

TEKNIKA

Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Andalas
Seri MEKANIKA DAN KONTROL

THE ANALYSIS OF VELOCITY FLOW EFFECT ON DRAG FORCE BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS	Ridwan A, Benny Dwika Leonanda
ANALISIS PELURUHAN RESPON DINAMIK SISTEM POROS-ROTOR TERHADAP KELEMBAMAN MASSA DAN REDAMAN VISCOUS	Nusyirwan
THE COMPARISON OF CYCLONE PERFORMANCE FOR DIFFERENT INLET GAS ANGLE	Nori Caroko, Suyitno
PERANCANGAN DAN ANALISA KENDALI SISTEM EKSITASI GENERATOR TIPE ARUS SEARAH DENGAN PIDTOOL MODEL PARALEL	Heru Dibyo Laksono, M. Revan
ANALISIS GETARAN BANTALAN ROTOR SKALA LABORATORIUM UNTUK KONDISI LINGKUNGAN NORMAL DAN BERDEBU	Jhon Malta, Boy Iham Wehyudi, Mulyadi Bur
PENGHITUNGAN KEKUATAN KRITIS ELASTO-PLASTIK STRUKTUR ATAP BERDASARKAN PENDEKATAN NUMERIK LINEAR ELASTIK DAN KONSEP BUCKLING PADA KOLOM	Eka Satria, Syafrinaldi
STEP-NC KONTROLLER UNTUK CNC 2 SUMBU	Firman Ridwan, Darwisson
EVALUASI KESALAHAN PEMASANGAN RANTAI KINEMATIK TERHADAP GERAK TRANSLASI TITIK PUSAT PUTAR (UNCOMPENSATABLE ERROR) MEKANISME PARALEL 3-DOF ROTASI MURNI 3-URU	Syafrri, Syamsul Huda, Mulyadi Bur
RANCANG BANGUN ALAT BENDING SENGKANG PADA KOLOM SKALA LABORATORIUM	Lovely Son, Fendra Satria

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ANDALAS PADANG

TEKNIKA	Volume 21	Nomor 3	Halaman 1-83	Padang Oktober 2014	ISSN 0854-8471
---------	--------------	------------	-----------------	------------------------	-------------------

Jurnal TeknikA
Volume 21 Nomor 3 Oktober 2014
ISSN: 0854-8471

Penerbit

Jurusan Teknik Mesin
 Fakultas Teknik - Universitas
 Andalas

Penasehat

Rektor Universitas Andalas
 Dekan Fakultas Teknik
 Universitas Andalas
 Ketua Jurusan Teknik Mesin
 Universitas Andalas

Reviewer

Prof. Dr.-Ing. Mulyadi Bur
 Prof. Dr.-Ing. Hairul Abrial
 Prof. Dr. Eng. Gunawarman
 Prof. Dr. Eng. Zaidir
 Dr. Eng. Syamsul Huda
 Dr. Eng. Meifal Rusli
 Dr. Adjar Pratoto
 Dr.-Ing. Agus Sutanto
 Adek Tasri, Ph.D
 Dr.-Ing. Uyung Gatot SD
 Ismet H. Mulyadi, Ph.D
 Dr. Eng. Lusi Susanti
 Henmaidi, Ph.D
 Ikhwana, Ph.D
 Refdinal Nazir, Ph.D
 Purnawan, Ph.D
 Dr. Eng. Slamet Raharjo
 Dr. Puti Sri Komala

Ketua Redaksi

Firman Ridwan, Ph. D

Redaksi Pelaksana

Dr. Eng. Eka Satria
 Dr. Eng. Lovely Son
 Dendi Adi Saputra, MT

Sekretaris Redaksi
 Merry Nursanti, S.Si

Alamat Redaksi

Jurusan Teknik Mesin
 Fakultas Teknik
 Universitas Andalas
 Kampus Limau Manis
 Padang, 25163
 Telepon: (0751)-72586
 Fax: (0751)-72566
 e-mail: teknik@ftunand.ac.id

Daftar Isi.....	1
Kata Pengantar Dekan Fakultas Teknik	ii
Kata Pengantar Ketua Jurusan Teknik Mesin	iii
Pengantar Redaksi.....	iv
The Analysis of Velocity Flow Effect on Drag Force by Using Computational Fluid Dynamics Ridwan Abdurrahman, Benny Dwika Leonardo	1
Analisis Pelarutan Respon Dinamik Sistem Poros-Rotor Terhubung Keterkaitan Massa dan Redaman Viscous Nusyirwan	8
The Comparison of Cyclone Performance for Different Inlet Gas Angle Novi Caroka, Suyitno	18
Perancangan dan Analisa Kendali Sistem Ekstasi Generator Tipe Arus Searah dengan Pemodelan Model Parsial Heru Dhyo Laksana, M. Rizwan	26
Analisa Getaran Bantalan Rotor Skala Laboratorium untuk Kondisi Lingkungan Normal dan Berdebu Jhon Malta, Boy Ilham Walayudi, Mulyadi Bur	36
Pengaliran Kekuatan Kinetik Energi Pasca Struktur Ang Berimpitan Pendekatan Numerik Linear Elastik dan Konsep Buckling pada Kolom Eka Satria, Syafrizaldi	50
STEP NC Kontroller untuk CNC Dua Sumbu Firman Ridwan, Darwisem	59
Evaluasi Keseluruhan Pemasangan Rantai Kinetik terhadap Gerak Translati Truk Pesat Patah (Incompensatable Error) Mekanisme Parsial 3-DOF Rotasi Matriks 3x3 URU Syafriz, Syamsul Huda, Mulyadi Bur	68
Rancang Bangun Alat Bending Sengking pada Kabin Skala Laboratorium Lovely Son, Fendra Satria	76

Analisis Getaran Bantalan Rotor Skala Laboratorium untuk Kondisi Lingkungan Normal dan Berdebu

Jhon Malta^{1,*}, Boy Ilham Wahyudi¹, Mulyadi Bur¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang

Email: jhonmalta@ft.unand.ac.id^{*})

Abstrak

Penelitian ini dititikberatkan pada analisis getaran yang terjadi pada bantalan rotor *single row deep groove ball bearing* tipe SKF 16002 pada kondisi lingkungan normal dan berdebu. Diagnosis kerusakan bantalan gelinding melalui sinyal getaran yang diperoleh berdasarkan ciri frekuensi khusus yang menandai timbulnya cacat, berupa *Fundamental Train Frequency* (FTF) yang terjadi pada sangkar, *Ball Spin Frequency* (BSF) pada bola, *Ball Pass Frequency Outer* (BPFO) pada lintasan luar, dan *Ball Pass Frequency Inner* (BPFI) pada lintasan dalam, sesuai dengan geometri bantalan dan kecepatan putar poros motor.

