat tinggi hingga bermil-mil pada frekuensi yang sangat rendah, tergantung pada mediumnya.

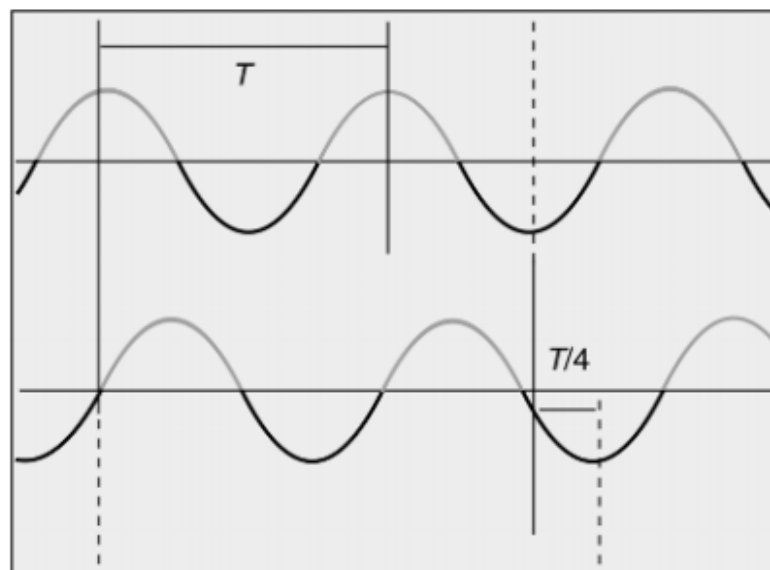


### 2.5.8 Amplitudo (*amplitude*)

Dua gelombang mungkin memiliki panjang gelombang yang sama, tetapi puncak salah satunya dapat naik lebih tinggi di atas garis referensi daripada puncak yang lain. Ketinggian puncak gelombang di atas garis referensi disebut amplitudo gelombang. Amplitudo dari gelombang memberikan indikasi relatif dari jumlah energi gelombang mentransmisikan. Terus menerusrangkaian gelombang, seperti A sampai Q, memiliki amplitudo dan panjang gelombang yang sama, disebut gelombang atau wave train.

### 2.5.9 Frekuensi dan waktu (*frequency and time*)

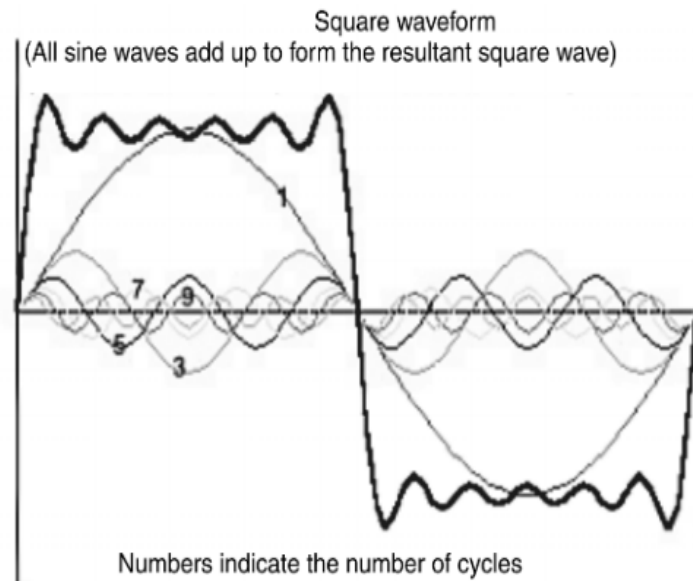
Ketika rangkaian gelombang melewati suatu medium, sejumlah tertentu gelombang individu melewati titik tertentu untuk satuan waktu tertentu. Jumlah getaran, atau siklus, dari rangkaian gelombang dalam satuan waktu disebut frekuensi kereta gelombang dan diukur dalam *hertz* (Hz). Pada tahun 1967, untuk menghormati fisikawan Jerman *Heinrich hertz*, istilah *hertz* ditunjuk untuk digunakan sebagai pengganti istilah 'siklus per detik' ketika mengacu pada frekuensi radio. Mungkin tampak membingungkan bahwa di satu tempat istilah 'siklus' digunakan untuk menunjuk pergantian gelombang positif dan negatif. Istilah *hertz* mengacu pada jumlah kejadian yang terjadi dalam satu detik.



**Gambar 11** Frekuensi dan waktu

### 2.5.10 Fase (*phase*)

Gelombang fase adalah identik dalam amplitudo dan frekuensi.



**Gambar 12** Hubungan fase antara dua gelombang yang serupa

- Gelombang (1) mewakili *1 cycle*. Dengan waktu 1 detik berarti  $F = 1$  Hz.
- Gelombang (3) mewakili *3 cycle*. Dengan waktu 1 detik berarti  $F = 3$  Hz.
- Gelombang (5) mewakili *5 cycle*. Dengan waktu 1 detik berarti  $F = 5$  Hz.
- Gelombang (7) mewakili *7 cycle*. Dengan waktu 1 detik berarti  $F = 7$  Hz.
- Gelombang (9) mewakili *9 cycle*. Dengan waktu 1 detik berarti  $F = 9$  Hz

Dengan ini (1,3,5,7,9...) disebut ganjil *odd harmonics* pada frekuensi. Apabila semakin banyak dapat menghasilkan bentuk gelombang *square*. Bila semakin kompleks biasanya menggunakan teknik *Fourier Transform* (Scheffer & Girdhar, 2004).

### 2.5.11 Bentuk gelombang (*waveforms*)

Bentuk gelombang adalah representasi visual (atau grafik) dari nilai sesaat gerak yang diplot terhadap waktu.

### 2.5.12 Harmonik (*harmonics*)

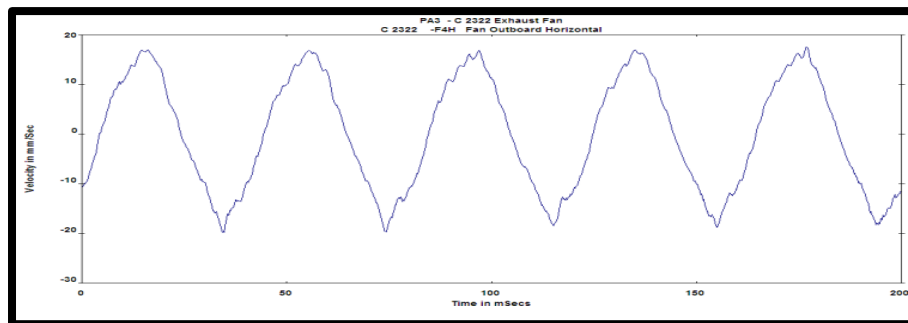
Diasumsikan jarak (*displacement*) diwakilkan dengan sumbu Y dan Waktu (time) pada sumbu X dengan nilai 1 detik.

## 2.6 Sinyal Getaran

Sinyal yang diperoleh melalui transducer pada pengukuran suatu getaran mesin adalah suatu gabungan berbagai respons atau tanggapan bangunan mesin terhadap bermacam-macam gaya eksitasi dari dalam mesin maupun dari luar mesin. Sehingga kunci analisis yang efektif adalah penguraian sinyal kompleks ini terhadap frekuensi komponen-komponennya (Scheffer & Girdhar, 2004).

