

## Bab II

### Dasar Teori

Bab ini menjelaskan jenis-jenis bantalan serta kerusakan-kerusakan terutama pada bantalan bola. Dalam bab ini juga menjelaskan tentang metode-metode perawatan mesin, terutama pada perawatan berbasis getaran yang disertai dengan metode-metode yang ada didalamnya.

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Durkhure dan Lodwal (2014) dalam jurnal penelitian yang berjudul *Fault Diagnosis of Ball Bearing using Time Domain Analysis and Fast Fourier Transformation*, menganalisis kerusakan pada bantalan bola dengan diameter luar 52 mm, diameter dalam 25 mm. Metode analisis menggunakan analisis statistik domain waktu dan analisis spektrum. Kecepatan motor yang digunakan hanya pada 810 rpm. Dalam penelitian ini, beberapa fitur analisis statistik domain waktu yang digunakan adalah, *kurtosis*, *skewness*, *crest factor*, dan *shape factor*. Hasil yang didapatkan dari proses analisis adalah, kurtosis yang memiliki nilai 3,48 pada bantalan kondisi normal, dan 9,8 pada bantalan kondisi rusak. Sedangkan skewness muncul dengan nilai 0,03 pada bantalan normal dan 0,46 pada bantalan rusak. Adapun pada frekuensi domain, muncul indikasi kerusakan lintasan luar dengan frekuensi 49 Hz, 99 Hz, dan 149 Hz.

Penelitian yang dilakukan Kulkarni dan Bewoor (2016) dengan judul *Vibration based condition assessment of ball bearing with distributed defects*. Melakukan pengujian terhadap bantalan DFM-85 *single row deep groove ball bearing*. Analisis dilakukan dengan variasi kecepatan pada 300, 600, 900, 1200 dan 1500 rpm. Dalam penelitian ini juga dilakukan variasi pembebanan pada bantalan yang diuji sebesar 100N. Metode yang digunakan adalah spektrum dan statistik domain waktu. Parameter yang digunakan pada metode statistik domain waktu adalah RMS, *peak*, kurtosis dan *peak to peak*. Masing-masing parameter menunjukkan nilai yang signifikan pada ciri-ciri kerusakan bantalan. Frekuensi domain menunjukkan posisi letak komponen bantalan yang rusak, yaitu pada lintasan luar dan lintasan dalam. Dari ketiga parameter statistik tersebut, *peak to*

*peak* merupakan parameter yang paling akurat dalam menunjukkan kerusakan pada komponen bantalan.

Koulocheris dkk (2013) melakukan penelitian dengan judul *Vibration Signal and Condition Monitoring for Wind Turbines*. Bantalan uji yang digunakan adalah SKF tipe 2207 EKTN9 dan SKF tipe 1207 EKTN9. Dalam penelitian ini metode yang digunakan meliputi statistik domain waktu menggunakan fitur *mean*, *standard deviation*, *RMS*, *skewness*, dan *kurtosis*. Ditambah dengan metode lainnya yaitu analisis spektrum. Dalam kasus ini, untuk mempercepat proses perusakan pada bantalan, maka dilakukan tindakan dengan memberikan beberapa puing material pada pelumas bantalan. Selain itu bantalanpun juga diberi beban yang diletakkan pada poros. Dengan dilakukannya 2 tindakan tersebut, maka kerusakan komponen ditemukan pada lintasan luar bantalan. Dari kasus ini maka didapat kesimpulan berupa : 1. Metode statistik domain waktu tidak memberikan hasil yang sangat signifikan dalam menentukan sumber kerusakan pada bantalan; 2. Analisis spektrum bisa digunakan dalam menemukan sumber kerusakan pada bantalan; 3. Proses *real time monitoring* pada spektrum bisa dilakukan pada saat transformasi FFT sedang berlangsung; 4. Nilai ketinggian dari amplitudo sinyal merupakan peningkatan dari nilai kerusakan.

Wahyudi dkk (2016) melakukan penelitian dengan mendeteksi kerusakan bantalan menggunakan metode vibrasi. Pada penelitian ini bantalan yang digunakan adalah 2205-K-2RS-TVH-C3. Bantalan tersebut terdiri dari 4 macam kondisi yaitu, bantalan dengan kondisi normal, lintasan luar dengan kerusakan 30%, lintasan dalam dengan kerusakan 30%, *rolling element* dengan kerusakan 30%. Untuk setiap varian dilakukan pengujian dengan 3 sampel yang sama. Metode yang digunakan adalah analisis spektrum dan statistik domain waktu dengan fitur RMS. Dari penelitian ini maka didapat hasil nilai RMS bantalan normal sebesar 0,55 (sampel 1); 0,57 (sampel 2); 0,51 (sampel 3), nilai RMS pada bantalan kerusakan 30% lintasan dalam sebesar 3,24 (sampel 1); 2,46 (sampel 2); 1,82 (sampel 3), nilai RMS kerusakan 30% lintasan luar sebesar 6,03 (sampel 1); 1,00 (sampel 2); 0,62 (sampel 3), nilai RMS kerusakan bola 30% sebesar 2,29 (sampel 1); 1,27 (sampel 2); 1,18 (sampel 3). Dari data tersebut dapat dianalisis

bahwa bantalan dengan tingkat kerusakan 30% pada lintasan dalam, menghasilkan nilai RMS yang memiliki variasi yang besar. Hal ini menunjukkan adanya kerusakan yang memungkinkan bantalan harus diganti. Sedangkan pada kerusakan lintasan luar tidak bisa menunjukkan adanya kerusakan jika menggunakan RMS, namun pada hasil FFT menunjukkan adanya puncak frekuensi yang menunjukkan nilai BPFO (*Ball Pass Frequency Outer*). Pada kerusakan elemen bola nilai RMS tidak menunjukkan adanya kerusakan, namun dari grafik FFT menunjukkan adanya frekuensi  $1 \times$  BSF. Dalam hal ini RMS tidak bisa digunakan pada kerusakan luar dan elemen bola. Karena posisi kedua komponen tersebut berada pada *Load zone* yang tidak konsisten.