Dari hasil eksperimen dan analisis data yang dilakukan, dapat diketahui bahwa peningkatan kerusakan yang terjadi pada bearing berdasarkan kemunculan getaran pada frekuensi FTF, BSF, BPFO, dan BPFI mendekati fungsi linier karena rentang waktu operasi masih relatif singkat. Selain itu, kerusakan yang paling duluan muncul adalah pada sangkar, di mana kenaikan laju amplitudonya lebih tinggi dibandingkan kenaikan laju amplitudo elemen bantalan bola lainnya.

Kata kunci: getaran bantalan rotor, bantalan SKF 16002, *predictive maintenance*

Abstract

This research deals with the vibration analysis on single row deep groove ball bearing type SKF 16002 in normal and dusty area. Vibration analyses of the bearings are conducted based on the vibration characteristics in which the failures occur at cage bearing (i.e. Fundamental Train Frequency (FTF)), at ball bearing (i.e. Ball Spin Frequency (BSF)), at outer race (i.e. Ball Pass Frequency Outer (BPFO)), and at inner race (i.e. Ball Pass Frequency Inner (BPFI)) depend on bearing geometry and as the functions of the rotor speed.

Based on the experimental results, the increases of bearing failures which occur as vibrations at frequencies FTF, BSF, BPFO, and BPFI are still as linear functions, because of relative short time of the rotor operation. Besides, the first failure occurs at the cage of bearing, because the increase rate of failure is the highest at FTF frequency.

Keywords: vibration in bearings, bearing SKF 16002, predictive maintenance

1. Pendahuluan

Pada operasi mesin-mesin yang berputar, seringkali terdapat sistem yang menggunakan poros dan rotor. Sistem poros rotor terdiri dari beberapa elemen seperti piringan, poros, dan bantalan yang menumpu poros serta motor sebagai penggerak yang digunakan untuk memutar poros. Namun pada sistem ini sering terjadi kegagalan yang diawali oleh kerusakan pada bantalan. Kerusakan yang terjadi pada bantalan dapat berupa cacat dan keausan yang disebabkan oleh beberapa faktor di antaranya lingkungan tempat bantalan beroperasi. Kondisi kerja bantalan yang kebanyakan beroperasi pada lingkungan berdebu mengakibatkan bantalan mudah terkontaminasi oleh debu.

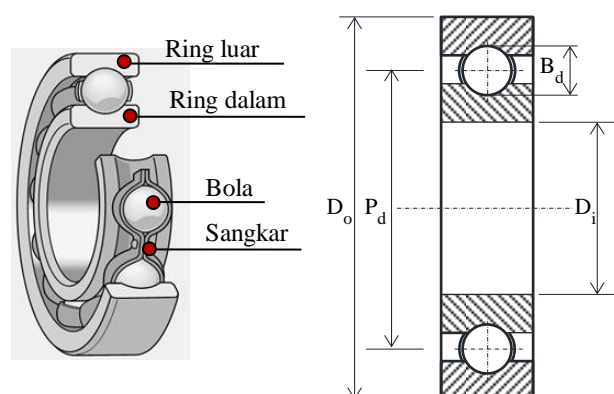
Timbulnya kerusakan pada bantalan sulit untuk dideteksi, hal ini disebabkan oleh disain bantalan yang tertutup oleh cover ataupun oleh rumah bantalan. Selain itu mesin-mesin dioperasikan secara terus menerus pada putaran/kecepatan tinggi. Pendeteksian dengan cara mendengarkan suara mesin yang sedang beroperasi tidak lagi efektif untuk diterapkan, karena frekuensi yang dihasilkan masing-masing elemen mesin sangat tinggi dan bervariasi, sehingga alat indra pun sulit untuk membedakannya. Jika dilakukan pembongkaran akan membutuhkan waktu yang lama dan biaya yang cukup besar. Oleh karena itu telah dikembangkan berbagai metode untuk mendeteksi kerusakan yang terjadi pada elemen mesin sedini mungkin, tanpa harus menghentikan pengoperasian mesin.

Getaran yang muncul pada peralatan mesin tersebut ada yang kecil dan masih berada di bawah batas toleransi yang diizinkan, tetapi ada kalanya getaran tersebut menunjukkan gejala yang semakin besar dan dikhawatirkan akan dapat merusak sistem secara keseluruhan. Sebelum hal ini terjadi, diperlukan perawatan secara berkala terhadap mesin-mesin tersebut. Salah satu cara dalam melakukan perawatan mesin adalah dengan melakukan pengukuran getaran sebagai bagian dari perawatan prediktif (*predictive maintenance*). Dari pengukuran ini dapat diketahui besar getaran yang terjadi, sehingga jika terjadi getaran yang relatif besar, maka dapat segera diambil tindakan pencegahan [1-4].

Penelitian tentang analisis getaran pada bantalan bola telah banyak dilakukan. Salah satunya yaitu diagnosis kerusakan bantalan gelinding melalui sinyal getaran oleh Rahmatyani [5] dan Suhardjono [6]. Berdasarkan penelitian tersebut diketahui bahwa sinyal getaran pada elemen bantalan bola mempunyai ciri frekuensi khusus yang menandai timbulnya cacat, berupa *Fundamental Train Frequency (FTF)*, *Ball Spin Frequency (BSF)*, *Ball Pass Frequency Outer (BPFO)*, dan *Ball Pass Frequency Inner (BPFI)*, sesuai dengan geometri bantalan dan kecepatan putar poros motor. Namun penelitian ini dilakukan hanya untuk menentukan kemunculan frekuensi cacat dengan cara memberikan cacat artifisial pada bantalan bola, selain itu pada penelitian tersebut tidak dapat diketahui tingkat kenaikan kerusakan pada elemen bantalan bola untuk mengetahui batas *repair level* suatu komponen. Untuk mengetahui tingkat kenaikan kerusakan bantalan bola yang tidak diberi cacat artifisial (bantalan baru), dilakukanlah analisis perbandingan antara sinyal getaran bantalan rotor pada kondisi lingkungan normal dan berdebu.

2. Kajian Pustaka

Pada bantalan gelinding terjadi gesekan antara bagian berputar dan bagian yang diam melalui elemen gelinding. Konstruksi bantalan gelinding secara umum dapat dilihat pada Gambar 1. Di mana B_d adalah diameter bola (elemen gelinding), P_d diameter pitch, D_i diameter cincin dalam, dan D_o diameter luar bantalan.



Gambar 1 Konstruksi bantalan [7]

Menurut Wowk [8], cacat yang terjadi pada bantalan bola dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Kontaminasi masuknya suatu zat atau benda lain (merupakan 40% penyebab terjadinya cacat pada bantalan)
2. Tegangan lebih (*overstress*)
3. Pelumasan yang kurang
4. Cacat yang timbul setelah proses manufaktur.

Cacat ini mengakibatkan timbulnya getaran yang tidak diinginkan pada mesin. Frekuensi getaran yang ditimbulkan oleh bantalan yang cacat tergantung pada jenis cacat, geometri bantalan dan kecepatan putar poros motor. Parameter bantalan (ukuran dan geometri) yang menentukan frekuensi tersebut adalah diameter bola, jumlah bola, diameter pitch dan sudut kontak. Intensitas sinyal getaran yang dibangkitkan pada bantalan sangat rendah, sehingga seolah-olah hilang oleh sinyal lain yang lebih kuat.