### 2.6.1 Sinyal getaran domain waktu

Dengan domain waktu analisis dapat mengamati perubahan simpangan suatu getaran terhadap waktu secara terinci.

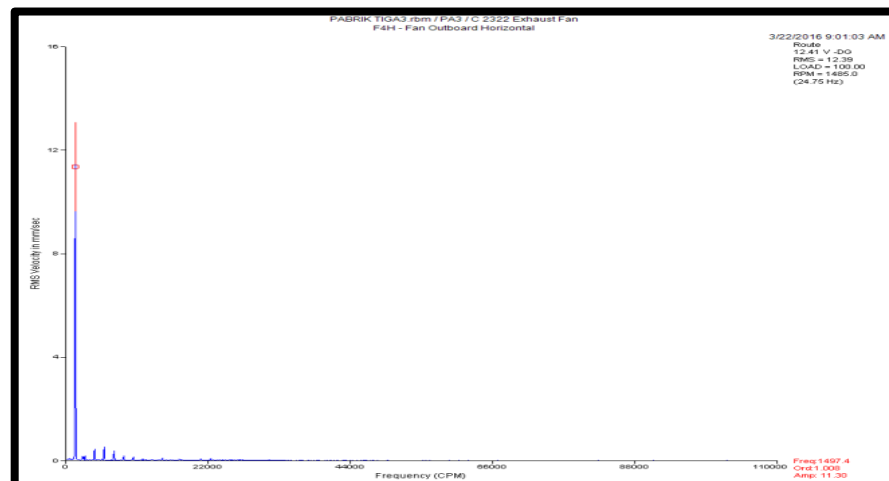


**Gambar 13** Sinyal getaran domain waktu

Domain waktu memberikan gambaran yang alamiah dari fenomena getaran, maka analisis dalam domain waktu menjadi lebih sulit.

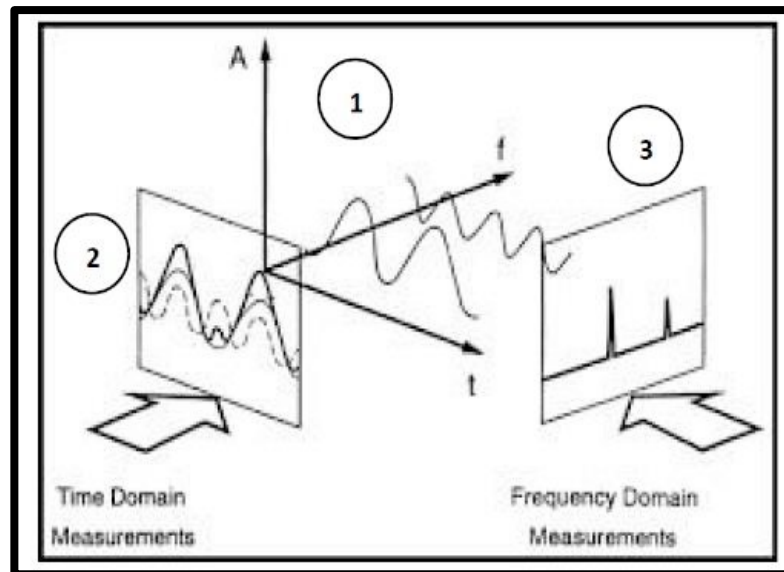
### 2.6.2 Sinyal getaran domain frekuensi

Sumbu vertikal pada diagram domain frekuensi menyatakan amplitudo dari variabel respon, sedangkan sumbu horizontal menyatakan frekuensi (Hz, RPM).



**Gambar 14** Sinyal getaran domain frekuensi

Dengan adanya sinyal getaran dalam domain frekuensi, analisis kegagalan dapat dilakukan dengan melihat amplitudo tinggi berdasarkan frekuensinya.



**Gambar 15** Hubungan antara domain waktu dengan domain frekuensi

Gambar (1) memperlihatkan data dalam sistem koordinat 3 dimensi yang terdiri atas sumbu waktu, sumbu frekuensi dan amplitudo. Hubungan antara amplitudo dengan frekuensi ditunjukkan dalam Gambar (3), sedangkan hubungan antara amplitudo dan waktu ditunjukkan dalam Gambar (2). Data dalam domain waktu ternyata tersusun atas dua sinyal sinus yang frekuensinya berbeda seperti yang diperlihatkan oleh data dalam domain frekuensi. Dalam domain waktu masing-masing komponen sinyal tidak teramati langsung sedangkan domain frekuensi baik amplitudonya maupun frekuensi dapat diketahui secara langsung. Pernyataan sinyal dalam domain frekuensi disebut spektrum sinyal (Scheffer & Girdhar, 2004).

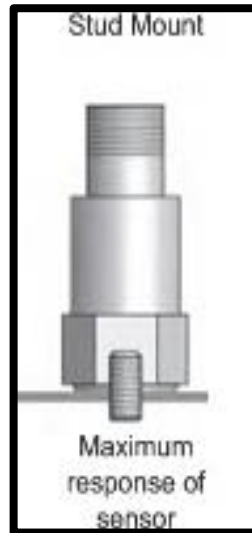
## 2.7 Sensor Getaran

Sensor ini memegang penting dalam kegiatan pemantauan sinyal getaran karena terletak di sisi terdepan dari suatu proses pemantauan sinyal getaran mesin. Opsi *mounting* dari sensor getaran dapat dibedakan menjadi 2 yaitu *mounting* untuk pemantauan secara berkala dan *mounting* untuk pemantauan secara *continuous* (Vokasi, 2018).

### 2.7.1 Mounting untuk pemantauan secara *continous*

#### 1. *Stud Mounting*

*Stud mounting* adalah sensor yang penggunaannya dengan cara sebuah mesin diberi lubang dan diuliri lalu sensor tersebut dipasang permanen dengan dimasukkan pada ulir yang telah dibuat.

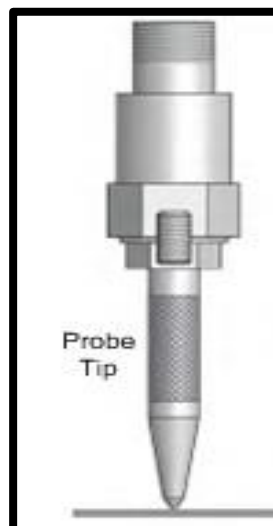


Gambar 16 Sensor *stud mounting*

### 2.7.2 Mounting untuk pemantauan secara berkala

#### 1. *Hand Held Probe*

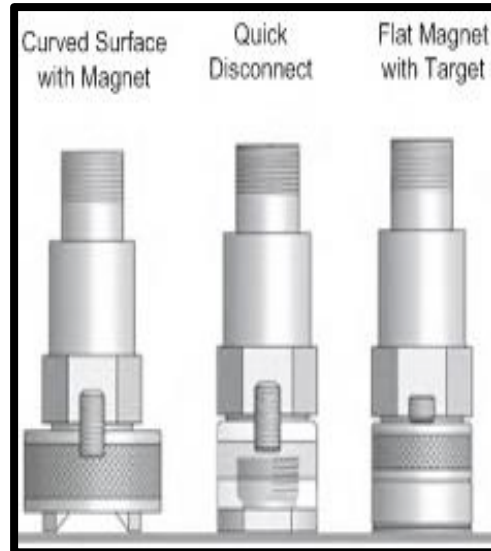
Penggunaan dari *hand held probe* adalah dengan menekan sensor pada mesin, penggunaan jenis sensor ini kurang direkomendasikan karena sensor jenis ini mudah untuk berubah posisi sehingga mempengaruhi hasil pengukuran.