Tiwari da Jatola (2013) dalam penelitiannya yang berjudul *Fault Detection in Bearing Using Envelope Analysis*, menunjukkan keunggulan dari metode analisis *envelope*. Benda uji yang digunakan adalah bantalan tipe SKF 6002-2Z. Jenis kerusakan komponen terdapat pada lintasan luar, lintasan dalam dan bola bantalan. Analisis menggunakan metode *envelope* menemukan frekuensi kerusakan pada nilai 7.43 Hz untuk lintasan luar BPFO, 10.83 Hz untuk lintasan dalam BPFI dan 5.70 Hz untuk bola bantalan BSF. Proses *high pass filter* yang terdapat pada analisis *envelope* merupakan cara yang akurat untuk menghilangkan frekuensi-frekuensi rendah yang memiliki amplitudo yang tinggi pada spektrum. Dengan menghilangkan frekuensi-frekuensi rendah pada spektrum, maka frekuensi tinggi yang memiliki nilai amplitudo yang rendah seperti BPFO, BPFI dan BSF akan mudah untuk diamati keberadaannya.

Dari beberapa literatur tersebut dapat disimpulkan bahwa hubungan antara metode statistik domain waktu dan metode domain frekuensi sangat menguntungkan jika digabungkan. Namun tidak semua dari fitur pada statistik domain waktu cocok untuk digunakan dalam beberapa kondisi. Metode statistik domain waktu hanya menunjukkan indikasi kerusakan pada bantalan. Sedangkan metode spektrum dapat menunjukkan secara spesifik letak sumber kerusakan.

## **2.2. Bantalan**

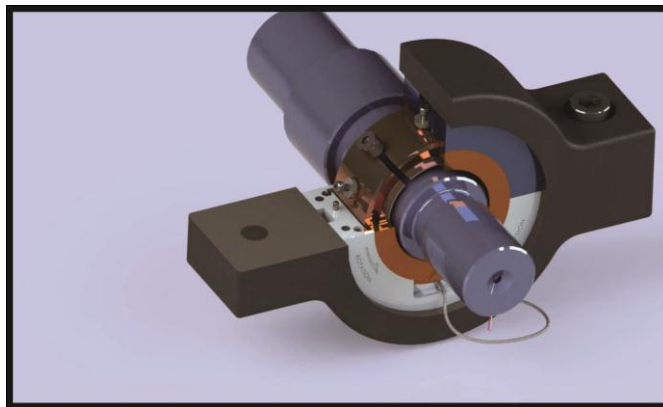
Dalam sebuah rangkaian mesin yang kompleks, bantalan merupakan komponen yang sangat penting untuk mendukung sebuah mesin beroperasi. Adapun fungsi dari bantalan adalah, sebagai peredam gesekan yang terjadi antar komponen mesin, dimana hal ini akan banyak mempengaruhi efisiensi kinerja mesin saat beroperasi. Gesekan merupakan perkara yang lumrah dan pasti terjadi dalam beroperasinya sebuah mesin. Suatu elemen mesin yang menumpu suatu poros berbeban, akan sangat membutuhkan sebuah bantalan untuk membantu dalam menopang poros, sehingga gerakan-gerakan yang terjadi seperti bolak-balik maupun putaran dapat terjadi secara aman, halus, dan berumur panjang. Apabila sebuah bantalan mengalami ketidakfungsian dengan baik, maka kerusakan juga akan dialami pada komponen-komponen mesin lainnya, sehingga akan berpengaruh juga pada prestasi mesin ketika beroperasi. Gesekan ditimbulkan dari gaya berlawanan yang terjadi antara satu komponen dengan komponen lainnya, sehingga terjadinya gesekan akan sangat mempengaruhi kondisi ketahanan sebuah komponen mesin. Dalam hal ini, gaya gesek yang terjadi pada komponen poros berputar dapat diatasi dengan menggunakan bantalan.

Analisis yang baik terhadap pantauan kondisi kerusakan pada komponen bantalan, sangat berguna untuk keberlangsungan proses produksi sebuah industri. Dalam hal ini, penerapan jadwal perawatan serta manajemen yang baik terkait diagnosa kerusakan pada bantalan, merupakan suatu hal yang menguntungkan untuk perusahaan. Karena dampak dari kerusakan komponen mesin akan mengganggu berjalannya proses produksi. Ketika terganggunya proses produksi, maka pendapatan sebuah perusahaan pun akan terganggu. Untuk itu, manajemen perawatan menjadi sesuatu yang penting sebagai usaha pencegahan. Adapun dampak lainnya, juga mempengaruhi keselamatan pekerja di perusahaan tersebut (Latuny, 2013).

### 2.3. Macam jenis bantalan

Dalam penggunaannya, bantalan mempunyai banyak macam dan bentuk yang disesuaikan dengan kegunaannya. Menurut Sularso (1978) dalam bukunya, menjelaskan tentang klasifikasi bantalan sebagai berikut :

1. Berdasarkan gerakan bantalan terhadap poros
  - a) Bantalan luncur. Pada bantalan ini terjadi gesekan luncur antara poros dan bantalan karena permukaan poros ditumpu oleh permukaan bantalan dengan perantara lapisan pelumas. Sebagaimana dapat dilihat pada gambar, bantalan luncur tidak memiliki komponen gelinding seperti bantalan lainnya. Untuk mengurangi gaya gesek dengan poros, bantalan luncur hanya memanfaatkan lapisan pelumas yang berada diantara poros dan bagian dalam bantalan. Ilustrasi bantalan luncur dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Bantalan luncur  
(<https://id.pinterest.com/rmcabrera131/solidworks/?lp=true>)

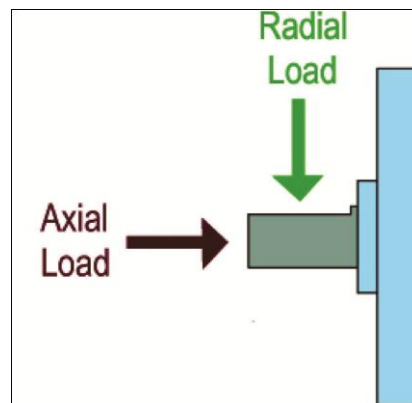
- b) Bantalan gelinding. Pada bantalan ini terjadi gesekan gelinding antara bagian yang berputar dengan yang diam melalui elemen gelinding seperti bola (peluru), rol atau rol jarum, dan rol bulat. Ilustrasi beberapa bantalan gelinding dapat dilihat pada gambar 2.2, dimana gambar (a) merupakan ilustrasi bantalan bola *single row*, sedangkan (b) merupakan ilustrasi bantalan rol *double-row cylindric*.