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

Frekuensi eksitasi impuls akibat adanya cacat lokal pada lintasan dalam bantalan disebut *Ball Pass Frekuensi Inner* (BPFI), yang dinyatakan dengan Pers. 1.

$$\text{BPFI} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right), \quad (1)$$

di mana N_b menyatakan jumlah bola, f_r frekuensi relatif antara *inner race* dan *outer race* (Hz), B_d diameter bola (mm), P_d diameter pitch (mm), α Sudut kontak antara bola dengan lintasan (derajat).

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

Frekuensi eksitasi impuls akibat adanya cacat lokal pada lintasan luar bantalan disebut *Ball Pass Frekuensi Outer* (BPFO), yang dinyatakan dengan Pers. 2.

$$\text{BPFO} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right). \quad (2)$$

2.3 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 Pers. 3.

$$\text{BSF} = \frac{P_d}{2 B_d} f_r \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right)^2 \right). \quad (3)$$

2.4 Cacat Lokal pada Sangkar (*Cage*)

Frekuensi akibat adanya cacat pada pemisah (*cage*) disebut *Fundamental Train Frequency* (FTF). Besarnya FTF dapat dihitung dengan Pers. 4.

$$\text{FTF} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right). \quad (4)$$

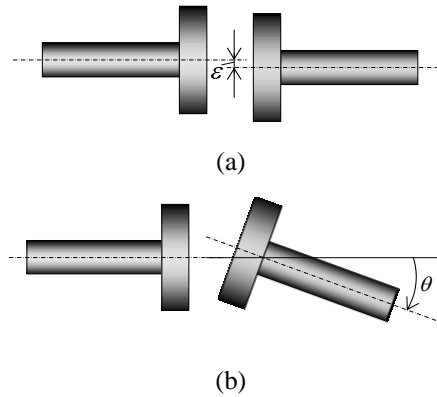
Fundamental Train Frequency ini sama dengan kecepatan putar *cage* atau sama dengan kecepatan sumbu putar bola terhadap sumbu poros.

2.5 Getaran akibat Massa Tak Seimbang

Massa tak seimbang merupakan penyebab getaran yang paling umum ditemukan di lapangan. Ketakseimbangan adalah kondisi di mana pusat massa tidak sama dengan pusat rotasi. Hal ini disebabkan oleh distribusi massa yang tidak seragam. Massa tak seimbang yang terdapat pada poros berputar akan menimbulkan gaya sentrifugal ke arah luar yang dapat menyebabkan poros terdefleksi. Kondisi ini akan menimbulkan efek getaran, dan getaran tersebut diteruskan pada bantalan. Getaran yang ditimbulkan akibat massa tak seimbang akan muncul pada frekuensi $1 \times \Omega$ [4].

2.6 Getaran akibat Ketaksesumbuan

Ketaksesumbuan terjadi ketika pusat perputaran dua poros atau lebih tidak berada pada satu garis lurus. Ketaksesumbuan dapat dibagi atas ketaksesumbuan paralel dan ketaksesumbuan angular. Dua jenis ketaksesumbuan itu diperlihatkan pada Gambar 2. Pada Gambar 2(a) terdapat ketaksesumbuan paralel sebesar ε dan pada Gambar 2(b) terdapat ketaksesumbuan angular sebesar θ .

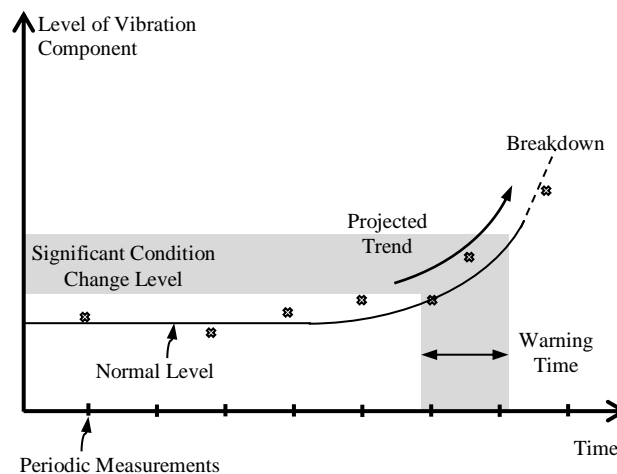


Gambar 2 Jenis-jenis ketaksesumbuan poros, (a) paralel, (b) angular

Pada umumnya ketaksesumbuan poros yang terjadi merupakan gabungan dari jenis ketaksesumbuan paralel dan ketaksesumbuan angular dalam arah vertikal dan horizontal. Getaran yang ditimbulkan akibat ketaksesumbuan ini akan muncul pada frekuensi $2 \times \Omega$, $3 \times \Omega$, $4 \times \Omega$, $n \times \Omega$ [4].

2.7 Tingkat Kerusakan

Tingkat kerusakan dapat dideteksi dengan adanya kenaikan amplitudo getaran, di mana frekuensi getaran tetap konstan sesuai dengan jenis kerusakan pada komponen. Berdasarkan referensi [9], diketahui 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. Kondisi ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Tren kenaikan amplitudo getaran akibat kerusakan komponen [9]

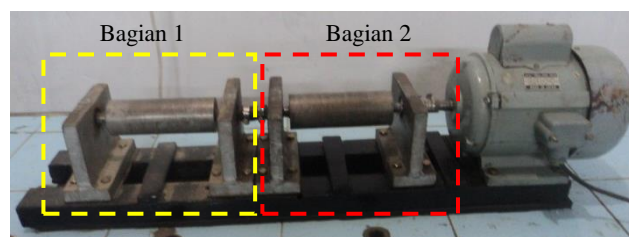
3. Metodologi

Pada penelitian ini dilakukan analisis getaran bantalan rotor skala laboratorium untuk kondisi lingkungan normal dan berdebu. Dalam proses perakitan dan *setting* alat, bantalan yang digunakan adalah *single row deep groove ball bearing* tipe SKF FRANCE 16002 dengan spesifikasi geometri yaitu diameter pitch (P_d) 24 mm, diameter luar (D_o) 32 mm, diameter dalam (D_i) 15 mm, diameter bola (B_d) 4,1 mm, jumlah bola (N_b) 9 buah, sudut kontak (α) 0° seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Bantalan uji

