



**TUGAS AKHIR - TM141585**

# **IDENTIFIKASI KEAUSAN BANTALAN TIRUS (TAPERED BEARING) BERBASIS ANALISIS VIBRASI DENGAN METODE SUPPORT VECTOR MACHINE (SVM)**

**FAISAL RAHMAN ADI  
NRP. 2115 105 027**

**Dosen Pembimbing  
Ir. Suwarmin PE.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**



**TUGAS AKHIR - TM141585**

**IDENTIFIKASI KEAUSAN BANTALAN TIRUS  
(TAPERED BEARING) BERBASIS ANALISIS  
VIBRASI DENGAN METODE SUPPORT VECTOR  
MACHINE (SVM)**

**FAISAL RAHMAN ADI  
NRP. 2115 105 027**

**Dosen Pembimbing  
Ir. Suwarmin PE.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**



**FINAL PROJECT - TM141585**

**IDENTIFICATION OF WEAR IN TAPERED  
BEARING BASED ON VIBRATION ANALYSIS WITH  
SUPPORT VECTOR MACHINE (SVM) METHOD**

**FAISAL RAHMAN ADI  
NRP. 2115 105 027**

**Counselor Lecturer  
Ir. Suwarmin PE.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Institute Technology of Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**

**IDENTIFIKASI KEAUSAN BANTALAN TIRUS  
(TAPERED BEARING) BERBASIS ANALISIS VIBRASI  
DENGAN METODE *SUPPORT VECTOR MACHINE*  
(SVM)**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**FAISAL RAHMAN ADI**  
NRP. 2115 105 027

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Ir Suwarmin PE.  
NIP. 196103141987011001 (Pembimbing)
2. Dr. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc.  
NIP. 197805102001121001 (Penguji I)
3. Ari Kurniawan Saputra, ST., MT.  
NIP. 198604012015041001 (Penguji II)



**SURABAYA**

**JULI, 2017**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **IDENTIFIKASI KEAUSAN BANTALAN TIRUS (*TAPERED BEARING*) BERBASIS ANALISIS VIBRASI DENGAN METODE *SUPPORT VECTOR MACHINE* (SVM)**

**Nama Mahasiswa** : Faisal Rahman Adi  
**NRP** : 2115105027  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Suwarmin PE.

## **Abstrak**

*Data mining* memiliki arti kegiatan yang meliputi pengumpulan, pemakaian data historis untuk menemukan keteraturan, pola atau hubungan, dalam set data berukuran besar[21]. *Data mining* fokus pada prediksi dan deskripsi data. *Support Vector Machine* (SVM) adalah salah satu teknik dari *data mining*, digunakan untuk menyelesaikan kasus klasifikasi dan regresi data. SVM mampu mengklasifikasikan data untuk menghasilkan informasi atau pengetahuan baru.

Dalam penelitian ini metode SVM digunakan untuk mengidentifikasi keausan pada bantalan tirus (*tapered bearing*). Data yang digunakan adalah data yang berasal dari analisis vibrasi. Pengujian analisis vibrasi dilakukan pada bantalan yang tidak mengalami keausan (normal) dan bantalan yang mengalami keausan. Keausan pada *inner race* diamati pada BPFI, keausan pada *outer race* diamati pada BPFO. Data vibrasi dari kedua bantalan tersebut disatukan menjadi *database*. *Database* tersebut dibagi menjadi *data testing* dan *data training*. SVM melakukan *train* untuk proses klasifikasi data, apabila akurasi SVM masih rendah maka dioptimasi dengan mengubah rasio pembagian dari *data training* dan *data testing*.

Keausan pada bantalan dapat diidentifikasi salah satunya melalui spektrum data vibrasi dimana muncul *sideband* di daerah BPFO untuk *outer race* dan BPFI untuk *inner race* dengan nilai  $\pm 1 \times \text{FTF}$ . Identifikasi keausan melalui metode SVM menghasilkan model dengan mengumpulnya data BPFI atau BPFO sebagai

indikasi terdapat keausan pada bantalan tersebut. Optimasi metode SVM dilakukan dengan metode *K-fold* yang menghasilkan metode SVM dengan keakurasian tertinggi.

**Kata kunci : analisis vibrasi, keausan bantalan, *Support Vector Machine* (SVM)**

# **IDENTIFICATION OF WEAR IN TAPERED BEARING BASED ON VIBRATION ANALYSIS WITH SUPPORT VECTOR MACHINE (SVM) METHOD**

**Name** : Faisal Rahman Adi  
**NRP** : 2115105027  
**Departement** : Mechanical Engineering,  
FTI-ITS  
**Counselor Lecturer** : Ir. Suwarmin PE.

## **Abstract**

*Data mining mean's an activity that included data collecting, old data using to find arrange of data, pattern or relationship, in a large dataset[21]. Data maining focused on data prediction and data description. SVM is ones of data mining method that used to finised classification case or data regression. SVM able to data classified to producted an information or a new knowledge.*

*In this research, SVM method used to identified wear in tapered bearing. Data that used was from vibration analysis. Vibration analysis did on normal bearing and wear bearing. Wear that happened on inner race was looked from BPF<sub>I</sub>, and wear that happened on outer race was looked from BPF<sub>O</sub>. Vibration data from those bearing combined to be a database. Those database sparated to a data testing and a data training. SVM used to data classified, SVM method have to optimized when the accurated still low.*

*One of ways to identified wear in tapered bearing can through by spectrum data vibration, sideband in BPF<sub>O</sub>'s area for outer race and BPF<sub>I</sub>'s area for inner race that the value is  $\pm 1x$  FTF. Identficated wear through by SVM method has results that models with data BPF<sub>I</sub> or BPF<sub>O</sub> gathered which indicated wear happen. Optimization SVM method did in K-fold's way that result SVM method with the highest accuration.*

***Keywords : Vibration analysis, wearing of bearing, Support Vector Machine (SVM)***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas berkat rahmat, hidayah, petunjuk dan rizkiNya penulisan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Sholawat serta salam terus tucurahkan kepada junjungan kita Rasulullah SAW. Tugas akhir ini merupakan tahap akhir dalam penelitian dan merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada pihak - pihak yang telah banyak membantu dalam proses penyelesaian tugas akhir ini antara lain:

1. **Ir. Suwarmin PE**, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan hingga terselesaikan tugas akhir ini.
2. **Dr. Eng. Unggul Wasiwitono ST., M.Eng, Sc ; Ari Kurniawan, ST, MT**, selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan yang berharga untuk tugas akhir ini.
3. **Ayah dan ibu** penulis yang telah banyak memberikan banyak dukungan dan doa dalam kehidupan ini.
4. Seluruh teman-teman Lintas Jalur Teknik Mesin ITS angkatan 2015.
5. Seluruh teman-teman selama penulis menimba ilmu di kampus ITS Surabaya.
6. Seluruh Dosen dan Karyawan Teknik Mesin FTI-ITS yang telah banyak memberi ilmu kepada penulis selama belajar di Departemen Teknik Mesin ITS.
7. Seluruh pihak yang belum disebutkan di atas yang telah memberikan do'a, bantuan, dan dukungannya bagi penulis hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

Tugas akhir ini masih sangat jauh dari sempurna, untuk itu masukan dan saran sangat diperlukan untuk menyempurnakan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu dan teknologi di Indonesia umumnya dan ITS khususnya.

Surabaya, 21 Juli 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xvii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB II DASAR TEORI</b>	
2.1 Bantalan ( <i>Bearing</i> ).....	5
2.1.1 Jenis Bantalan Gelinding .....	7
2.1.2 Kegagalan pada Bantalan.....	8
2.2 <i>Tapered Roller Bearing</i> .....	12
2.2.1 <i>Tapered Roller Bearing</i> Jenis <i>Single Row</i> .....	13
2.2.2 Penggunaan <i>Tapered Roller Bearing</i> .....	14
2.3 Vibrasi.....	14
2.3.1 Analisis Vibrasi.....	17
2.3.2 Tipe Data Vibrasi.....	19
2.3.3 Deteksi Kegagalan dengan Analisis Vibrasi .....	21
2.4 Data Mining .....	24
2.4.1 <i>Support Vector Machine</i> .....	27
2.4.1.1 Kelebihan SVM pada Analisis Vibrasi... ..	29
2.5 Tinjauan Pustaka.....	31
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Alat dan Bahan Uji.....	37
3.1.1 Alat Uji.....	37

3.1.2 Bahan Uji .....	39
3.2 Alur Penelitian .....	41
3.2.1 Skema Penelitian .....	42
3.3 Pengujian.....	43
3.3.1 Alur Pengujian .....	44
3.3.2 Diagram Alir Pengujian .....	44
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Analisa keausan <i>tapered roller bearing</i> melalui data vibrasi.....	47
4.2 Proses dalam <i>data mining</i> .....	55
4.3 Identifikasi keausan melalui metode SVM .....	56
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	73
5.2 Saran.....	74
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	75
<b>LAMPIRAN</b> .....	79

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	bantalan dan beban yang diterima.....	5
<b>Gambar 2.2</b>	contoh pemasangan bantalan dengan poros .....	6
<b>Gambar 2.3</b>	<i>Ball Roller Bearing</i> .....	7
<b>Gambar 2.4</b>	<i>Cylindrical Roller Bearing</i> .....	7
<b>Gambar 2.5</b>	<i>Tapered Roller Bearing</i> .....	7
<b>Gambar 2.6</b>	<i>Needle Cage Roller Bearing</i> .....	7
<b>Gambar 2.7</b>	bentuk keausan pada bantalan.....	9
<b>Gambar 2.8</b>	bentuk korosi pada bantalan.....	9
<b>Gambar 2.9</b>	bentuk retakan pada bantalan.....	10
<b>Gambar 2.10</b>	bentuk pengelupasan pada bantalan .....	10
<b>Gambar 2.11</b>	bentuk pengotoran pada bantalan.....	11
<b>Gambar 2.12</b>	Ilustrasi <i>misalignment angular</i> dan <i>pararel</i> .....	11
<b>Gambar 2.13</b>	Ilustrasi <i>unbalanced</i> pada poros.....	12
<b>Gambar 2.14</b>	<i>tapered roller bearing</i> .....	13
<b>Gambar 2.15</b>	<i>tapered roller bearing single row</i> .....	14
<b>Gambar 2.16</b>	komponen vibrasi, ilustrasi gerak harmonik .....	15
<b>Gambar 2.17</b>	komponen gelombang .....	16
<b>Gambar 2.18</b>	Ilustrasi siklus vibrasi .....	17
<b>Gambar 2.19</b>	ilustrasi perbedaan domain waktu dan domain Frekuensi .....	19
<b>Gambar 2.20</b>	contoh bentuk domain waktu data .....	20
<b>Gambar 2.21</b>	contoh bentuk domain frekuensi data .....	20
<b>Gambar 2.22</b>	deteksi kegagalan pada peralatan mesin .....	21
<b>Gambar 2.23</b>	grafik ketidaklayakan mesin secara umum .....	22
<b>Gambar 2.24</b>	ilustrasi notasi rumus pada bantalan .....	24
<b>Gambar 2.25</b>	proses penemuan pengetahuan pada <i>database</i> .....	25
<b>Gambar 2.26</b>	skema proses <i>data mining</i> .....	26
<b>Gambar 2.27</b>	Ilustrasi metode SVM .....	27
<b>Gambar 2.28</b>	“ <i>fat</i> ” dan “ <i>skinny</i> ” margin .....	28
<b>Gambar 2.29</b>	skema SVM.....	29
<b>Gambar 2.30</b>	skema analisis vibrasi konvensional .....	30
<b>Gambar 2.31</b>	skema analisis vibrasi dengan SVM .....	30
<b>Gambar 2.32</b>	spektrum <i>fault-free</i> bantalan dan cacat lokal <i>outer</i>	

	<i>race</i> .....	31
<b>Gambar 2.33</b>	spektrum cacat terdistribusi <i>outer race</i> dan <i>inner race</i> .....	32
<b>Gambar 2.34</b>	tahapan analisa kegagalan .....	32
<b>Gambar 2.35</b>	skema proses SVM .....	33
<b>Gambar 2.36</b>	skema percobaan Baccari.....	34
<b>Gambar 3.1</b>	skema rangkaian alat uji.....	37
<b>Gambar 3.2</b>	skema rangkaian DAQ dengan rumah uji bantalan.....	38
<b>Gambar 3.3</b>	skema rangkaian motor dengan bantalan .....	38
<b>Gambar 3.4</b>	ilustrasi letak bagian yang mengalami keausan .....	40
<b>Gambar 3.5</b>	KOYO <i>tapered roller bearing</i> .....	40
<b>Gambar 3.6</b>	Timken <i>tapered roller bearing</i> .....	40
<b>Gambar 3.7</b>	skema penelitian.....	42
<b>Gambar 3.8</b>	skema pengujian.....	42
<b>Gambar 3.9</b>	diagram alir pengujian .....	44
<b>Gambar 4.1</b>	perbandingan <i>outer race</i> sebelum (a) dan sesudah (b) terjadi keausan .....	47
<b>Gambar 4.2</b>	perbandingan <i>inner race</i> sebelum (a) dan sesudah (b) terjadi keausan .....	48
<b>Gambar 4.3</b>	spektrum vibrasi dengan nilai BPFO pada bantalan Koyo normal .....	49
<b>Gambar 4.4</b>	spektrum vibrasi dengan nilai BPFI pada bantalan Koyo normal .....	49
<b>Gambar 4.5</b>	spektrum vibrasi dengan nilai BPFO pada bantalan Koyo yang mengalami keausan .....	50
<b>Gambar 4.6</b>	spektrum vibrasi dengan nilai BPFI pada bantalan Koyo yang mengalami keausan .....	50
<b>Gambar 4.7</b>	spektrum vibrasi dengan nilai FTF pada bantalan Koyo yang mengalami keausan .....	51
<b>Gambar 4.8</b>	spektrum vibrasi dengan nilai 1x BPFO dan <i>sideband</i> pada bantalan Koyo yang mengalami keausan.....	53
<b>Gambar 4.9</b>	spektrum vibrasi dengan nilai 2x BPFO dan <i>sideband</i> pada bantalan Koyo yang mengalami keausan.....	53

<b>Gambar 4.10</b>	spektrum vibrasi dengan nilai 1x BPFI dan <i>sideband</i> pada bantalan Koyo yang mengalami keausan.....	54
<b>Gambar 4.11</b>	spektrum vibrasi dengan nilai 2x BPFI dan <i>sideband</i> pada bantalan Koyo yang mengalami keausan.....	54
<b>Gambar 4.12</b>	diagram alir pengolahan data dengan metode SVM pada program .....	58
<b>Gambar 4.13</b>	model 2 <i>Fine Gaussian</i> SVM menghasilkan keakurasian 97.1% .....	63
<b>Gambar 4.14</b>	bantalan Koyo bagian <i>inner race</i> normal (a) dan mengalami keausan (b).....	64
<b>Gambar 4.15</b>	klasifikasi bantalan Koyo yang mengalami keausan pada <i>inner race</i> dengan keakuratan 91.9% .....	64
<b>Gambar 4.16</b>	hasil klasifikasi bantalan Koyo yang mengalami keausan pada <i>inner race</i> dengan menghilangkan beberapa <i>class</i> .....	65
<b>Gambar 4.17</b>	bantalan Koyo bagian <i>outer race</i> normal (a) dan terjadi keausan(b) .....	66
<b>Gambar 4.18</b>	klasifikasi bantalan Koyo yang mengalami keausan pada <i>outer race</i> dengan keakuratan 95% .....	66
<b>Gambar 4.19</b>	hasil klasifikasi bantalan Koyo yang mengalami keausan bagian <i>outer race</i> dengan menghilangkan beberapa <i>class</i> .....	67
<b>Gambar 4.20</b>	Timken <i>outer race</i> normal (a) dan sesudah terjadi keausan (b).....	68
<b>Gambar 4.21</b>	klasifikasi Timken yang mengalami keausan <i>outer race</i> dengan keakuratan 94.2% .....	69
<b>Gambar 4.22</b>	hasil klasifikasi Timken yang mengalami keausan <i>inner race</i> dengan menghilangkan beberapa <i>class</i> .....	69
<b>Gambar 4.23</b>	Timken <i>outer race</i> normal (a) dan keadaan cacat lokal (b) .....	70
<b>Gambar 4.24</b>	klasifikasi Timken cacat lokal <i>outer race</i> dengan keakuratan 93.5% .....	71

**Gambar 4.25** klasifikasi Timken cacat lokal *outer race* dengan  
menghilangkan beberapa *class* .....71

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> perbandingan jenis bantalan dengan beban yang diterima .....	6
<b>Tabel 2.2</b> perbedaan jenis bantalan gelinding.....	7
<b>Tabel 2.3</b> bagian - bagian <i>tapered roller bearing</i> .....	13
<b>Tabel 3.1</b> spesifikasi alat uji .....	39
<b>Tabel 3.2</b> spesifikasi bahan uji.....	40
<b>Tabel 4.1</b> ilustrasi metode <i>K-fold</i> .....	60
<b>Tabel 4.2</b> hasil keakurasian metode SVM .....	61
<b>Tabel 4.3</b> gambar model metode SVM tabel 4.2 .....	61

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam dunia industri, perawatan atau *maintenance* terhadap mesin – mesin dilakukan dengan berbagai teknik. *Predictive maintenance* merupakan salah satu teknik dari perawatan yang berbasis pada kondisi mesin. *Predictive* atau *condition-based maintenance* terdiri dari pemantauan terhadap kondisi mesin dan operasional secara periodik, mengidentifikasi komponen yang bermasalah pada mesin dan melakukan perencanaan perawatan, langkah selanjutnya jika diperlukan mesin dimatikan dan komponen yang bermasalah diganti[7]. Analisis vibrasi adalah salah satu metode yang digunakan dalam *predictive maintenance*, digunakan untuk mengawasi dan menganalisa kondisi kritis dari mesin, komponen, dan sistem pada bagian tertentu berbasis getaran atau vibrasi yang ditimbulkan benda tersebut.

Bantalan merupakan komponen mesin yang berfungsi menahan beban yang ditimbulkan oleh poros. Bantalan dirancang untuk menerima beban aksial dan radial akibat pergerakan poros, salah satu jenis bantalan yang memiliki kemampuan baik dalam menerima beban tersebut adalah jenis *tapered roller bearing*. Fungsi dari bantalan yang vital membuat bantalan rentan mengalami kegagalan apabila tidak dilakukan sistem perawatan yang baik. Keausan merupakan salah satu jenis kegagalan bantalan yang mampu mengurangi umur bantalan.

*Data mining* memiliki arti kegiatan yang meliputi pengumpulan, pemakaian data historis untuk menemukan keteraturan, pola atau hubungan, dalam set data berukuran besar[21]. *Data mining* fokus pada prediksi dan deskripsi data. *Support Vector Machine* (SVM) adalah salah satu teknik dari *data mining*, digunakan untuk menyelesaikan kasus klasifikasi dan regresi data. SVM mampu mengklasifikasikan data untuk menghasilkan informasi atau pengetahuan baru.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penyusunan tugas akhir ini adalah mengidentifikasi keausan bantalan jenis *tapered roller bearing* berdasarkan data hasil analisis vibrasi melalui salah satu metode *data mining* yaitu *Support Vector Machine* (SVM), serta melakukan optimasi metode SVM untuk memperoleh keakuratan yang tinggi dalam klasifikasi data.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini berdasarkan rumusan masalah diatas adalah:

1. Menganalisis keausan *tapered roller bearing* melalui bentuk data vibrasi.
2. Mengolah data hasil analisis vibrasi menggunakan prinsip dari *data mining*.
3. Mengidentifikasi keausan bantalan melalui klasifikasi dari metode *Support Vector Machine* (SVM).

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah digunakan dalam penelitian ini adalah untuk membuat bahasan dari penelitian ini tidak meluas. Berikut merupakan batasan masalah penelitian ini:

1. Seluruh proses pengujian dilakukan di Laboratorium Otomasi dan Kendali, Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
2. Alat – alat yang digunakan adalah alat standart dan dalam keadaan baik.
3. Pengujian dilakukan pada *Tapered Roller Bearing* tipe 30304 buatan *Timken* dan *Koyo*.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat dari penelitian ini:

1. Sebagai pembelajaran bagi mahasiswa dalam menggunakan alat – alat analisis vibrasi.

2. Sebagai pembelajaran terhadap fenomena kegagalan bantalan melalui analisis vibrasi.
3. Implementasi *Data Mining* dengan metode SVM (*Support Vector Machine*) sebagai salah satu metode dalam mengidentifikasi kegagalan komponen.
4. Sebagai konsep dasar dalam penggunaan metode SVM (*Support Vector Machine*) untuk kasus lain.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### 1. Bab I Pendahuluan

Pada bab ini dibahas tentang latar belakang perumusan masalah sebagai topik tugas akhir, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan tugas akhir.

### 2. Bab II Dasar Teori

Bab ini membahas referensi yang digunakan untuk mendukung penelitian seperti penjelasan tentang bantalan, *tapered roller bearing* pada khususnya, dasar – dasar vibrasi dan analisis vibrasi, *Data mining*, metode SVM (*Support Vector Machine*), dan teori lainnya yang mendukung penelitian ini.

### 3. Bab III Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian membahas tentang alat dan bahan yang digunakan dalam pengujian, skema penyusunan alat uji, langkah penelitian, langkah pengujian, dan langkah pengolahan data.

### 4. Bab IV Analisa dan Pembahasan

Bab ini menampilkan hasil dari pengujian dan pengolahan data, serta pembahasan terhadap hasil yang diperoleh.

### 5. Bab V Kesimpulan dan Saran

Pada bab ini berisikan kesimpulan dan saran dari proses penelitian.