Gambar 2.2 (a). Bantalan bola *single row*, (b). Bantalan rol *double-row*  
 ([http://www.st-esg.com/product\\_list.asp](http://www.st-esg.com/product_list.asp), <https://www.indiamart.com/rktraders-newdelhi/ball-bearings.html>)

2. Berdasarkan arah beban terhadap poros
  - a) Bantalan radial. Pada bantalan ini arah beban yang ditumpu bantalan adalah tegak lurus sumbu poros.
  - b) Bantalan aksial. Pada bantalan ini arah beban bantalan sejajar dengan sumbu poros.
  - c) Bantalan gelinding khusus. Bantalan ini dapat menumpu beban yang arahnya sejajar dan tegak lurus sumbu poros.

Bantalan gelinding adalah fokus tema yang akan diamati pada penelitian ini. Keuntungan yang dimiliki bantalan gelinding dapat dilihat dari gesekan kecil yang dihasilkannya jika dibandingkan dengan bantalan luncur (Sularso, 1978). Ketika salah satu cincin berputar, maka gerakan putar yang dihasilkan bola atau rol akan memperkecil gaya gesek dengan poros. Hal ini dipengaruhi oleh tingkat presisi dari ukuran dan bentuk bola bantalan. Klasifikasi bantalan gelinding dibagi menjadi dua yaitu : 1). Bantalan radial, dimana fokus beban yang ditanggung, lebih besar dalam bentuk radial, dan hanya sedikit pada bentuk aksialnya. 2). Bantalan aksial, dimana gaya yang ditumpu hanya pada beban yang sejajar dengan sumbu poros. Bentuk gaya axial dan radial yang membebani bantalan dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Gaya aksial dan radial yang diterima oleh bantalan  
(<http://encoder.com/>)

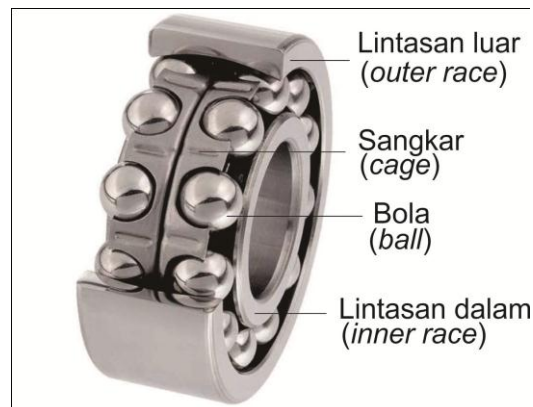
Adapun klasifikasi bantalan gelinding berdasarkan bentuk elemen gelindingnya dapat dibagi menjadi dua yaitu: 1). Bantalan bola, 2). Bantalan *rol*. Kelebihan yang dimiliki bantalan gelinding dengan klasifikasi bola dan *rol*, adalah gesekan yang ditimbulkan oleh dua bantalan ini relatif lebih kecil dibandingkan bantalan lainnya. Bentuk salah satu jenis bantalan bola dan bantalan *rol* dapat dilihat pada gambar 2.4, dimana pada gambar a menunjukkan bentuk bantalan bola dengan bola kecil pejal sebagai komponen gelindingnya. Sedangkan gambar b, menunjukkan bentuk dari bantalan *rol* dengan komponen gelinding berupa tabung kecil pejal. Pada penelitian kali ini fokus analisis hanya tertuju pada bantalan bola, sehingga penjelasan selanjutnya hanya pada bantalan bola.



Gambar 2.4. (a) bentuk dari bantalan bola; (b) bentuk dari bantalan rol  
(<http://www.indiamart.com>, <http://www.intechbearing.com>)

#### 2.4. Bantalan Bola

Bantalan bola merupakan bantalan yang banyak menerima beban radial yang besar, namun juga dapat menerima beban aksial meskipun kecil. Berbeda dengan bantalan *rol*, yang pada umumnya hanya mampu menerima beban radial. Bantalan bola terdiri dari beberapa komponen elemen didalamnya yaitu : bola, cincin luar / lintasan luar (*outer race*), cincin dalam / lintasan dalam (*inner race*), sangkar / pemegang bola (*cage*). Seperti dijelaskan pada Gambar 2.5, merupakan salah satu bantalan bola dengan tipe *self-aligning double row*.



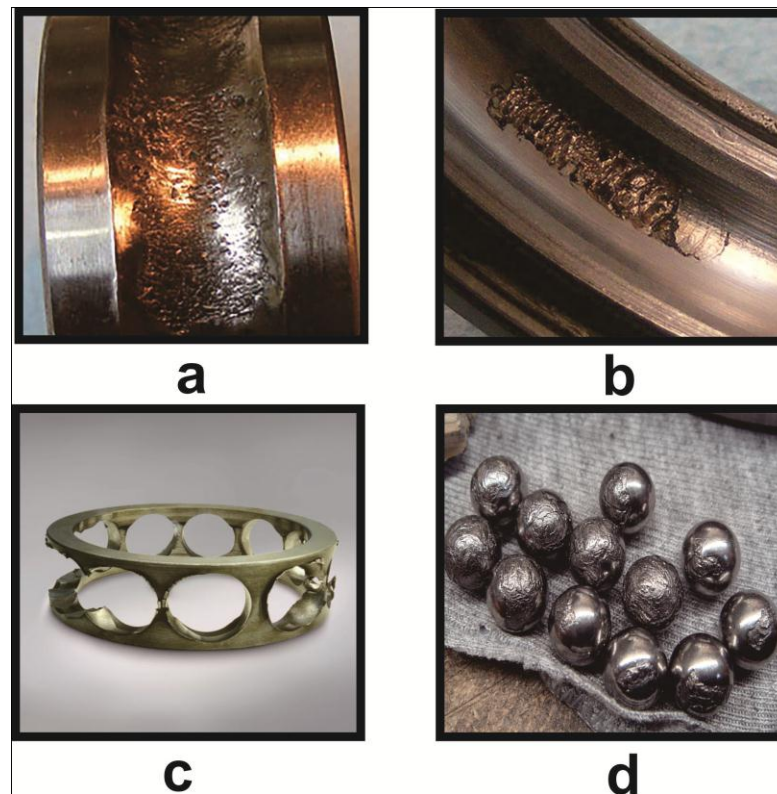
Gambar 2.5 menunjukkan bentuk dari bantalan bola dan komponen didalamnya  
(<http://www.dungannonbearingco.co.uk/author/bearingadmin/page/2/>)