Gambar 17 Sensor *hand probe*

## 2. Magnet Sensor

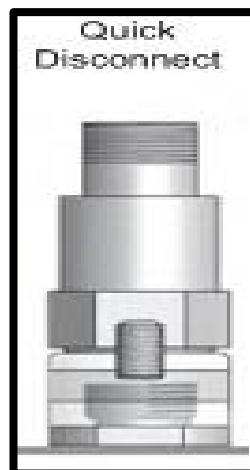
*Sensor magnet* ini sering digunakan dalam melakukan pengukuran secara berkala, karena magnet dapat dengan kuat menempel pada mesin dan tidak mudah berubah posisi sehingga didapatkan hasil pengukuran yang maksimal. Jenis sensor magnet terdiri dari dua jenis yaitu *flat magnet* dan *curved magnet*.



**Gambar 18** Sensor magnet

## 3. Quick Disconnect Sensor

Sensor jenis ini merupakan jenis sensor yang baik karena lokasi pengukuran selalu sama dan tidak mudah berubah posisi sehingga hasil pengukuran yang didapatkan baik. Namun sensor ini jarang digunakan karena biaya yang dibutuhkan mahal karena dibutuhkan *spesial pad* pada setiap mesin yang akan dilakukan pengukuran.



**Gambar 19** Quick disconnect sensor

## 2.8 *Fast Fourier Transform (FFT) dan Discrete Fourier Transform (DFT)*

*Fast Fourier Transform* (FFT) adalah teknik perhitungan operasi matematika yang digunakan untuk mentransformasi sinyal analog menjadi sinyal digital berbasis frekuensi. *Fast Fourier Transform* (FFT) membagi sebuah sinyal menjadi frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks menurut (Tiara, 2014). *Fast Fourier Transform* (FFT) adalah algoritma untuk menghitung transformasi fourier diskrit dengan cepat dan efisien. Karena sinyal-sinyal dalam sistem komunikasi bersifat kontinu, sehingga hasilnya dapat digunakan untuk transformasi fourier. *Fourier Transform* dapat didefinisikan dengan rumus:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (27)$$

$S(f)$  = sinyal dalam domain frekuensi (*frequency domain*)

$s(t)$  = sinyal dalam domain waktu (*time domain*)

$s(t)e^{-j2\pi ft}$  = konstanta nilai sebuah sinyal

$f$  = frekuensi

$t$  = waktu

Dari persamaan integral di atas dapat dilihat bahwa *Fast Fourier Transform* (FFT) dapat digunakan untuk menghitung nilai frekuensi, amplitudo dan fase dari suatu gelombang sinyal. Sementara untuk menghitung spektrum frekuensi sinyal pada komputer digital membutuhkan algoritma *Discrete Fourier Transform* (DFT). *Discrete Fourier Transform* (DFT) mengubah sinyal domain waktu menjadi sinyal domain frekuensi. Berikut adalah rumus dari *Discrete Fourier Transform* (DFT):

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{x=N-1} f(x) \exp[-2j\pi ux/N] \quad (28)$$

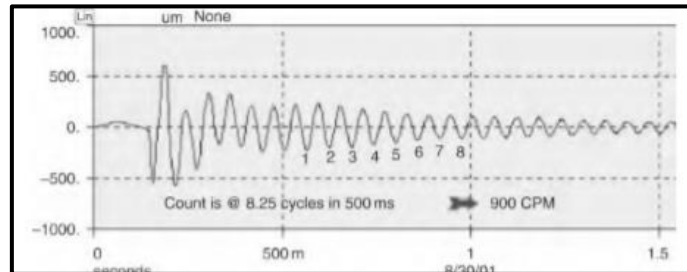
$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{x=N-1} f(x) \left( \cos\left(\frac{2\pi ux}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi ux}{N}\right) \right) \quad (29)$$

$N$  = jumlah sampel yang diambil.

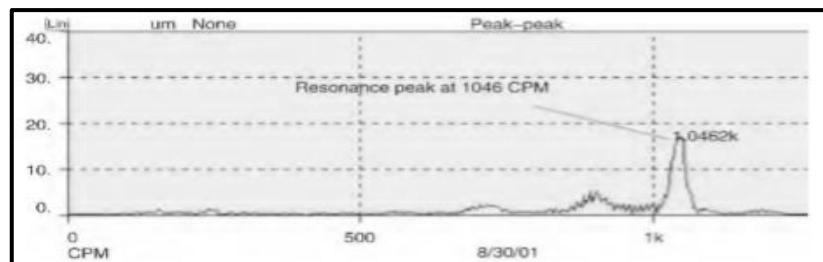
## 2.9 *Bump Test*

*Bump test* adalah metode sederhana untuk menentukan frekuensi pribadi dari setiap objek atau sistem. Dengan metode ini, sensor getaran

dipasang pada bagian yang terdapat frekuensi pribadi. Menggunakan benturan palu, pukulan mengenai kontruksi dan bentuk gelombang waktu (FTT) dikumpulkan. Frekuensi dominan yang diamati dalam dua grafik adalah frekuensi pribadi kontruksi (Cornelius & Paresh, 2004).



**Gambar 20** Time waveform of a bump test



**Gambar 21** FFT spektrum of a bump test

## 2.10 Satuan-satuan Pengukuran Getaran

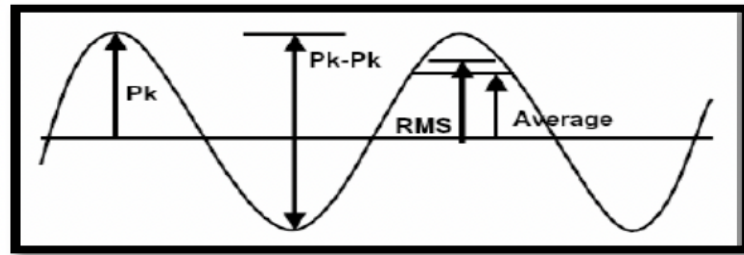
Ada beberapa satuan yang digunakan dalam suatu pengukuran getaran. Menurut (AJI SATRIO NORVAN, 2019) nilai *Peak - to - peak* adalah nilai amplitudo dari gelombang sinusoida mulai dari batas atas sampai ke batas bawah. Pengukuran *displacement* suatu getaran biasanya menggunakan nilai *peak-to-peak* dengan satuan *mils* atau micron. Nilai Peak adalah nilai *peak-to-peak* dibagi dua atau setengah dari nilai *peak-to-peak*. Nilai RMS (*root-means-square*), nilai ini digunakan untuk mengklasifikasikan keparahan getaran dari suatu mesin. Nilai RMS ini mengukur nilai energi efektif yang dipakai untuk menghasilkan getaran pada suatu mesin.

Untuk gerak sinusoidal nilai RMS adalah  $0.707 \times$  nilai peak. Sedangkan nilai *Average* dari suatu gelombang sinusoidal adalah  $0.637 \times$  nilai peak.