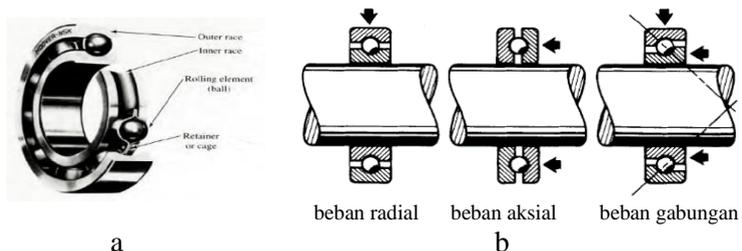
*Halaman ini sengaja di kosongkan*

## BAB II DASAR TEORI

Pada bab ini dibahas mengenai dasar teori tentang bantalan pada umumnya dan *tapered roller bearing* pada khususnya, serta kegagalan yang terjadi pada bantalan. Dasar – dasar dari vibrasi dan analisis vibrasi dibahas pada bab ini sebelum melakukan pembahasan tentang *data mining* dan metode *support vector machine* (SVM). Tinjauan pustaka adalah rangkuman penelitian – penelitian terdahulu sebagai acuan pengerjaan penelitian ini.

### 2.1 Bantalan (*Bearing*)

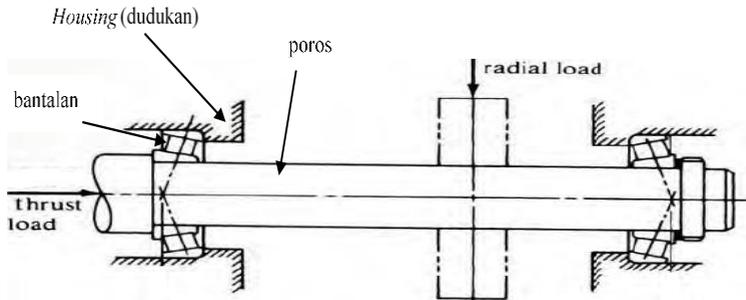
*Bearing* yang dalam bahasa indonesia berarti bantalan, bantalan memiliki arti alat atau tempat yang digunakan untuk menumpu poros benda, berputar sedemikian rupa hingga perputaran poros itu berjalan lancar. Berdasarkan pengertian tersebut, bantalan digunakan untuk menahan beban yang terjadi akibat dari suatu gerak pada salah satu bagian mesin, dengan kata lain prinsip bantalan adalah menahan beban. Gambar 2.1a menunjukkan gambar bantalan secara umum.



Gambar 2. 1 bantalan dan beban yang diterima [18][17]

Bantalan digunakan untuk menerima dua buah beban, yaitu beban aksial, dan beban radial. Beban radial terjadi terhadap pusat dari bantalan sepanjang jari – jarinya, beban aksial terjadi searah dengan sumbu poros. Pada gambar 2.1b ditunjukkan beban yang diterima oleh bantalan. Beban yang diterima bantalan merupakan salah satu dasar pemilihan jenis bantalan. Pada tabel

2.1 ditunjukkan perbandingan jenis bantalan terhadap beban yang diterima.



Gambar 2. 2 contoh pemasangan bantalan dengan poros[18]

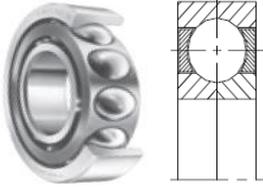
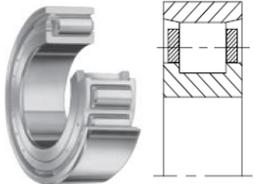
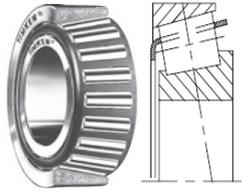
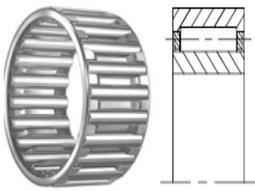
Hubungan antara bantalan dengan poros ditunjukkan pada gambar 2.2. Pada gambar 2.2 bantalan yang digunakan adalah jenis *tapered bearing*, ditunjukkan bahwa bantalan berperan menahan beban pada poros secara radial maupun beban *thrust* atau aksial.

Tabel 2. 1 perbandingan jenis bantalan dengan beban yang diterima[18]

Jenis Bantalan	Kemampuan menerima beban radial	Kemampuan menerima beban aksial
<i>Singel row, deep groove ball</i>	Baik	Cukup
<i>Double row, deep groove ball</i>	Sempurna	Baik
<i>Angular contact</i>	Baik	Sempurna
<i>Cylindrical roller</i>	Sempurna	Buruk
<i>Neddle</i>	Sempurna	Buruk
<i>Spherical roller</i>	Sempurna	Cukup/Baik
<i>Tapered roller</i>	Sempurna	Sempurna

## 2.1.1 Jenis Bantalan Gelinding

Tabel 2. 2 perbedaan jenis bantalan gelinding

No.	Gambar	Penjelasan
1.		<p>Gambar 2. 3 <i>Ball Roller Bearing</i>[26][11], <i>Ball roller bearings</i> adalah salah satu jenis bantalan dengan ciri bola-bola atau <i>ball</i> sebagai elemen pemutarnya.</p>
2.		<p>Gambar 2. 4 <i>Cylindrical Roller Bearing</i>[26][11] <i>Cylindrical roller bearings</i> adalah jenis bantalan, dengan sebuah tabung atau silinder sebagai elemen pemutarnya.</p>
3.		<p>Gambar 2. 5 <i>Tapered Roller Bearing</i>[26][11], <i>Tapered roller bearings</i> adalah salah satu jenis bantalan yang bercirikan silinder atau tabung berbentuk agak mengerucut sebagai elemen pemutarnya.</p>
4.		<p>Gambar 2. 6 <i>Needle Cage Roller Bearing</i>[26][11], <i>Needle Roller Bearing</i> adalah jenis bantalan gelinding dengan yang dirancang untuk <i>space</i> yang kecil namun dengan kemampuan yang baik.</p>

Jenis bantalan menurut fungsinya sebagai pendukung dari poros dibagi menjadi 2 yaitu bantalan gelinding (*roller bearing*) dan bantalan luncur (*sliding bearing*)[11]. Perbedaan mendasar dari kedua jenis bantalan tersebut adalah bantalan gelinding menggunakan elemen putar (bola, silinder, *taper*, dan lain-lain), bantalan luncur menggunakan mekanisme meluncur dengan pelumas sebagai sarannya. Bantalan gelinding memiliki banyak jenis berdasarkan elemen putarnya, jenis – jenis bantalan gelinding yang umum dapat dilihat pada tabel 2.2.

### 2.1.2 Kegagalan pada Bantalan

Kegagalan pada bantalan terdiri dari berbagai jenis dan bentuk, serta penyebab yang berbeda – beda. Berikut merupakan beberapa jenis dari kegagalan bantalan.

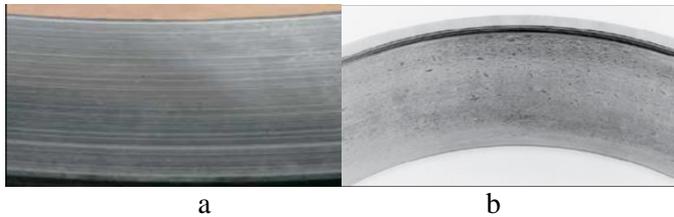
#### a. Keausan

Keausan terjadi pada permukaan yang bersentuhan saat sedang meluncur, saat atau setelah beroperasi pada waktu tertentu bantalan akan mengalami keausan[10]. Beberapa penyebab keausan diantaranya:

- Kesalahan pada proses produksi
- Benda asing sebagai pencemar
- Kurangnya pelumasan

Keausan yang terjadi pada bantalan akibat pengikisan disebabkan oleh adanya benda asing (pasir, besi, dan material lain) yang masuk kedalam sistem pelumasan bantalan, mengakibatkan gesekan antara benda asing tersebut dengan bantalan. Bentuk keausan dapat dilihat pada gambar 2.7a dan gambar 2.7b.

Gambar 2.7a adalah *outer racer* yang mengalami keausan secara terdistribusi atau merata. Gambar 2.7b adalah *outer racer* yang mengalami keausan akibat dari puing – puing bagian lain atau benda asing yang masuk kedalam sistem pelumasan dari bantalan, hal tersebut disebabkan oleh komponen pembatas ataupun perawatan yang kurang baik.



Gambar 2. 7 bentuk keausan pada bantalan [27]

b. Korosi

Korosi adalah fenomena oksidasi pada permukaan yang berasal dari reaksi kimia. Korosi terjadi ketika *sulfur* atau *chorine* yang terdapat pada pelumas mengalami kerusakan karena temperature tinggi. Penyebab lain terjadinya korosi adalah ketika air masuk kedalam sistem bantalan. Bentuk korosi pada bantalan dapat dilihat pada gambar 2.8a dan gambar 2.8b.



Gambar 2. 8 bentuk korosi pada bantalan [12]

c. Retak

Retakan atau garis pemisahan merupakan kegagalan yang dapat mematahkan bantalan. Retak diakibatkan oleh beban yang melebihi desain, ketidaksuaiian bantalan dengan poros maupun dengan rumah bantalan, kenaikan temperatur yang tinggi dan kurangnya pelumasan pada saat yang bersamaan[12]. Bentuk retakan pada bantalan dapat dilihat pada gambar 2.9a dan gambar 2.9b.



Gambar 2. 9 bentuk retakan pada bantalan [12]

d. Pengelupasan

Pengelupasan merupakan tanda dari umur bantalan telah habis. Pengelupasan terjadi karena beban sentuhan saat operasional, *clearance* operasional lebih kecil daripada desain. Kesalahan pemasangan serta tidak akuratnya bentuk dari poros dan rumah bantalan dapat menyebabkan pengelupasan[12]. Bentuk pengelupasan pada bantalan dapat dilihat pada gambar 2.10a dan gambar 2.10b.



Gambar 2. 10 bentuk pengelupasan pada bantalan [12]

e. Pengotoran

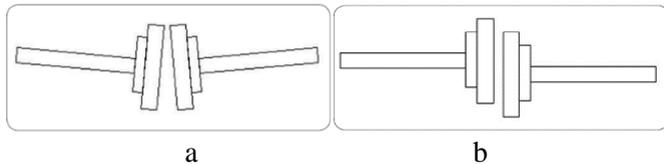
Pengotoran adalah fenomena dimana permukaan bantalan mengalami perubahan warna, akibat perubahan temperature saat operasional. Pengotoran juga dapat terjadi karena pelumas yang rusak menempel pada permukaan bantalan, apabila dibiarkan maka dapat mengakibatkan pengikisan saat operasional. Bentuk pengotoran pada bantalan dapat dilihat pada gambar 2.11a dan gambar 2.11b.



Gambar 2. 11 bentuk pengotoran pada bantalan [12]

f. *Misalignment*

*Misalignment* atau ketidaksegarisan, terjadi ketika poros, sambungan (*coupling*), dan bantalan tidak dalam kondisi segaris pada sumbunya[15]. *Misalignment* mengacu pada perbedaan garis sumbu poros yang terdapat di bantalan dengan sumbu bantalan itu sendiri[18]. Berikut merupakan ilustrasi *misalignment angular* dan *misalignment paralel*.



Gambar 2. 12 Ilustrasi *misalignment angular* dan *paralel*[15]

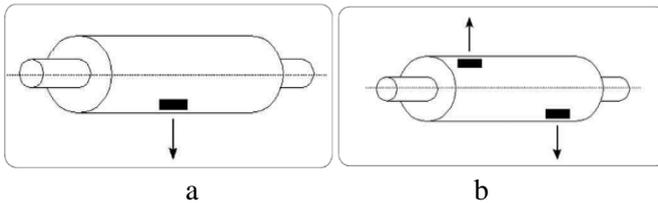
Gambar 2.13a menunjukkan ilustrasi *misalignment angular* pada sambungan atau kopling, masing – masing poros membentuk sudut tersendiri terhadap garis sumbunya. Gambar 2.13b adalah ilustrasi *misalignment paralel* pada sambungan atau kopling, salah satu atau kedua poros mengalami *offset* atau garis sumbu tidak pada tempatnya. Penyebab lain terjadinya ketidaksegarisan adalah:

1. Pertambahan ukuran komponen karena pertambahan temperatur.

2. Terjadinya pergeseran komponen saat operasi.
3. Poros terlalu panjang.

g. *Unbalance*

*Unbalance* atau ketidakseimbangan adalah distribusi berat yang tidak seragam di seluruh bagian benda. Koreksi terhadap distribusi berat yang tidak sama ini disebut *balancing*.



Gambar 2. 13 Ilustrasi *unbalanced* pada poros[15]

Gambar 2.13a merupakan ilustrasi *static unbalance*, yaitu distribusi berat benda terpusat pada satu titik. Gambar 2.13b menunjukkan *dynamic unbalance*, yaitu distribusi beban benda lebih dari satu titik. Penyebab utama ketidakseimbangan adalah:

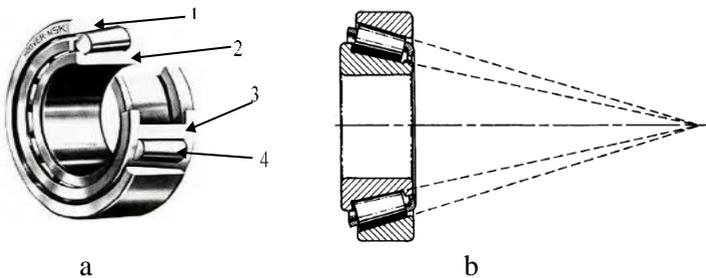
1. Densitas material tidak seragam.
2. Pemesinan tidak menghasilkan benda kerja yang bulat atau simetri sempurna.
3. Kesalahan dalam perakitan.

## 2.2 *Tapered Roller Bearings*

*Tapered roller bearings* adalah suatu bantalan yang di rancang untuk kokoh terhadap *thrust loads* (beban aksial) dan *radial loads* (beban radial) yang besar, mendapatkan penilaian yang sempurna untuk keduanya[18]. *Tapered roller bearing* biasanya digunakan bantalan roda pada kendaraan dan mesin – mesin alat berat dimana membutuhkan ketahanan terhadap beban aksial dan radial yang besar nilainya.

Bentuk khas dari *tapered roller bearings* dapat dilihat pada gambar 2.14b, yaitu memiliki elemen putar yang berbentuk tabung yang sedikit meruncing dan apabila ditarik garis lurus akan menyilang di titik tertentu pada sumbu bantalan. *Tapered roller bearing* memiliki ciri *cup* atau *outer ring* terpisah dengan *tapered roller* dan *cone* atau *inner ring*.

Pada gambar 2.14a ditunjukkan bagian - bagian dari *tapered roller bearing*. Penjelasan dari notasi angka pada gambar 2.14 dapat dilihat pada tabel 2.3. *Tapered roller bearing* terdiri dari 4 bagian utama.



Gambar 2. 14 tapered roller bearing[18][17]

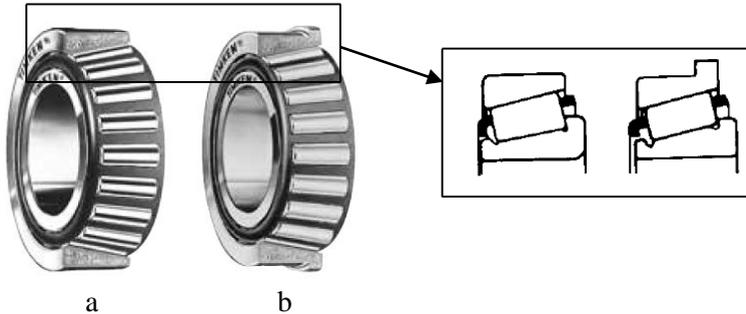
Tabel 2. 3 bagian - bagian tapered roller bearing

No.	Nama bagian
1	<i>Inner Ring</i> (cincin dalam)
2	<i>Outer Ring</i> (cincin luar)
3	<i>Rolling Element: Tapered Roller</i> (elemen putar: taper)
4	<i>Cage</i> (sangkar dari elemen putar)

### 2.2.1 Tapered Roller Bearing Jenis Single Row

Pada dasarnya *tapered roller bearing* dibagi menjadi dua jenis, yaitu *single row* atau satu baris *tapered roller* dan *double row* atau dua *tapered roller* yang digabungkan. Pada umumnya para produsen bantalan membagi lagi jenis *single row* dan *double row* sesuai dengan kebutuhan.

*Single row* memiliki arti bahwa *tapered roller* yang terdapat pada bantalan adalah satu baris melingkar. Beberapa jenis *tapered roller bearing single row* yang umum dapat ditunjukkan pada gambar 2.15.



Gambar 2. 15 tapered roller bearing single row[28]

Pada gambar 2.15a ditunjukkan bentuk dari *tapered roller bearing single row*. *Tapered roller bearing single row* dan gambar 2.15b *single row with flanged outer ring*, perbedaannya yaitu terdapat pada sisi luar dari bantalan, terdapat *flanged* atau tidak. Pinggiran atau *flanged* yang terdapat pada *tapered roller bearing single row with flanged* berfungsi untuk memudahkan peletakan bantalan secara aksial pada rumah bantalan.

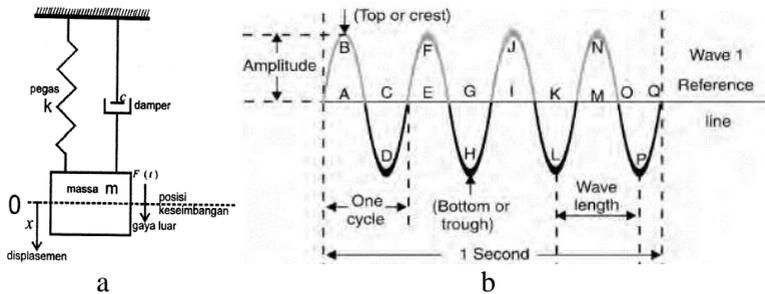
### 2.2.2 Penggunaan Tapered Roller Bearing

*Tapered roller bearing* umumnya digunakan pada perangkat dengan beban aksial dan radial yang besar. Penggunaan dari *tapered roller bearing* adalah pada *gearboxes* untuk *heavy trucks*, *bevel-gear* transmisi, *spindel* mesin bubut, dan lain – lain.

## 2.3 Vibrasi

Vibrasi adalah gerak berkala (*periodic motion*) atau sebuah gerak bolak - balik selama selang waktu tertentu. Massa, redaman, dan kekakuan adalah komponen penting dalam suatu vibrasi. Massa mendeskripsikan tentang material, yaitu seberapa banyak material tersebut dengan satuan kg. Kekakuan (*Stiffness*)

merupakan suatu bilangan yang timbul akibat perlawanan terhadap gaya yang diterima, satuannya N/m. Redaman (*damping*) sebagai komponen penting lainnya. Redaman digunakan untuk mengurangi kecepatan, satuannya N/(m/s). Pada gambar 2.16a ditunjukkan komponen penting dari vibrasi.

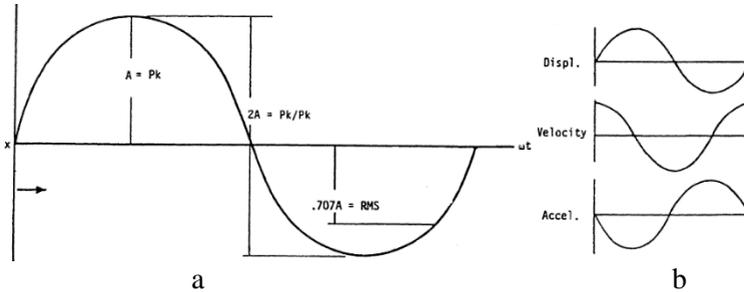


Gambar 2. 16 komponen vibrasi [8], ilustrasi gerak harmonik [7]

*Harmonic motion* atau gerak selaras adalah bagian dari *periodic motion*, *harmonic motion* mengulang setiap elemen berputar. Ilustrasi gerak harmonik ditunjukkan pada gambar 2.16b. Amplitudo ditunjukkan dengan jarak antara garis referensi dengan titik B. *One cycle* ditunjukkan dari gelombang yang bergerak dari garis referensi (titik A) kembali ke garis referensi (titik E). Panjang gelombang (*wave length*) ditunjukkan dengan jarak antar puncak.

Pada vibrasi terdapat tiga besaran untuk mendeskripsikannya, yaitu *displacement*, *velocity*, dan *acceleration*. Pada gambar 2.17b ditunjukkan bentuk gelombang dari masing – masing besaran.

Pada gambar 2.17a ditunjukkan beberapa komponen dari gelombang, amplitudo dinotasikan dengan  $A$ , atau dapat disebut dengan *peak* ( $P_k$ ). *Peak-to-peak* dinotasikan dengan  $2A$ .  $RMS=0.707A$ , atau  $0.707$  dikali nilai *peak*. Nilai dari RMS didapat dari akar rata – rata suatu fungsi kuadrat, untuk  $0.707$  didapat dari perhitungan akar rata – rata fungsi gelombang kuadrat pada satu siklus.



