

Analisis Sinyal Getaran untuk Menentukan Jenis dan Tingkat Kerusakan Bantalan Bola (*Ball Bearing*)

Suhardjono

Dosen Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Kampus ITS Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111.

E-mail : suhardjono_dring@yahoo.de

Abstrak

Seorang Insinyur (*Engineer*) mesin dapat mendeteksi jenis dan tingkat kerusakan mesin dengan sinyal getarannya bak seorang dokter mendeteksi penyakit pasiennya dengan menganalisa denyut/detak jantungnya. Getaran merupakan respon dari sebuah sistem mekanik baik yang diakibatkan oleh gaya eksitasi yang diberikan maupun perubahan kondisi operasi sebagai fungsi waktu. Gaya yang menyebabkan getaran ini dapat ditimbulkan oleh beberapa sumber misalnya kontak/benturan antar komponen yang bergerak/berputar, putaran dari massa yang tidak seimbang (*unbalance mass*), misalignment dan juga karena kerusakan bantalan (*bearing fault*) yang akan menjadi topik penelitian ini. Jenis kerusakan bantalan bola baik akibat kerusakan lokal maupun yang terdistribusi ditunjukkan oleh adanya getaran dengan frekuensi tertentu yang muncul, sedangkan tingkat kerusakan pada umumnya diketahui dari besarnya amplitude getarannya.

Metode yang paling mutakhir untuk mendeteksi kerusakan pada bantalan bola adalah dengan mengukur karakteristik getarannya baik dalam domain waktu maupun domain frekuensi yang terjadi pada arah radial. Percobaan untuk mengetahui dan mempelajari spektrum getaran akibat kerusakan bantalan bola ini dilakukan pada mesin gerinda bangku dengan mengganti beberapa jenis bantalan yang sengaja dirusak.

Analisis perbandingan sinyal getaran antara bantalan bola yang berkondisi baik (normal) dan yang dibuat cacat pada komponennya secara bertingkat sedemikian rupa sehingga dapat ditentukan jenis dan tingkat kerusakan bantalan bola tersebut.

Secara umum hasil dari percobaan ini dapat disimpulkan bahwa sinyal getaran untuk bantalan yang baik mendekati harmonik (sinusoidal), sedangkan yang rusak sinyal getarannya berbentuk stokastik (random). Untuk menentukan jenis kerusakan lintasan dalam, luar atau kerusakan bola harus disinkronkan antara frekuensi getaran dan perhitungan yang berdasarkan data dari parameter bantalannya, yaitu diameter lintasan dalam atau luar, jumlah bola dan putaran poros. Aplikasi hasil penelitian ini adalah monitoring getaran (*vibration monitoring*) untuk "predictive maintenance".

Kata kunci: kerusakan bantalan, sinyal getaran, *vibration monitoring*, *predictive maintenance*.

Abstract

An Engineer can determine accurately the type and the level of engine faults using vibration-signal, like a doctor investigates his/her patient by analyzing the hart beat. Vibration is a response of a mechanical system caused by both excitation forces and the changes of operating conditions that vary within certain limits. The excitation forces introduced by several sources such as contact between moving elements, unbalanced mass, misalignments, ball bearing defects, which is the topic of this research may be arised.

There are two kinds of bearing defects, local and distributed defects. The most cases of local defects are the defect of inner and outer raceway also rolling elements. Moreover the most cases of distributed defects are the unroundness of inner and outer raceway, missalignment of inner and outer raceway, ununiformed ball dimension. Furthermore, for many machine elements such as ball bearing, the vibration has a typical level, and its frequency spectrum has a characteristic shape when the machine is in good condition or defect.

The most popalar and the latest sophisticated method to detect bearing defect is computer-based vibration monitoring. This method analyzes the measured vibration-signal in both time and frequency domain. An experiment to detect the type and the level of ball bearing defects has been done in bench grinding machine by changing such a certain defect of bearing elements. A comparison of the vibration-signal of the good condition and the defect one can be determined the type and the level of such a bearing defect.

In general the result of this experiment showed that the vibration-signal of the good bearing is a harmonic, but the defect one has a random signal. For determining the type of defect of bearing elements, the frequency must be synchronized with the calculation of bearing parameters such as inner and outer raceway diameters, number of balls and number of rotations. The application of this research is the vibration monitoring for predictive maintenance.

Keywords: bearing defect, machine condition monitoring, vibration spectrum, predictive maintenance.

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Februari 2005. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 7 Nomor 1 April 2005.

1. Pendahuluan

Sebuah mesin yang ideal sempurna pada prinsipnya tidak menimbulkan getaran sama sekali, karena seluruh energi yang dihasilkan diubah menjadi kerja. Namun di dunia ini tidak ada yang sempurna, sehingga sebagian energi salah satunya terbuang menjadi getaran. Getaran timbul akibat transfer gaya siklik melalui elemen-elemen mesin yang ada, dimana elemen-elemen tersebut saling beraksi satu sama lain dan energi didisipasi melalui struktur dalam bentuk getaran. Kerusakan atau keausan serta deformasi akan mengubah karakteristik dinamik sistem dan cenderung meningkatkan energi getaran. Metode masa lalu dengan cara mendengarkan suara mesin dan menyentuh/meraba (*hearing and touching*) dikembangkan untuk menentukan apakah mesin bekerja baik atau tidak, tetapi metode klasik tersebut tidak lagi andal untuk saat ini, karena dua faktor berikut ini :

1. Mesin-mesin modern dirancang untuk berjalan secara otomatis, sehingga interaksi antara manusia (operator) dan mesin tidak lagi efektif dan ekonomis
2. Kebanyakan mesin-mesin modern beroperasi pada putaran/kecepatan tinggi, dimana getaran yang timbul banyak yang berfrekuensi tinggi dan tidak lagi dapat dibedakan oleh indra manusia, sehingga dibutuhkan alat untuk mendeteksi dan mengukurnya.