#### 2.5. Jenis Kerusakan Bantalan Bola

Kerusakan pada bantalan merupakan hal yang sering terjadi dalam dunia permesinan. Untuk itu perlu dilakukan penanganan yang serius terkait hal ini.



Para peneliti sudah melakukan klasifikasi kerusakan bantalan bola dengan definisi menggunakan rumus-rumus getaran, sehingga mempermudah proses analisis untuk menemukan kerusakan pada komponen secara detail. Dengan adanya metode-metode yang handal dalam analisis getaran, maka akan mengurangi kontak manusia dengan mesin secara langsung, sehingga tingkat keselamatan dalam proses perawatan mesin menjadi lebih baik. Keuntungan lainnya yang diakibatkan oleh metode baru tersebut adalah, semakin menghindari ketidakakuratan hasil pengamatan yang disebabkan oleh minimnya kemampuan panca indra manusia dalam membedakan getaran yang bervariasi serta memiliki kecepatan yang tinggi. Ada beberapa jenis kerusakan yang sudah diklasifikasi berdasarkan jenisnya, seperti halnya kerusakan yang terdistribusi pada bantalan bola, dimana hal ini diakibatkan oleh ketidakbulatan lintasan luar dan dalam, serta bentuk sumbu yang tidak sama (*misalignment*) antara lintasan sumbu luar dan dalam, dan juga dimensi bola yang tidak sama. Bentuk-bentuk dari bagian komponen yang rusak pada bantalan bola, dapat dilihat pada Gambar 2.6, mulai dari rusaknya komponen lintasan luar, lintasan dalam, bola, hingga kerusakan pada sangkar.



Gambar 2.6 (a). Kerusakan lintasan dalam pada bantalan bola; (b). Kerusakan lintasan luar pada bantalan bola; (c) Kerusakan sarang (*cage*) pada bantalan bola.; (d). Kerusakan komponen bola pada bantalan bola (<http://www.bmwlt.com/forums/k1200lt/109609-fd-problem.html>)<http://jadanalysis.co.uk>; [http://www.nskamericas.com/cps/rde/xchg/na\\_en/hs.xsl/cage-damage.html](http://www.nskamericas.com/cps/rde/xchg/na_en/hs.xsl/cage-damage.html);

Selain itu terdapat klasifikasi kerusakan bantalan bola yang didefinisikan menggunakan rumus getaran, yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Kerusakan lokal yang terjadi pada lintasan luar.

Informasi terkait kerusakan yang terjadi pada lintasan luar, dimunculkan dengan adanya frekuensi eksitasi impuls yang disebut *Ball Pass Frequency Outer Race* (BPFO), dimana dinyatakan pada persamaan berikut:

$$BPFO = \frac{Nb}{2} \times f_r \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \quad 2.1$$

$Nb$  = Jumlah bola (*Number of balls*),

$Fr$  = Frekuensi relatif antara lintasan dalam dan luar (Hz),

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

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

$\alpha$  = Sudut kontak (*Contact angle*) derajat

## 2. Kerusakan lokal yang terjadi pada lintasan dalam.

Informasi yang berhubungan dengan kerusakan yang terjadi pada lintasan dalam, dimunculkan dengan adanya frekuensi eksitasi impuls yang disebut *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPFI), sehingga dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$BPFI = \frac{Nb}{2} \times f_r \times \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \quad 2.2$$

## 3. Kerusakan Lokal Pada Bola (*Rolling Element*).

Jika terdapat kerusakan pada bola, maka kemunculan frekuensi *impuls* yang terjadi dinamakan *Ball Spin Frequency* (BSF). Sehingga persamaannya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$BSF = \frac{Nb}{2Bd} \times f_r \times \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right)^2\right) \quad 2.3$$

## 4. Kerusakan Lokal Pada Pemisah (*Cage*)

Kerusakan yang muncul pada pemisah (*Cage*), dimunculkan dengan adanya frekuensi yang disebut *Fundamental Train Frequency* (FTF). Besarnya FTF dapat ditunjukkan dalam persamaan sebagai berikut:

$$FTF = \frac{f_r}{2} \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \quad 2.4$$

## 2.6. Metode Maintenance (Perawatan)

Manajemen perawatan mesin merupakan hal sangat penting dalam sebuah industri. Melihat akan dampak yang diakibatkan oleh buruknya sebuah manajemen perawatan, yang dapat mengakibatkan kerugian di berbagai aspek

didalam perusahaan. Untuk itu para peneliti telah melakukan pendalaman terkait metode analisis kerusakan pada komponen mesin. Salah satu metode yang unggul digunakan untuk mendeteksi kerusakan komponen mesin seperti bantalan (*bearing*), adalah *Condition-Based Maintenance* (CBM). Dengan salah satu metodenya yang handal dan umum digunakan oleh peneliti yaitu analisis berbasis getaran, sehingga dapat mempermudah upaya menemukan kerusakan pada komponen bantalan.