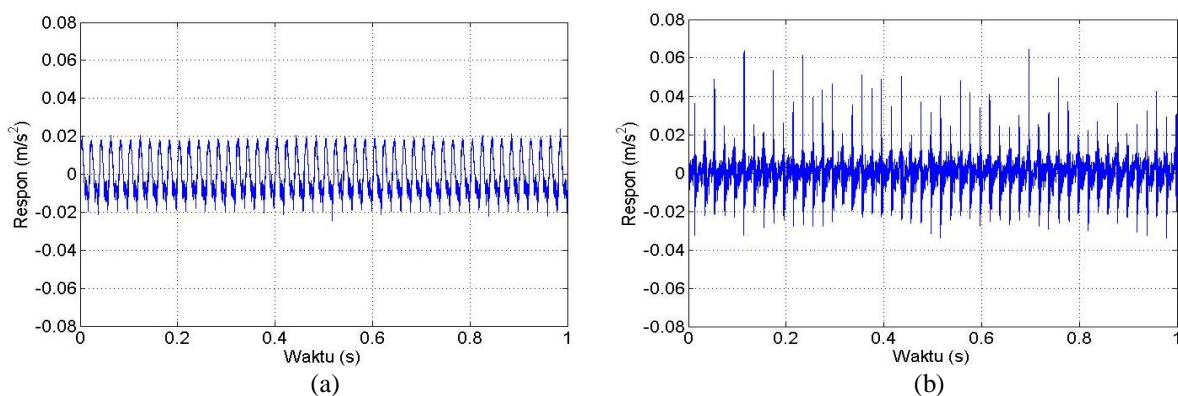
Pengambilan sinyal getaran akan dilakukan pada setiap rumah bantalan dengan menggunakan accelerometer Delta Tron type 4507 Bruel & Kjaer dengan sensitivitas 10.18 mV/ms^{-2} atau 99.8 mV/g . Alat uji dibagi atas dua bagian, seperti terlihat pada Gambar 5. Pada bagian 1 *bearing* dikondisikan dengan tidak memberikan perawatan (tanpa pelumasan) dan penambahan debu secara bertahap sesuai dengan kondisi di lapangan, sedangkan bagian 2 *bearing* dirawat dengan baik serta memberikan pelumasan yang cukup dan diusahakan selalu berada dalam keadaan bersih. Hal ini dilakukan untuk melihat perbedaan kerusakan yang terjadi pada *bearing* dengan melihat perbedaan frekuensi yang muncul dari hasil pencuplikan data.



Gambar 5 Pembagian kondisi rotor

4. Hasil dan Pembahasan

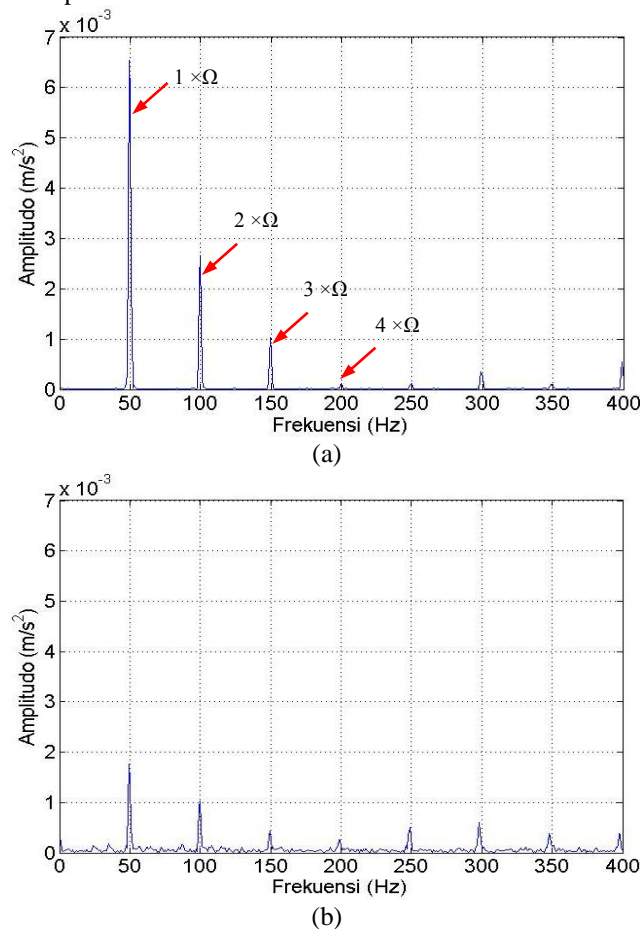
Untuk mengetahui kondisi awal alat uji, dilakukan pencuplikan sinyal getaran pada saat semua bantalan dalam kondisi baik. Hal ini sangat penting dilakukan untuk menghindari kesalahan dalam menganalisis data nantinya. Selain itu pengukuran sinyal getaran pada motor juga dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh getaran motor terhadap bantalan. Hasil pencuplikan disajikan dalam selang waktu seperti yang terlihat pada Gambar 6, kecepatan putar yang terukur saat pencuplikan adalah 2990 rpm di mana kecepatan putar ini konstan selama pencuplikan.



Gambar 6 Sinyal getaran dalam domain waktu pada putaran 2990 rpm, (a) sinyal pada bantalan, (b) sinyal pada motor

Gelombang sinusoidal yang terlihat pada Gambar 6(a) menunjukkan bahwa bantalan dalam kondisi baik. Sinyal getaran dalam selang waktu ditransformasikan ke selang frekuensi dengan menggunakan FFT (*Fast Fourier Transform*) yang telah tersedia pada perangkat lunak MATLAB seperti yang ditampilkan pada Gambar 7. Pada Gambar 7 terlihat bahwa getaran yang terjadi pada bantalan bukanlah akibat adanya cacat melainkan sinyal getaran yang berasal dari motor. Hal itu terbukti dengan munculnya amplitudo tinggi yang terjadi secara periodik

di frekuensi yang sama pada $1 \times \Omega$, $2 \times \Omega$, $3 \times \Omega$, $4 \times \Omega$, ..., $n \times \Omega$ antara motor dengan bantalan, di mana Ω adalah kecepatan putaran motor dalam rpm.



Gambar 7 Sinyal getaran dalam domain frekuensi yang muncul dengan putaran 2990 rpm, (a) sinyal pada bantalan, (b) sinyal pada motor

Secara teoritik cacat pada bantalan akan muncul pada frekuensi-frekuensi yang terlihat pada Tabel 1. Besarnya amplitudo yang muncul akibat berbagai jenis cacat pada bantalan tidak tepat berada pada frekuensi yang telah dihitung secara teoritik, cacat akan muncul di sekitar frekuensi tersebut.