Gambar 2. 17 komponen gelombang[16]

*Displacement* atau perpindahan, yang berarti perubahan jarak atau posisi dari suatu benda relatif terhadap titik referensinya yang biasanya ditunjukkan dengan satuan mils atau sama dengan 0.001 inch[16], atau dalam satuan internasional disebut micron, 1 micron = 0.001 mm. Pada gambar 2.17b, bentuk gelombang dari *displacement* adalah yang pertama atau paling atas. *Displacement* diekspresikan dengan:

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

*Velocity* atau kecepatan, adalah perubahan waktu pada perpindahan, biasanya ditunjukkan dengan *inch per second* (in/sec) atau mm/sec dalam satuan internasional, secara sederhana kecepatan dideskripsikan seberapa cepat komponen getaran bergerak dibagi dengan seberapa jauh perpindahan yang terjadi[16]. Pada gambar 2.17b, bentuk gelombang dari *velocity* pada posisi tengah. *Velocity* diekspresikan dengan:

$$v(t) = \omega X_0 \cos(\omega t) \dots\dots\dots (2.2)$$

*Acceleration* atau percepatan, definisikan sebagai waktu dari perubahan kecepatan, dengan satuan *inch per second squared* (in/sec<sup>2</sup>)[16] atau mm/sec<sup>2</sup> dalam satuan internasional. Pada gambar 2.17b, bentuk gelombang *Acceleration* terletak pada posisi terakhir atau paling bawah. *Acceleration* diekspresikan dengan:

$$a(t) = -\omega^2 X_0 \sin(\omega t) \dots\dots\dots (2.3)$$

Frekuensi adalah siklus per satuan waktu, sering dinyatakan dalam *cycles-per-second* (cps) atau *Hertz* (Hz). Secara rumus frekuensi ( $f$ ) dinyatakan dalam:

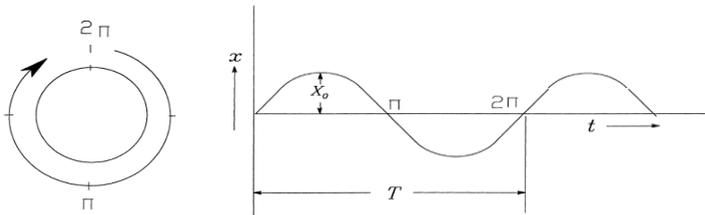
$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots (2.4)$$

Periode adalah waktu yang dibutuhkan untuk gelombang menyelesaikan satu siklus, ilustrasi pada gambar 2.18 yaitu notasi " $T$ ". Periode dinyatakan dalam satuan waktu. Secara perhitungan periode ( $T$ ) dinyatakan dalam:

$$T = \frac{1}{f} \dots\dots\dots (2.5)$$

Frekuensi putar atau *circular frequency*,  $\omega$ , dinyatakan dalam *radian per second*. Pada gambar 2.18 ditunjukkan pada  $2\pi$  radian, dinyatakan dalam:

$$\omega = 2\pi f \dots\dots\dots (2.6)$$



Gambar 2. 18 Ilustrasi siklus vibrasi[16]

### 2.3.1 Analisis Vibrasi

Perawatan adalah pengawasan dan perbaikan komponen atau sistem dari suatu mesin agar tidak terjadi penurunan fungsi dalam operasi. Dasar perawatan dibagi menjadi 4 bagian, yaitu[7]:

- *Breakdown* atau *run-to-failure maintenance*
- *Preventive* atau *time-based maintenance*
- *Predictive* atau *condition-based maintenance*
- *Proactive* atau *prevention maintenance*

*Predictive* atau *condition-based maintenance* terdiri dari pemantauan terhadap kondisi mesin dan operasional secara periodik, mengidentifikasi komponen yang bermasalah pada mesin dan melakukan perencanaan perawatan, langkah selanjutnya jika

diperlukan mesin dimatikan dan komponen yang bermasalah diganti[7]. Salah satu keuntungan pada metode ini adalah saat penjadwalan dapat dihitung waktu tunggu untuk pemesanan komponen sehingga tidak membutuhkan penyimpanan komponen yang banyak. Berikut merupakan beberapa teknik dalam *predictive maintenance*[7]:

- *Vibration Monitoring* (pemantauan terhadap vibrasi)
- *Acoustic Emission* (Bunyi yang ditimbulkan)
- *Oil Analysis* (analisa sistem pelumasan)
- *Particle Analysis* (analisa partikel)
- *Corrosion Monitoring* (pemantauan terhadap korosi)
- *Thermography* (pemantauan terhadap temperatur)

Analisis vibrasi yang merupakan salah satu dari beberapa metode dalam *predictive maintenance* digunakan untuk mengawasi dan menganalisa kondisi kritis dari mesin, komponen, dan sistem pada bagian tertentu berbasis getaran atau vibrasi yang ditimbulkan benda tersebut. Analisis vibrasi dapat digunakan pada pengujian untuk membandingkan benda jadi(*existing*) dengan desain, *quality control*, deteksi kegagalan mesin, pengendalian kebisingan mesin, deteksi retakan, dan analisis mesin pesawat[16]. Sistem pada analisis vibrasi biasanya terdiri dari empat bagian, yaitu[7]:

- Pengukur sinyal, biasanya disebut *transducer*
- Penganalisa sinyal, DAQ
- Perangkat lunak untuk menganalisa data vibrasi
- Sebuah computer untuk analisa data dan penyimpanan

Proses di dalam penganalisa sinyal atau *Data Acquisition* adalah[7]:

- Pengumpulan vibrasi pada mesin
- Pengubahan sinyal vibrasi ke sinyal elektrik
- Pengubahan bentuk dari sinyal elektrik ke besaran vibrasi
- Penyajian informasi dan perekaman data vibrasi

Keuntungan utama menggunakan analisa vibrasi adalah dapat mengidentifikasi masalah sebelum masalah tersebut semakin serius dan menyebabkan perbaikan yang tidak terjadwal, hal

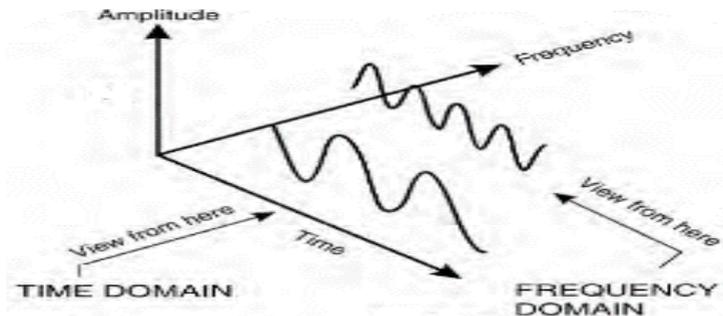
tersebut dapat dicapai dengan pemantauan secara berkala pada interval waktu yang terjadwal. Keuntungan lainnya, 80% dari permasalahan pada *rotating machine* berhubungan dengan *misalignment* dan *unbalance*, analisis vibrasi dapat digunakan untuk mendeteksi hal tersebut agar dapat mengurangi atau menghilangkan permasalahan yang timbul.[7]

### 2.3.2 Tipe Data Vibrasi

Data vibrasi dalam besaran *displacement*, *velocity*, dan *acceleration* dapat dijelaskan dalam bentuk domain waktu atau domain frekuensi. Domain waktu berupa amplitudo yang berubah terhadap waktu. Domain frekuensi berupa amplitudo berubah terhadap frekuensi.

Sinyal vibrasi yang diukur oleh *accelerometer* harus diubah untuk menghasilkan informasi yang berguna. Data tersebut perlu dikondisikan dengan proses[20]:

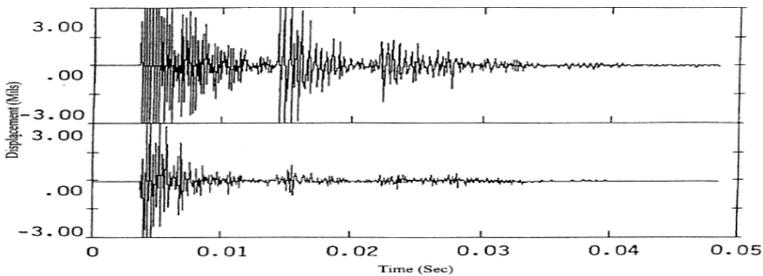
- Penyaringan untuk membuang sinyal palsu atau yang tidak diinginkan.
- Pembesaran untuk meningkatkan resolusi dari sinyal yang lemah
- Membuat data rata – rata untuk membuang data yang tidak diinginkan.
- Konversi ke domain frekuensi (FFT).



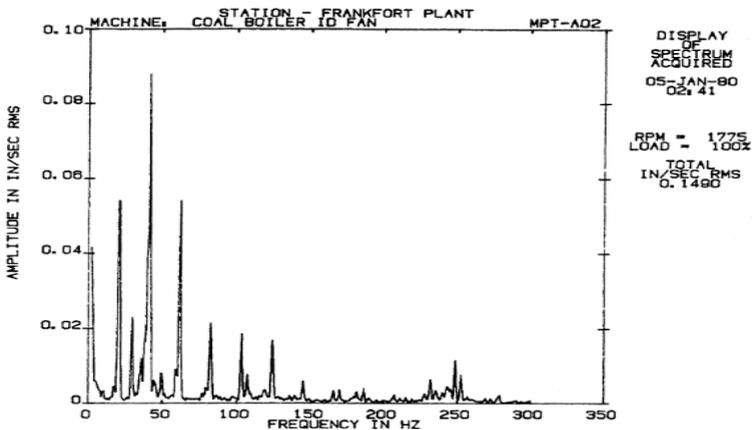
Gambar 2. 19 ilustrasi perbedaan domain waktu dan domain frekuensi[7]

*Fast Fourier Transform* adalah operasi matematika dimana pengubahan fungsi domain waktu ke fungsi domain frekuensi. [20] FFT digunakan untuk sebagian besar analisis vibrasi. Ilustrasi perbedaan domain waktu dan domain frekuensi dapat dilihat pada gambar 2.19.

Proses analisis vibrasi pada awalnya menggunakan tipe domain waktu karena peralatan yang digunakan masih terbatas. Mesin – mesin atau sistem proses yang memiliki waktu spesifik lebih baik dianalisa dengan domain waktu, contohnya pada peralatan dengan gerakan linier atau *resiprocating*[16]. Contoh bentuk domain waktu dapat dilihat pada gambar 2.20.



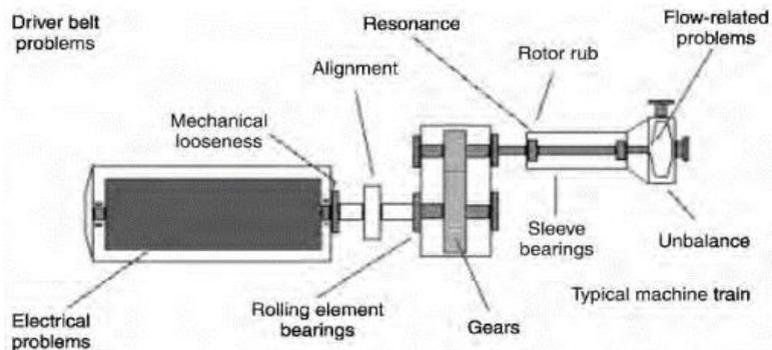
Gambar 2. 20 contoh bentuk domain waktu data [16]



Gambar 2. 21 contoh bentuk domain frekuensi data[16]

Domain frekuensi yang merupakan hasil proses FFT dari domain waktu kebanyakan dipakai pada deteksi kegagalan *rotating machine*, karena frekuensi erat hubungannya dengan kecepatan putaran. Contoh domain frekuensi dapat dilihat pada gambar 2.21. Pengulangan puncak dapat dinormalkan untuk menghasilkan gambaran yang akurat tentang kondisi mesin. Keuntungan analisis menggunakan domain frekuensi adalah kemampuan untuk menormalisasi setiap data vibrasi pada deretan mesin yang rumit dapat diuraikan menjadi masing – masing komponen.

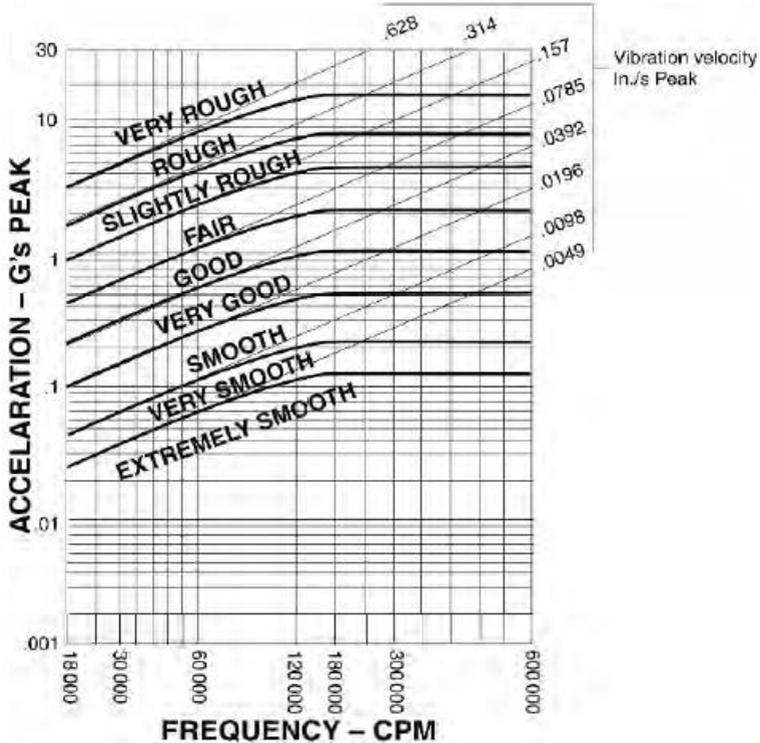
### 2.3.3 Deteksi Kegagalan dengan Analisis Vibrasi



Gambar 2. 22 deteksi kegagalan pada peralatan mesin[7]

Pada gambar 2.22 ditunjukkan kegagalan mesin yang dapat dideteksi dengan menggunakan analisis vibrasi, yaitu: problem pada *driven belt*, problem elektrika, kelonggaran mesin, kesegaran(*alignment*), resonansi, problem pada roda gigi, *unbalanced*, problem pada bantalan, problem pada kopling, problem yang terkait dengan aliran dan keseluruhan rangkaian peralatan mesin. Komponen yang dapat dianalisis vibrasinya diantaranya: Rotor, stator, seals, bantalan, kopling, gear dan belt.[6]. Penilaian terhadap kegagalan dari suatu komponen mesin

dapat dibaca melalui bentuk data vibrasi domain waktu atau domain frekuensi.



Gambar 2. 23 grafik ketidaklayakan mesin secara umum[7]

Salah satu cara mendiagnosa suatu mesin berbasis analisa vibrasi adalah dengan grafik ketidaklayakan pada mesin secara umum menurut *IRD Mechanalisis Standart Vibration* yaitu pada gambar 2.23. Grafik tersebut menggabungkan antara besaran kecepatan vibrasi dengan perpindahannya pada frekuensi tertentu.

Cacat pada bantalan dapat dideteksi di sekitar frekuensi refrensi cacat bantalan. Frekuensi refrensi cacat bantalan dibagi menjadi 4, yaitu pada *cage* atau sangkar dari elemen pemutar

disebut FTF, pada elemen pemutar atau *ball* disebut BSF, pada lintasan luar disebut BPFO, dan pada lintasan dalam disebut BPFi. Secara teori frekuensi refrensi cacat tersebut dapat dihitung nilainya dan ilustrasi notasi dapat dilihat pada gambar 2.24, berikut perhitungannya:

BPFO adalah *Ball Pass Frequency of Outer Race*, yaitu adalah frekuensi refrensi cacat pada *ring* luar bantalan, jadi apabila terdapat nilai amplitudo yang tinggi pada BPFO maka bantalan tersebut diindikasikan memiliki cacat pada lintasan luarnya. Secara perhitungan:

$$BPFO = \left\{ \frac{Nb}{2} \times \left[ 1 - \left( \frac{Db}{Dp} \right) \times \cos \emptyset \right] \times fs \right\} \dots (2.7)$$

BPFi adalah *Ball Pass Frequency of Inner Race*, yaitu frekuensi refrensi cacat pada *ring* dalam bantalan, jadi apabila terdapat nilai amplitudo yang tinggi pada BPFi maka bantalan tersebut diindikasikan memiliki cacat pada lintasan dalamnya. Secara perhitungan:

$$BPFi = \left\{ \frac{Nb}{2} \times \left[ 1 + \left( \frac{Db}{Dp} \right) \times \cos \emptyset \right] \times fs \right\} \dots (2.8)$$

BSF adalah *Ball Spin Frequency*, yaitu frekuensi refrensi cacat pada bola atau elemen pemutar pada bantalan, apabila terdeteksi amplitudo yang tinggi pada BSF maka bantalan tersebut diindikasikan memiliki cacat pada elemen putarnya. Secara perhitungan:

$$BSF = \left\{ \frac{Pd}{2 \times Bd} \times \left[ \left( 1 - \left( \frac{Db}{Dp} \right) \times \cos \emptyset \right)^2 \right] \times fs \right\} \dots (2.9)$$

FTF adalah *Fundamental Train Frequency*, yaitu frekuensi refrensi cacat yang terdapat pada *cage* atau sangkar dari elemen putar pada bantalan, apabila terdeteksi amplitudo yang tinggi pada FTF maka bantalan tersebut diindikasikan memiliki cacat pada sangkar dari elemen putarnya. Secara perhitungan:

$$FTF = \frac{fs}{2} \times \left( 1 - \left( \frac{Db}{Dp} \right) \times \cos \emptyset \right) \dots (2.10)$$

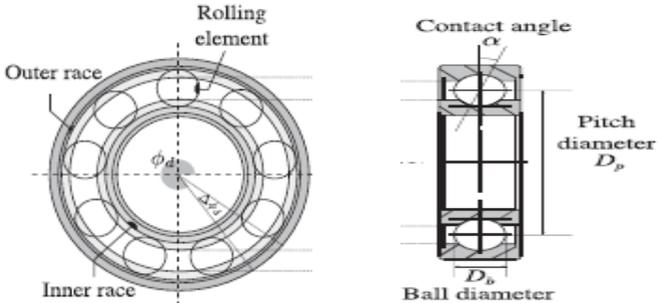
$Db$  = Ball diameter (diameter bola, *roller*, atau elemen pemutar)

$Dp$  = Pitch diameter (jarak antara bola, *roller*, atau elemen putar)

$\phi$  = Contact Angle (sudut kontak bola, roller, atau elemen putar dengan bantalan)

$N_s$  = Jumlah bola, roller, atau elemen putar

$f_s$  = Putaran pada poros rotation per second (rps atau Hz)



Gambar 2. 24 ilustrasi notasi rumus pada bantalan [6]

## 2.4 Data Mining

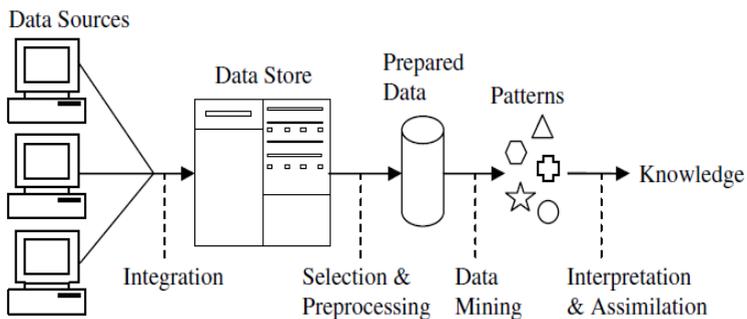
*Data Mining*, sering disebut *knowledge discovery in database* (KDD), adalah kegiatan yang meliputi pengumpulan, pemakaian data historis untuk menemukan keteraturan, pola atau hubungan, dalam set data berukuran besar[21]. Dua tujuan utama dalam *data mining* adalah prediksi dan deskripsi, prediksi menggunakan beberapa variabel atau data yang tersedia untuk memprediksikan hal yang belum diketahui atau nilai di masa depan dari beberapa variable lain yang menarik, deskripsi fokus pada menemukan pola dari data yang dapat dijelaskan secara umum.[9]

Pada gambar 2.25 dijelaskan bahwa, awalnya data yang diperoleh dari berbagai sumber disimpan pada *data store*. Data tersebut disusun dengan format yang dibutuhkan menjadi *prepared data*, setelah itu metode dari *data mining* digunakan untuk membentuk pola atau aturan yang dapat disimpulkan menjadi pengetahuan atau informasi baru. Keluaran dari *data mining* ini bisa digunakan untuk memperbaiki pengambilan keputusan di masa depan atau bisa disebut prediksi. *Data mining* digunakan

dalam peramalan cuaca, perkiraan pasar saham, jaringan telepon internasional, dan lain – lain.

Prediksi dan deskripsi dalam *data mining* dapat dicapai dengan cara beberapa teknik diantaranya[9]:

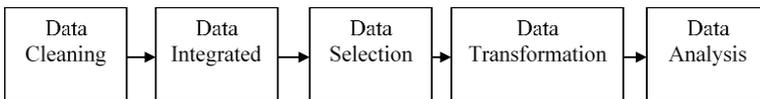
- Klasifikasi, digunakan untuk menemukan fungsi prediksi yang membagi data kedalam satu atau beberapa *class* yang telah diketahui.
- Regresi, digunakan untuk menemukan fungsi prediksi yang memetakan data untuk mencari variabel prediksi yang sebenarnya.
- Klastering, pendeskripsian data dimana salah satunya mencari dan mengidentifikasi suatu kategori terbatas untuk menggambarkan data.
- Ringkasan, bagian dari pendeskripsian yang mencakup metode untuk menemukan deskripsi tentang sebuah kumpulan atau sebagian dari data.
- Penentuan Model, digunakan untuk menemukan sebuah model yang menggambarkan keterkaitan antara variabel atau antara nilai yang terdapat di dalam bagian dari data.
- Deteksi terhadap perubahan dan penyimpangan, digunakan untuk menemukan perubahan atau penyimpangan terjauh dalam data.



Gambar 2. 25 proses penemuan pengetahuan pada *database*[2]

Proses dalam *data mining*[14]:

1. Data Cleaning  
Pembersihan data, membersihkan atau membuang data yang tidak perlu, yaitu data yang mengganggu atau data yang tidak konsisten.
2. Data Integrated  
Penghubungan data, mencari hubungan data sehingga data didapat dari sumber yang berhubungan.
3. Data Selection  
Pemilihan data, memilih dan memanggil kembali data yang berhubungan.
4. Data Transformation  
Pengubahan format data, mengubah data ke format yang tepat untuk dianalisis.
5. Data Analysis  
Analisis data, kumpulan pertanyaan diproses pada analisis yang mendalam.