Oleh karena itu untuk mengatasi salah satu permasalahan di atas dikembangkan metode untuk mendeteksi jenis kerusakan dan tingkat kerusakan bantalan bola dari karakteristik sinyal getarannya. Selanjutnya metode ini banyak diaplikasikan pada *condition based maintenance* yang ekonomis.

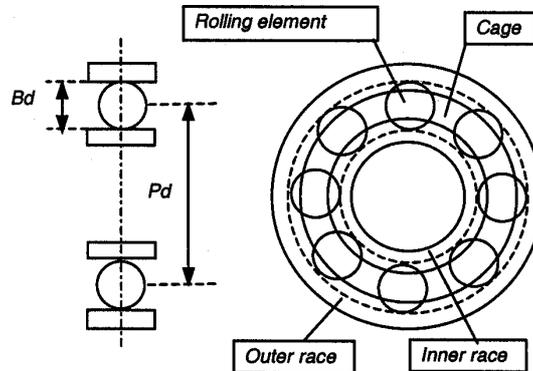
2. Tinjauan

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik sinyal getaran akibat kerusakan bantalan dengan beberapa jenis cacat lokal dan tingkat kerusakannya.

3. Dasar Teori

Beberapa penyebab kerusakan bantalan diantaranya adalah keretakan bantalan, keausan, pemasangan yang tidak sesuai, pelumasan yang tidak cocok, kerusakan dalam pembuatan komponen, diameter bola yang tidak sama. Getaran yang timbul tentu saja disebabkan oleh adanya gaya kontak pada kerusakan tersebut. Pada bantalan ideal, besarnya gaya kontak akan sama pada setiap bola dan pada setiap posisi bola. Bila pada bantalan

bola terdapat kerusakan maka besarnya gaya kontak tidak lagi seragam. Hal inilah yang menimbulkan getaran yang tidak beraturan. Gambar 1 di bawah ini menunjukkan komponen yang terdapat pada bantalan.



Gambar 1. Komponen-komponen Bantalan Bola (*Ball Bearing*)

3.1 Jenis Kerusakan Bantalan Bola

Cacat pada bantalan bola dapat dikelompokkan dalam dua kategori yaitu:

1. Cacat Lokal

Jenis cacat yang termasuk dalam cacat lokal adalah adanya goresan ataupun lubang pada lintasan dalam, lintasan luar dan bola. Sinyal yang dibangkitkan akibat cacat lokal ini berupa impuls, yaitu pada saat elemen rotasi bersentuhan dengan cacat lokal tersebut.

2. Cacat Terdistribusi

Bila pada bantalan bola terdapat cacat terdistribusi, maka gaya kontak akan berubah secara periodik. Jenis cacat yang termasuk dalam kategori cacat terdistribusi ini adalah ketidaksamaan lintasan luar dan lintasan dalam, ketidaksamaan sumbu (*misalignment*) antara sumbu lintasan luar dan lintasan dalam, serta ketidaksamaan dimensi bola. Karena pada bantalan ini getaran yang dibangkitkan berhubungan erat dengan kecepatan putar bola dan *cage* (pemisah), maka terlebih dahulu perlu ditentukan kecepatan putar bola dan pemisah tadi. Jika ω_{OR} adalah kecepatan putar lintasan luar (*outer race*) dan ω_{IR} kecepatan putar lintasan dalam (*inner race*), serta diasumsikan bahwa $\omega_{OR} = 0$ dan $\alpha = 0$ (sudut kontak), maka:

$$V_{IR} = \omega_{IR} \cdot \left[\frac{P_d}{2} - \frac{B_d}{2} \right] \tag{1}$$

$$V_C = \frac{1}{2} \cdot V_{IR} \tag{2}$$

selanjutnya

$$V_C = \frac{1}{2} \cdot \omega_{IR} \cdot \left[\frac{P_d}{2} - \frac{B_d}{2} \right] \tag{3}$$

atau

$$V_C = \omega_C \cdot \frac{P_d}{2} \quad (4)$$

Dari persamaan (3) dan (4), maka didapat :

$$\frac{1}{2} \cdot \omega_{IR} \cdot \left[\frac{P_d}{2} - \frac{B_d}{2} \right] = \omega_C \cdot \frac{P_d}{2}$$

atau

$$\frac{1}{2} \cdot \left[\omega_{IR} \cdot \frac{P_d}{2} - \omega_{IR} \cdot \frac{B_d}{2} \right] = \omega_C \cdot \frac{P_d}{2}$$

sehingga

$$\omega_C = \frac{1}{2} \cdot \omega_{IR} \cdot \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \right] \quad (5)$$

Jika $\alpha \neq 0$, maka

$$\omega_C = \frac{1}{2} \cdot \omega_{IR} \cdot \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right] \quad (6)$$

dimana,

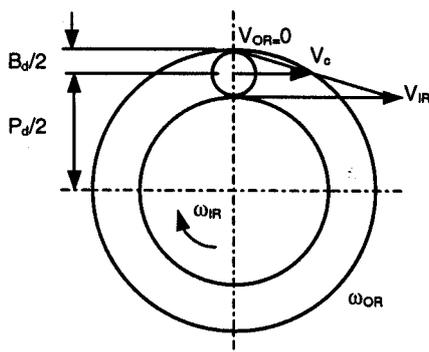
- V_C : Kecepatan linier cage (pemisah),
- V_{IR} : Kecepatan linier lintasan dalam
- ω_C : Kecepatan putar cage (pemisah),
- α : Sudut kontak bantalan
- ω_{IR} : Kecepatan sumbu putar bola terhadap sumbu poros

Dengan cara yang sama untuk kasus dimana $\omega_{IR} = 0$, maka didapat:

$$\omega_C = \frac{1}{2} \cdot \omega_{OR} \cdot \left[1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right] \quad (7)$$

Sedangkan jika lintasan dalam dan lintasan luar sama-sama berputar, maka,

$$\omega_C = \frac{1}{2} \cdot \omega_{IR} \cdot \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right] + \frac{1}{2} \cdot \omega_{OR} \cdot \left[1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right] \quad (8)$$