Untuk amplitudo vibrasi (*displacement, velocity, accelerations*) dapat dinyatakan dalam *peak to peak* (Pk-Pk), *Peak* (Pk), *Average*, dan *Root Mean Square*



(RMS). Angka *Peak to Peak* tidak selalu bisa ditampilkan oleh setiap alat ukur vibrasi.



**Gambar 22** *Peak to Peak, Average, dan RMS*

Pada umumnya *Average* adalah nilai rata-rata nilai mutlak dari *waveform*. Dan untuk gelombang sinus besarnya adalah 0,5 Peak. *Root Mean Square* (RMS) adalah akar kuadrat dari rata-rata nilai kuadrat *waveform*, untuk gelombang sinus besarnya adalah 0.707 Peak. Nilai RMS dalam grafik bisa digambarkan seperti dibawah ini.



**Gambar 23** *Root mean square*

Dalam suatu Organisasi Standarisasi Internasional (ISO) yang standarisasinya sudah dikenal dan diterima di dunia internasional menganjurkan untuk memakai RMS sebagai acuan tingkat keparahan vibrasi. Berkaitan dengan RMS dikenal juga parameter penting lainnya yaitu *Crest Factor* yang besarnya adalah perbandingan antara nilai peak (pk) gelombang terhadap nilai RMS dari gelombang. *Crest factor* dari gelombang Sinus adalah 1.414 yaitu nilai Peak (Pk) adalah 1.414 dikali nilai RMS. *Crest Factor* adalah salah satu ciri-ciri penting yang dapat digunakan unruk perkembangan kondisi mesin.

**Tabel 1** Satuan pengukur getaran

<i>Conversion Factor</i>	<i>Peak to Peak</i>	<i>Peak</i>	<i>RMS</i>	<i>Average</i>
<i>Peak to Peak</i>	1	0.5	0.354	0.318
<i>Peak</i>	2	1	0.71	0.64
<i>RMS</i>	2.83	1.414	1	0.90
<i>Average</i>	3.14	1.571	1.111	1

## 2.11 Standarisasi Analisa Vibrasi

Standarisasi untuk analisa getaran merupakan salah satu aktivitas terpenting dari ISO/TC108. Meskipun begitu, karena adanya beragam jenis klasifikasi dan kategori mesin, hal ini juga menjadi sangat kompleks. Berbagai macam standarisasi yang telah diterbitkan menggambarkan batas getaran yang dapat diterima, termasuk serial ISO/7919 (5 seri) “*Mechanical vibration of non-reciprocating machines – Measurement on rotating shafts and evaluation criteria*” dan serial ISO/10816 (6 seri) “*Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*” (Robichaud, 2009).

**Tabel 2** Standarisasi ISO untuk analisa getaran

<i>ISO 7919 Series</i>	<i>Mechanical vibration of non-reciprocating machines - Measurement on rotating shafts and evaluation criteria</i>
<i>7919-1:1996</i>	<i>Part 1: General Guidelines</i>
<i>7919-2: 2001</i>	<i>Part 2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds of 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min and 3600 r/min</i>
<i>7919-3: 1996</i>	<i>Part 3: Coupled industrial machines</i>
<i>7919-4: 1996</i>	<i>Part 4: Gas turbine sets</i>
<i>7919-5: 1997</i>	<i>Part 5: Machines set in hydraulic power generating and pumping plants</i>
<i>ISO 10816 Series</i>	<i>Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts</i>
<i>10816-1: 1995</i>	<i>Part 1: General Guidelines</i>
<i>10816-2: 2001</i>	<i>Part 2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds of 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min and 3600 r/min</i>
<i>10816-3: 1998</i>	<i>Part 3: Industrial machines with normal power above 15kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ</i>
<i>10816-4: 1998</i>	<i>Part 4: Gas turbine sets excluding aircraft derivatives</i>
<i>10816-5: 2000</i>	<i>Part 5: Machines set in hydraulic power generating and pumping plants</i>
<i>10816-6: 1995</i>	<i>Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW</i>
<i>10816-7:</i>	<i>Part 7: Rotodynamic pumps for industrial application</i>

Vibrasi *overall* atau vibrasi *velocity*, dengan satuan mm/s atau inchi RMS (*root-mean-square*), digunakan untuk mengetahui kondisi umum kelayakan mesin

yang beroperasi. Berdasarkan standard yang digunakan yaitu, **ISO 10816-3**, nilai vibrasi suatu mesin yang beroperasi dapat ditentukan apakah mesin tersebut layak atau tidak layak untuk terus beroperasi. Pengukuran dilakukan selama mesin beroperasi. Karena motor yang digunakan untuk menggerakkan alat simulator memiliki daya output 60 Hz (1410 RPM) sehingga standar vibrasi ISO 10816-3 masuk dalam kategori Group 2.

DIN ISO 10816-3		Group 1		Group 2	
Machine type		Large machines 300 kW < P < 50 MW		Medium sized machines 15 kW < P < 300 kW	
		Motor H > 315 mm		Motor 160 mm < H < 315 mm	
Foundation		flexible	rigid	flexible	rigid
Velocity $v_{\text{eff}}$ mm/s rms	11,0		<b>D</b>		
	7,1				
	10–1000 Hz $r > 600$ rpm		<b>C</b>		
	4,5				
	2–1000 Hz $120 < r < 600$ rpm		<b>B</b>		
	3,5				
	2,8				
	2,3				
1,4		<b>A</b>			
©PRÜFTECHNIK AG					
<b>A</b>	Newly commissioned machines	<b>B</b>	Unrestricted long term operation	<b>C</b>	Restricted long term operation
				<b>D</b>	Vibration causing damage

**Gambar 24** Standar vibrasi DIN ISO 10816-3

Standarisasi ini menggunakan r.m.s. (*root mean square*) sebagai patokan evaluasi dalam analisa getaran. Zona evaluasi yang digunakan yaitu sebagai berikut:

1. Zona A: Getaran pada mesin baru berada pada zona ini.
2. Zona B: Mesin dengan getaran pada zona ini dianggap dapat diterima untuk operasi jangka panjang.
3. Zona C: Mesin dengan getaran pada zona ini dianggap tidak memuaskan untuk operasi jangka panjang terus menerus. Biasanya, mesin dapat dioperasikan untuk waktu terbatas dalam kondisi ini hingga ada kesempatan untuk tindakan perbaikan.

4. Zona D: Nilai getaran pada zona ini biasanya dianggap tingkat keparahan yang cukup untuk menyebabkan kerusakan pada mesin.