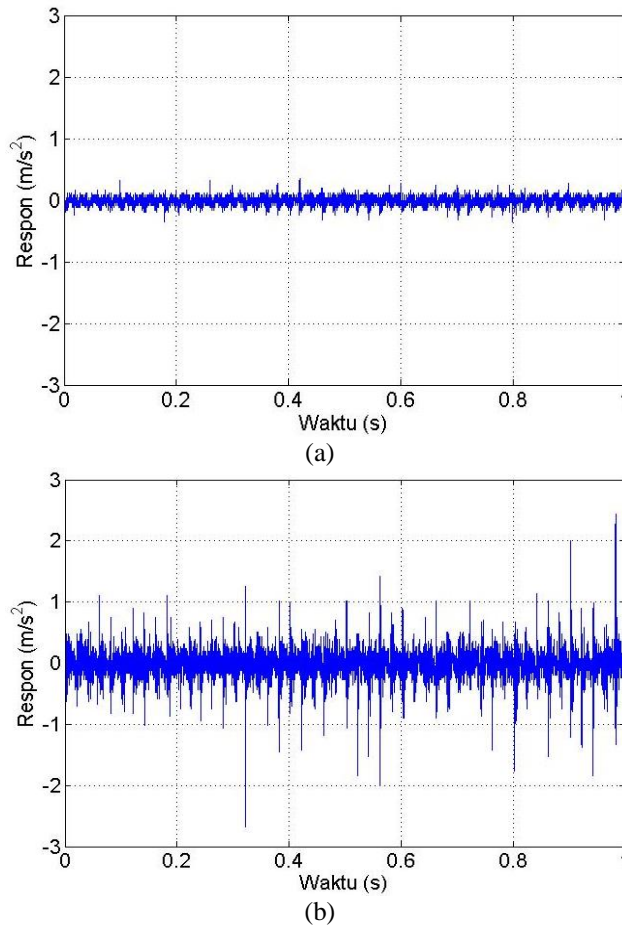
Tabel 1 Frekuensi kemunculan cacat yang diperoleh (teoritik) pada *bearing* SKF 16002

Jenis Cacat	Frekuensi cacat yang timbul
<i>Unbalance</i>	$1 \times f_r$
Misalignment	$2 \times f_r, 3 \times f_r, 4 \times f_r, \dots, n \times f_r$
FTF	$0.41 \times f_r$
BSF	$2.84 \times f_r$
BPFO	$3.73 \times f_r$
BPFI	$5.27 \times f_r$

Catatan : f_r = putaran poros motor dalam Hz

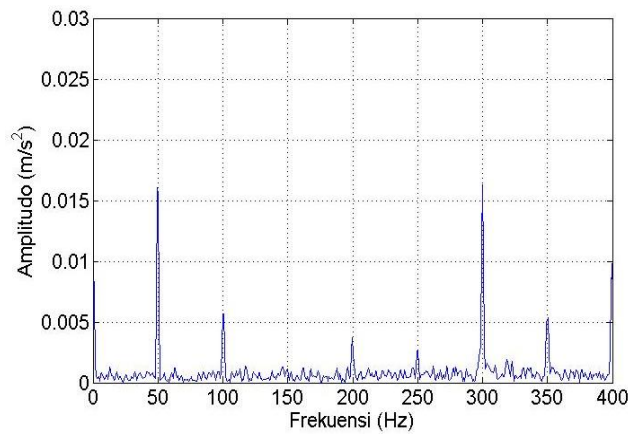
4.1 Kerusakan pada Pemisah (*Cage*)

Untuk memperlihatkan perbedaan sinyal getaran yang muncul pada kondisi bantalan yang diberi pelumasan dan tanpa pelumasan dipilih data pencuplikan hari ke-39 dengan putaran 2997 rpm. Sinyal getaran yang muncul ditampilkan dalam selang waktu seperti terlihat pada Gambar 8.

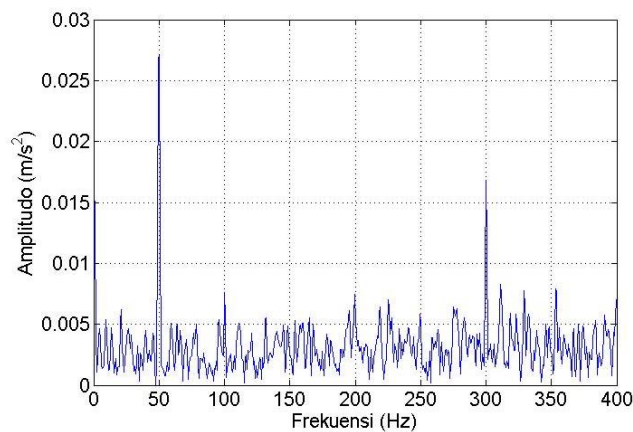


Gambar 8 Sinyal getaran dalam domain waktu yang muncul pada putaran 2997 rpm, (a) sinyal bantalan pada kondisi lingkungan normal, (b) sinyal bantalan pada kondisi lingkungan berdebu

Sinyal getaran yang muncul pada kondisi normal dan kondisi berdebu setelah dilakukan FFT ke domain frekuensi terlihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9 Sinyal getaran bantalan pada kondisi normal dengan putaran 2997 rpm



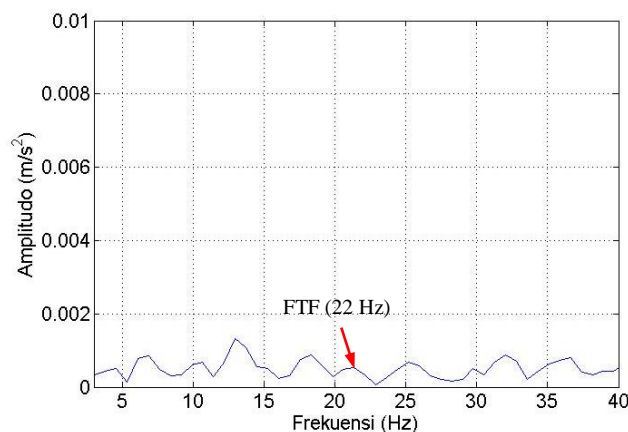
Gambar 10 Sinyal getaran bantalan pada kondisi berdebu dengan putaran 2997 rpm

Pada Gambar 9 dan 10 terlihat perbedaan ketinggian amplitudo antara bantalan yang beroperasi pada kondisi lingkungan normal dan berdebu. Secara keseluruhan terlihat bahwa semua amplitudo pada kondisi lingkungan berdebu menjadi tinggi, namun tidak semua amplitudo tinggi mengindikasikan kerusakan pada bantalan. Kerusakan pada bantalan diprediksi hanya terjadi di sekitar nilai frekuensi cacat yang telah diperoleh secara teoritik. Tingginya amplitudo ini mungkin disebabkan karena getaran yang terjadi akibat gesekan antar bola baja yang kemasukan debu.