CBM merupakan metode yang handal dalam menganalisis kerusakan pada bantalan secara dini. Namun terdapat beberapa model perawatan yang sebelumnya menjadi acuan para peneliti sebelum menemukan metode CBM. Hal ini dilakukan agar dapat mengetahui kekurangan dari metode-metode sebelum CBM. Sehingga perkembangan metode-metode perawatan dapat diamati perjalanannya. Metode-metode perawatan tersebut adalah : *Breakdown Maintenance, Preventive Maintenance dan predictive Maintenance*.

### **2.6.1. Breakdown Maintenance**

*Breakdown maintenance* menurut sejarahnya merupakan metode perawatan yang paling awal, dimana system perawatan diterapkan, dengan cara memperbaiki komponen yang rusak atau menggantinya dengan yang baru. Hal ini hanya dilakukan pada saat mesin sudah mengalami kerusakan. (Jardine dkk, 2006). *Breakdown maintenance* merupakan metode perawatan yang tidak terencana. Hal ini menjadi kekurangan dari metode *breakdown maintenance*, dimana ketidakmampuannya dalam merencanakan gangguan dalam sistem produksi, sehingga tidak dapat memprediksi kondisi mesin yang tiba-tiba berhenti. Kekurangan lainnya yang membuat metode *breakdown maintenance* kurang efisien adalah, diagnose kerusakan pada mesin tidak dilakukan pada akar/penyebab dasar kerusakan tersebut muncul, namun hanya dilakukan pada komponen-komponen yang sudah jelas terlihat. Dalam pelaksanaannya harus mempersiapkan suku cadang, material, alat-alat dan tenaga kerjanya.

### **2.6.2. Preventive Maintenance**

*preventive maintenance* merupakan metode perawatan yang dilakukan pada waktu-waktu yang tepat, dengan maksud untuk mencegah kerusakan yang fatal serta berhentinya mesin pada kondisi darurat secara tiba-tiba. Pada metode *preventive maintenance*, perawatan dilakukan secara periodik dan terjadwal, dengan memperhatikan kondisi sistem operasional mesin. Kegiatan perawatan meliputi pengecekan berkala tanpa memperhatikan kondisi operasional aktual mesin. Contoh dari kegiatan periodik *preventive maintenance* adalah: pelumasan, kalibrasi, inspeksi komponen mesin, penggantian *drive belt* dan bantalan pada waktu interval reguler atau pada waktu yang sudah terjadwal, serta memantau status kondisi kesehatan komponen mesin.

Pemilihan interval waktu dalam kegiatan *preventive maintenance* merupakan sesuatu yang penting untuk menilai tingkat efektifitas metode perawatan ini. Metode ini termasuk efektif karena mengurangi dari penggunaan metode *breakdown* dan juga dengan adanya rangkaian sistem perencanaan metode ini, maka nilai anggaran biaya yang akan dikeluarkan nantinya dapat diketahui rinciannya. (Bloch dan Geitner, 1985). Gertsbakh (1976) menyimpulkan sebuah metode yang menunjukkan perawatan di setiap waktu. Pendapat ini didasari dengan asumsi bahwa jarak jeda waktu kerusakan pada komponen mesin dapat dimunculkan perkembangannya secara statistik serta dapat pula di simpulkan dari serangkaian pengamatan sistem dimana proses operasi dilakukan pada kondisi normal saat mesin bekerja.

Kekurangan dari metode ini adalah, adanya beberapa proses yang tidak sesuai jika diterapkan pada mesin-mesin industri modern saat ini. Hal itu dikarenakan mesin-mesin industri modern saat ini memiliki komponen-komponen yang semakin kompleks dan berkualitas, sehingga membutuhkan prediksi yang konservatif dalam menjalankan metode perawatan *preventive* dimana akan berdampak pada kebutuhan biaya yang besar (Jardine dkk, 2006).

### **2.7. Condition-Based Maintenance (CBM)**

Condition-based maintenance (CBM) adalah metode perawatan yang mana didasari pada informasi yang didapatkan dari proses *condition monitoring*

(CM). CBM merupakan bagian dari metode perawatan mesin *preventive maintenance*. Objek dari metode ini adalah melakukan perawatan hanya jika terdapat tanda yang abnormal pada saat kondisi instalasi mesin beroperasi. CBM mampu menghindari proses perawatan mesin yang tidak perlu dan sia-sia. Metode ini juga bertujuan untuk menjegah gangguan pada saat kondisi mesin beroperasi secara normal, dengan cara muncul gangguan dengan sendirinya, ataupun gangguan abnormal yang sengaja di munculkan guna pembelajaran. Jika metode ini akan diterapkan dalam sebuah manajemen industri, maka konsep perencanaanya harus dibuat sedini mungkin. Perencanaan itu dibentuk sebelum mesin beroperasi, dimana sejak awal harus dilakukan sinkronasi perawatan dengan waktu *real time* mesin beroperasi. Hal ini bertujuan agar proses memonitor kondisi mesin berjalan dengan baik sesuai jadwalnya. (Latuny, 2013)

Skema CBM didasari pada tiga elemen pendukung yaitu :

1. *Data acquisition* : data yang menyimpan kumpulan informasi terkait kondisi kesehatan mesin.
2. *Data processing, conditioning* : data yang sudah melewati proses filterisasi dan seleksi.
3. *Decision-making process* : menyediakan keluaran hasil berupa dugaan mengenai kondisi kesehatan mesin, yang mana kegiatannya diwujudkan dalam bentuk aksi perawatan, diagnosis, dan proses perkiraan (Jardine dkk, 2006).

### **2.7.1. Condition Monitoring (CM) untuk Metode CBM**

Pada umumnya, memonitor kondisi mesin dapat didefinisikan sebagai proses yang dijalankan bersamaan dengan aktivitas operasi mesin seperti biasanya. Cara yang dilakukan adalah mengumpulkan informasi dari sekumpulan data operasi aktivitas mesin, dengan maksud untuk menentukan kondisi integritas dan operasional mesin. Hal ini menunjukkan kemampuan pengamatan kondisi mesin saat diamati sehingga mampu memprediksi kondisi mesin untuk waktu yang akan datang.