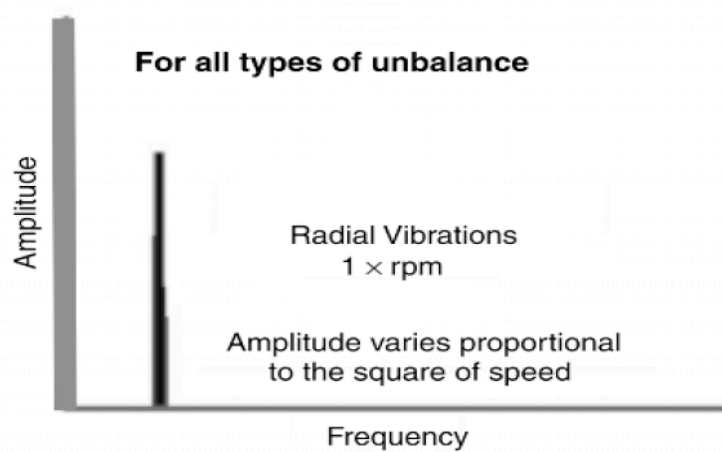
## 2.12 Diagnosis Mesin Dengan Analisis Getaran

Menurut(Cornelius & Paresh, 2004) beberapa cacat mesin yang terdeteksi menggunakan analisis getaran tercantum di bawah ini:

### 2.12.1 *Unbalance*

Untuk segala jenis tipe *unbalance*, spektrum FFT akan menunjukkan frekuensi getaran yang dominan pada 1x rpm.

*Static unbalance* terjadi karena adanya ketidakseimbangan gaya yang bekerja. Pada fenomena *force unbalance* terdeteksi sebuah amplitudo yang tinggi pada arah pengukuran radial. Fenomena ini dapat diketahui dengan melihat perbedaan fase sebesar  $0^\circ$  pada bantalan poros. Spektrum akan menunjukkan frekuensi getaran dominan pada 1x RPM.

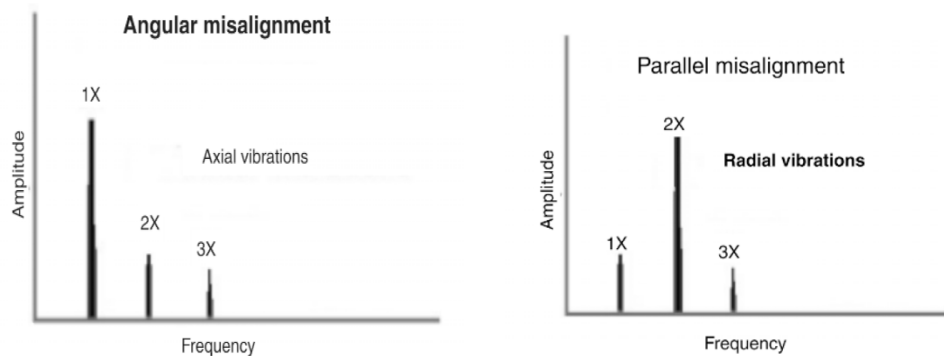


**Gambar 25** Spektrum akibat *unbalance*

### 2.12.2 *Misalignment*

Ketidaksejajaran poros atau *misalignment* adalah kondisi dimana hubungan poros pada mesin tidak sejajar. Terdapat dua jenis ketidaksejajaran poros yaitu angular misalignment dan parallel misalignment. Angular misalignment adalah ketidaksejajaran poros dimana poros yang satu dengan yang lain akan membentuk sudut tertentu. Sedangkan Parallel misalignment adalah ketidaksejajaran poros dimana sumbu rotasi poros yang satu dengan yang lain tidak sejajar. Grafik pada

domain frekuensi akan berbeda antara *angular misalignment* dan *parallel misalignment* seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini:

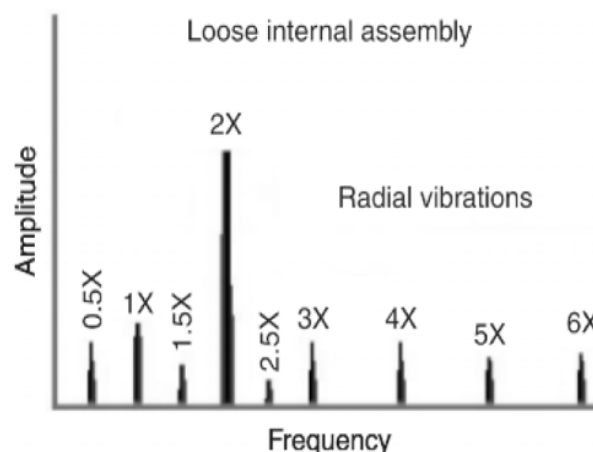


**Gambar 26** Ciri kerusakan *angular* dan *parallel misalignment*

### 2.12.3 Mechanical looseness

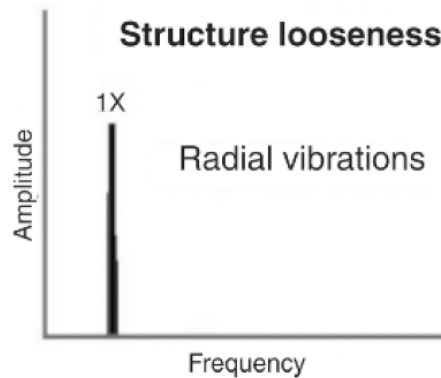
Kategori kelonggaran bisa antara liner bantalan di tutupnya, selongsong atau rolling bantalan elemen, atau impeller pada poros. Ini biasanya disebabkan oleh kecocokan yang tidak tepat antara bagian-bagian komponen, yang akan menghasilkan banyak harmonik di FFT karena nonlinier respon bagian yang lepas terhadap gaya eksitasi dari rotor.

Kelonggaran mekanis seringkali sangat terarah dan dapat menyebabkan perbedaan yang nyata pembacaan ketika mereka diambil pada kenaikan  $30^\circ$  dalam arah radial di sekitar bantalan. Mechanical looseness dapat mengakibatkan frekuensi sub-harmonik pada  $\frac{1}{2}$  rpm,  $1 \frac{1}{2}$  rpm,  $2 \frac{1}{2}$  rpm, dll.



**Gambar 27** Spektrum *mechanical loosenees* akibat salah perakitan

Jenis kelonggaran ini disebabkan oleh kelonggaran struktural atau kelemahan pada bagian mesin, kaki, pelat dasar atau pondasi. Ini juga dapat disebabkan oleh grouting yang memburuk, penahan yang longgar baut di dasar dan alas.



**Gambar 28** Spektrum *mechanical loosenees* akibat salah struktur mesin

### 2.13 Konsep Dasar Arsitektur Jaringan Syaraf Tiruan

Pada umumnya jaringan syaraf tiruan memiliki dua lapisan, yaitu input layer dan output layer. Tetapi pada perkembangannya, adapula jaringan syaraf tiruan yang memiliki satu lapisan lagi yang terletak di antara *input layer* dan *output layer*, lapisan ini disebut *hidden layer*. Menurut (Kusumadewi, 2003), penjelasan mengenai komponen jaringan syaraf tiruan.

#### 1. *Input Layer*

*Input layer* berisi node-node yang masing-masing menyimpan sebuah nilai masukan yang tidak berubah pada fase latih dan hanya bisa berubah jika diberikan nilai masukan baru. Node pada lapisan ini tergantung pada banyaknya input dari suatu pola.

#### 2. *Hidden Layer*

Lapisan ini tidak pernah muncul sehingga dinamakan *hidden layer*. Akan tetapi semua proses pada fase pelatihan dan fase pengenalan dijalankan di lapisan ini. Jumlah lapisan ini tergantung dari arsitektur yang akan dirancang, tetapi pada umumnya terdiri dari satu lapisan *hidden layer*.