Gambar 2. 26 skema proses *data mining*

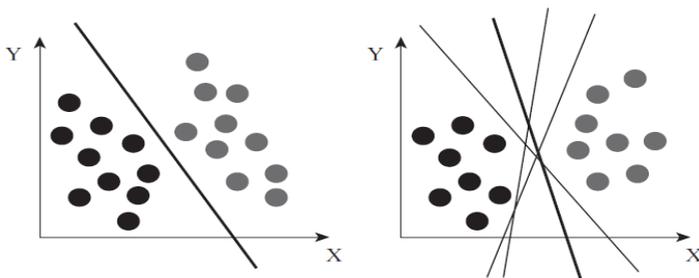
Metode pembelajaran dalam *data mining* dibagi dua pendekatan yaitu *supervised learning* dan *unsupervised learning*. *Unsupervised learning* merupakan metode pembelajaran dalam *data mining* dengan penerapan tanpa adanya latihan (*training*) dan tanpa adanya label data (*trainer*), keluaran dari pembelajaran ini tidak memiliki label, hanya pengelompokan data. *Supervised Learning* adalah metode pembelajaran dalam *data mining* dengan adanya latihan (*training*) dan label data (*trainer*), *Support Vector Machine* (SVM) adalah salah satu dari *supervised learning*. *Trainer* atau label berfungsi sebagai acuan dalam melakukan

pengelompokan data, sehingga apabila telah terkelompokkan maka data tersebut memiliki label.

### 2.4.1 Support Vector Machine

*Support Vector Machine* (SVM) awalnya dikenalkan oleh Vapnik pada tahun 1992, untuk mencari garis pemisah (*hyperplane*) bersamaan dengan meminimalisir eror pada data dan memaksimalkan margin (batas) antar *class*[14]. SVM yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan klasifikasi disebut dengan istilah *Support Vector Classification* (SVC), penyelesaian masalah regresi atau prediksi disebut *Support Vector Regression* (SVR)[9]. SVM bersifat fleksibel, artinya SVM dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai kasus klasifikasi atau regresi.

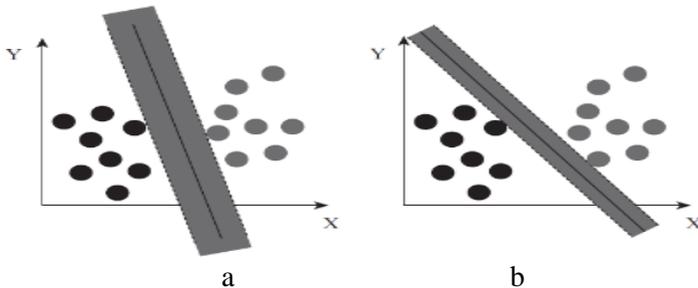
Konsep SVM dapat secara sederhana dijelaskan sebagai usaha mencari *hyperplane* terbaik yang berfungsi sebagai pemisah dua buah *class* pada *input data*[19]. *Hyperplane* dalam ruang vektor berdimensi- $n$  membagi data pada ruang vektor tersebut ke dalam dua bagian, yang masing-masing data berdekatan pada *class* yang berbeda. Pada gambar 2.27 diilustrasikan beberapa *pattern* yang merupakan anggota dari dua buah *class*, yaitu *class* : +1 dan -1. *Pattern* yang tergabung pada *class* -1 disimbolkan dengan lingkaran berwarna hitam, *pattern* pada *class* +1 disimbolkan dengan lingkaran berwarna abu – abu.



Gambar 2. 27 Ilustrasi metode SVM[9]

*Hyperplane* pemisah terbaik antara kedua *class* dapat diukur menggunakan *margin*, Margin adalah jarak antara *hyperplane* dengan *pattern* terdekat dari masing - masing *class*. Garis solid pada gambar 2.27 menunjukkan *hyperplane* yang terbaik, yaitu yang terletak tepat pada tengah-tengah kedua *class*, *pattern* terdekat dengan *hyperplane* disebut *support vector*.

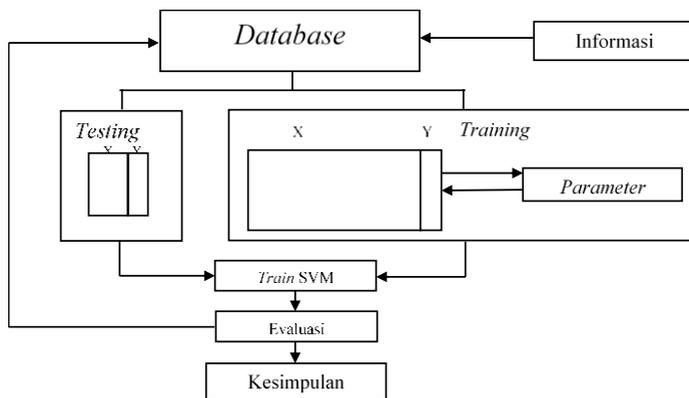
Tujuan dari permodelan dengan SVM pada  $n$ -dimensi adalah untuk menemukan *hyperplane* yang optimum yang memisahkan *class* dari  $n$ -dimensi. *Hyperplane* yang optimum dapat dilihat pada gambar 2.28a, *hyperplane* yang “fat” membentuk margin yang besar dan sesuai dengan tujuan SVM. Gambar 2.28b menunjukkan *hyperplane* yang “skinny”, lebih kompleks namun fleksible. [9]



Gambar 2. 28 “fat” dan “skinny” margin[9]

Skema SVM pada gambar 2.29 menjelaskan urutan dari proses di dalam SVM. *Database* yang merupakan sekumpulan data pusat dibagi menjadi 2 yaitu sebagai *data testing* dan *data training*. Di dalam *data testing* terdapat proses uji parameter untuk membentuk *data training*. Simbol “X” menandakan input data atau variabel dan symbol “Y” menandakan output data atau label. *Data testing* dan *data training* dilatih dengan menggunakan SVM untuk menghasilkan pola yang diharapkan. Hasil *train* SVM

dievaluasi, jika kurang memuaskan dikembalikan ke *database* untuk mengulangi pembagian *data training* dan *data testing*, begitu seterusnya hingga mendapatkan pola terbaik dengan keakuratan yang tinggi. Informasi – informasi baru akan masuk ke *database* untuk diolah bersama data sebelumnya. Kesimpulan diambil jika tingkat keakuratan metode SVM ini telah tinggi, akurasi dapat dihitung dengan pembagian antara data yang diklasifikasikan secara benar dengan seluruh data yang diproses.

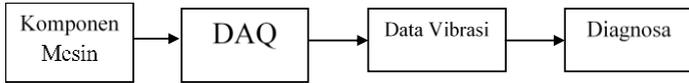


Gambar 2. 29 skema SVM

#### 2.4.1.1 Kelebihan SVM pada Analisa Vibrasi

Skema pada proses analisis vibrasi secara konvensional dapat dilihat pada gambar 2.30, dalam skema ditunjukkan tahapan – tahapan pada proses analisa vibrasi. Pengukuran dilakukan pada komponen mesin dilakukan dengan *tranduser*, *tranduser* berfungsi untuk mengukur sinyal vibrasi, data direkam pada *Data Acquisition (DAQ)* untuk diproses menjadi bentuk data vibrasi. Data vibrasi dalam bentuk domain waktu atau domain frekuensi yang merupakan keluaran dari hasil pengukuran yang telah diproses oleh DAQ, hasil tersebut dibaca untuk melakukan

diagnosa terhadap komponen mesin. Pembacaan hasil dan mendiagnosa komponen mesin dilakukan oleh operator yang telah berkompeten di bidang analisa vibrasi.



Gambar 2. 30 skema analisis vibrasi konvensional

Analisis vibrasi yang dilakukan dengan cara membaca data vibrasi bentuk domain waktu atau domain fekuensi dari pengukuran, merupakan cara yang konvensional. Inspektor yang ditunjuk untuk membaca data vibrasi dari pengukuran dan mendiagnosa komponen tersebut harus memiliki keahlian, hal ini menyebabkan kemungkinan terjadinya perbedaan persepsi dalam pembacaan data vibrasi.

*Support Vector Machine* (SVM) menawarkan konsep dalam mendiagnosa secara konsisten, artinya hasil dari diagnosa yang dilakukan siapapun dapat sama. Skema analisis vibrasi dengan SVM ditunjukkan pada gambar 2.31, metode SVM yang digunakan diletakkan setelah didapatnya data vibrasi hasil proses pada DAQ. Data vibrasi tersebut disusun agar dapat diolah menggunakan perangkat lunak dengan metode SVM. Hasil pengolahan data dengan metode SVM dan ditampilkan dalam bentuk pola atau *plot data*, pola tersebut digunakan untuk mengklasifikasikan data berdasarkan kriteria atau label yang telah ditentukan, sehingga dapat didiagnosa atau diambil kesimpulan terhadap kondisi komponen mesin tersebut.

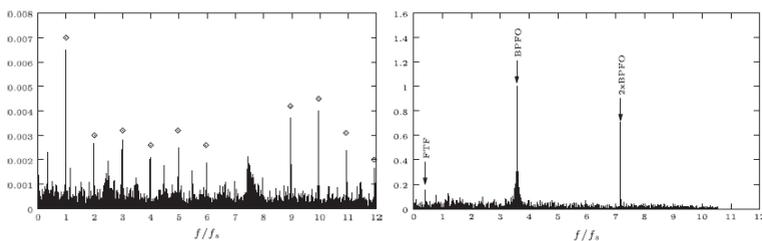


Gambar 2. 31 skema analisis vibrasi dengan SVM

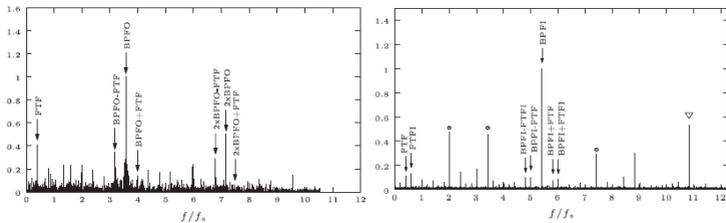
Kelebihan menggunakan metode SVM dalam analisis vibrasi adalah kesamaan diagnosa dari proses analisa terhadap kondisi komponen mesin yang dilakukan oleh inspektor. Metode SVM ini juga berlaku berkelanjutan, artinya dalam sekali proses analisis vibrasi data tersebut akan terekam sebagai *database* dan dapat digunakan untuk analisis vibrasi di waktu lain.

## 2.5 Tinjauan Pustaka

**Dolenc, Boskoski, Juricic (2015)** melakukan penelitian tentang diagnosa kegagalan terdistribusi pada bantalan berdasarkan analisis vibrasi. Percobaan dilakukan pada bantalan bola FAG 6205. Penelitian ini menggunakan empat kasus yang dipelajari, yaitu bantalan tanpa cacat (*fault-free*), bantalan yang diberi cacat lokal pada *outer race*, bantalan yang mengalami cacat terdistribusi pada *outer race*, dan bantalan yang mengalami cacat terdistribusi pada *inner race*. Cacat terdistribusi pada *outer race* akan terdeteksi pada BPFO dengan batas  $1 \times \text{FTF}$ , FTF adalah *fundamental train frequency*, dengan nilai  $\text{BPFO} = n_b \times \text{FTF}$ ,  $n_b$  adalah jumlah bola. Cacat terdistribusi pada *inner race* akan terdeteksi pada BPFI dengan batas  $1 \times \text{FTFI}$ , dimana FTFI adalah *fundamental train frequency inner*, dengan nilai  $\text{BPFI} = n_b \times \text{FTFI}$ . Hasil dari percobaan Dolenc dapat dilihat pada gambar 2.32 dan gambar 2.33.



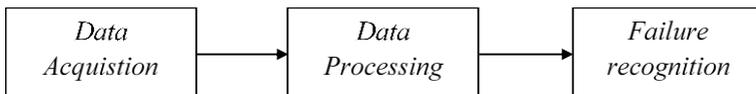
Gambar 2. 32 spektrum *fault-free* bantalan dan cacat lokal *outer race* [5]



Gambar 2. 33 spektrum cacat terdistribusi *outer race* dan *inner race* [5]

Pada penelitian ini cacat lokal dan terdistribusi telah ditunjukkan dari hasil spektrum. Pada gambar 2.32 cacat lokal terlihat tanpa *sideband* pada BPFO, gambar 2.33 terdapat *sideband* pada BPFO yang besarnya sama dengan  $\pm 1 \times \text{FTF}$ . *Sideband* pada BPFi besarnya sama dengan  $\pm 1 \times \text{FTFI}$ .

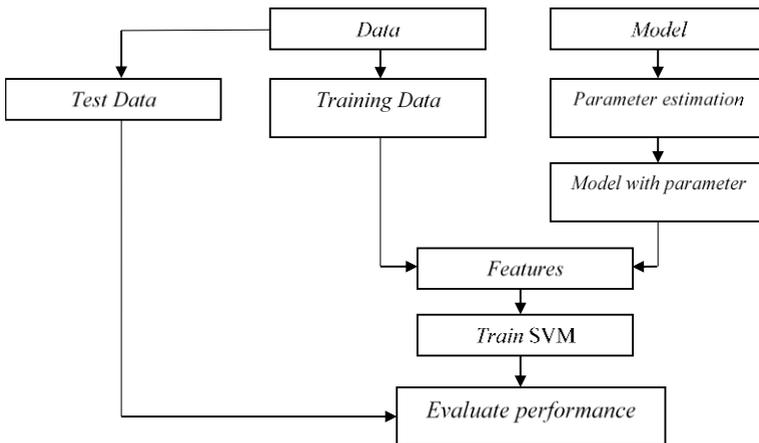
Deak, Kocsis, vamosi, keviczki (2014) melakukan penelitian tentang diagnosa kegagalan dengan SVM pada perawatan mesin. *Condition Based Maintenance* (CBM) adalah salah satu teknik dalam *maintenance* yang didalamnya termasuk pemantauan kondisi mesin dan prediksi kegagalan mesin. *Condition Monitoring* (CM) adalah metode yang efektif dalam mengawasi parameter keadaan mesin seperti vibrasi, temperatur, analisa puing keausan, dan pengawasan terhadap kebisingan. Semua analisa terhadap kegagalan dapat dilakukan melalui tahapan seperti pada gambar 2.34.



Gambar 2. 34 tahapan analisa kegagalan[5]

Data yang didapat melalui pengukuran, kemudian di ekstraksi agar dapat diproses untuk selanjutnya dilakukan analisa terhadap kegagalan. Eksperimen dilakukan pada bantalan jenis *roller bearing* dengan tipe 6206, menggunakan 5 buah bantalan

pada *bearing test rig*, *accelerometer* diletakkan diatas rumah bantalan. Cacat bantalan dibuat pada *inner race*. Data hasil pengukuran vibrasi diolah dengan menggunakan metode SVM. SVM digunakan untuk mengidentifikasi bantalan tersebut normal atau cacat. SVM berada pada tahapan *data processing*. Skema pengolahan data Deak dengan menggunakan metode SVM dapat dilihat pada gambar 2.35. *Failure recognition* adalah tahapan dimana kegagalan dapat dikenali berdasarkan *data processing*.



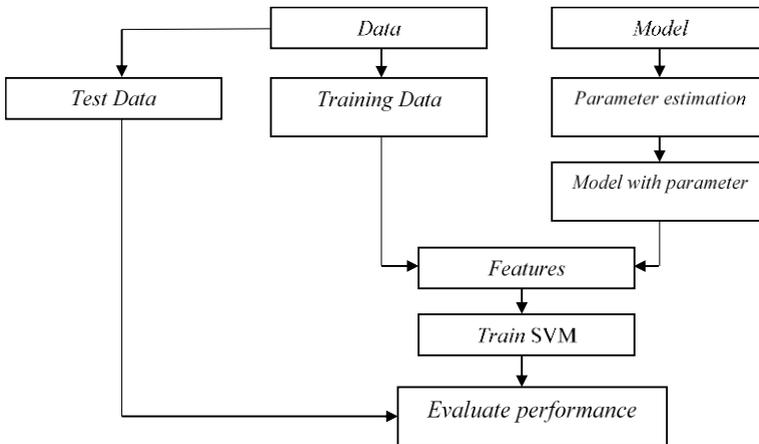
Gambar 2. 35 skema proses SVM [5]

Dari penelitian ini disimpulkan bahwa *Condition Monitoring* (CM) adalah bagian vital dibidang maintenance untuk dapat meningkatkan keandalan mesin dan mengurangi biaya perawatan. Pada percobaan ini SVM mampu mencapai tingkat keakurasian diagnosa sekitar 90% pada penelitian ini, sehingga metode SVM dapat diterapkan secara efisien untuk diagnosa kegagalan pada bantalan dan pada kasus lainnya.

**Baccarini, Silva, Menezes, Caminhas (2010)** melakukan penelitian tentang penerapan SVM pada industri praktis untuk mendiagnosa kegagalan mesin. Kebanyakan permasalahan mesin

dapat dideteksi dari vibrasi *harmonic* pertama dari putaran motor. Penelitian ini menggunakan metode SVM *multiclass one-against-all*. Ekspreimen menggunakan motor 5 HP dan pembebanan dilakukan oleh generator DC. Sinyal ditangkap menggunakan *accelerometer* pada posisi vertikal, horizontal, dan axial pada *cooling fan* dan *motor coupling*. Skema percobaa Baccari dapat dilihat pada gambar 2.36. Tiga tipe kegagalan yang diamati adalah *misalignment* pada poros, *mechanical loosenes* dan *unbalance* pada rotor. Letak *accelerometer* pada setiap kegagalan motor:

- P1 - Posisi vertikal pada *cooling fan* (VCF).
- P2 – Posisi aksial depan *cooling fan* (ACF).
- P3 – Posisi horizontal pada *cooling fan* (HCF).
- P4 – Posisi vertikal pada *motor coupling* (VMC).
- P5 – Posisi aksial didepan *motor coupling* (AMC).
- P6 – Posisi horizontal pada *motor coupling* (HMC).



Gambar 2. 36 skema percobaan Baccari [1]

SVM 1: *No Fault*, SVM 2: *Unbalance*, SVM 3: *Misalignment*, dan SVM 4: *Mechanical Loosenes*, pada SVM *classification* dilakukan metode *one-against-all*. Kesimpulan yang didapat adalah posisi terbaik untuk mengalisa data didapat dari

pemasangan *accelerometer* posisi vertikal pada *cooling fan* yaitu dengan keakurasian 96%.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

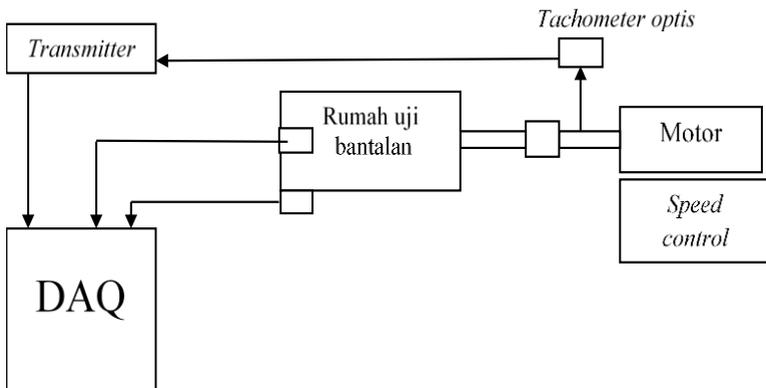
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Alat Dan Bahan Uji

Dalam penelitian tugas akhir ini, digunakan beberapa alat dan bahan uji, diantaranya:

#### 3.1.1 Alat uji

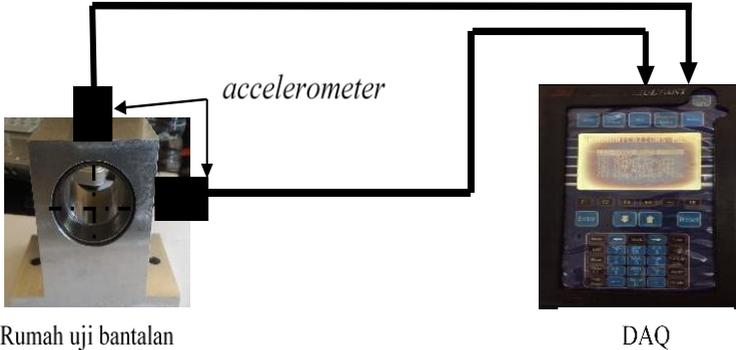
Pada gambar 3.1 ditunjukkan rangkaian dari alat uji bantalan dan alat – alat yang digunakan dijelaskan pada tabel 3.1. Gambar 3.1 menunjukkan skema pengukuran atau pengambilan data bantalan. *Tachometer optis* digunakan untuk mengukur kecepatan poros, dihubungkan pada baterai sebagai penyedia energi dan sebagai penghubung dengan DAQ. Dua buah *accelerometer* sebagai pengukur sinyal vibrasi. *Accelerometer* mengirimkan sinyal hasil pengukuran untuk diolah oleh DAQ menjadi data vibrasi. *Speed control* berfungsi sebagai pengatur kecepatan motor.



Gambar 3. 1 skema rangkaian alat uji

Gambar 3.2 menunjukkan rangkaian antara rumah uji bantalan, *accelerometer*, dan DAQ. Skema tersebut merupakan

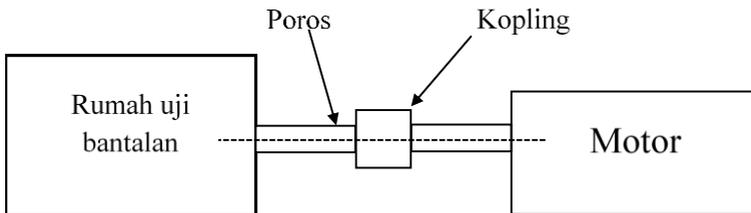
rangkaian dari rumah uji bantalan, dua buah *accelerometer* dipasang secara vertikal dan horizontal pada rumah uji bantalan. Pada DAQ data diolah menjadi data vibrasi fungsi domain waktu atau domain frekuensi.



Gambar 3. 2 skema rangkaian DAQ dengan rumah uji bantalan

Spesifikasi alat – alat yang digunakan dalam pengujian ini ditunjukkan pada tabel 3.1. Alat uji yang utama terdiri dari DAQ, *tacometer optis*, *accelerometer*, motor, alat uji penunjang terdiri dari rumah uji bantalan, poros, dan kopling.