Gambar 2. Komponen Kecepatan pada Bantalan Bola

3.2 Getaran Akibat Cacat Lokal pada Bantalan Bola

Mekanisme terjadinya getaran akibat adanya cacat pada bantalan adalah adanya impuls pada saat elemen rotasi mengalami tumbukan dengan cacat lokal. Untuk putaran poros yang tetap maka tumbukan akan terjadi secara periodik. Untuk gaya

impuls tunggal, maka respon getarannya akan berupa getaran bebas teredam seperti pada persamaan 9:

$$g_f(t) = A \cdot e^{-\alpha_i \cdot t} \cdot \sin \omega_d \cdot t \quad (9)$$

dimana :

$$A = \frac{F}{m \cdot \omega_n \cdot \sqrt{1 - D^2}},$$

$$\alpha_i = D \cdot \omega_n$$

$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - D^2} \text{ dan } D: \text{ rasio redaman.}$$

Untuk putaran poros yang konstan, maka impuls tersebut akan terjadi secara periodik, sehingga respon getarannya akan berupa getaran bebas teredam yang berulang secara periodik dan memenuhi persamaan :

$$x_f(t) = \sum_j g_f(t - jT_i) \cdot U(t - jT_i) \quad (10)$$

dimana:

- T_i = Periode eksitasi impuls,
- $U(t)$ = Fungsi step satuan dan
- j = indeks periode = 1, 2, ...

Persamaan (10) dapat pula ditulis sebagai berikut:

$$x_f(t) = g_f(t) * \sum_j \delta(t - jT_i) \quad (11)$$

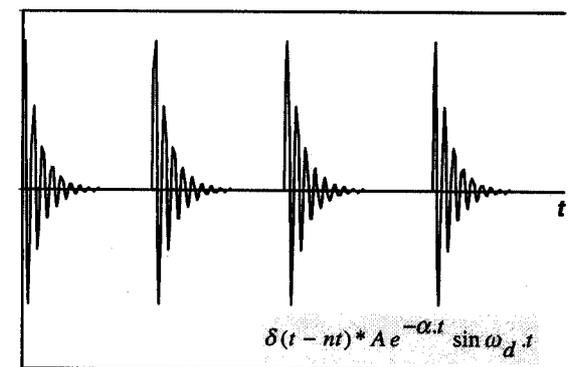
dimana:

$\sum_j \delta(t - jT_i)$: fungsi sisir dengan interval waktu T_i

dan $*$ = operator konvolusi.

Sehingga bentuk sinyal domain waktu yang dihasilkan oleh cacat lokal dapat ditunjukkan seperti gambar 3.

$x(t)$



Gambar 3. Sinyal Getaran Domain Waktu Bantalan Akibat Cacat Lokal

Jika pada bantalan terdapat i buah cacat lokal, maka persamaan (11) menjadi:

$$x(t) = \sum_i x_i(t) = \sum_i \sum_j A_i e^{-\alpha_i(t-jT_i)} \cdot \sin[\omega_{di}(t-jT_i)] \cdot U(t-jT_i) \quad (12)$$

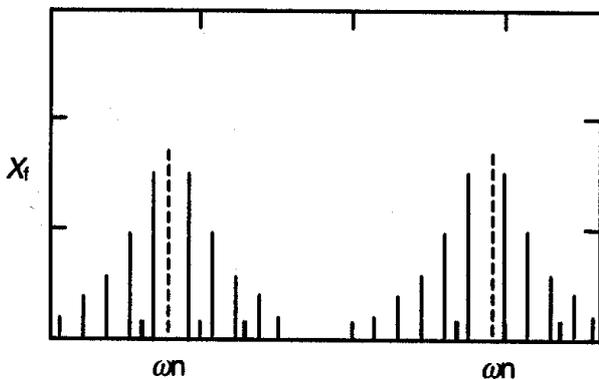
Dengan melakukan Transformasi Fourier pada persamaan (12) maka spektrum frekuensinya adalah:

$$X_i(f) = 2\pi \sum_k X_{ik}(f) \delta(f - kf_i) \quad (13)$$

dimana: f_i = frekuensi eksitasi impuls = $2\pi/T_i$

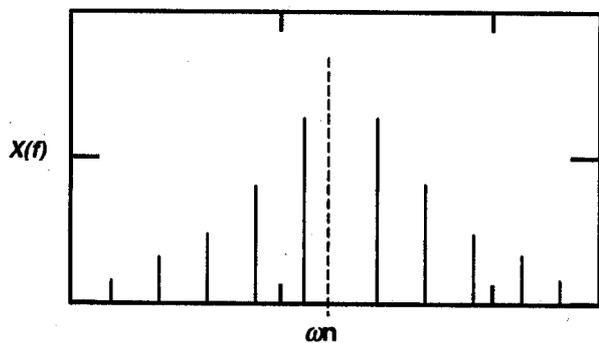
$$X_{ik}(f) = \frac{1}{T_i} \int_{-T_i/2}^{T_i/2} g_i(t) \cdot e^{-j \cdot k \cdot 2\pi \cdot f_i \cdot t} dt \quad (14)$$

Karena $X_i(f)$ pada persamaan (14) adalah merupakan fungsi diskrit dengan frekuensi $1/T_i$ dengan amplitudo mengikuti fungsi $X_{ik}(f)$, maka bentuk spektrum frekuensi dari bantalan yang mempunyai cacat lokal akan terlihat seperti gambar 4 dibawah:



Gambar 4. Pola Spektrum Frekuensi Bantalan Akibat Cacat Lokal

Terlihat bahwa spektrum frekuensi akan mempunyai harga amplitudo terbesar pada daerah frekuensi pribadinya. Bila sistem dengan m buah modus getar, maka pola spektrumnya akan berulang untuk setiap frekuensi pribadi modus getarnya. Sehingga polanya dapat ditunjukkan seperti pada gambar 5 berikut ini :



Gambar 5. Pola Spektrum Bantalan dengan m Modus Getar

Harga frekuensi impuls (f_i) yang digunakan bergantung dari letak cacat lokal pada bantalan. Harga frekuensi impuls (f_i) yang ditimbulkan oleh bantalan dengan N_b buah bola adalah sebagai berikut:

• **Cacat Lokal pada Lintasan Dalam (Inner Race)**

Frekuensi eksitasi impuls akibat adanya cacat lokal pada lintasan dalam bantalan disebut *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPFI), yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$BPFI = \frac{N_b}{2} \times f_r \times \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha \right) \quad (15)$$

dimana :

N_b = Jumlah bola (*Number of balls*),

f_r = Frekuensi relatif antara *inner race* dan *outer race* (Hz),

Bd = Diameter bola (*Ball diameter*) mm,

Pd = Diameter Pitch (*Pitch diameter*) mm dan

α = Sudut kontak (*Contact angle*) derajat.