#### 3. *Output Layer*

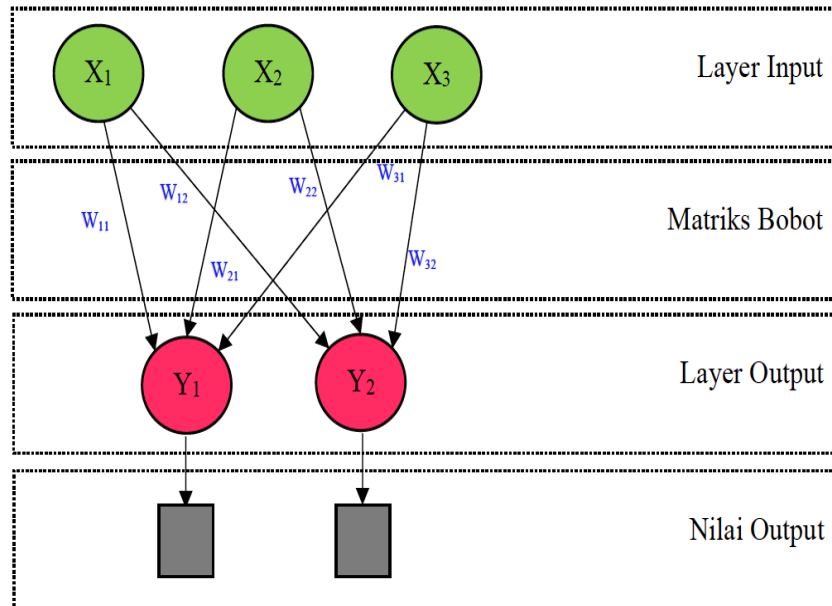
*Output layer* berfungsi untuk menampilkan hasil perhitungan sistem oleh fungsi aktivasi pada *hidden layer* berdasarkan input yang diterima.

Menurut (Windarto, 2020), arsitektur jaringan dan algoritma pelatihan sangat menentukan model-model jaringan syaraf tiruan. Arsitektur tersebut gunanya untuk menjelaskan arah perjalanan sinyal atau data di dalam jaringan. Sedangkan algoritma pelatihan menjelaskan bagaimana bobot koneksi harus diubah agar pasangan *input-output* yang diinginkan dapat tercapai dan inilah yang *backpropagation* lakukan. Dalam setiap perubahan nilai bobot koneksi dapat dilakukan dengan berbagai cara, tergantung pada jenis algoritma pelatihan yang digunakan. Dengan mengatur besarnya nilai bobot ini diharapkan bahwa kinerja jaringan dalam mempelajari berbagai macam pola yang dinyatakan oleh setiap pasangan *input-output* akan meningkat.

Menurut(Aini, 2019), arsitektur jaringan syaraf tiruan digolongkan menjadi dua model.

### 2.13.1 Jaringan lapisan tunggal (*single layer network*)

Dalam jaringan ini, sekumpulan *input* neuron dihubungkan langsung dengan sekumpulan *output*-nya seperti yang ditunjukkan Gambar 29.



**Gambar 29** Arsitektur *single layer network*

Keterangan:

$x_1, x_2, x_3$ : Nilai input ke 1 sampai  $n$ .

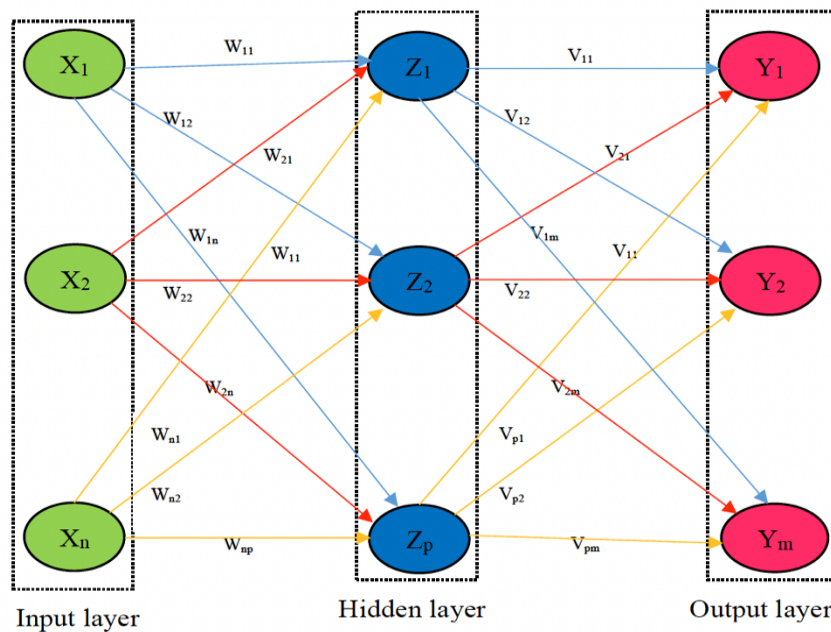
$y_1, y_2$  : Nilai output hasil pembangkitan nilai input oleh suatu fungsi aktivasi.

$w_i$  : Bobot atau nilai.

Gambar 29 memperlihatkan bahwa arsitektur *single layer network* dengan  $n$  buah input ( $x_1, x_2, x_3$ ) dan  $m$  buah output ( $y_1, y_2$ ). Dalam jaringan ini semua unit input dihubungkan dengan semua unit output. Tidak ada unit input yang dihubungkan dengan unit input lainnya dan unit output-pun demikian.

### 2.13.2 Jaringan banyak lapisan (*multilayer network*)

*Multilayer network* merupakan perluasan dari *layer* tunggal. Dalam jaringan ini, selain *input* dan *output*, ada unit-unit lain (sering disebut *hidden layer*). Arsitektur *multilayer network* dapat dilihat pada Gambar 30.



**Gambar 30** Arsitektur *multilayer network*

Keterangan:

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  : Nilai input ke 1 sampai  $n$ .

$z_1, z_2, \dots, z_p$  : Nilai dari neuron *hidden layer*.

Nilai output hasil pembangkitan nilai input oleh suatu fungsi aktivasi.

$v_i$  : Bobot atau nilai.

Penjelasan dari Gambar 30 yaitu jaringan dengan  $n$  buah unit input ( $x_1, x_2, x_3$ ), sebuah *hidden layer* yang terdiri dari  $p$  buah unit ( $z_1, z_2$ ) dan  $m$  buah output ( $y$ ). *Multilayer network* dapat menyelesaikan masalah yang lebih kompleks dibandingkan dengan *layer* tunggal, meskipun kadangkala proses pelatihan lebih kompleks dan lama.



### 2.13.3 Kelebihan dan kelemahan jaringan syaraf tiruan

Sebagai alat pemecah masalah, menurut(Siang, 2005), jaringan syaraf tiruan memiliki kelebihan dan kekurangan, beberapa keunggulan dari jaringan syaraf tiruan adalah sebagai berikut.