Poros pada bantalan dengan motor penggerak dihubungkan dengan kopling. Poros, kopling, dan bantalan dipasang segaris pada sumbu poros. Pada gambar 3.3 ditunjukkan rangkaian rumah uji bantalan, poros, kopling, dan motor.



Gambar 3. 3 skema rangkaian motor dengan bantalan

Tabel 3. 1 spesifikasi alat uji

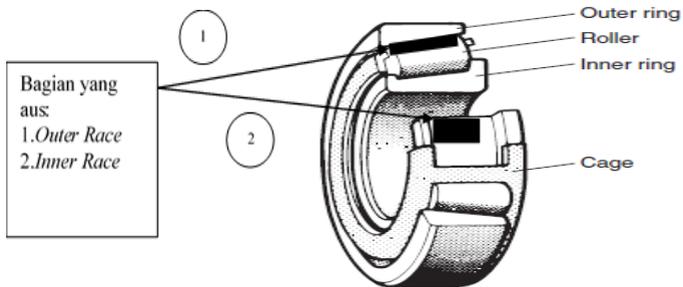
No.	Nama Komponen	Keterangan
1.	DAQ	Model: CSI 2120A <i>Dual Channel</i>
2.	<i>Tachometer optis</i>	- Model: 404B <i>Infrared Phototach</i> - Kecepatan maksimal yang dapat diukur: 20000 RPM/CPM - Sumber cahaya: <i>Infrared</i> - Tegangan: 5-15 VDC - Dilengkapi dengan <i>Transmitter</i>
3.	<i>Accelerometer</i>	Model: PCB <i>Pieztronics Accelerometer</i> Jumlah: 2 unit Sensitifitas: 0.0989 (vertikal) 0.1011 (horizontal)
4.	Motor	- Daya: 1/12 HP - Tegangan: 180 VDC - Kecepatan Maksimal: 1725 RPM - Dilengkapi dengan pengatur kecepatan( <i>speed control</i> )
5.	Alat uji penunjang	Terdiri dari: - Rumah uji bantalan - Poros - Kopling

### 3.1.2 Bahan Uji

Bahan uji terdiri dari dua produk bantalan, masing – masing produk terdiri dari dua buah bantalan, total penelitian ini menggunakan empat buah bantalan. Bantalan tersebut dikondisikan dalam keadaan normal (*fault-free*) dan dalam keadaan mengalami keausan (*inner race* dan *outer race*). Kedua produk tersebut memiliki jenis dan tipe yang sama yaitu *tapered roller bearing* tipe 30304. Tabel 3.2 ditunjukkan spesifikasi bantalan uji.

Keausan yang terjadi pada *inner race* dan *outer race* dibuat dengan menggunakan alat bantu. Bagian tersebut

dinyatakan aus menggunakan pengamatan kasat mata dan kekasaran permukaan lintasan bertambah secara sentuhan. Gambar 3.4 merupakan ilustrasi bagian yang mengalami keausan.



Gambar 3. 4 ilustrasi letak bagian yang mengalami keausan[8]

Tabel 3. 2 spesifikasi bahan uji

No.	Gambar	Keterangan
1.		Gambar 3. 5 KOYO tapered roller bearing Diameter dalam ( <i>inner</i> ): 20 mm Diameter luar ( <i>outer</i> ): 52 mm Lebar ( <i>width</i> ): 16.25 mm
2.		Gambar 3. 6 Timken tapered roller bearing Diameter dalam ( <i>inner</i> ): 20 mm Diameter luar ( <i>outer</i> ): 52 mm Lebar ( <i>width</i> ): 16.25 mm

### **3.2 Alur Penelitian**

Alur penelitian adalah sebagai acuan untuk membuat penelitian lebih terstruktur dan sistematis dalam proses pengerjaannya. Dalam sub bab ini dibahas urutan langkah penelitian mulai dari awal hingga terbentuknya kesimpulan. Berikut merupakan langkah – langkah dalam penelitian ini:

#### **a. Perumusan Masalah**

Perumusan masalah adalah tahapan awal dalam penelitian ini, berdasarkan dari latar belakang penelitian dilakukanlah perumusan masalah. Pada tahapan ini dilakukan penggalan gagasan – gagasan berdasarkan latar belakang untuk dibentuknya rumusan masalah pada penelitian ini.

#### **b. Penyusunan dan Penyesuaian Landasan Teori**

Penyusunan landasan teori merupakan tahapan pencarian, pengumpulan, dan pembelajaran teori – teori yang digunakan sebagai dasar penelitian ini. Penyesuaian landasan teori berkaitan dengan penyusunan kembali landasan teori apabila ditemukan ketidaksesuaian landasan teori dengan penelitian ini. Sumber utama pada tahapan penyusunan dan penyesuaian landasan teori adalah buku referensi dan jurnal terkait. Hal utama dari landasan teori pada penelitian ini berupa teori – teori tentang *data mining*, vibrasi, dan bantalan. Penyesuaian landasan teori terus dilakukan pada tahapan – tahapan selanjutnya apabila ditemui ketidaksesuaian landasan teori terhadap penelitian ini.

#### **c. Pengujian**

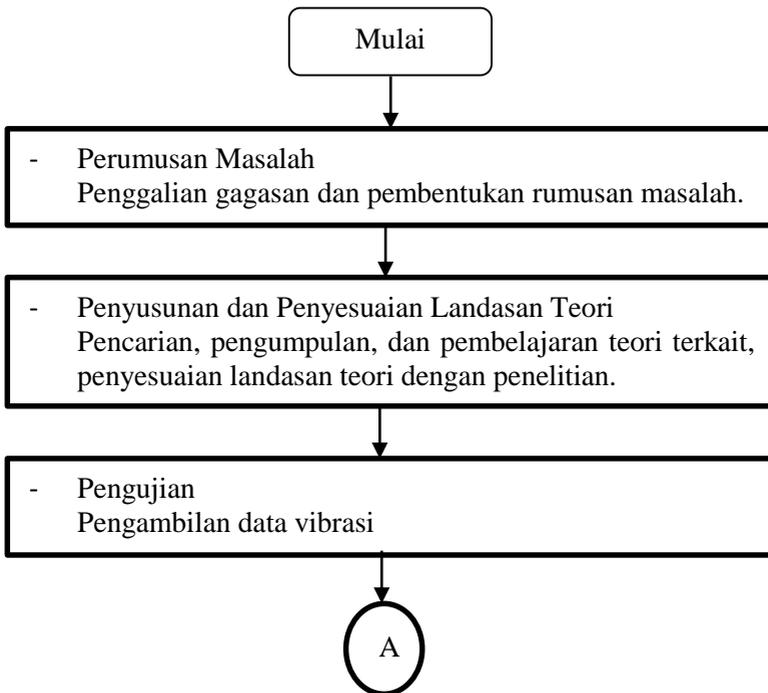
Pengambilan data merupakan inti dari tahapan pengujian ini. Pengujian dilakukan secara benar agar data yang diambil dapat diolah dan dianalisis. Pengujian dilakukan setelah penyusunan landasan teori untuk meminimalisir kesalahan dalam proses. Pengujian ini dilakukan di Laboratoium Otomasi dan Kendali Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

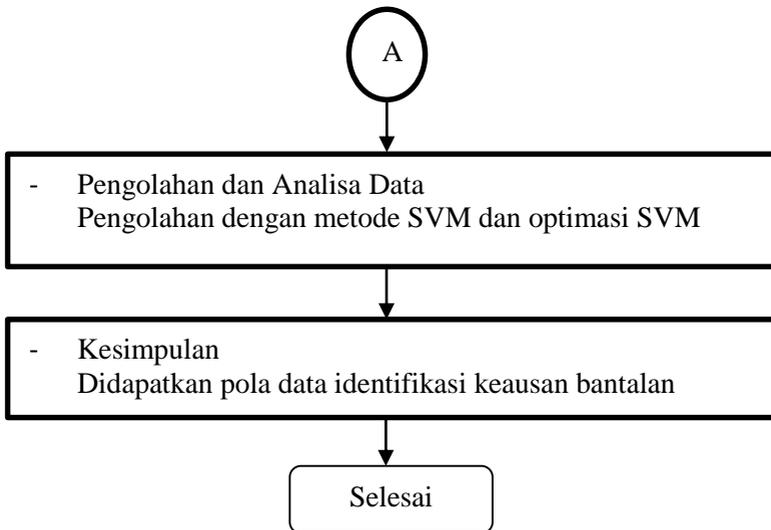
**d. Pengolahan dan Analisa Data**

Pengolahan data hasil dari pengujian dilakukan oleh perangkat lunak. Pengolahan data vibrasi dengan metode SVM bertujuan untuk memetakan data dan membentuk pola data. Analisa dilakukan untuk mengoptimasi metode SVM sehingga mendapatkan hasil yang diharapkan.

**e. Kesimpulan**

Tahap akhir dari penelitian ini didapat kesimpulan SVM mampu memetakan data keausan pada *tapered roller bearing*. Hasil pemetaan tersebut digunakan sebagai identifikasi keausan dari bantalan.

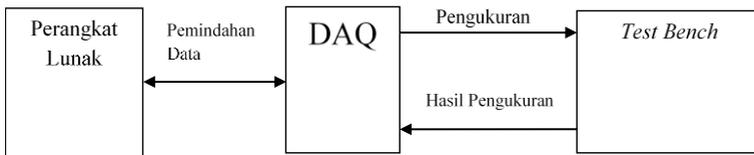
**3.2.1 Skema Penelitian**



Gambar 3. 7 skema penelitian

### 3.3 Pengujian

Pengujian dalam penelitian ini adalah proses pengambilan data vibrasi dari *tapered bearing*. Skema pengujian dapat dilihat pada gambar 3.8. Skema tersebut terdiri dari 3 komponen utama yaitu perangkat lunak, DAQ, dan rangkaian alat dan bahan uji. Rangkaian dari alat – alat uji yang telah ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3. 8 skema pengujian

Pada gambar 3.8 ditunjukkan skema pengujian yang berawal pembuatan *database* pada perangkat lunak sebagai sistem tempat penyimpanan parameter dan hasil pengukuran. *Database*

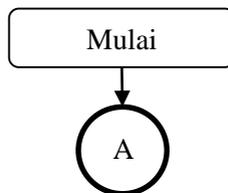
yang telah dibuat dipindahkan ke DAQ, untuk melakukan pengukuran pada *test bench*. Hasil pengukuran akan tersimpan pada DAQ. Proses pengukuran dianggap selesai jika data telah terekam dianggap baik, jika tidak maka harus dilakukan pengukuran ulang, karena data belum terekam dengan baik pada DAQ. Data yang telah terekam dengan baik pada DAQ dipindahkan kembali pada perangkat lunak.

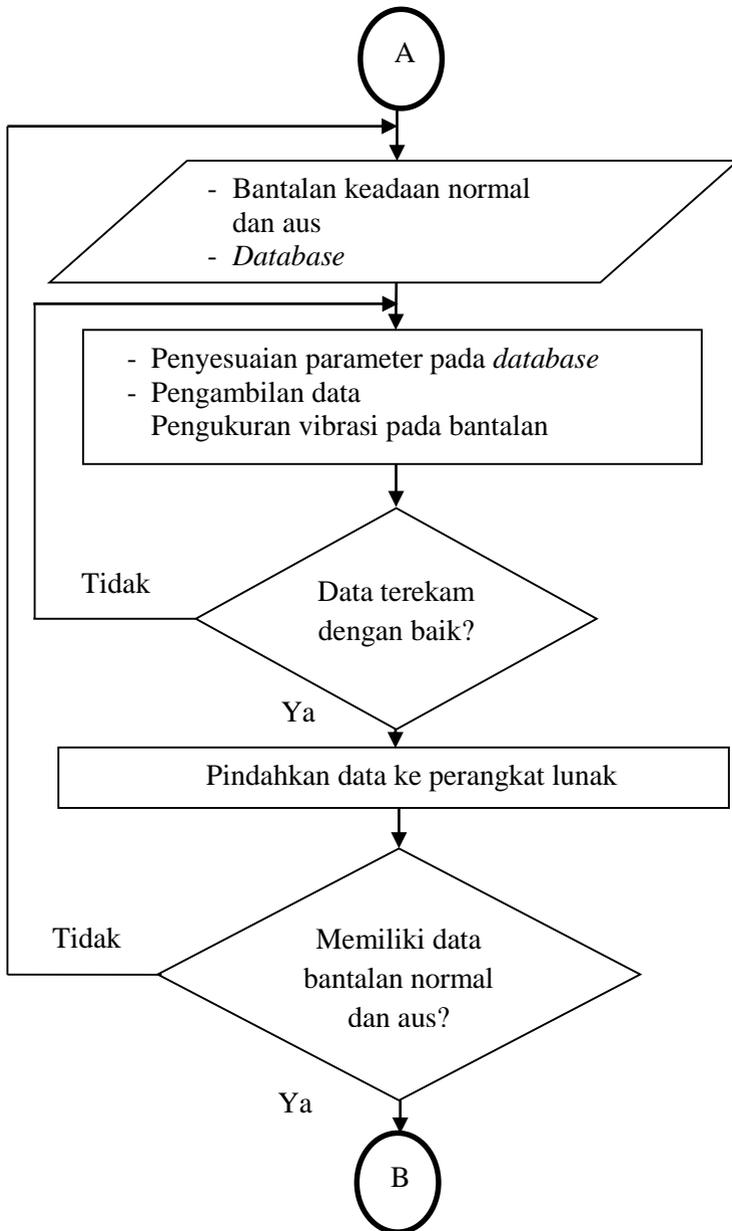
### 3.3.1 Alur Pengujian

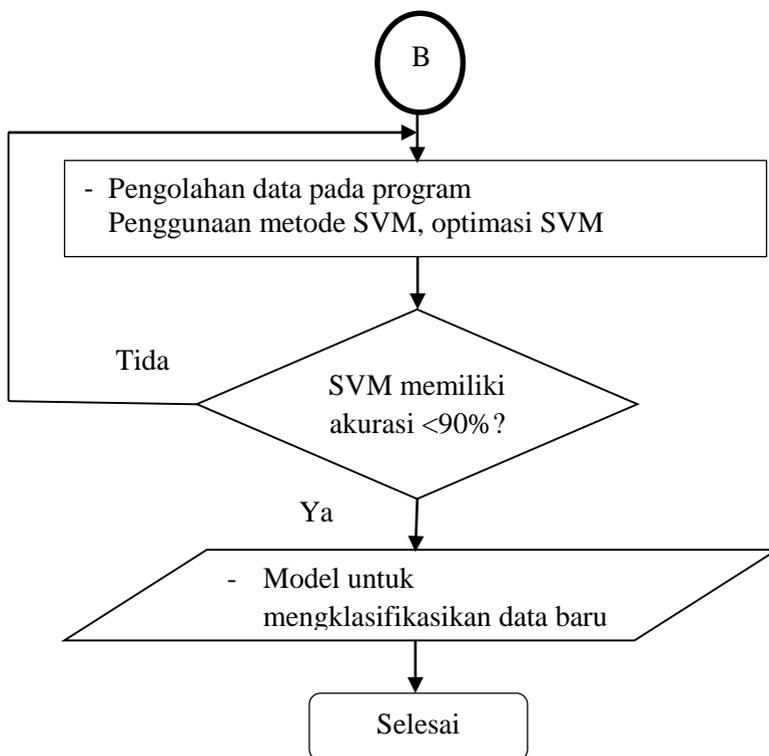
Alur percobaan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Persiapkan *test bench*.
2. Pemasangan bantalan.
3. Pembuatan *Database* pada perangkat lunak sebagai sistem penyimpanan parameter saat pengukuran.
4. Pindahkan *database* dari perangkat lunak ke DAQ.
5. Pengambilan data bantalan dengan mengoperasikan DAQ.
6. Data terekam dengan baik pada DAQ, jika tidak maka dilakukan proses pengambilan data ulang.
7. Data yang telah terekam dengan baik dipindahkan kembali dari DAQ ke perangkat lunak.
8. Pengambilan data kembali dilakukan untuk bantalan yang aus, dengan langkah yang sama mulai nomor 2.
9. Pengolahan data pada perangkat lunak dengan metode SVM.
10. Optimasi SVM.
11. Pengujian selesai apabila SVM telah memiliki keakuratan yang tinggi dalam mengelompokkan data.

### 3.3.2 Diagram Alir Pengujian







Gambar 3. 9 diagram alir pengujian

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan ditampilkan data hasil dari percobaan dan pembahasan yang disesuaikan dengan tujuan penelitian untuk mendapatkan kesimpulan.

### 4.1 Analisa keausan *tapered roller bearing* melalui data vibrasi

Analisa keausan *tapered roller bearing* dilakukan dengan membaca spektrum data vibrasi. Spektrum ditampilkan dengan bantuan *program* komputer setelah data di *transfer* dari perangkat DAQ. Pada program dilakukan perhitungan terhadap FTF, BPFO dan BPFI. Beberapa pengaturan diperlukan untuk memunculkan nilai dari FTF, BPFO dan BPFI. Data vibrasi yang ditampilkan pada gambar 4.5 Sampai 4.11 merupakan hasil pengujian terhadap bantalan Koyo 30304AJR pada RPM 1300 yang telah dibuat aus pada bagian *inner race* dan *outer race*. Pada gambar 4.1 menampilkan perbedaan *outer race* dalam keadaan normal dan sesudah terjadi keausan. Pada gambar 4.2 menampilkan perbedaan *inner race* dalam keadaan normal dan sesudah terjadi keausan. Spektrum yang ditampilkan merupakan data vibrasi bantalan Koyo 30304AJR pada RPM 1300.



Gambar 4. 1 perbandingan *outer race* sebelum (a) dan sesudah (b) terjadi keausan



Gambar 4. 2 perbandingan *inner race* sebelum (a) dan sesudah (b) terjadi keausan

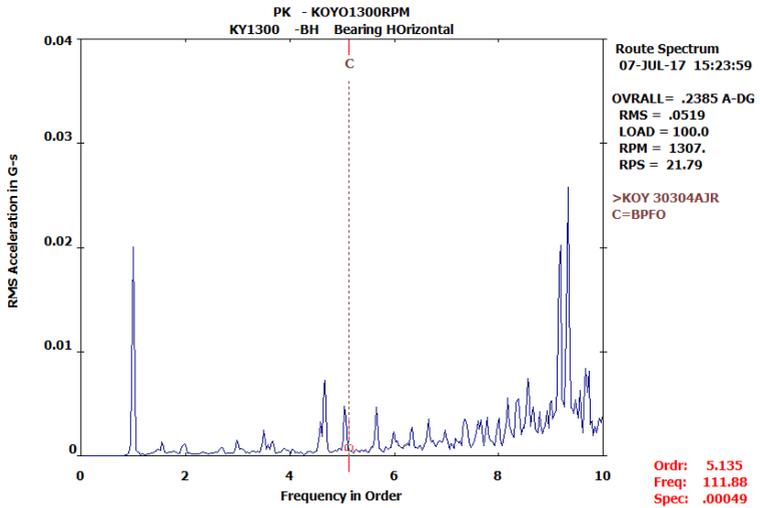
Keausan pada bantalan dapat dideteksi berdasarkan spektrum vibrasi melalui dua cara, yaitu melalui nilai amplitudo yang besar pada frekuensi refrensinya atau terdapat *sideband* di sekitar frekuensi refrensinya. Pada frekuensi refrensi *outer race*, *sideband* terletak pada nilai  $BPFO \pm$  nilai *Fundamental Train Frequency* (FTF). Pada frekuensi refrensi *inner race*, *sideband* terletak pada nilai  $BPFI \pm$  nilai *Fundamental Train Frequency* (FTF). Perhitungan untuk memperoleh letak *sideband* adalah sebagai berikut:

$$\textit{Sideband outer race} = BPFO - FTF \text{ (untuk nilai sideband minimal) } \dots\dots\dots (4.1)$$

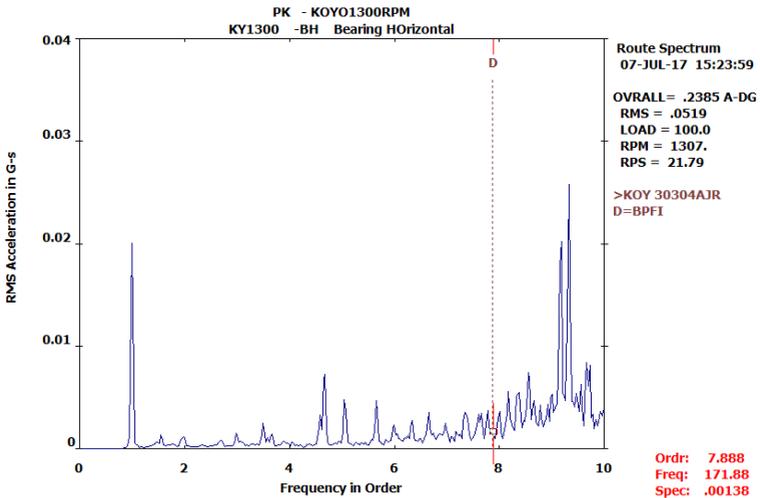
$$\textit{Sideband outer race} = BPFO + FTF \text{ (untuk nilai sideband maksimal) } \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\textit{Sideband inner race} = BPFI - FTF \text{ (untuk nilai sideband minimal) } \dots\dots\dots (4.3)$$

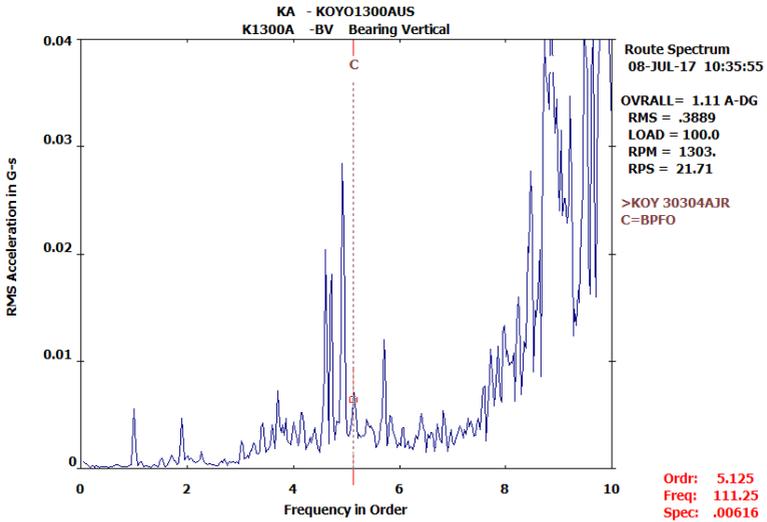
$$\textit{Sideband inner race} = BPFI + FTF \text{ (untuk nilai sideband maksimal) } \dots\dots\dots (4.4)$$