• **Cacat Lokal pada Lintasan Luar (Outer Race)**

Frekuensi eksitasi impuls akibat adanya cacat lokal pada lintasan luar bantalan disebut *Ball Pass Frequency Outer Race* (BPFO), yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$BPFO = \frac{N_b}{2} \times f_r \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha \right) \quad (16)$$

• **Cacat Lokal pada Bola (Rolling Element)**

Bila terdapat cacat pada bola, maka frekuensi impuls yang terjadi disebut *Ball Spin Frequency* (BSF). Besarnya dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini :

$$BSF = \frac{Pd}{2 \cdot Bd} \times f_r \times \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha \right)^2 \right) \quad (17)$$

• **Cacat Lokal pada Pemisah (Cage)**

Frekuensi akibat adanya cacat pada pemisah (*cage*) disebut *Fundamental Train Frequency* (FTF). Besarnya FTF dapat dihitung dengan persamaan

$$FTF = \frac{f_r}{2} \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha \right) \quad (18)$$

Fundamental Train Frequency ini sama dengan kecepatan putar *cage* atau sama dengan kecepatan sumbu putar bola terhadap sumbu poros.

Jika geometri bantalan tidak diketahui, tetapi jumlah bola dan kecepatan putar mesin diketahui maka dapat digunakan pendekatan sebagai berikut:

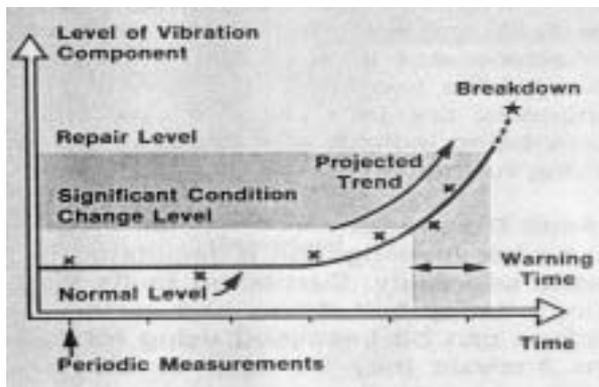
$$FTF \approx f_r \times \left(\frac{1}{2} - \frac{1.2}{N_b} \right) \quad (19)$$

$$BPFI \approx f_r \times \left(\frac{N_b}{2} + 1.2 \right) \quad (20)$$

$$BPFO \approx f_r \times \left(\frac{N_b}{2} - 1.2 \right) \quad (21)$$

3.3 Tingkat Kerusakan

Tingkat kerusakan dapat dideteksi dengan adanya kenaikan amplitudo getaran, dimana frekuensi getaran tetap konstan sesuai dengan jenis kerusakan pada komponen yang mana. Berdasarkan “Machine Condition Monitoring” gambar 6 terlihat bahwa untuk mesin normal (kondisi baik) menunjukkan *amplitudo* getaran yang relatif konstan selama kondisi normal, tetapi saat mulai terjadi kerusakan pada saat itu juga mulai menunjukkan kenaikan amplitudo getaran (*vibration level*) yang cukup besar. Jika *amplitudo* getaran sampai pada batas repair level, maka mesin harus direparasi (*breakdown*) atau komponen harus diganti.



Gambar 6. Tren Kenaikan *Amplitudo* Getaran Akibat Kerusakan Komponen

4. Peralatan dan Pelaksanaan Eksperimen

4.1 Peralatan Eksperimen

Eksperimen dilakukan pada mesin gerinda bangku (*bench grinding machine*), karena mesin ini tidak mempunyai komponen yang bergerak translasi, sehingga dapat diisolasi bahwa getaran yang terjadi hanya karena kerusakan bantalan.

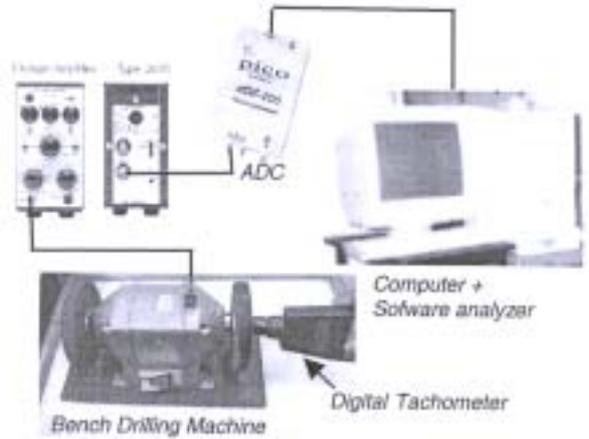
Data teknis mesin gerinda bangku (*bench drilling machine*):

Merk KRISBOW tipe MD 150 F,
 Putaran : 2950 rpm (49.17 Hz)
 Daya motor : 250 Watt
 Dimensi Batu gerinda : ($d_o \times d_i \times t$) = 150mm x 20mm x 12.7mm

Data teknis bantalan:

Merk ASB No. 6203,
 diameter pitch (Pd) : 28.5 mm
 diameter luar (Do) : 40 mm
 diameter dalam (Di) : 17 mm
 jumlah bola (Nb) : 8
 diameter bola (Bd) : 6 mm
 sudut kontak (α) : 0°

Setup percobaan dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian Peralatan Eksperimen untuk Mendeteksi Jenis Kerusakan Bantalan Bola

4.2 Pelaksanaan Percobaan

Pertama kali mesin gerinda harus diukur frekuensi pribadinya dengan modal *hammer* dalam arah vertikal dan horizontal. Setelah itu pengukuran sinyal getaran dalam kedua arah di atas untuk mesin gerinda dengan bantalan baru (tanpa cacat) dan selanjutnya pengukuran getaran mesin yang menggunakan berbagai jenis bantalan cacat dan tingkat kecacatannya.