- a. Mampu memecahkan masalah yang sukar disimulasikan dengan menggunakan teknik analitikal logika seperti teknologi *software* standar.
- b. Mampu memahami data yang dimasukkan meskipun data tersebut tidak lengkap (*incomplete data*) atau terkena gangguan (*noisy data*).
- c. Jaringan syaraf tiruan memiliki kelebihan yang sulit diciptakan dengan pendekatan simbolik/*logical* dari teknik tradisional kecerdasan buatan, yaitu bahwa jaringan syaraf tiruan mampu belajar dari pengalaman.
- d. Hemat biaya dan lebih nyaman bila dibandingkan dengan keharusan untuk menulis program seperti *software* standar. Hal ini dikarenakan pada jaringan syaraf tiruan, yang harus dilakukan adalah melatih jaringan untuk belajar dengan cara memasukkan data set yang berisikan sekumpulan kasus ke dalam jaringan.
- e. Jaringan syaraf tiruan terbuka untuk digabungkan dengan teknologi lain untuk menghasilkan sistem hibrida yang memiliki kemampuan memecahkan masalah dengan sangat baik. Misalnya jaringan syaraf tiruan dengan sistem pakar, dengan logika samar (*fuzzy*), dan dengan algoritma genetika, atau diintegrasikan dengan database.

Selain memiliki banyak kelebihan, jaringan syaraf tiruan juga memiliki beberapa kelemahan, seperti:

- a. Jaringan syaraf tiruan kurang sesuai digunakan untuk aritmatika dan pengolahan data.
- b. Jaringan syaraf tiruan masih membutuhkan campur tangan penguji untuk memasukkan pengetahuan dan menguji data.
- c. Belum ditemukan metode paling efektif dalam merepresentasikan data *input*, memilih arsitektur yang sesuai, menentukan jumlah neuron dan juga menentukan jumlah lapisan. Cara yang digunakan sampai dengan saat ini adalah dengan *trial* dan *error*.

- d. Jaringan syaraf tiruan kurang dapat mendeskripsikan mengenai hasil. Untuk aplikasi di mana aturan-aturan penjelasan adalah hal penting, misalnya penolakan aplikasi pinjaman bank, mungkin jaringan syaraf tiruan bukan merupakan saran yang tepat untuk menjelaskan. Sebaliknya jika diutamakan hasil, misalnya prediksi pola-pola pasar saham, maka jaringan syaraf tiruan adalah saran yang tepat.

#### **2.13.4 Backpropagation**

*Backpropagation* merupakan algoritma pembelajaran terawasi yang paling banyak digunakan. *Backpropagation* melatih jaringan untuk mendapatkan keseimbangan antara kemampuan jaringan mengenali pola yang digunakan selama *training* serta kemampuan jaringan untuk memberikan *respon* yang benar terhadap pola *input* yang serupa (tapi tidak sama) dengan pola yang dipakai selama pelatihan (Siang, 2005).

Di dalam jaringan *backpropagation*, setiap unit yang berada di input layer berhubungan dengan setiap unit yang ada di *hidden layer*. Setiap unit yang ada di hidden layer terhubung dengan setiap unit yang ada di output layer. Jaringan ini terdiri dari banyak lapisan (*multilayer network*). Ketika jaringan ini diberikan pola input sebagai pola pelatihan, maka pola tersebut menuju unit-unit *hidden layer* untuk selanjutnya diteruskan pada unit-unit di output layer. Kemudian unit-unit output layer akan memberikan respon sebagai output jaringan syaraf tiruan. Saat hasil output tidak sesuai dengan yang diharapkan, maka output akan disebarkan mundur (*backward*) pada hidden layer kemudian dari hidden layer menuju input layer.

#### **2.13.5 Arsitektur backpropagation**

Menurut(Aini, 2019), jaringan *backpropagation* terdiri atas beberapa layer yaitu layer input dengan  $n$  buah neuron (ditambah sebuah bias), hidden layer yang terdiri atas  $p$  neuron (ditambah sebuah bias), serta  $m$  buah output yang masing-masing neuron pada suatu layer terhubung penuh dengan masing-masing neuron pada layer di atasnya atau di bawahnya, kecuali pada bias hanya terkoneksi penuh

dengan neuron layer di atasnya seperti yang diperlihatkan oleh arsitektur *backpropagation* pada Gambar 31.

Pada Gambar 31 menunjukkan jaringan yang memiliki  $s$  input layer  $x$ , hidden layer  $z$  dan output layer  $y$ , serta pemberian nilai bias, yaitu suatu masukkan dengan nilai tetap sama yaitu 1.

Seperti yang terlihat pada Gambar 30,  $v_{ji}$  merupakan bobot garis dari input layer  $x_i$  ke hidden layer  $z_j$  ( $v_{j0}$  merupakan bobot garis yang menghubungkan bias di input layer ke hidden layer  $z_j$ ).  $w_{kj}$  merupakan bobot dari hidden layer  $z_j$  ke output layer  $y_k$  ( $w_{k0}$  merupakan bobot dari bias di hidden layer ke output layer  $z_k$ ).

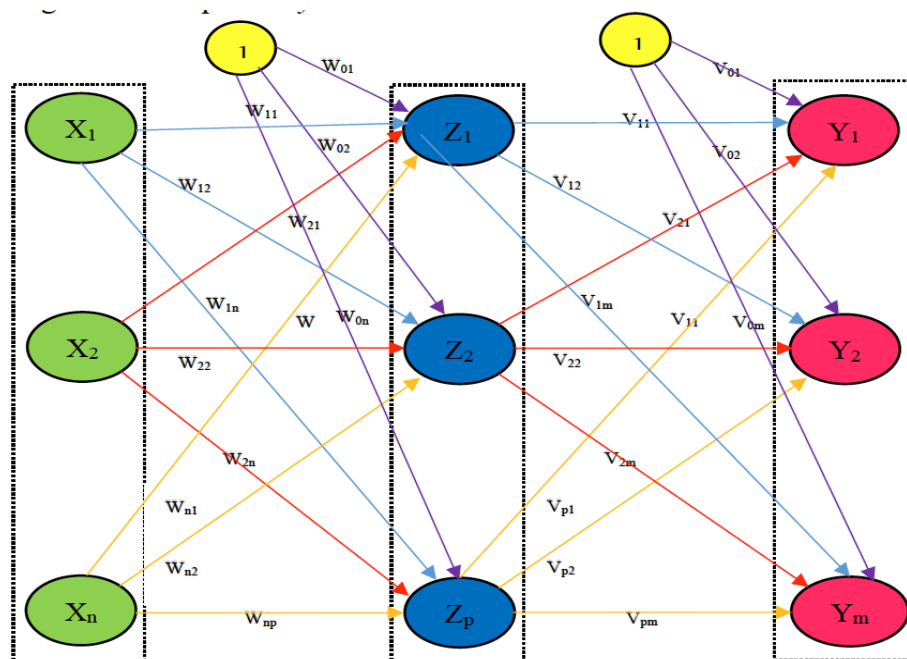
### 2.13.6 Algoritma pelatihan *backpropagation*

Menurut (Siang, 2005) algoritma pelatihan *Backpropagation* terdiri dari dua tahapan. *Feed forward* dan *backpropagation* dari galatnya. Untuk jelasnya dapat dijelaskan sebagai berikut:

Langkah 0. Pemberian inisialisasi penimbang (diberi nilai kecil secara acak).

Langkah 1. Ulangi langkah 2 hingga 9 sampai kondisi akhir iterasi dipenuhi.

Langkah 2. Untuk masing-masing pasang data pelatihan (training data), lakukan langkah 3 hingga 8.