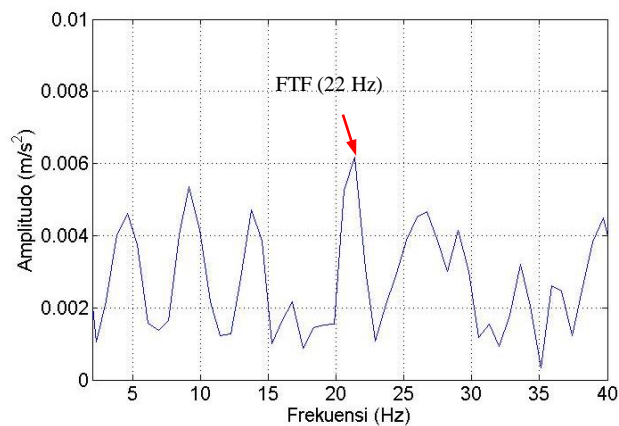
Bantalan yang mengalami cacat pada sangkar (*cage*) dengan kecepatan putar 2997 rpm akan muncul *Fundamental Train Frequency* (FTF) di sekitar 20.5 Hz.

$$\text{Fundamental Train Frequency} = 0.41 \times 49.95 \text{ Hz} = 20.5 \text{ Hz}$$

Pada Gambar 9 dan 10 frekuensi FTF belum dapat dilihat dengan jelas. Frekuensi ini terlihat apabila gambar tersebut diperbesar pada frekuensi 0-40 Hz, khususnya untuk bantalan yang diduga mengalami cacat seperti terlihat pada Gambar 11 dan 12.

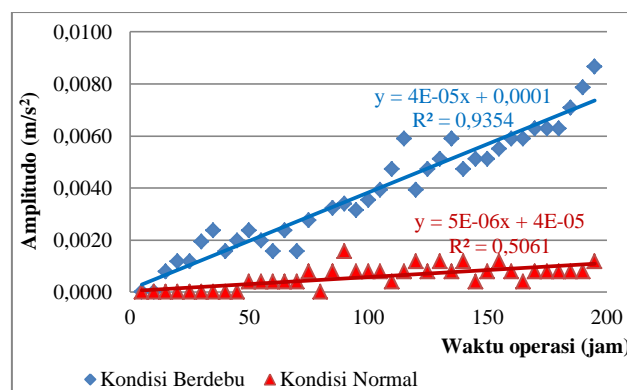


Gambar 11 Sinyal getaran bantalan pada kondisi lingkungan normal yang mengalami cacat pada sangkar (FTF) dengan putaran 2997 rpm dengan rentang frekuensi 0–40 Hz



Gambar 12 Sinyal getaran bantalan pada kondisi lingkungan berdebu yang mengalami cacat pada sangkar (FTF) dengan putaran 2997 rpm dengan rentang frekuensi 0–40 Hz

Pada Gambar 11 dan 12 terlihat bahwa kemunculan FTF tidak tepat berada pada frekuensi yang diperoleh secara teoritik. Namun kemunculan FTF masih berada di sekitar frekuensi yang dihitung secara teoritik. Hal ini berlaku untuk semua data pada pengujian ini. Sinyal getaran pada Gambar 11 dan 12 menunjukkan perbedaan tinggi amplitudo getaran pada frekuensi FTF antara bantalan pada kondisi normal dan kondisi lingkungan berdebu, hal ini mengindikasikan bahwa bantalan yang beroperasi pada lingkungan berdebu serta tanpa perawatan diperkirakan telah mengalami kerusakan pada sangkar (*cage*). Perbandingan kenaikan kerusakan yang terjadi antara bantalan pada kondisi normal dan kondisi berdebu terlihat pada Gambar 13.



Gambar 13 Laju peningkatan amplitudo yang terjadi pada FTF

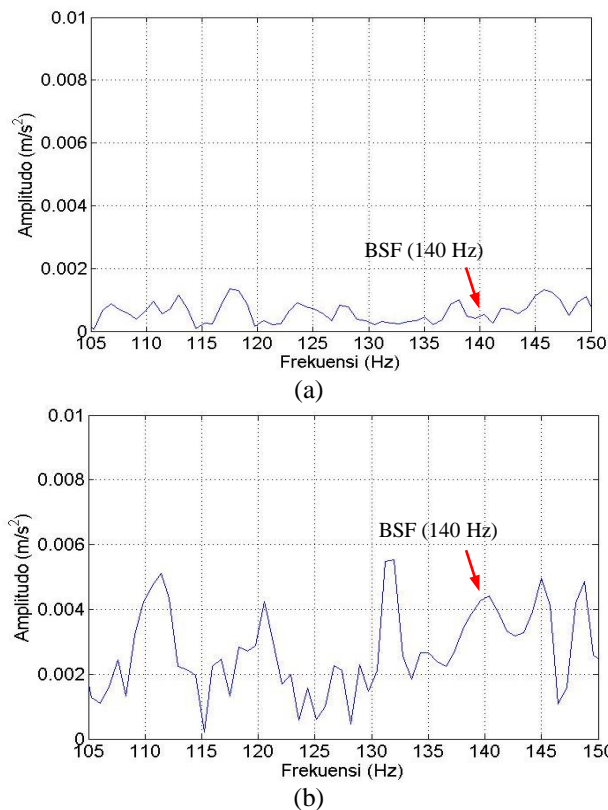
Dari Gambar 13 terlihat perbedaan kenaikan amplitudo getaran antara bantalan pada kondisi normal dan kondisi berdebu. Hal ini mengindikasikan bahwa bantalan yang beroperasi pada kondisi lingkungan berdebu mengalami kerusakan sangkar (*cage*) lebih cepat dibandingkan dengan bantalan yang beroperasi pada kondisi normal.

4.2 Kerusakan pada Bola

Bantalan yang mengalami cacat pada bola dengan kecepatan 2997 rpm akan muncul *Ball Spin Frequency* (BSF) pada 140.51 Hz.

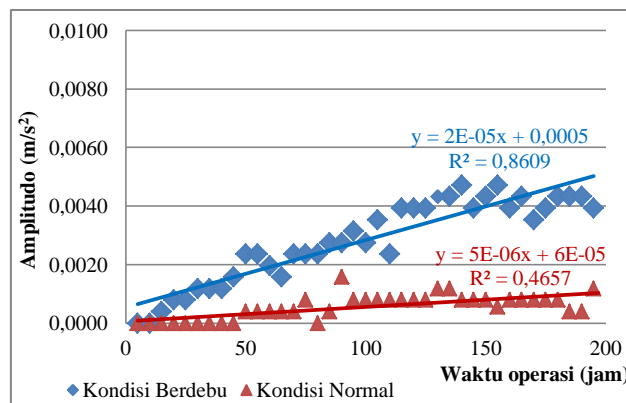
$$Ball\ Spin\ Frequency = 2.84 \times 49.95\text{Hz} = 140.51\text{Hz}$$

Untuk melihat frekuensi BSF yang muncul akibat kerusakan bantalan, maka grafik pada Gambar 9 dan Gambar 10 diperbesar dengan hanya menampilkan frekuensi antara 105–150 Hz.



Gambar 14 Sinyal getaran pada bantalan yang mengalami cacat pada bola dengan putaran 2997 rpm dengan rentang frekuensi 105–150 Hz, (a) sinyal bantalan pada kondisi lingkungan normal, (b) sinyal bantalan pada kondisi lingkungan berdebu

Jika dilihat pada Gambar 14, amplitudo getaran yang terjadi pada BSF sangat kecil seolah-olah tertutupi oleh sinyal lain yang lebih besar, namun pada gambar tersebut terlihat perbedaan tinggi amplitudo getaran yang cukup signifikan antara bantalan dengan pelumasan dan tanpa pelumasan. Perbandingan kenaikan kerusakan yang terjadi pada BSF antara bantalan pada kondisi normal dan kondisi berdebu terlihat pada Gambar 15.