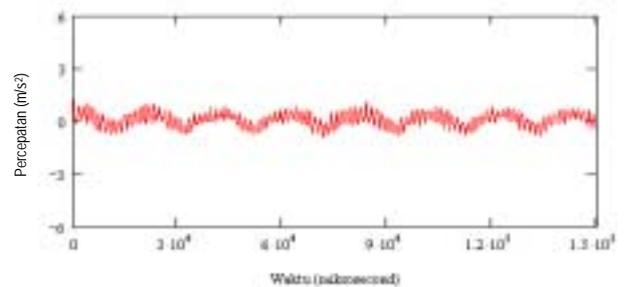
5. Hasil Percobaan dan Analisis Data

Hasil pengukuran frekuensi pribadi mesin gerinda dalam arah vertikal dan horizontal dengan rentang frekuensi antara 0 – 250 Hz dapat dilihat pada tabel 1.

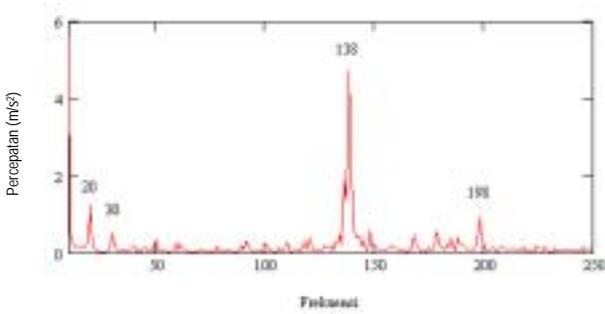
Tabel 1. Hasil Pengukuran Frekuensi Pribadi Mesin Gerinda Bangku dengan Rentang Frekuensi 0 – 250 Hz

Arah Pengukuran	Frekuensi Pribadi (Hz)			
	f ₀₁	f ₀₂	f ₀₃	f ₀₄
Horizontal	26	58	62	197
Vertikal	59	111	137	-

Hasil pengukuran getaran mesin gerinda dengan bantalan baru untuk arah vertikal dan horizontal dapat dilihat pada gambar 8 dan 9.

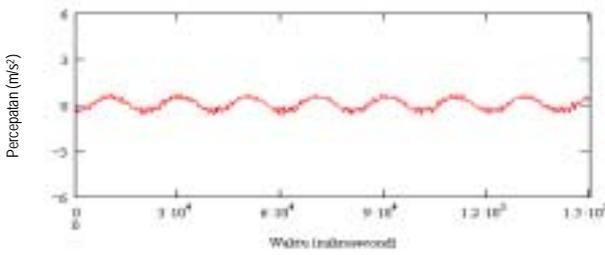


(a)

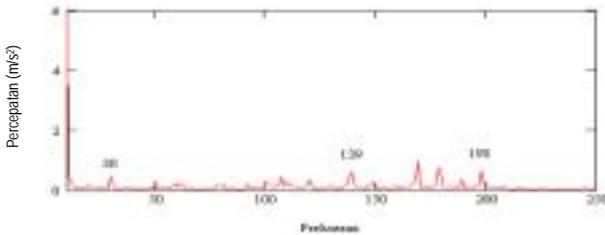


(b)

Gambar 8. Getaran Arah Vertikal untuk Bantalan Baru



(a)



(b)

Gambar 9. Getaran Arah Horizontal untuk Bantalan Baru

Karena sinyal getaran pada arah vertikal lebih besar daripada arah horizontal untuk percobaan selanjutnya hanya diukur dalam arah vertikal saja

5.1 Kerusakan Lintasan Dalam

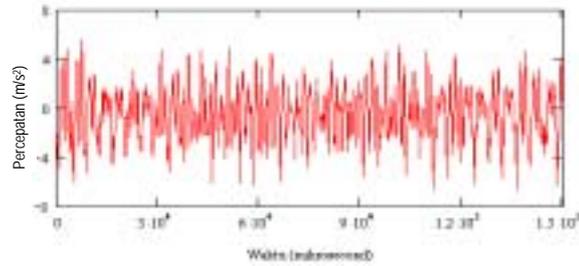
Kerusakan lintasan dalam dapat dilihat pada gambar 10 berikut ini.



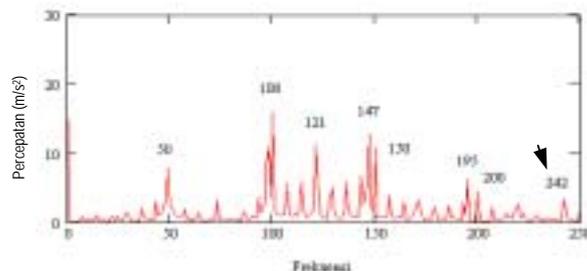
Gambar 10. Foto Cacat Lintasan Dalam

Hasil pengukuran getaran diperlihatkan pada gambar 11a dan 11b, pada gambar tersebut terlihat

sinyal benturan (*impact*) antara bola dan cacat yang terjadi secara periodik. Secara teoritik bahwa frekuensi cacat aktif bantalan dengan cacat pada lintasan dalam adalah $BPFI = 240.3 \text{ Hz}$, dibandingkan dengan hasil pengukuran 242 Hz.