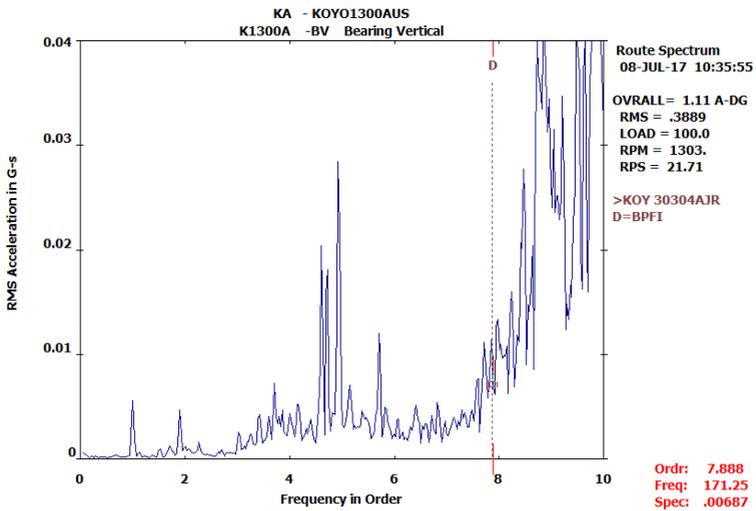
Gambar 4. 3 spektrum vibrasi dengan nilai BPFO pada bantalan Koyo normal



Gambar 4. 4 spektrum vibrasi dengan nilai BPFI pada bantalan Koyo normal



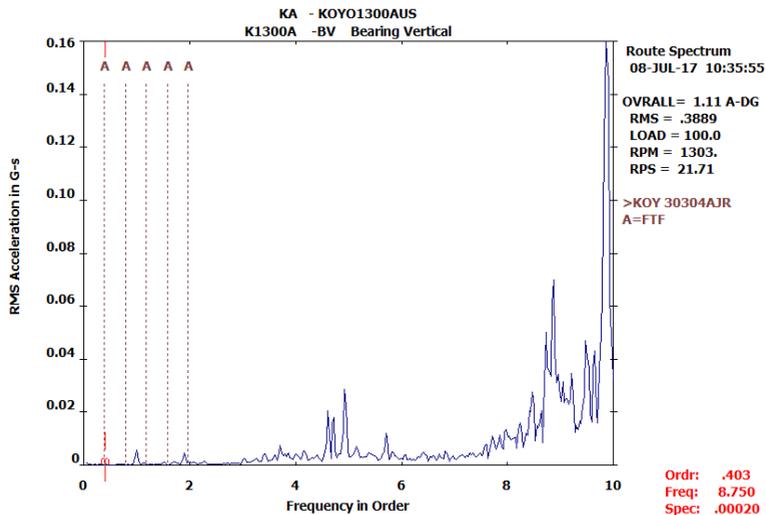
Gambar 4. 5 spektrum vibrasi dengan nilai BPFO pada bantalan Koyo yang mengalami keausan



Gambar 4. 6 spektrum vibrasi dengan nilai BPFI pada bantalan Koyo yang mengalami keausan

Pada gambar 4.3 nilai BPFO pada bantalan Koyo normal atau tidak terdapat keausan terletak pada order 5.135. Nilai BPFI pada gambar 4.4 spektrum bantalan Koyo normal terletak pada order 7.888.

Gambar 4.5 dan gambar 4.6 menunjukkan letak BPFO dan BPFI dari bantalan Koyo yang mengalami keausan hasil proses analisis vibrasi. Nilai BPFO hasil pengukuran pada bantalan Koyo yang mengalami keausan terletak pada order 5.125 sedikit berbeda dengan bantalan normal yaitu 5.135. Pada gambar 4.6 menunjukkan nilai BPFI pada bantalan yang mengalami keausan terletak pada order 7.888.



Gambar 4. 7 spektrum vibrasi dengan nilai FTF pada bantalan Koyo yang mengalami keausan

Pada gambar 4.7 ditunjukkan letak FTF dari bantalan Koyo yang mengalami keausan yaitu pada order 0.403. Berdasarkan persamaan 4.1 dan 4.2 perhitungan untuk mengetahui letak *sideband* pada 1x BPFO adalah sebagai berikut:

$$\textit{Sideband minimal} = \text{BPFO} - \text{FTF} = 5.125 - 0.403 = 4.721 \text{ order}$$

$$\textit{Sideband maksimal} = \text{BPFO} + \text{FTF} = 5.125 + 0.403 = 5.528 \text{ order}$$

Pada gambar 4.8 ditunjukkan letak *sideband* minimal dan *sideband* maksimal pada 1x BPFO berdasarkan perhitungan. Letak *sideband* untuk 2x BPFO dapat diketahui melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\textit{Sideband minimal} = (\text{BPFO} \times 2) - \text{FTF} = (5.125 \times 2) - 0.403 = 9.846 \text{ order}$$

$$\textit{Sideband maksimal} = (\text{BPFO} \times 2) + \text{FTF} = (5.125 \times 2) + 0.403 = 10.65 \text{ order}$$

Pada gambar 4.9 ditunjukkan letak *sideband* minimal dan *sideband* maksimal berdasarkan perhitungan.

Pada bagian *inner race*, sama halnya dengan bagian *outer race*, letak *sideband* pada BPFI dapat diketahui dengan perhitungan. Berdasarkan persamaan 4.3 dan 4.4 perhitungan untuk menentukan *sideband* minimal dan maksimal 1x BPFI:

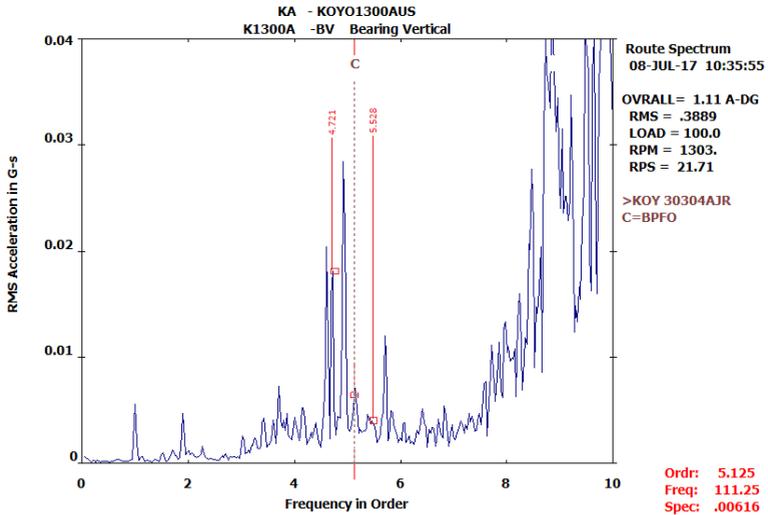
$$\textit{Sideband minimal} = \text{BPFI} - \text{FTF} = 7.888 - 0.403 = 7.485 \text{ order}$$

$$\textit{Sideband maksimal} = \text{BPFI} + \text{FTF} = 7.888 + 0.403 = 8.291 \text{ order}$$

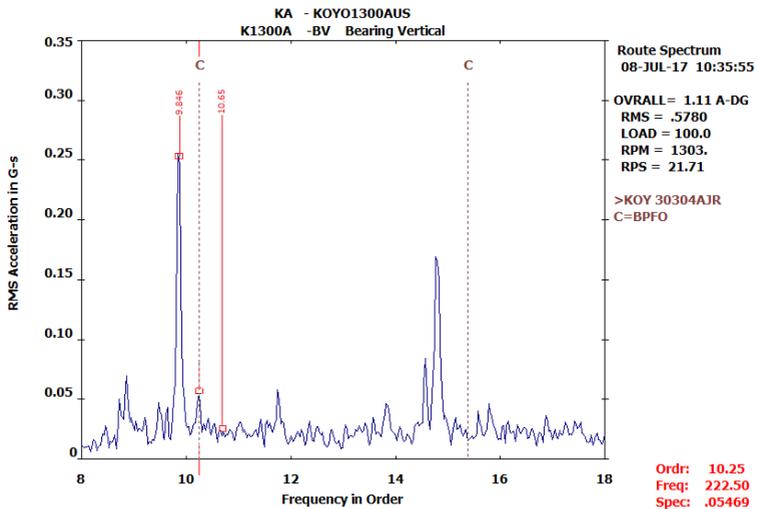
Letak *sideband* minimal dan maksimal pada 1x BPFI ditampilkan pada gambar 4.10. Pada gambar 4.11 ditampilkan letak *sideband* minimal dan maksimal pada 2x BPFI berdasarkan perhitungan sebagai berikut:

$$\textit{Sideband minimal} = (\text{BPFI} \times 2) - \text{FTF} = (7.888 \times 2) - 0.403 = 15.37 \text{ order}$$

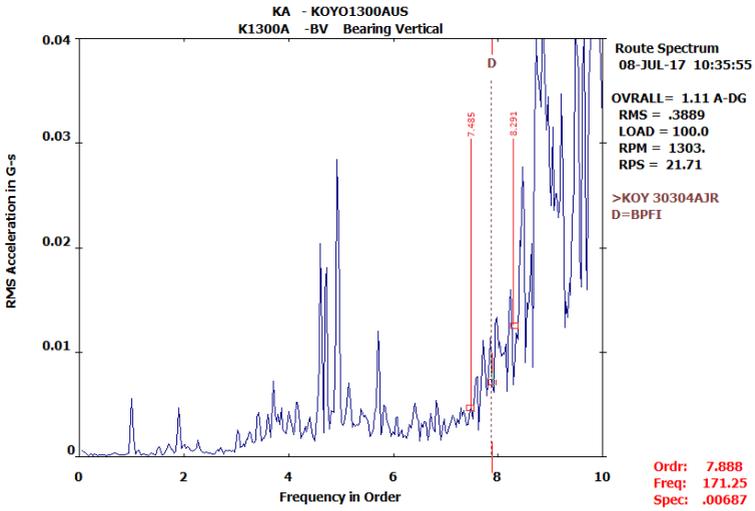
$$\textit{Sideband maksimal} = (\text{BPFI} \times 2) + \text{FTF} = (7.888 \times 2) + 0.403 = 16.18 \text{ order}$$



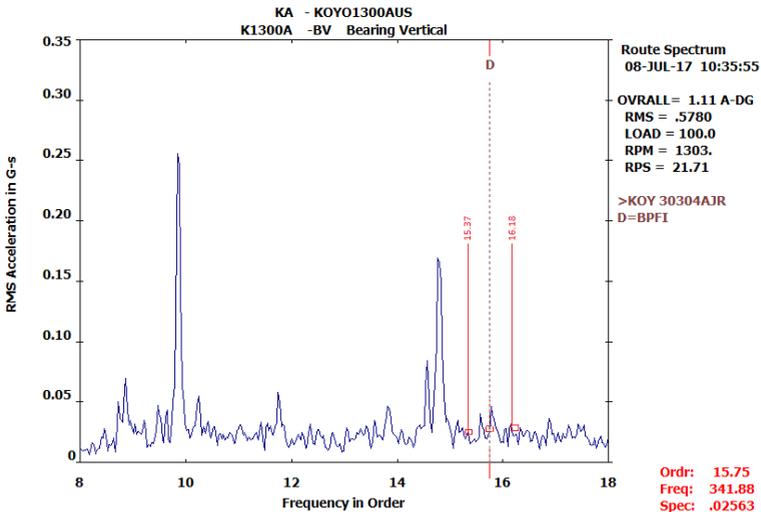
Gambar 4. 8 spektrum vibrasi dengan nilai 1x BPFO dan *sideband* pada bantalan Koyo yang mengalami keausan



Gambar 4. 9 spektrum vibrasi dengan nilai 2x BPFO dan *sideband* pada bantalan Koyo yang mengalami keausan



Gambar 4. 10 spektrum vibrasi dengan nilai 1x BPFI dan *sideband* pada bantalan Koyo yang mengalami keausan



Gambar 4. 11 spektrum vibrasi dengan nilai 2x BPFI dan *sideband* pada bantalan Koyo yang mengalami keausan

Berdasarkan gambar 4.8 sampai 4.11, *sideband* yang muncul disekitar frekuensi referensi merupakan salah satu indikasi bantalan mengalami keausan. Letak *sideband* pada *outer race* diketahui melalui  $BPF0 \pm FTF$  dan pada *inner race* diketahui melalui  $BPFI \pm FTF$ .

#### **4.2 Proses dalam data mining**

Proses pada *data mining* yang diterapkan pada penelitian ini diuraikan dengan penjelasan sebagai berikut:

##### **1. Data Cleaning**

Pembersihan data, atau membuang data yang tidak diperlukan. Proses *data cleaning* ini dilakukan pada saat pembuatan parameter pengukuran vibrasi pada bantalan. Parameter tersebut diatur pada program sebelum melakukan pengukuran. Parameter yang digunakan berupa 0.0 order untuk batas awal pengukuran dan batas akhir pengukuran 50 order.

##### **2. Data Integrated**

Relasi data, atau mencari data yang berhubungan untuk dapat diolah. Pada tahapan ini data vibrasi berupa order dengan amplitudo dipilih karena setiap order akan menampilkan amplitudo yang berbeda – beda. Sebuah data yang akan diolah merupakan hubungan antara order dengan amplitudo, order merupakan kelipatan putaran poros dan amplitudo adalah nilai vibrasi.

##### **3. Data Selection**

Pemilihan data, atau memilih data-data yang digunakan dalam pengolahan. Data vibrasi yang terdiri dari hasil pengukuran vibrasi pada bantalan Timken dan Koyo dipilih sesuai kebutuhan pengolahan data, karena data vibrasi kedua bantalan tersebut tidak dapat disatukan maka diperlukan *data selection* untuk pemilihan data yang akan diolah.

##### **4. Data Transformation**

Pada tahapan ini data vibrasi disiapkan pada format yang dapat diolah untuk proses selanjutnya. Pengubahan format ini dilakukan agar data lebih mudah dibaca dan distandartkan bentuknya untuk diolah menggunakan metode dari *data mining*.

## 5. Data Analysis

Analisis data terdiri dari beberapa proses didalamnya, dimulai dari pengolahan data hingga mendapatkan kesimpulan sebagai keluaran *data mining*. Pemilihan dan penggunaan metode *data mining* sebagai dasar dalam pembuatan model yang digunakan untuk mengklasifikasikan *class data*. Evaluasi dilakukan untuk meningkatkan keakurasian dari metode *data mining*. Kesimpulan didapat setelah data baru diklasifikasikan dengan model yang telah dibuat. Penjelasan lebih rinci terdapat pada sub bab 4.3.

### 4.3 Identifikasi keausan melalui metode SVM

Data yang digunakan untuk menampilkan hasil penelitian pada sub bab ini adalah data vibrasi dari bantalan Koyo 30304AJR yang berjumlah 6596 data. Proses yang dijelaskan pada sub bab ini adalah proses *data analysis*, klasifikasi awal dilakukan untuk membentuk *class* awal untuk diolah menjadi pola data atau model pada *program*. Pada gambar 4.12 merupakan diagram alir pengolahan data dengan metode SVM pada program.

Beberapa metode klasifikasi yang dilakukan dengan metode SVM, yaitu linear SVM, quadratic SVM, cubic SVM, fine gaussian SVM, medium gaussian SVM, dan coarse SVM. Perbedaan metode SVM tersebut adalah sebagai berikut:

1. *Linear SVM*, rumus yang digunakan:

$$G(x_1, x_2) = x_1'x_2 \dots \dots \dots (4.5)$$

*Linear SVM* menggunakan *hyperplane* atau garis pemisah berbentuk garis lurus dengan fungsi:

$$f(x) = a_0 + a_1x \dots \dots \dots (4.6)$$

Dengan syarat :  $a_1 \neq 0$  .

Tanda ' berarti *transpose matrix* yaitu perubahan dari vektor baris ke vektor kolom.

2. *Quadratic SVM*, rumus yang digunakan:

$$G(x_1, x_2) = (1 + x_1'x_2)^p \dots \dots \dots (4.7)$$

dimana  $p$  merupakan *polynomial order* atau derajat polinomial, nilai dari  $p = 2$  untuk *quadratic SVM*.

*Quadratic SVM* membentuk *hyperplane* atau garis pemisah dengan fungsi dari derajat polinomial = 2 :

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \dots\dots\dots (4.8)$$

Dengan syarat:  $a_2 \neq 0$

3. *Cubic SVM*, rumus yang digunakan seperti pada persamaan (4.7), dimana  $p$  merupakan *polynomial order*, nilai dari  $p = 3$  untuk *cubic SVM*.

*Cubic SVM* membentuk *hyperplane* atau garis pemisah dengan menggunakan fungsi dari derajat polinomial = 3 :

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \dots (4.9)$$

Dengan syarat:  $a_3 \neq 0$

4. *Fine Gaussian SVM*, rumus yang digunakan:

$$G(x_1, x_2) = \exp(-\gamma \|x_1 - x_2\|^2) \dots (4.10)$$

*Fine Gaussian SVM* menggunakan fungsi kernel untuk membentuk *hyperplane* atau garis pemisahannya. *Gamma* ( $\gamma$ ) atau *Kernel Scale* merupakan faktor pengali untuk semua komponen prediktor. Nilai *Gamma* untuk *fine gaussian SVM* :

$$\text{sqrt}(P):4 \dots\dots\dots (4.11)$$

*Sqrt(P)* merupakan akar dari nilai  $P$ ,  $P$  merupakan jumlah dari prediktor.

5. *Medium Gaussian SVM*, rumus yang digunakan seperti pada persamaan (4.10). Nilai *gamma* untuk membentuk *hyperplane* atau garis pemisah pada *medium gaussian SVM*:

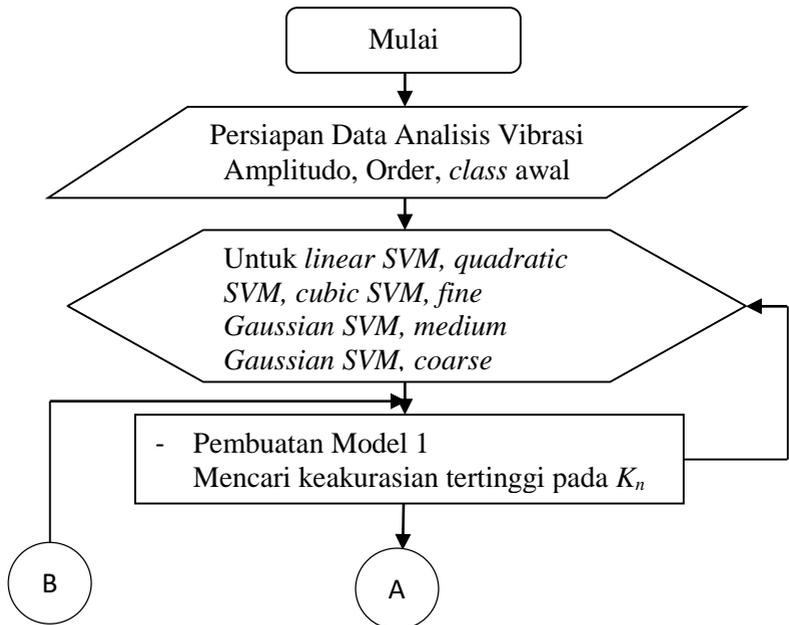
$$\text{sqrt}(P) \dots\dots\dots (4.12)$$

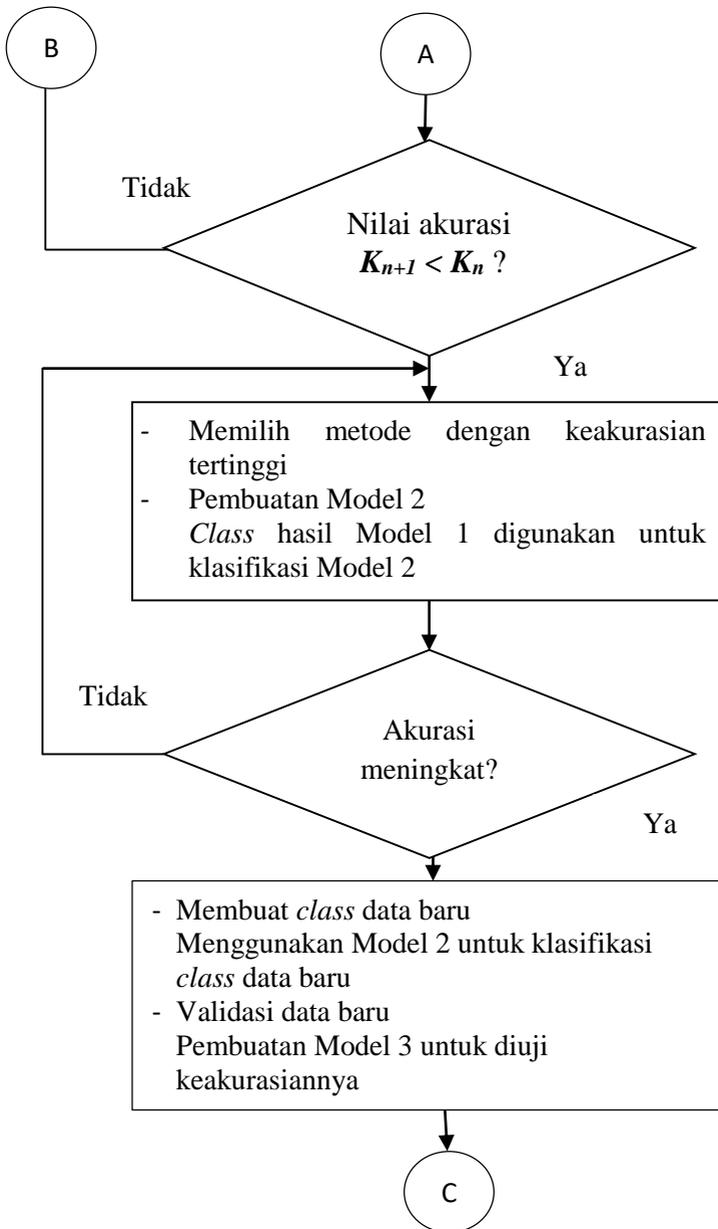
6. *Coarse Gaussian SVM*, rumus yang digunakan seperti pada persamaan (4.10). Nilai *gamma* untuk membentuk *hyperplane* atau garis pemisah pada *coarse gaussian SVM*:

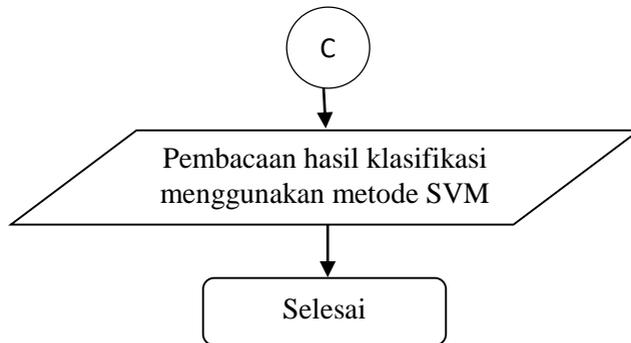
$$\text{sqrt}(P)*4 \dots\dots\dots (4.13)$$

Proses pengolahan data vibrasi menggunakan metode SVM dapat dilihat pada diagram alir gambar 4.12. Pada diagram alir 4.12 ditunjukkan proses pengolahan data vibrasi dengan menggunakan metode SVM mulai dari data vibrasi amplitudo,

order dan *class* awal hingga dapat dilakukan klasifikasi untuk data baru. *Input* berupa amplitudo, order, dan *class* untuk setiap metode SVM dibuat model 1 untuk mengetahui tingkat akurasi. *Looping* atau pengulangan terhadap metode SVM dilakukan yang bertujuan mencari metode terbaik untuk mengklasifikasikan data vibrasi. Pembuatan model 1 untuk setiap metode dilakukan berulang dengan teknik *K-fold*. Model 2 digunakan untuk evaluasi dan optimasi dari model 1. Model 2 adalah model 1 metode SVM yang memiliki keakuratan tertinggi. Akurasi dari model 2 lebih tinggi daripada model 1 dan model 2 dapat dijadikan model untuk melakukan klasifikasi terhadap data baru. Model 3 dibuat untuk menilai keakuratan dari klasifikasi model 2. Pembacaan hasil klasifikasi berupa model 3 merupakan keluaran dari proses pengolahan data.