Dalam hal membuat jadwal perawatan memonitor kerusakan mesin, catatan jadwal waktu ditentukan dari proses pengamatan kondisi komponen mesin

saat beroperasi. Untuk itu dibutuhkan data yang menunjukkan serangkaian proses operasi mesin yang sudah terukur, dan sudah terekam secara periodik dan berkelanjutan.

Maka dapat disimpulkan, metode memonitor kondisi mesin untuk sebuah pengamatan kerusakan, terdiri dari lima tahapan yaitu: deteksi kerusakan, diagnosis kerusakan, prognosis terkait perkembangan kerusakan, menentukan tempat kerusakan yang akan di perbaiki, evaluasi. Tahapan diagnosis kerusakan, merupakan proses yang menentukan lokasi kerusakan pada sebuah komponen mesin, dan hal ini merupakan tahapan yang paling penting dari proses memonitor kondisi mesin.

### **2.7.2. Metode-metode *Condition Monitoring (CM)***

Dalam metode *condition monitoring*, terdapat beberapa metode-metode yang telah digunakan untuk mendapatkan data-data operasional sebuah mesin. Metode-metode tersebut digunakan pada berbagai bidang seperti: *industrial vibration and noise*, dinamika, Tribologi dan *non-destructive testing (NDT)*. Metode-metode tersebut adalah:

- *Mechanical vibration signature analysis*,
- *Lubrican analysis or oil particles density rate analysis*,
- *Acoustics emission signature analysis*, and
- *Non-destructive testing & analysis*.

Namun dalam penelitian kali ini hanya terfokus pada *condition monitoring* yang berbasis getaran / *Mechanical vibration signature analysis*. Karena analisis berbasis getaran, mampu mendeteksi adanya kerusakan sebelum terjadinya permasalahan serius yang dapat mengakibatkan perbaikan secara tiba-tiba dan tidak terjadwal (Scheffer dan Girdhar, 2004).

### **2.7.3. CBM berbasis getaran**

Salah satu keunggulan yang dimiliki CBM berbasis getaran adalah mampu mengidentifikasi perkembangan kerusakan sebelum masuk pada tahap kerusakan yang berat. Semua mesin yang berputar, akan menghasilkan getaran. Dari getaran

tersebut, terdapat ukuran amplitudo pada frekuensi yang memberikan informasi terkait kesejajaran, keseimbangan poros, kondisi bantalan dan *gear*, serta efek resonansi yang diakibatkan oleh komponen lainnya. Analisis vibrasi merupakan metode yang tidak mengganggu selama mesin beroperasi secara normal.

Dalam analisis berbasis getaran, terdapat 4 sistem pokok yang mendasari yaitu:

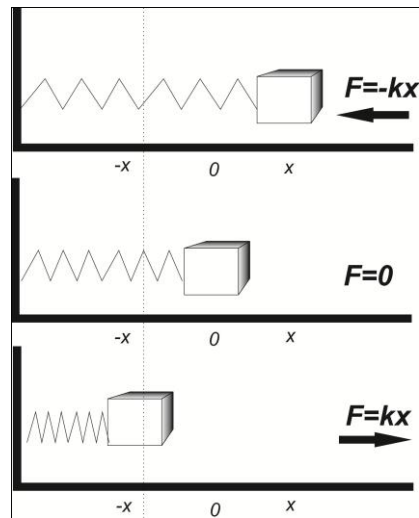
1. penangkap sinyal/*transducer*
2. *signal analyzer*
3. software analisis
4. komputer/PC

Dari keempat dasar inilah proses analisis getaran dapat dilakukan. Adapun software analisis memiliki serangkaian metode-metode yang nantinya dapat dikombinasikan, sehingga hasil yang didapat akan semakin akurat.

## 2.8. Teori Getaran

Getaran merupakan sebuah gerak bolak balik atau bisa disebut osilasi. Pergerakan getaran tersebut dapat di jelaskan dengan ilustrasi pada gambar 2.7, yang menunjukkan sebuah pegas yang terpasang pada sebuah benda, kemudian dibebankan dengan sebuah benda yang memiliki berat massa tertentu pada sisi lain dari ujungnya. Pada saat setimbang, gaya  $F=0$  ditunjukkan dengan ilustrasi gambar yang tengah. Saat dilakukan tekanan pada beban, yang ditunjukkan pada gambar yang paling kiri dari ilustrasi gambar 2.7, terdapat gaya tekan yang diberikan pegas kepada beban. Sehingga saat tekanan dilepaskan, maka gaya  $F=kx$  akan dilepaskan oleh pegas. Maka setelah pegas melepaskan gayanya sebesar  $F=kx$ , pegas akan memanjang pada ukuran tertentu, dan saat itu pula beban memiliki gaya  $F=kx$  yang akan dilepaskan kembali ke posisi semula saat pegas terkompresi. Pengulangan gerakan itu akan terjadi beberapa kali hingga berhenti pada waktu tertentu. Dimana pegas dan benda berada pada kondisi setimbang dengan  $F=0$ . Gerakan bolak-balik yang terjadi berkali-kali inilah disebut osilasi dan menjadi bentuk dari sebuah getaran.





Gambar 2.7 gerakan bolak-balik yang medasari terjadinya sebuah getaran (Scheffer dan Girdhar, 2004).