Gambar 15 Laju peningkatan amplitudo yang terjadi pada BSF

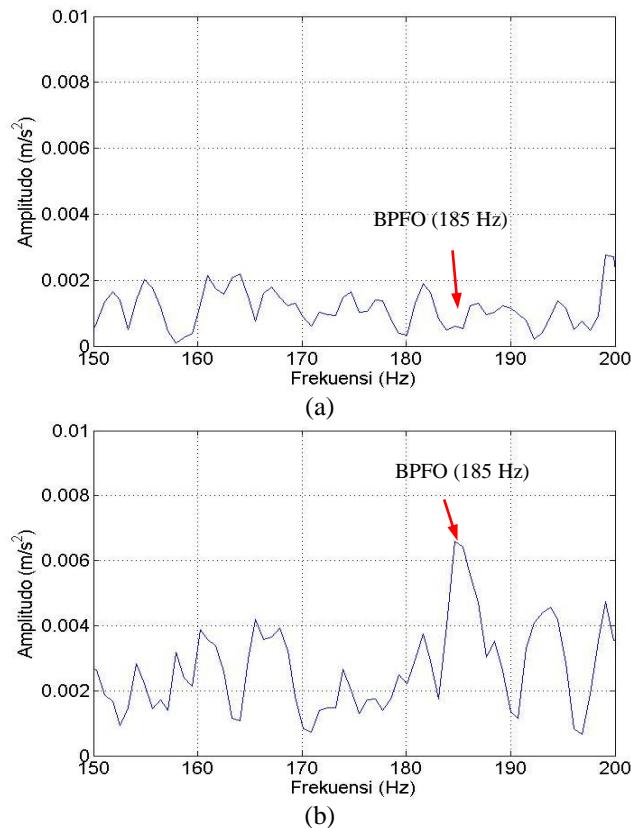
Dilihat secara keseluruhan dari Gambar 15 kerusakan bola pada bantalan tidak menunjukkan kenaikan kerusakan yang signifikan, ini sesuai dengan kondisi bantalan setelah dilepas dari alat uji. Cacat pada bola bantalan belum terlihat dengan jelas.

4.3 Kerusakan Lintasan Luar

Bantalan yang mengalami cacat pada lintasan luar dengan kecepatan 2997 rpm akan muncul *Ball Pass Frequency Outer* (BPFO) di sekitar 186.01 Hz.

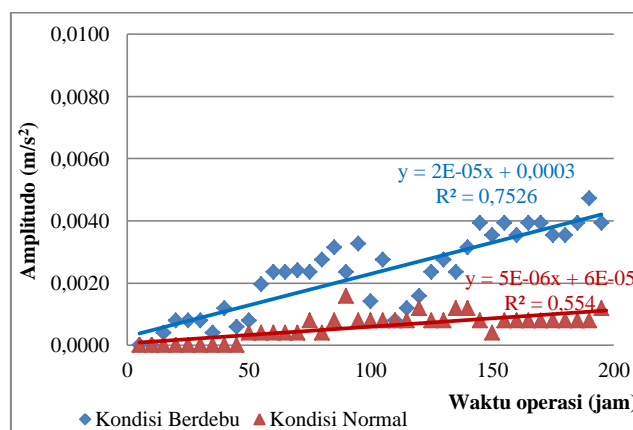
$$Ball\ Pass\ Frequency\ Outer = 3.73 \times 49.95\text{Hz} = 186.01\text{Hz}$$

Untuk melihat frekuensi BPFO yang muncul akibat kerusakan bantalan, maka grafik pada Gambar 9 dan Gambar 10 diperbesar dengan hanya menampilkan frekuensi antara 150–200 Hz.



Gambar 16 Sinyal getaran pada bantalan yang mengalami cacat pada lintasan luar dengan putaran 2997 rpm dengan rentang frekuensi 150–200 Hz, (a) sinyal bantalan dengan pelumasan, (b) sinyal bantalan tanpa pelumasan

Kerusakan yang terjadi pada lintasan dalam dan lintasan luar pada bantalan adalah kerusakan yang paling berbahaya dibanding kerusakan lain, pada Gambar 16 sinyal getaran yang muncul pada BPFO tidak tepat berada pada frekuensi yang telah diperoleh secara teori. Dari penelitian ini diketahui tingkat kenaikan kerusakan yang terjadi pada bantalan yang disebabkan cacat pada lintasan luar. Perbandingan kenaikan kerusakan yang terjadi pada BPFO antara bantalan pada kondisi normal dan kondisi berdebu terlihat pada Gambar 17. Cacat yang terjadi pada lintasan luar tidak dominan muncul pada pengujian ini.



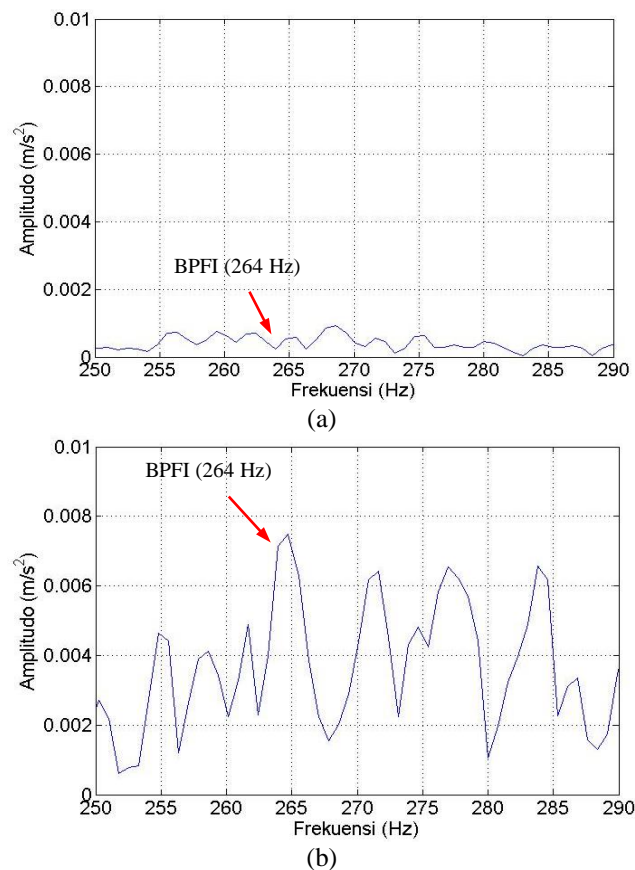
Gambar 17 Laju peningkatan amplitudo yang terjadi pada BPFO

4.4 Kerusakan Lintasan Dalam

Bantalan yang mengalami cacat pada lintasan dalam dengan kecepatan 2997 rpm akan muncul *Ball Pass Frequency Inner* (BPFI) di sekitar 263.54 Hz.