Gambar 4. 12 diagram alir pengolahan data dengan metode SVM pada program

Metode untuk mencari akurasi tertinggi dari sebuah metode SVM adalah dengan *K-fold*. *K-fold* atau yang sering disebut *K-fold Cross Validation* adalah sebuah teknik untuk menilai keakurasian dari sebuah model dengan cara data dibagi sebanyak *K*-bagian secara acak dan dilakukan sejumlah *K*-kali pengujian, dimana masing – masing eksperimen menggunakan data ke-*K* sebagai *data testing* dan data lainnya sebagai *data training*. Nilai *K* pasti lebih dari 1, nilai *K* yang sering digunakan pada *machine learning* adalah 5 atau 10. Contoh metode *K-fold*, ditentukan nilai *K-fold* = 5 maka data dibagi kedalam 5 bagian secara acak. Data yang telah diacak diuji dengan sebanyak 5 kali dengan komposisi yang berbeda. Jumlah data yang diklasifikasikan benar dibagi seluruh data yang diolah maka akan menghasilkan nilai akurasi metode SVM tersebut. Tabel 4.1 merupakan ilustrasi dari teknik *K-fold*.

Tabel 4. 1 ilustrasi metode *K-fold*

<i>Data Testing</i>	<i>Data Training</i>
K1	K2,K3,K4,K5
K2	K1,K3,K4,K5
K3	K1,K2,K4,K5
K4	K1,K2,K3,K5
K5	K1,K2,K3,K4

Tabel 4. 2 hasil keakurasian metode SVM

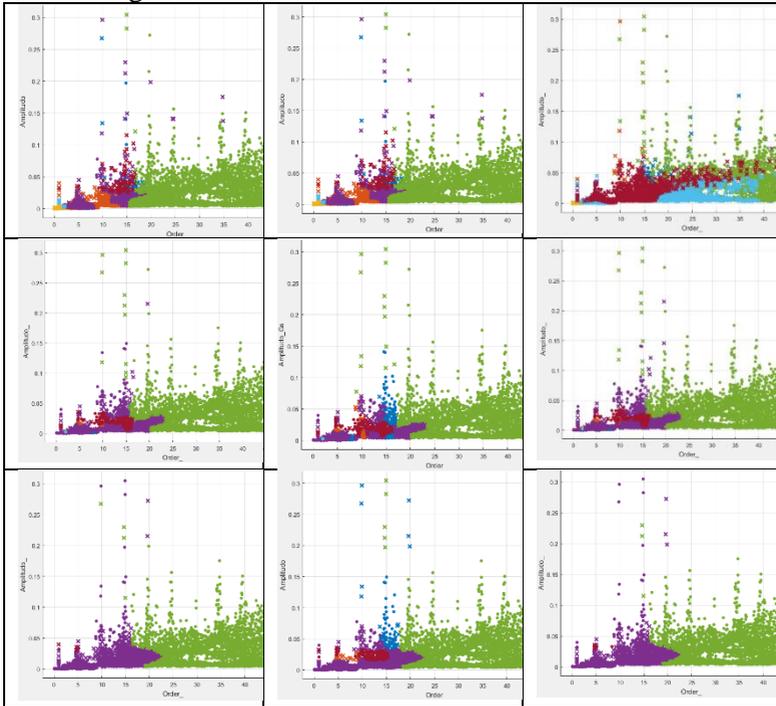
Metode	K-Fold											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
L SVM	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Q SVM	71	65	63	65	65	65	65	65	63	65	63	63
C SVM	59	54	50	50	50	50	49	48	48	48	46	46
FG SVM	82	82	82	82	82	82	82	82	83	82	82	82
MG SVM	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
CG SVM	69	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70

Pada tabel 4.2 nilai dari akurasi metode SVM tiap *K-fold* dalam satuan persentase. Pada baris metode, L SVM berarti *Linear SVM*, Q SVM berarti *Quadratic SVM*, C SVM berarti *Cubic SVM*, FG SVM berarti *Fine Gaussian SVM*, MG SVM berarti *Medium Gaussian SVM*, dan CG SVM berarti *Coarse Gaussian SVM*. Pengujian teknik *K-fold* dilakukan dengan *trial* nilai  $K = 2$  sampai ditemukan nilai keakurasian berkurang atau telah melewati keakurasian tertinggi. Nilai  $K = 12$ , karena hingga  $K=10$  nilai keakurasian dari metode *fine Gaussian SVM* dan *coarse SVM* masih meningkat, maka dilakukan  $K=11$ . Pada saat  $K=11$  nilai keakurasian dari *quadratic SVM* meningkat maka dilakukan  $K=12$ .

Pada tabel 4.2 ditampilkan nilai keakurasian tertinggi dari setiap metode SVM. Nilai keakurasian tertinggi metode SVM didapat dari nilai K-fold yang berbeda. Berdasarkan tabel 4.2 diketahui bahwa keakurasian dari metode *Fine Gaussian SVM* adalah yang tertinggi, yaitu dengan 83%. Nilai keakurasian tertinggi mengartikan bahwa metode tersebut adalah yang paling tepat untuk mengklasifikasikan data yang sedang di proses.

Tabel gambar 4.3 merupakan tampilan potongan dari tabel 4.2. Terdapat 9 kotak yang diambil pada tabel 4.2 yang ditunjukkan oleh kotak pembatas dalam tabel. Pada tabel 4.3 kotak pertama dari kanan tampilan adalah *cubic SVM* dengan nilai  $K=9$  sampai  $K=11$  secara horizontal, berikut seterusnya pada *fine Gaussian SVM* dan *medium gaussian SVM* secara vertikal.

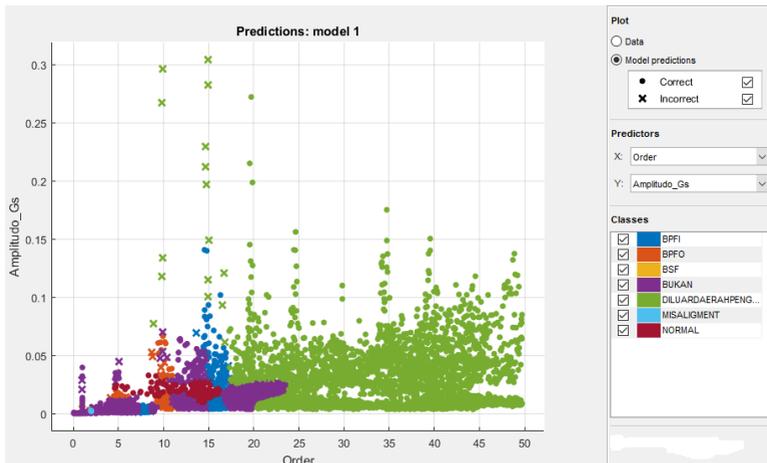
Tabel 4. 3 gambar model metode SVM tabel 4.2



*Class data* hasil pengklasifikasian dengan model yang pertama dijadikan sebagai *class data* untuk data awal, proses *training data* selanjutnya dilakukan untuk mengetahui apakah keakurasian model telah tinggi. Hal ini merupakan proses evaluasi dari model SVM yang sebelumnya. Gambar 4.20 merupakan hasil evaluasi *training data* dengan *class data* baru.

Pada gambar 4.13 setiap class ditunjukkan dengan warna berbeda, biru tua untuk data BPFJ, jingga untuk data BPFO, kuning untuk data BSF, ungu untuk data bukan (artinya data tersebut tidak di dalam area data BPFJ, BPFO, BSF, dan *Misalignment*), hijau untuk data diluar daerah pengamatan, biru muda untuk data *misalignment*, dan merah marun untuk data yang diambil dari bantalan normal namun didalam daerah pengamatan. Data yang berbentuk

lingkaran kecil atau titik merupakan data yang diklasifikasikan secara benar, data berbentuk tanda silang merupakan koreksi dari model SVM terhadap kelas data, sebagai contoh tanda silang berwarna hijau, sebelum diklasifikasikan dengan model SVM warnanya bukan hijau atau tidak masuk di *class* yang berwarna hijau. Pada grafik ditunjukkan sumbu x sebagai frekuensi satuan order dan sumbu y sebagai amplitudo dengan satuan G's.



Gambar 4. 13 model 2 *Fine Gaussian SVM* menghasilkan keakurasian 97.1%

Model hasil evaluasi tersebut dijadikan sebagai model dalam mengklasifikasikan data baru. Identifikasi keausan bantalan menggunakan metode SVM dilakukan dengan 4 buah kasus berikut:

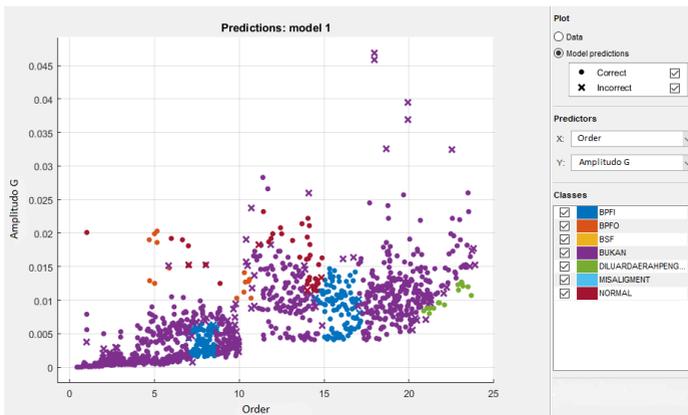
- Bantalan Koyo 30304AJR dengan keadaan mengalami keausan pada bagian *inner race* dan tidak terjadi keausan pada *outer race***

Bentuk keausan pada *inner race* dapat dilihat pada gambar 4.14b. Data vibrasi yang diambil untuk diolah dengan metode SVM adalah sebanyak 1200 data. Gambar

4.15 merupakan hasil klasifikasi dari bantalan Koyo yang mengalami keausan pada bagian *inner race*.

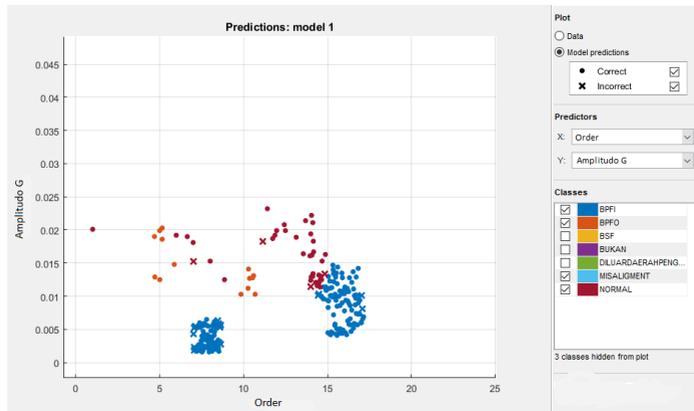


Gambar 4. 14 bantalan Koyo bagian *inner race* normal (a) dan mengalami keausan (b)



Gambar 4. 15 klasifikasi bantalan Koyo yang mengalami keausan pada *inner race* dengan keakuratan 91.9%

Gambar 4.15 merupakan hasil pengklasifikasian data bantalan Koyo yang mengalami keausan pada bagian *inner race* dengan metode SVM, menghasilkan banyak data “bukan” (data berwarna ungu) atau tidak diketahui data tersebut milik *class* data apa. Beberapa *class* dapat dihilangkan untuk memudahkan membaca hasil identifikasi.



Gambar 4. 16 hasil klasifikasi bantalan Koyo yang mengalami keausan pada *inner race* dengan menghilangkan beberapa *class*

Pada gambar 4.16 terlihat banyak data berwarna biru atau data BPFI yang mengumpul, hal tersebut menandakan bahwa bantalan yang dianalisis vibrasinya terdapat keausan pada *inner race*. Data *misalignment* yang berwarna biru muda tidak muncul pada model, ini menandakan bantalan tersebut tidak memiliki gejala *misalignment*. Data BPFO yang berwarna jingga muncul dengan jumlah yang sedikit dan tinggal mengumpul menandakan bantalan tersebut tidak memiliki gejala keausan pada *outer race*. Data normal yang berwarna merah marun sedikit muncul menandakan bantalan dalam kondisi ini mendekati akhir umur dan selayaknya diganti.

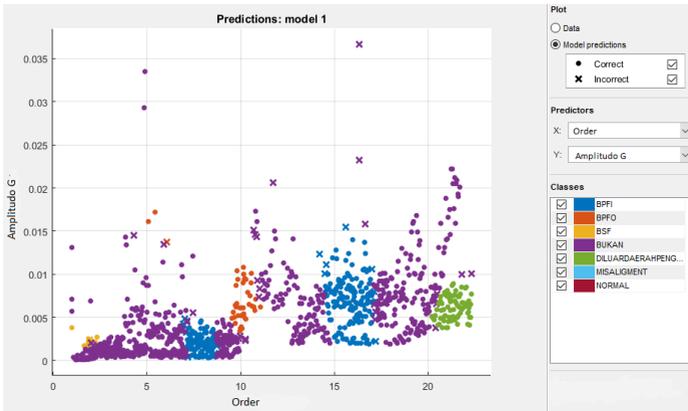
## 2. Bantalan Koyo 30304AJR dengan keadaan mengalami keausan pada bagian *outer race* dan tidak terjadi keausan pada bagian *inner race*

Bentuk keausan dapat dilihat pada gambar 4.17b. Data vibrasi yang diambil untuk diolah dengan metode SVM adalah sebanyak 1200 data. Gambar 4.18 merupakan

hasil klasifikasi dari bantalan Koyo yang mengalami keausan pada bagian *outer race*.



Gambar 4. 17 bantalan Koyo bagian *outer race* normal (a) dan terjadi keausan(b)

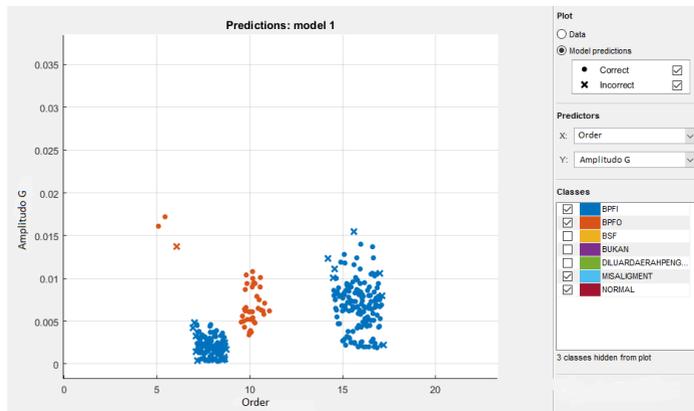


Gambar 4. 18 klasifikasi bantalan Koyo yang mengalami keausan pada *outer race* dengan keakuratan 95%

Pada gambar 4.18 hasil pengklasifikasian data vibrasi bantalan Koyo yang mengalami keausan pada *outer race* dengan metode SVM menghasilkan banyak data “bukan” (data berwarna ungu) atau tidak diketahui data tersebut milik data apa. Beberapa *class* dapat dihilangkan untuk memudahkan membaca hasil identifikasi.

Pada gambar 4.19 terlihat banyaknya data berwarna jingga atau data BFFO yang mengumpul, hal

tersebut menandakan bahwa bantalan yang dianalisis vibrasinya terdapat keausan pada *outer race*. Data *misalignment* yang berwarna biru muda tidak muncul pada model, ini menandakan bantalan tersebut tidak memiliki gejala *misalignment*.



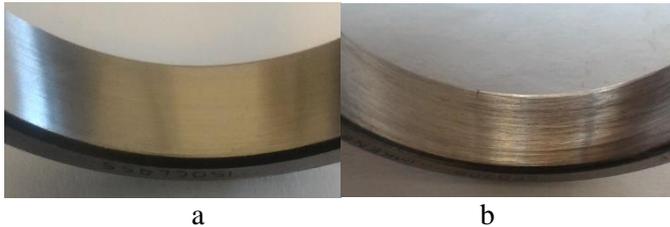
Gambar 4. 19 hasil klasifikasi bantalan Koyo yang mengalami keausan bagian *outer race* dengan menghilangkan beberapa *class*

Data normal yang berwarna merah marun tidak muncul menandakan bantalan dalam kondisi ini harus diganti agar tidak mengganggu proses operasi atau kerusakan lainnya. Data BPF1 yang berwarna biru muncul dengan jumlah yang banyak dan mengumpul merupakan tanda bantalan terdapat gejala keausan pada *inner race*, sebenarnya *inner race* saat pengambilan data tidak memiliki keausan. Gejala kesalahan ini timbul akibat pelumasan tidak masuk pada *inner race* atau kemungkinan ada benda asing pada lintasan dalam, fenomena tersebut kerap terjadi. Kurangnya jumlah data yang diolah juga merupakan salah satu kemungkinan munculnya banyak data pada *inner race*. Pada kasus ini kerap terjadi

ketidaksamaan data dengan keadaan di lapangan, kesalahan terjadi mungkin dikarenakan kesalahan pengambilan data.

**3. Bantalan Timken 30304 dengan keadaan mengalami keausan pada bagian *outer race* dan tidak terjadi keausan pada bagian *inner race***

Model yang digunakan untuk mengolah data baru ini adalah model berdasarkan data bantalan Timken yang berbeda dengan bantalan Koyo. Data vibrasi yang digunakan berjumlah 1200 data. Bentuk keausan dapat dilihat pada gambar 4.20b.

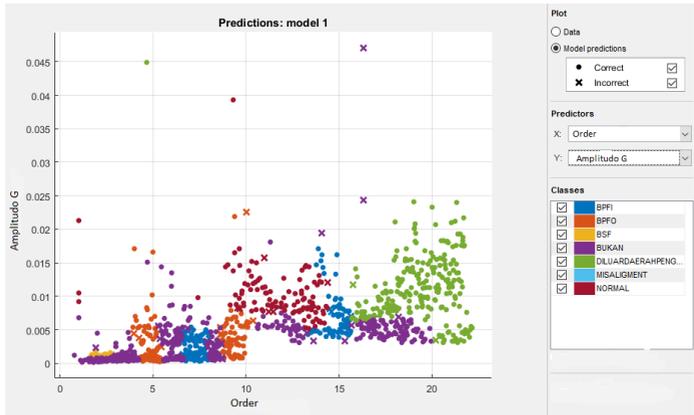


Gambar 4. 20 Timken *outer race* normal (a) dan sesudah terjadi keausan (b)

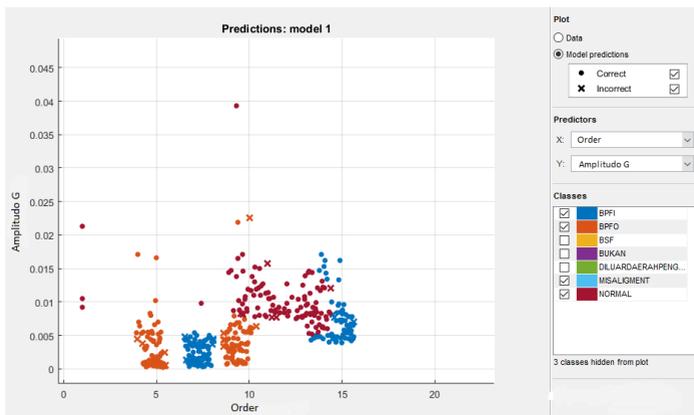
Gambar 4.21 merupakan hasil klasifikasi dari data vibrasi bantalan Timken yang terjadi keausan pada bagian *outer race*. Hasil pengklasifikasian dengan metode SVM menghasilkan persebaran data yang merata tanpa *class misalignment*. Beberapa *class* dapat dihilangkan untuk memudahkan membaca hasil identifikasi.