**Gambar 31** Arsitektur *backpropagation*

**Fase I: Feedforward (umpan maju).**

Langkah 3. Masing-masing unit masukan ( $x_i, i = 1, \dots, n$ ) menerima sinyal masukan  $x_i$  dan sinyal tersebut disebarkan ke unit-unit bagian berikutnya (unit-unit lapis tersembunyi).

Langkah 4. Masing-masing unit dilapis tersembunyi dikalikan dengan penimbang dan dijumlahkan serta ditambahkan dengan biasnya:

$$z_{in_j} = v_{0j} + \sum_{i=1}^n x_i v_{ij} \quad (30)$$

Kemudian dihitung sesuai dengan fungsi pengaktif yang digunakan:

$$z_j = f(z_{in_j}) \quad (31)$$

Bila yang digunakan adalah fungsi sigmoid maka bentuk fungsi tersebut adalah:

$$z_j = \frac{1}{1 + \exp(-z_{in_j})} \quad (32)$$

Sinyal keluaran dari fungsi pengaktif tersebut dikirim ke semua unit di lapis keluaran (unit keluaran).

Langkah 5. Masing-masing unit keluaran ( $y_k, k=1,2,3,\dots,m$ ) dikalikan dengan penimbang dan dijumlahkan serta ditambah dengan biasnya:

$$y_{in_k} = w_{ok} + \sum_{j=1}^p z_j w_{jk} \quad (33)$$

Kemudian dihitung kembali sesuai dengan fungsi pengaktif

$$y_k = f(y_{in_k}) \quad (34)$$

**Fase II: Backpropagation (propagasi mundur)**

Langkah 6. Masing-masing unit keluaran ( $y_k, k=1,\dots,m$ ) menerima pola target sesuai dengan pola masukan saat pelatihan/training dan dihitung galatnya:

$$\delta_k = (t_k - y_k) f'(y_{in_k}) \quad (35)$$

Karena  $f'(y_{in_k}) = y_k \cdot (1 - y_k)$  menggunakan fungsi sigmoid, maka:

$$f'(y_{in_k}) = y_k (1 - y_k) \quad (36)$$

Menghitung perbaikan penimbang (kemudian untuk memperbaiki  $w_{jk}$ ).

$$\Delta w_{kj} = \alpha \cdot \delta_k \cdot z_j \quad (37)$$

Menghitung perbaikan koreksi:

$$\Delta w_{ok} = \alpha \cdot \partial k \quad (38)$$

Dan menggunakan nilai delta ( $\partial k$ ) pada semua unit lapis sebelumnya.

Langkah 7. Masing-masing penimbang yang menghubungkan unit-unit lapis keluaran dengan unit-unit pada lapis tersembunyi ( $z_j, j=1, \dots, p$ ) dikalikan delta ( $\partial k$ ) dan dijumlahkan sebagai masukan ke unit-unit berikutnya.

$$\delta_{in_j} = \sum_{k=1}^m \delta_k w_{jk} \quad (39)$$

Langkah berikutnya menghitung perbaikan penimbang (digunakan untuk memperbaiki  $v_{ij}$ )

$$\Delta v_{ij} = \alpha \delta_j x_i \quad (40)$$

Kemudian menghitung perbaikan bias (untuk memperbaiki  $v_{oj}$ )

$$\Delta v_{ij} = \alpha \delta_j \quad (41)$$

### Fase III: Memperbaiki penimbang dan bias

Langkah 8. Masing-masing keluaran unit ( $y_k, k=1, \dots, m$ ) diperbaiki bias dan penimbangnya ( $j=0, \dots, p$ ),

$$w_{jk}(\text{baru}) = w_{jk}(\text{lama}) + \Delta w_{jk} \quad (42)$$

Masing-masing unit tersembunyi ( $z_j, j=1, \dots, p$ ) diperbaiki bias dan penimbangannya ( $j=0, \dots, n$ ).

$$v_{jk}(\text{baru}) = v_{jk}(\text{lama}) + \Delta v_{jk} \quad (43)$$

Langkah 9. Uji kondisi pemberhentian (akhir iterasi).

#### Daftar Notasi

$X_p$  = Pola masukan pelatihan ke-p,  $p=1, 2, \dots, p \leq 1$

$X_p$  = (X1, X2, X3, ..., Xn)

$tp$  = pola target keluaran dari pelatihan

$tp$  = (t1, t2, t3, ..., tn)

$x_i$  = Unit ke-i pada lapis masukan

$X_i$  = nilai pengaktif dari unit  $X_i$

$Z_j$  = Unit ke-j pada lapis tersembunyi

$Z_{in_j}$  = keluaran untuk unit  $Z_j$

$Z_j$  = nilai pengaktif dari unit  $Z_j$

$Y_k$  = unit ke -k pada lapis keluaran

- $Y_{ink}$  = keluaran untuk unit  $Y_k$   
 $Y_k$  = nilai pengaktif dari unit  $Y_k$   
 $W_{k0}$  = nilai penimbang pada bias untuk unit  $Y_k$   
 $W_{kj}$  = nilai penimbang dari  $Z_{ij}$  ke unit  $Y_k$   
 $\Delta W_{kj}$  = selisih antara  $W_{kj}$  (t) dengan  $W_{kj}$  (t+1)  
 $V_{j0}$  = nilai penimbang pada bias untuk unit  $Z_j$   
 $V_{ij}$  = nilai penimbang dari unit  $X_i$  ke unit  $Z_j$   
 $\Delta V_{ij}$  = selisih antara  $V_{ij}$  (t) dengan  $V_{ij}$  (t+1)  
 $\delta_k$  = faktor pengendalian nilai penimbangan pada lapis keluaran  
 $\delta_j$  = faktor pengendalian nilai penimbang pada lapis tersembunyi  
 $\alpha$  = konstanta laju pelatihan (learning rate)  $0 < \alpha < 1$   
 $E$  = Total galat

Setelah pelatihan selesai dilakukan, jaringan dapat dipakai untuk pengenalan pola. Dalam hal ini, hanya propagasi maju (langkah 4 dan 5) saja yang dipakai untuk menentukan *output* jaringan. Apabila fungsi aktivasi yang dipakai bukan *sigmoid biner*, maka langkah 4 dan 5 harus disesuaikan. Demikian juga turunannya pada langkah 6 dan 7.

Dalam beberapa kasus pelatihan yang dilakukan memerlukan iterasi yang banyak sehingga membuat proses pelatihan menjadi lama. Untuk mempercepat iterasi dapat dilakukan dengan parameter  $\alpha$  atau laju pemahaman. Nilai  $\alpha$  terletak antara 0 dan 1 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ). Jika harga  $\alpha$  semakin besar, maka iterasi yang dipakai semakin sedikit. Hal ini menyebabkan pola yang sudah benar menjadi rusak sehingga pemahaman menjadi lambat. Proses pelatihan yang baik dipengaruhi pada pemilihan bobot awal karena bobot awal sangat memengaruhi apakah jaringan mencapai titik minimum lokal atau global, dan seberapa cepat konvergensinya. Oleh karena itu, dalam standar *backpropagation*, bobot dan bias diisi dengan bilangan acak kecil dan biasanya bobot awal diinisialisasi secara *random* dengan nilai antara -0,5 sampai 0,5 (atau -1 sampai 1 atau interval yang lainnya).