$$\text{Ball Pass Frequency Inner} = 5.27 \times 49.95 \text{ Hz} = 263.54 \text{ Hz}$$

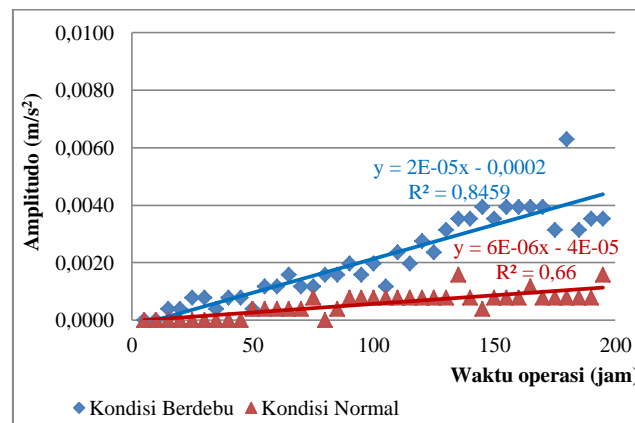
Untuk melihat frekuensi BPFI yang muncul akibat kerusakan bantalan, maka grafik pada Gambar 9 dan Gambar 10 diperbesar dengan hanya menampilkan frekuensi antara 250–290 Hz.



Gambar 18 Sinyal getaran pada bantalan yang mengalami cacat pada lintasan luar dengan putaran 2997 rpm dengan rentang frekuensi 250–300 Hz, (a) sinyal bantalan dengan pelumasan, (b) sinyal bantalan tanpa pelumasan

Pada kenyataannya cacat bantalan yang terjadi pada lintasan dalam sangat sulit untuk dideteksi, hal ini terjadi karena sinyal yang dibangkitkan oleh BPFI sangatlah kecil seolah-olah tertimbun oleh sinyal-sinyal lain, namun pada penelitian ini diperlihatkan perbedaan amplitudo sinyal yang muncul antara bantalan yang beroperasi pada lingkungan berdebu dan lingkungan normal. Sehingga menjadi petunjuk bahwa kerusakan bantalan yang diakibatkan oleh cacat pada lintasan dalam terjadi pada $5.27 \times \Omega$ untuk bantalan SKF 16002 (*single row groove ball bearing*). Perbandingan kenaikan kerusakan yang terjadi pada BPFI antara bantalan pada kondisi normal dan kondisi berdebu terlihat pada Gambar 19.

Kenaikan kerusakan yang terjadi pada lintasan dalam naik seiring berjalannya waktu, namun secara keseluruhan kerusakan bantalan pada penelitian ini disebabkan oleh kerusakan sangkar (*cage*). Grafik laju peningkatan amplitudo yang terjadi pada masing-masing komponen bantalan bola mendekati fungsi persamaan linier. Pada kondisi lingkungan berdebu komponen sangkar bantalan bola menghasilkan persamaan $y = 4E-05x + 0.0001$, dengan koefisien determinasi $R^2 = 0.9354$. Persamaan ini menggambarkan bahwa amplitudo (kerusakan pada bantalan) mengalami kenaikan sesuai dengan berjalannya waktu operasi rotor. Komponen bola pada bantalan menghasilkan persamaan $y = 2E-05x + 0.0005$, dengan $R^2 = 0.8609$. Lintasan luar bantalan menghasilkan persamaan $y = 2E-05x + 0.0001$, dengan $R^2 = 0.7135$, dan lintasan dalam menghasilkan persamaannya $y = 2E-05x - 0.0002$, dengan $R^2 = 0.8459$.



Gambar 19 Laju peningkatan amplitudo yang terjadi pada BPFI

Berdasarkan referensi [9], cacat yang terjadi pada suatu komponen mesin mengikuti fungsi kuadratik. Namun pada penelitian ini keseluruhan cacat yang terjadi pada bantalan mengikuti fungsi linier. Hal ini mungkin disebabkan rentang waktu operasi bantalan yang masih relatif singkat.

5. Kesimpulan

Dari hasil eksperimen dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kerusakan yang terjadi pada sangkar (FTF), bola (BSF), lintasan luar (BPFO), dan lintasan dalam (BPFI) mendekati fungsi linier karena rentang waktu operasi masih relatif singkat. Selain itu, kerusakan yang paling duluan muncul adalah pada sangkar yang kenaikan laju amplitudonya lebih tinggi dibandingkan kenaikan laju amplitudo elemen bantalan bola lainnya. Sehingga kegagalan bantalan secara keseluruhan pada kondisi lingkungan berdebu dominan diakibatkan oleh kerusakan pada sangkar (*cage*).

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LP2M) Universitas Andalas yang telah membiayai awal penelitian ini melalui skim penelitian mandiri DIPA Unand dengan kontrak No. 003/UN.16/PL/M/III/2011 Tanggal 21 April 2011 dan penelitian lanjutan melalui skim penelitian Fundamental dengan kontrak No. 18/UN.16/PL/D-FD/2014.

Nomenklatur

B_d	Diameter bola (mm)
D_i	Diameter cincin dalam (mm)
D_o	Diameter luar bantalan (mm)
fr	Frekuensi relatif antara inner race dan outer race (Hz)
N_b	Jumlah bola bantalan
P_d	Diameter pitch (mm)

Greek letters

α	Sudut kontak antara bantalan dan lintasan ($^{\circ}$)
Ω	Kecepatan putaran motor (rpm)

Daftar Pustaka

- [1] Lalanne, M. and Guy, F., Rotor Dynamics Prediction in Engineering, John Wiley & Sons Ltd., England, Ch. 1, pp. 1-8, 1990.
- [2] McConnell, K.G., Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York, Ch. 1, pp. 1-10, Ch. 5, pp. 261-275, 1995.
- [3] Tadeo, A.T. and Cavalca, K.L., A Comparison of Flexible Coupling Models for Updating in Rotating Machinery Response, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 25 no.3, 2003.

-
- [4] Bur, M.; M. Okuma; Malta. J.; Huda, F.; Experimental Study of Vibration on Rotor System due to Unbalance Mass and Misalignment, *Jurnal Poros*, Vol. 8 No. 4, 2005.
 - [5] Rahmatyani, A., *Diagnosis Kerusakan Bantalan Gelinding Melalui Sinyal Getaran*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang, 2003.
 - [6] Suhardjono, Analisis Sinyal Getaran untuk Menentukan Jenis dan Tingkat Kerusakan Bantalan Bola (Ball Bearing), *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 6, No. 2, Oktober 2004, pp. 39-48.
 - [7] N.N., SKF, General Catalogue, Germany, June 2003.
 - [8] Wowk, V., *Machinery Vibration Measurement and Analysis*, McGraw-Hill, USA, Ch. 5, pp. 125-148, 1991.
 - [9] N.N., *Machine Condition Monitoring*, Bruel & Kjaer, Denmark, 1989.