Pada gambar 4.22 terlihat banyak data berwarna jingga atau data BPFO yang mengumpul, hal tersebut menandakan bahwa bantalan yang dianalisis vibrasinya terdapat keausan pada *outer race*. Data *misalignment* yang berwarna biru muda tidak muncul pada model, ini menandakan bantalan tersebut tidak memiliki gejala *misalignment*. Data normal yang banyak muncul

menandakan bantalan ini masih layak beroperasi dalam kondisi ini.



Gambar 4. 21 klasifikasi Timken yang mengalami keausan *outer race* dengan keakuratan 94.2%



Gambar 4. 22 hasil klasifikasi Timken yang mengalami keausan *inner race* dengan menghilangkan beberapa *class*

Data BPF1 yang berwarna biru muncul dengan jumlah yang banyak dan mengumpul merupakan tanda bantalan terdapat gejala keausan pada *inner race*, sebenarnya *inner race* saat pengambilan data tidak memiliki keausan. Gejala kesalahan ini timbul akibat pelumasan tidak masuk pada *inner race* atau kemungkinan ada benda asing pada lintasan dalam, fenomena tersebut kerap terjadi. Kurangnya jumlah data yang diolah juga merupakan salah satu kemungkinan munculnya banyak data pada *inner race*. Pada kasus ini kerap terjadi ketidaksamaan data dengan keadaan di lapangan, kesalahan terjadi mungkin dikarenakan kesalahan pengambilan data.

**4. Bantalan Timken 30304 dengan keadaan cacat lokal bagian tertentu pada *outer race* dan normal pada *inner race***

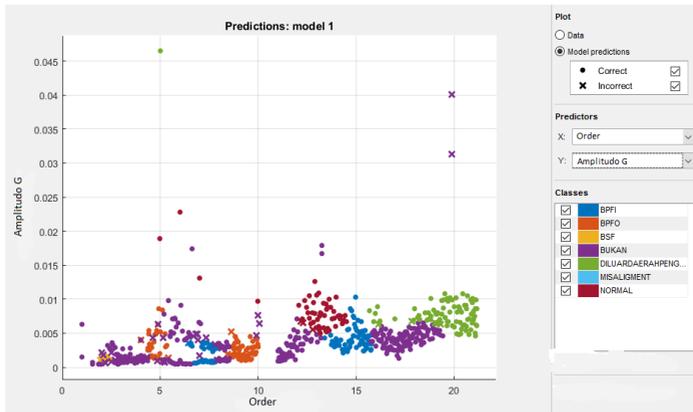


Gambar 4. 23 Timken *outer race* normal (a) dan keadaan cacat lokal (b)

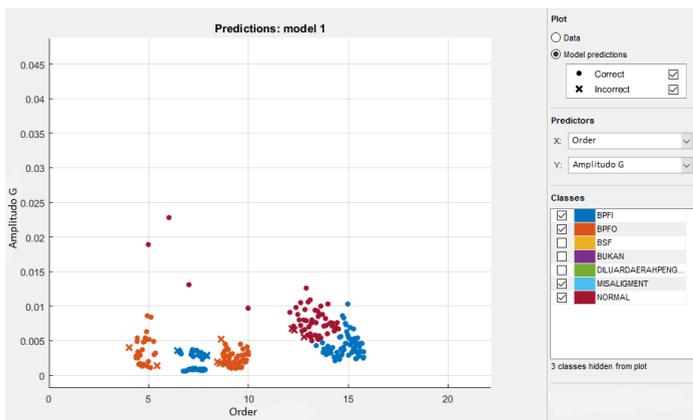
Model yang digunakan adalah model dari data vibrasi bantalan Timken. Data vibrasi yang digunakan berjumlah 861 data, akibat beberapa kesalahan dalam pengambilan data. Bentuk cacat dapat dilihat pada gambar 4.23b.

Gambar 4.24 merupakan hasil klasifikasi dari bantalan Timken yang terjadi kecacatan pada bagian *outer race*. Hasil pengklasifikasian dengan metode SVM

menghasilkan persebaran data yang merata tanpa *class misalignment*. Beberapa *class* dapat dihilangkan untuk memudahkan membaca hasil identifikasi.



Gambar 4. 24 klasifikasi Timken cacat lokal *outer race* dengan keakuratan 93.5%



Gambar 4. 25 klasifikasi Timken cacat lokal *outer race* dengan menghilangkan beberapa *class*

Cacat lokal yang dibuat cukup lebar pada *outer race* pada beberapa sisi, sehingga cacat tersebut menyerupai keausan. Pada gambar 4.25 terlihat banyak data berwarna jingga atau data BPFO yang mengumpul, hal tersebut menandakan bahwa bantalan yang dianalisis vibrasinya terdapat gejala keausan pada *outer race*. Data *misalignment* yang berwarna biru muda tidak muncul pada model, ini menandakan bantalan tersebut tidak memiliki gejala *misalignment*. Data normal yang banyak muncul menandakan bantalan ini masih layak beroperasi dalam kondisi ini. Data BPF1 yang berwarna biru muncul dengan jumlah yang banyak dan mengumpul merupakan tanda bantalan terdapat gejala keausan pada *inner race*, sebenarnya *inner race* saat pengambilan data ini tidak memiliki keausan. Gejala kesalahan ini timbul akibat pelumasan tidak masuk pada *inner race* atau kemungkinan ada benda asing pada lintasan dalam, fenomena tersebut kerap terjadi. Kurangnya jumlah data yang diolah juga merupakan salah satu kemungkinan munculnya banyak data pada *inner race*. Pada kasus ini kerap terjadi ketidaksamaan data dengan keadaan di lapangan, kesalahan terjadi mungkin dikarenakan kesalahan pengambilan data.

## BAB V

### Kesimpulan dan Saran

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. *Sideband* yang muncul disekitar frekuensi referensi merupakan salah satu indikasi bantalan mengalami keausan. Letak *sideband* pada *outer race* diketahui melalui  $BPFO \pm FTF$  dan pada *inner race* diketahui melalui  $BPFI \pm FTF$ .
2. Metode SVM yang paling tepat digunakan dalam penelitian ini dari ke-6 metode SVM untuk identifikasi keausan bantalan adalah *Fine Gaussian SVM* dengan nilai  $K\text{-fold} = 10$ , karena memiliki keakuratan tertinggi yaitu 83%.
3. Identifikasi keausan pada data baru menghasilkan klasifikasi koyo aus *inner race* dengan keakuratan 91.9%, klasifikasi koyo aus *outer race* dengan keakuratan 95%, klasifikasi Timken aus *outer race* dengan keakuratan 94.2%, dan klasifikasi Timken cacat lokal *outer race* dengan keakuratan 93.5%.
4. Tiga dari empat kasus menampilkan data keausan pada *inner race* yang sebenarnya tidak aus, hal tersebut memberi arti bahwa kerusakan pada *outer race* memiliki kecenderungan akan cepat berdampak pada *inner race*.
5. Pada kasus ke-2 yaitu Koyo yang mengalami keausan pada *outer race*, tidak ditemukan data *class* normal, menandakan bahwa pada kondisi tersebut bantalan sudah saatnya untuk diganti. Kasus pertama yaitu untuk Koyo yang mengalami keausan pada *inner race* data *class* normal muncul sedikit yang artinya bantalan mendekati masa habis umurnya maka layak segera diganti. Kasus ke-3 dan ke-4 yaitu Timken yang mengalami keausan pada *outer race* dan kecacatan pada *outer race* masih dapat

digunakan karena data *class* normal masih terdapat banyak.

## **5.2 Saran**

Saran untuk penelitian berikutnya adalah:

1. Penggunaan tipe, jenis, atau produk bantalan lain sebagai bahan penelitian.
2. Penggunaan jenis kerusakan lain pada bantalan sebagai bahan pembahasan.

## DAFTAR PUSTAKA

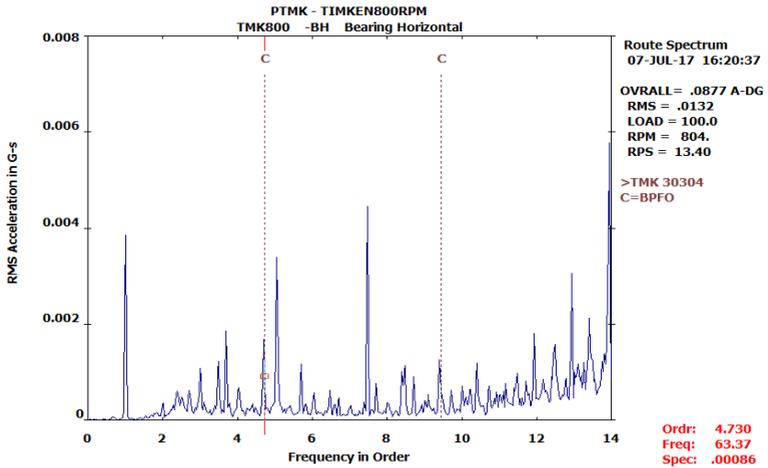
- [1] Baccarini, Lane Maria Rabelo, Valceres V. R. e Silva, Benjamim R. de Menezes, Walmir M. C., 2010, *SVM Pratical Industrial Application for Mechanical Fault Diagnostic*, Brazil. *Jurnal Expert System with Applications* 38 (2011) 6980 – 6984.
- [2] Bramer, Max, 2007, *Principles of Data Mining*, UK: Springer-Verlag London Limited.
- [3] Cristianini N., Taylor J.S., 2000, *An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-Based Learning Methods*, Australia: Cambridge Press University.
- [4] Deak, Krisztian, Imre Kocsis, and Attila Vamosi, 2014, *Application of Machine vision in manufacturing of bearings using ANN and SVM*, Hungary. *Proceedings of the 9th International Conference on Applied Informatics Eger, Hungary, January 29–February 1, 2014*. Vol. 1. pp. 295–304 doi: 10.14794/ICAL.9.2014.1.295
- [5] Deak, Krisztian, Imre Kocsis, Attila Vamosi, and Zoltan Keviczki, 2014, *Failure Diagnostics with SVM in Machine Maintenance Engineering*, *Annals of The Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering* ISSUE #1, May 2014.
- [6] Dolenc, Bostjan, Pavle Bosloski, and Dani Juricic, 2015, *Distributed Bearing Fault Diagnosis Based on Vibration Analysis*, *Mechanical System and Signal Processing* 66-67 (2016) pages 521-532.
- [7] Girdhar, Paresh, 2004 , *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, UK: Newnest.
- [8] Hamid, Abdul, 2012, *Praktikal Vibrasi Mekanik: Teori dan Praktek*, Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [9] Kantardzid, Mehmed, 2011, *Data Mining: concepts, models, methods, and algorithm 2<sup>nd</sup> edition*, USA: John Wiley & Sons, Inc.

- [10] Khonsari, Michael M., E. Richard Booser, 2001, *Applied Tribology Bearing Design and Lubrication*, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [11] Klebanov, Boris M., David M. Barlam, Frederic E. Nystrom, 2008, *Machine Element: Life and Design*, USA: CRC Press.
- [12] Koyo, 2009, *Koyo Ball and Roller Bearings: Failure, Causes, and Countermeasures*, Japan: JTEKT Corporation., ltd. CAT.NO.B3001E.
- [13] Koyo, 2009, *Koyo Tapered Roller Bearings: Inch Series*, Japan: JTEKT Corporation. CAT.NO.B2009E-2.
- [14] Maimon, Oded, Lior Rokach, 2010, *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook 2<sup>nd</sup> edition*, USA: Springer.
- [15] Mais, Jason, 2002, *Spectrum Analysis: The key features of analyzing spectra*, USA: SKF USA Inc. CM5118 EN.
- [16] Mobley, R.Keith, 1999, *Root Cause Failure Analysis*, USA: Butterworth-Heinemann.
- [17] Mobley, R. Keith, 2004, *Maintenance Fundamental 2<sup>nd</sup> Edition*, USA: Elsevier Inc.
- [18] Mott, Robert L., 2004, *Machine Element in Mechanical Design fourth Edition*, New Jersey: Pearson Education Inc.
- [19] Nugroho, Anto S., Arief Budi W., dan Dwi Handoko, 2003, *Support Vector Machine "Teori dan Aplikasinya dalam Bioinformatika"*. IlmuKomputer.Com.
- [20] Prufteknik, 2002, *An Engineers Guide to Shaft Aligment, Vibration Analysis, Dynamic Balancing & Wear Debris Analysis*. Burntwood: Prufteknik Ltd.
- [21] Santosa, Budi, 2007, *Data Mining: Teknik Pemanfaatan Data untuk Keperluan Bisnis*, Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [22] Santosa, Budi, 2007, *Data Mining Terapan dengan Matlab*, Yogyakarta: Graha Ilmu.

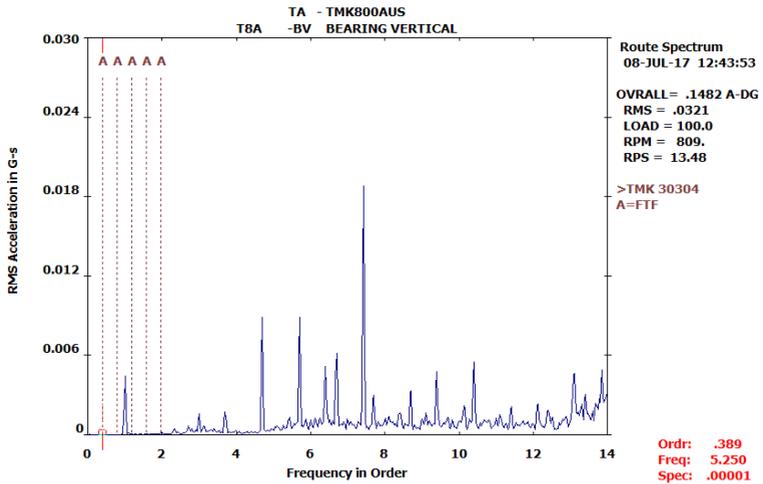
- [23] SKF, 1994, *General Catalogue*, Germany: Gerber and Bruckmann. Catalogue 4000/IV E Reg. 47. 24 000. 1994-12.
- [24] SKF, 2016, *Rollings Bearings*, USA: SKF Group. PUB BU/P1 10000/3EN.
- [25] Taylor, James I., 2003, *The Vibration Analysis Handbook: A Practical Guide for Solving Rotating Machinery Problems*, VCI.
- [26] Timken, 2006, *Timken Products Catalog*, USA: The Timken Company. 36M 11-06-29 Order No. 5731.
- [27] Timken, 2015, *Timken Bearing Damage Analysis with Lubrication Reference Guide*, USA: The Timken Company. 10M 05-15:29 Order No. 5892.
- [28] Timken, 2016, *Timken: Tapered Roller Bearing Catalog*, USA: The Timken Company. 10M 08-16:29 Order No. 10481.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

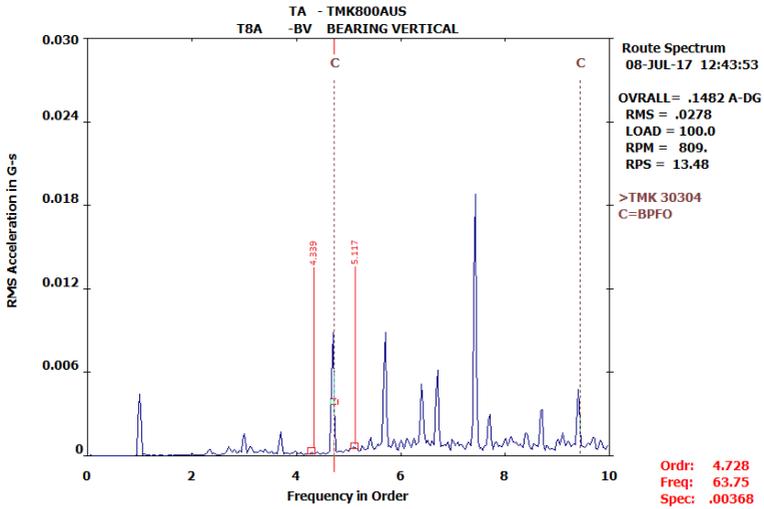
# Lampiran



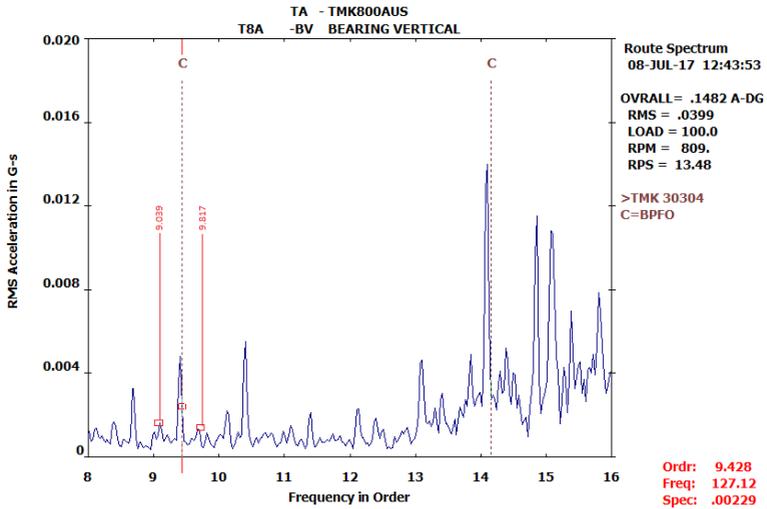
Spektum vibrasi bantalan Timken normal dengan tampilan nilai BPFO pada 800 RPM



Spektum bantalan Timken yang mengalami keausan pada outer race dengan tampilan nilai FTF pada 800 RPM



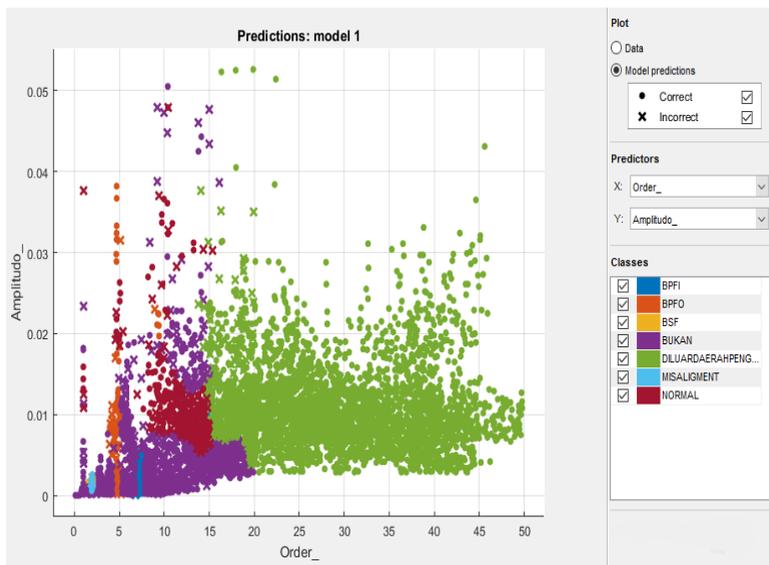
Spektrum vibrasi bantalan Timken yang mengalami keausan pada outer race dengan tampilan nilai 1x BPFO dan sideband



Spektrum vibrasi bantalan Timken yang mengalami keausan pada outer race dengan tampilan nilai 2x BPFO dan sideband

Metode	<i>K-fold</i>														
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Linear SVM	78.5	78.4	78.4	78.4											
Quadratic SVM	79.8	79.6	79	78.9											
Cubic SVM	74.1	74	73.7	72.8											
Fine Gaussian SVM	84	84.5	85	85.5	85.5	85.5	85.5	85.5	85.6	85.6	85.6	85.6	85.6	85.5	
Medium Gaussian SVM	79.7	79.9	79.9	80	80	80	80	80	80	80	80.2	80.2	80.2	80	
Coarse Gaussian SVM	78.6	78.6	78.6	78.5											

Tabel hasil perhitungan K-fold bantalan Timken



Model 1 klasifikasi bantalan Timken Metode Fine Gaussian SVM K-fold 10 akurasi 85.6%



Model 2 evaluasi klasifikasi bantalan Timken Metode Fine Gaussian SVM K-fold 10 akurasi 97.2%

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Jember, 28 Januari 1993, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal hingga tahap diploma di D3 Teknik Mesin ITS bidang konversi energi dengan IPK 3.06. Pada tahun 2015 penulis melanjutkan studi ke S1 Teknik Mesin ITS dengan NRP 2115 105 027. Tugas akhir penulis terkonsentrasi di laboratorium Otomasi Industri.

Penulis banyak mengikuti beberapa pelatihan selama berada di kampus ITS misalnya LKMM Pra-TD FTI-ITS 2012, LKMM TD HMDM FTI-ITS 2013, Platjurdas HMDM FTI-ITS 2013, dan lain-lain. Selain pelatihan, penulis juga aktif dalam organisasi yaitu staff PSDM BEM ITS 2013/2014, staff PSDM HMDM FTI-ITS 2013/2014 dan sebagai pengurus himpunan tahun kepengurusan 2014/2015 sebagai Wakil Ketua I HMDM FTI-ITS. Penulis pernah melakukan kerja Praktek di PT. PJB - UP Gresik selama satu bulan pada 01 Juli s/d 01 Agustus 2014 di *Mechanical Departement*. Penulis dapat dihubungi melalui email [faisal.rahman.adi@gmail.com](mailto:faisal.rahman.adi@gmail.com). Penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak orang untuk kedepannya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*