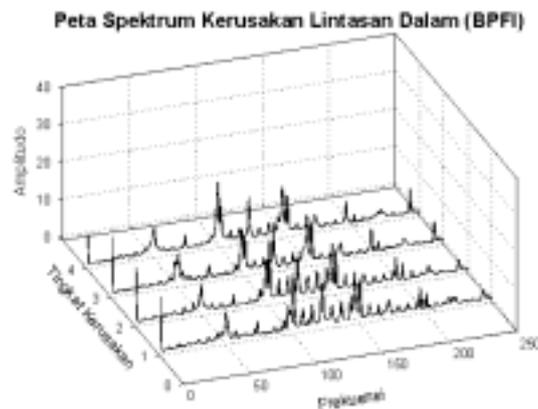
(a)



(b)

Gambar 11. Hasil Pengukuran Getaran Akibat Kerusakan (Cacat) pada Lintasan dalam. a) Domain Waktu b) Domain Frekuensi

Tingkat kerusakan cacat lintasan dalam dapat dilihat dari kenaikan amplitudo getaran yang ditunjukkan pada diagram waterfall berikut ini:



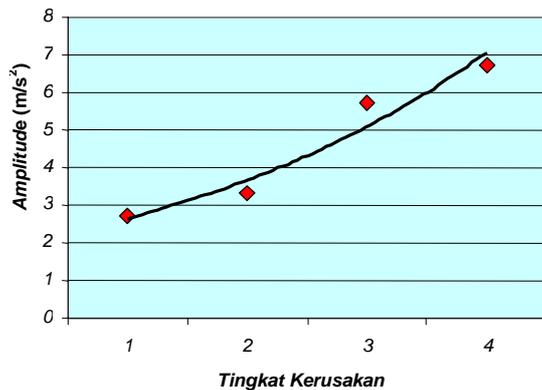
Gambar 12. Diagram Air Terjun (*Waterfall*) untuk Melihat Tingkat Kerusakan Cacat Lintasan Dalam

Pada gambar 12 terlihat bahwa pada frekuensi 242 Hz terjadi kenaikan *amplitudo* yang cukup signifikan, sedangkan amplitudo getaran untuk frekuensi yang lain untuk tingkat kerusakan 1 hingga 4 relatif tidak berubah. Hal ini juga membuktikan bahwa lintasan dalam (*inner race*) yang benar-benar rusak. Kenaikan *amplitudo* getaran terhadap

tingkat kerusakan ditabelkan pada tabel 2 dan grafik dapat dilihat pada gambar 13.

Tabel 2. Amplitudo Bantalan Bola dengan Cacat pada Lintasan Dalam (BPFI = 242 Hz)

Tingkat Kerusakan	Amplitudo (m/s ²)
Kerusakan 1	2.717
Kerusakan 2	3.321
Kerusakan 3	5.731
Kerusakan 4	6.74



Gambar 13. Kenaikan *Amplitudo* Terhadap Tingkat Kerusakan Lintasan Dalam

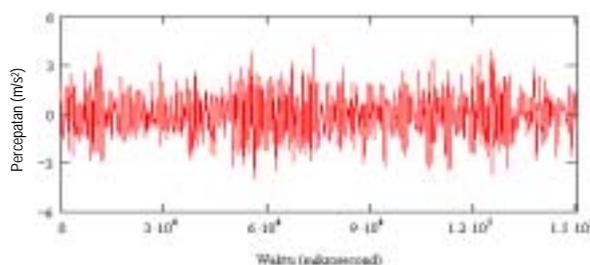
5.2 Kerusakan Lintasan Luar

Cacat pada lintasan luar diperlihatkan pada gambar 14.

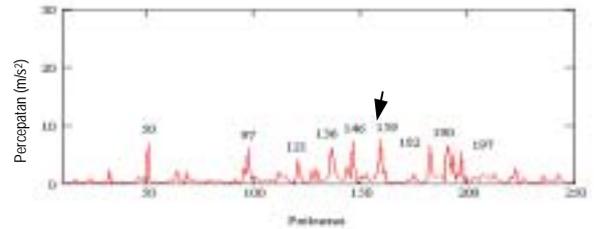


Gambar 14. Foto Cacat pada Lintasan Luar

Seperti cacat pada lintasan dalam, maka bentuk sinyal getaran akibat cacat lintasan luar hampir sama, hanya frekuensinya yang berbeda. Hasil perhitungan BPFO=157.33 Hz, aktualisasinya 159 Hz.



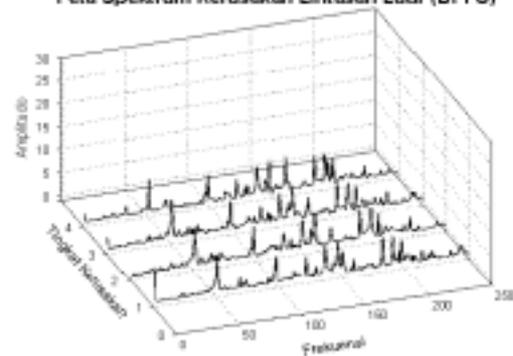
(a)



(b)

Gambar 15. Getaran dari Bantalan Bola Akibat Cacat pada Lintasan Luar. (a) Domain Waktu (b) Domain Frekuensi

Peta Spektrum Kerusakan Lintasan Luar (BPFO)

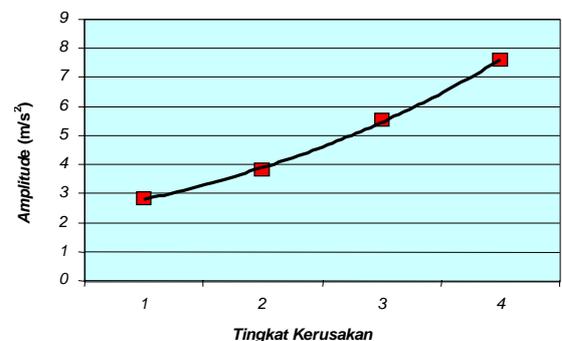


Gambar 16. Diagram *Waterfall* untuk Tingkat Kerusakan Lintasan Luar

Pada BPFO dengan frekuensi 159 Hz terlihat bahwa *amplitudo* terjadi kenaikan dengan naiknya tingkat kerusakan pada lintasan luar, sedangkan untuk Amplitudo getaran pada frekuensi yang lain tidak terjadi perubahan. Kenaikan amplitudo pada BPFO diperlihatkan pada tabel 3 dan gambar 17.

Tabel 3. Amplitudo Getaran dari Bantalan Bola dengan Cacat pada Lintasan Luar (BPFO = 159 Hz)

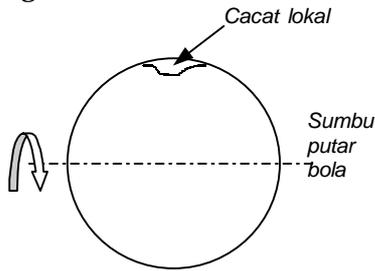
Tingkat Kerusakan	Amplitudo (m/s ²)
Kerusakan 1	2.815
Kerusakan 2	3.818
Kerusakan 3	5.541
Kerusakan 4	7.60



Gambar 17. Kenaikan *Amplitudo* pada BPFO Terhadap Tingkat Kerusakan Lintasan Luar

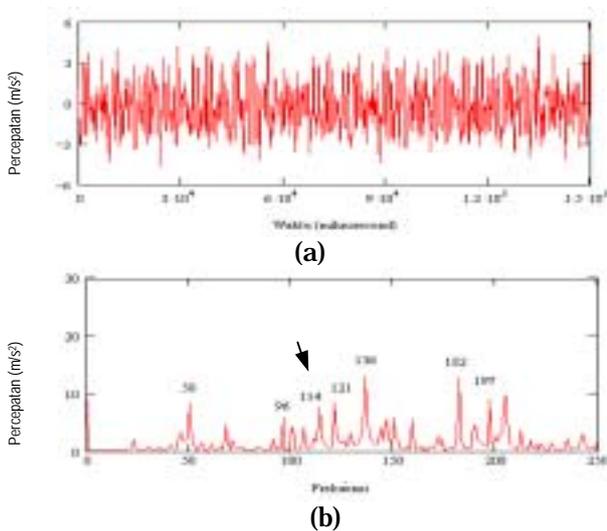
5.3 Kerusakan (Cacat) pada Bola

Pemberian cacat pada bola diperlihatkan seperti pada gambar 18.



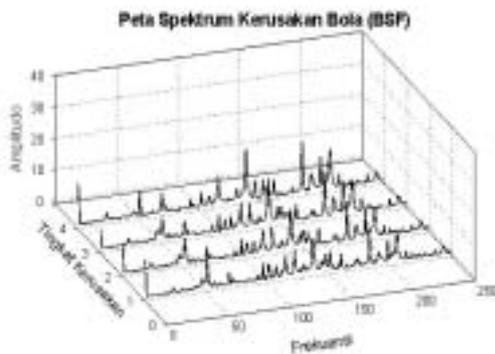
Gambar 18. Cacat pada Bola

Sinyal getaran untuk cacat pada bola juga terjadi akibat benturan secara periodik, tetapi lebih teratur dan *amplitudo* relatif lebih besar. Hasil perhitungan teoritik Ball Spin Frequency (BSF) = 113.08 Hz, sedangkan hasil pengukuran 114 Hz (lihat gambar 19).



Gambar 19. Getaran Akibat Cacat pada Bola. (a) Domain Waktu (b) Domain Frekuensi

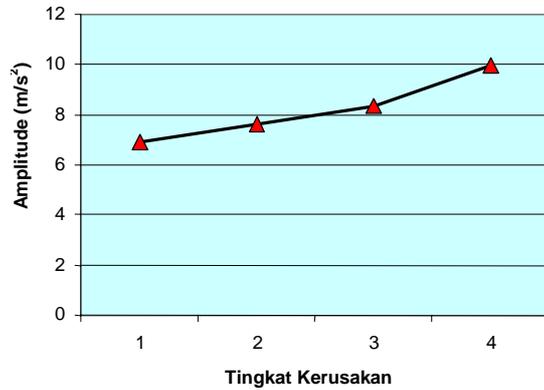
Tingkat kerusakan untuk cacat pada bola ditunjukkan pada diagram *waterfall* gambar 20. Tren kenaikan amplitudo getaran pada frekuensi 114 Hz terlihat terjadi kenaikan seperti Tabel 4 dan Gambar 21.



Gambar 20. Diagram *Waterfall* untuk Cacat pada Bola

Tabel 4. *Amplitudo* Getaran dari Bantalan Bola dengan Cacat Local pada Bola (114 Hz)

Tingkat Kerusakan	<i>Amplitudo</i> (m/s ²)
Kerusakan 1	6.886
Kerusakan 2	7.618
Kerusakan 3	8.351
Kerusakan 4	9.946



Gambar 21. Tren Kenaikan *Amplitudo* Getaran pada BSF

5.4 Kerusakan pada Pemisah (Cage)

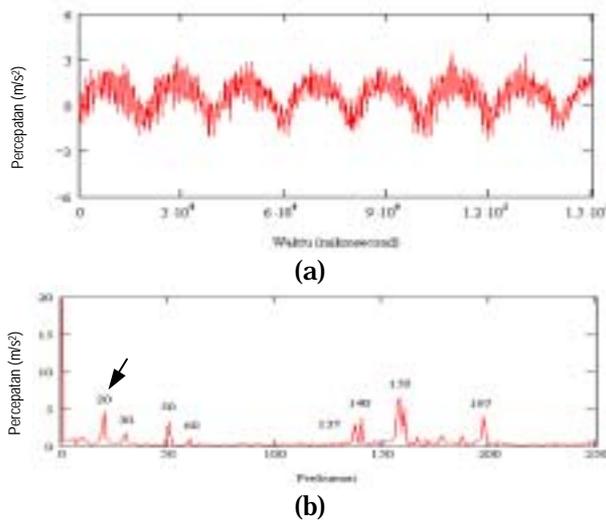
Kerusakan pada pemisah dapat dilihat pada gambar 22.



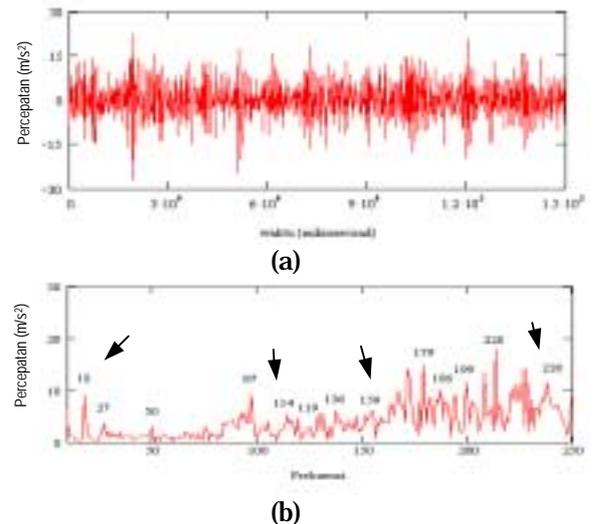
Gambar 22. Foto Kerusakan pada Pemisah

Hasil pengukuran getaran akibat cacat ini diperlihatkan pada gambar 23. Kerusakan jenis ini tidak menimbulkan benturan sehingga tidak memperlihatkan getaran seperti pada cacat-cacat lainnya. Dari domain waktu terlihat sinyalnya seperti bantalan baru, hanya saja *amplitudo* getarannya lebih besar. Hasil Perhitungan Fundamental Train Frequency (FTF) = 19.67 sedangkan aktualnya 20 Hz.

Perubahan amplitudo getaran akibat kerusakan pada pemisah (*cage*) antara satu pemisah dan dua pemisah yang rusak tidak terlalu signifikan, sehingga tidak dilakukan pengukuran getaran lebih lanjut untuk tingkat kerusakan jenis ini.



Gambar 23. Getaran Bantalan Bola Akibat Kerusakan pada Pemisah. (a) Domain Waktu (b) Domain Frekuensi



Gambar 25. Pengukuran Getaran dari Bantalan Bekas. (a) Domain Waktu (b) Domain Frekuensi

5.5 Bantalan Bekas

Bantalan bekas hampir mempunyai segala jenis kerusakan baik lintasan dalam dan luar, pada bola maupun pada pemisah. Selain itu terjadi keausan sehingga kelonggaran antara lintasan dalam, bola dan lintasan luar cukup besar. Hal ini diperlihatkan oleh *amplitudo* getaran yang lima kali lebih besar dibandingkan bantalan baru yang diberi cacat lokal atau 20 kali lebih besar dari bantalan normal (baik) seperti hasil percobaan sebelumnya. Foto bantalan bekas diperlihatkan pada gambar 24.



Gambar 24. Foto Bantalan Bola Bekas

Hasil pengukuran getaran ditunjukkan pada gambar 25. Frekuensi yang muncul sesuai tipe kerusakan bantalan adalah FTF 18 Hz, BSF 114 Hz, BPFO 159 Hz dan BPFI 238 Hz. Pada frekuensi tinggi memperlihatkan *amplitudo* yang cukup besar, hal ini disebabkan benturan antara metal dan metal lainnya yang cukup besar akibat kelonggaran, perhatikan skala ordinat 5 kali lebih besar.

6. Kesimpulan

Dari hasil eksperimen dan analisis di atas, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Getaran dari bantalan bola yang baru (baik) memperlihatkan getaran sinusoidal murni, sedangkan yang ada cacat lokalnya akan terlihat acak (random) atau benturan secara periodik.
2. Kerusakan pada lintasan dalam akan muncul getaran pada frekuensi di sekitar BPFI (*Ball Pass Frequency Inner race*).
3. Kerusakan pada lintasan luar akan muncul getaran pada frekuensi di sekitar BPFO (*Ball Pass Frequency Outer race*).
4. Getaran yang muncul pada frekuensi di sekitar BSF (*Ball Spin Frequency*) berarti terjadi kerusakan pada bola.
5. Kerusakan pada pemisah memperlihatkan sinyal getaran dalam domain waktu yang hampir sama seperti bantalan baru, tetapi akan muncul frekuensi FTF (*Fundamental Train Frequency*) yang menunjukkan terjadi kerusakan pada pemisah bola.
6. Tren kenaikan *amplitudo* getaran terhadap tingkat kerusakan baik untuk lintasan dalam, lintasan luar maupun pada bola menunjukkan fungsi eksponential.
7. Untuk bantalan bola bekas yang semua komponennya aus/rusak memperlihatkan munculnya getaran dengan frekuensi yang sesuai dengan semua jenis kerusakan diatas.

Daftar Pustaka

1. Crowford ,Arthur R., *Crowford S, The Simplified Handbook of Vibration Analysis*, Volume 1, SCI, Knoxville. 1992.
2. Ewins, D. J., *Modal Testing-Theory and Practice*, B&K, Research studies press Ltd, Letchworth, 1986.
3. Mcconnel ,Kenneth G., *Vibration Testing*, John Wiley & Sons,Inc, New York. 1995.
4. Randall, RB, *Frequency Analysis*, Revision on september, Bruel & Kjaer, Denmark, 1987.
5. Robert K. Vierck, *Vibration Analysis*, International Harper & Row, Publisher, New York, 1967.
6. Suhardjono, Analisa Chatter Proses Permesinan Pada Mesin Freis Vertikal, Institut Teknologi Bandung. 1990.
7. Wowk, Victor, *Machinery Vibration (Measurement & Analysis)*, McGraw-Hill, USA. 1991.
8. Zaveri, K., *Modal Analysis of Large Structures Multiple Exiter Systems*, 1st Edition, Bruel & Kjaer. 1984.
9. _____, *Machine Condition Monitoring*, Bruel & Kjaer, Denmark, 1989.