### 2.8.1. Sinyal Getaran

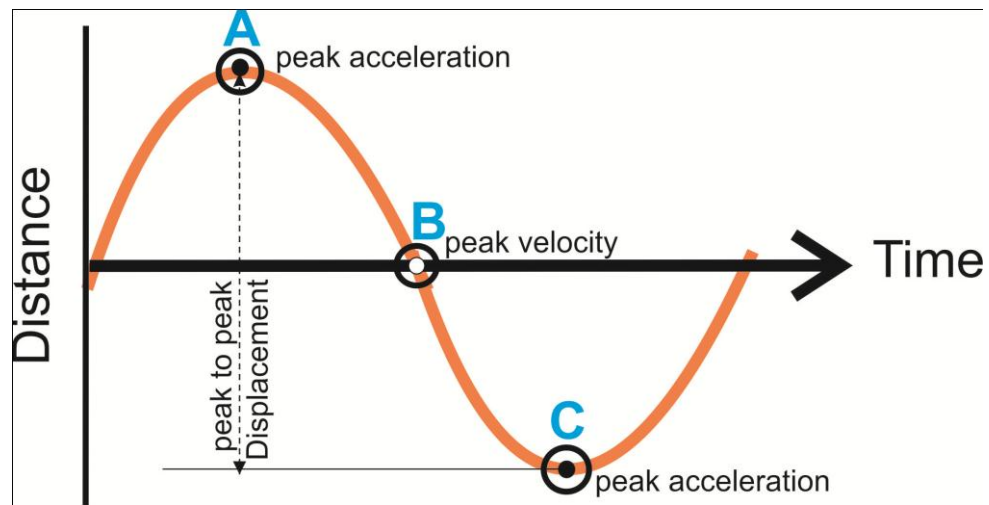
Sinyal merupakan besaran fisik yang nilai dan variasi nilainya terhadap waktu, memuat informasi-informasi tertentu. Bentuknya pada umumnya berupa keadaan, laju perubahan, level bentuk, serta frekuensi. Analisis terkait data-data getaran mesin mengandung banyak informasi yang dibutuhkan untuk menentukan kondisi suatu elemen mesin, diantaranya adalah:

1. Informasi terkait kondisi terbaik untuk beroperasi.
2. Analisis tentang perubahan kondisi mesin.
3. Data terkait penyebab kerusakan mesin.

Ketika sebuah sensor memberikan sinyal pada proses pengukuran suatu mesin, maka informasi getaran yang terkandung didalamnya, berupa macam-macam gaya dari dalam maupun luar mesin. Untuk itu perlu dilakukan proses klasifikasi data terkait sinyal yang didapat, agar proses analisis sinyal getaran yang dimunculkan dari elemen mesin yang mengalami kerusakan akan mudah dibaca.

### 2.8.2. Karakter getaran

Dalam menganalisis kerusakan menggunakan sinyal getaran, terdapat perbedaan karakteristik dari masing-masing getaran. Setiap karakter getaran memiliki penanganan yang berbeda-beda. Beberapa karakter getaran tersebut yaitu:



Gambar 2.8 karakter getaran

### 1. *Acceleration*

Percepatan getaran dapat dikatakan sebagai perubahan laju dari kecepatan getaran. Jika dilihat pada gambar 2.8, maka A dan C merupakan titik dimana getaran mengalami percepatan maksimum. Sedangkan titik B adalah dimana getaran mengalami percepatan nol.

### 2. *Velocity*

Getaran merupakan sebuah gerakan yang bersifat periodik, maka dapat dipastikan sebuah getaran memiliki kecepatan. Jika dilihat pada gambar 2.8, titik B merupakan kondisi dimana getaran memiliki kecepatan maksimal. Sedangkan pada titik A dan C (peak), getaran berada pada kondisi kecepatan nol.

### 3. *Displacement*

Perpindahan getaran merupakan suatu jarak yang ditempuh dari satu puncak ke puncak lainnya. Pada gambar 2.8, jarak puncak titik (A) ke puncak titik (B) merupakan ilustrasi dari perpindahan sebuah getaran.

### 2.8.3. *Transducer*

*Transducer* merupakan sebuah alat yang dapat menyalurkan energi dengan bentuk yang sama atau bahkan berbeda, dari bentuk energi yang menggerakkan alat tersebut (Williams, 1993). *Transducer* memiliki karakteristik yang

berhubungan dengan karakter getaran yang akan direkam. Karakter getaran yang dimaksud dapat dilihat pada gambar 2.8. Pembagian *transducer* tersebut adalah sebagai berikut:

1. Perpindahan (*displacement*)

*Transducer* ini merupakan tipe non-kontak yang biasa digunakan sebagai pengukur pergerakan relatif antara ujung sensor dan poros. *Transducer* perpindahan ini sangat cocok jika digunakan untuk mengukur sesuatu yang memiliki frekuensi rendah dengan ukuran dibawah 600 CPM. *Transducer* perpindahan biasanya digunakan untuk mengukur getaran shaft pada mesin berat yang memiliki putaran relatif kecil.

2. Kecepatan (*velocity*)

*Transducer* ini merupakan *transducer* kontak yang digunakan sebagai pengukur kecepatan. Pada umumnya *transducer* ini dipasang pada rumah bantalan dan masih banyak digunakan pada beberapa industri. Penggunaan *transducer* kecepatan digunakan pada rentang frekuensi 600-100.000 CPM.

3. Percepatan (*acceleration*)

*Transducer* percepatan atau biasa disebut *accelerometer*, merupakan jenis *transducer* kontak. *Transducer* ini cocok digunakan untuk mengukur getaran yang memiliki frekuensi tinggi. Pada mesin-mesin industri, umumnya digunakan untuk menganalisis motor listrik, bantalan, *gear box* dll. Rentang frekuensi yang dapat direkam oleh *transducer* ini adalah 600-600.000 CPM.

#### **2.8.4. Akselerometer**

Akselerometer merupakan alat yang digunakan untuk menangkap sinyal getaran yang dihasilkan dari sebuah komponen mesin. Sistem kerja dari sensor akselerometer menggunakan efek piezoelektrik. Ketika sinyal getaran terbaca oleh sensor akselerometer, maka sinyal tersebut akan ditampilkan oleh perangkat akuisisi data berupa domain waktu pada program Matlab. Akselerometer merupakan alat yang dapat mengukur percepatan serta mendeteksi suatu getaran (Aji, 2007). Akselerometer memiliki beberapa karakteristik yang dapat dijadikan acuan dalam memilih sensor yang akan digunakan. Karakteristik tersebut adalah:

1. Sensitivitas

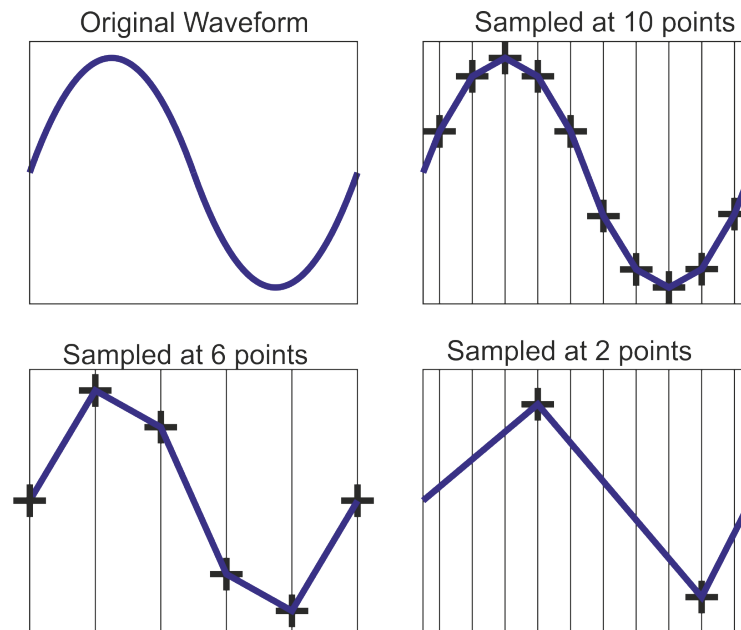
Sensitivitas merupakan ukuran tingkat kepekaan akselerometer dalam merekam intensitas getaran yang diukur. Sensitivitas yang umumnya dirancang pada akselerometer adalah 100 mV/g.

2. Rentang frekuensi

Rentang frekuensi dapat didefinisikan sebagai tingkat kemampuan akselerometer dalam menangkap frekuensi suatu getaran. Pada umumnya, rentang frekuensi pada sebuah sensor akselerometer berkisar antara 1 hingga 10 kHz.

3. *Sampling rate*

*Sampling rate* merupakan jumlah sampel yang direkam dalam satu detik. Semakin besar *sampling rate* yang digunakan dalam merekam suatu getaran, maka rekonstruksi sinyal getaran yang ditampilkan akan sesuai dengan aslinya. Ilustrasi *sampling rate* dapat dilihat pada gambar 2.13. Jika dilihat pada gambar 2.13, rekonstruksi bentuk dari gelombang *original waveform* berbeda, sesuai berdasarkan jumlah *sampling rate* yang diberikan. Semakin rendah *sampling rate* yang digunakan, maka rekonstruksi gelombang akan semakin jauh dari bentuk aslinya.



Gambar 2.9 *sampling rate*

(labtronix.co.uk)

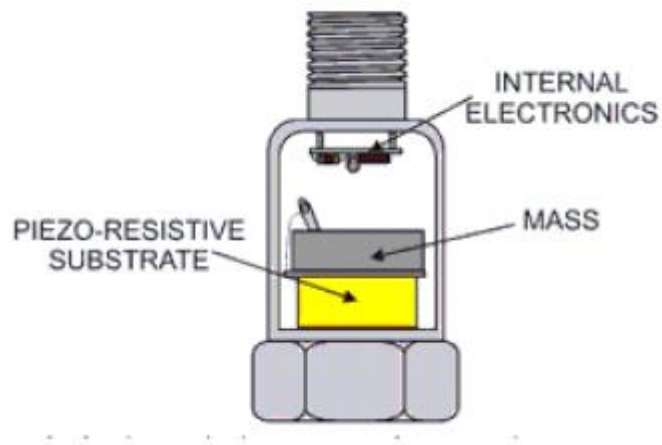
Jika rekonstruksi getaran tidak sesuai dengan bentuk aslinya, maka kejadian tersebut dinamakan aliasing. Pada gambar 2.9, aliasing terjadi pada gambar dengan *sampling rate* 6 dan 2.

### 2.8.5. Karakteristik akselerometer

Pemilihan akselerometer yang akan digunakan harus sesuai dengan karakteristik getaran yang akan direkam. Pada rentang tertentu, setiap akselerometer memiliki batasan kemampuan perekaman. Perbedaan karakteristik masing-masing akselerometer dapat dijelaskan sebagai berikut:

#### 1. *single ended compression accelerometer*

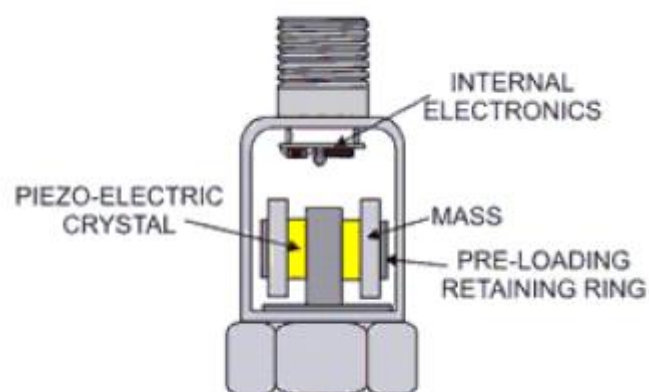
Pada akselerometer ini, kristal terpasang pada pangkal akselerometer. Sedangkan massa beban terpasang pada kristal dengan mur, *fastener* dan *setscrew*. Ilustrasi *single ended compression accelerometer* dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 *single ended compression accelerometer*  
(Aji, 2007)

## 2. *shear type accelerometer*

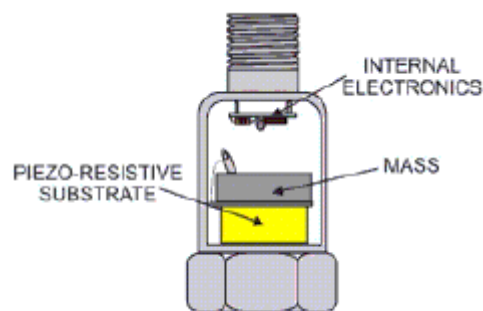
Merupakan akselerometer yang dirancang untuk digunakan pada aplikasi distorsi *base* yang disebabkan oleh pengaruh perubahan panas, atau digunakan juga pada struktur yang fleksibel. Bentuk *shear type accelerometer* dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 *shear type accelerometer*  
(Aji, 2007)

### 3. *Piezo-resistive accelerometer*

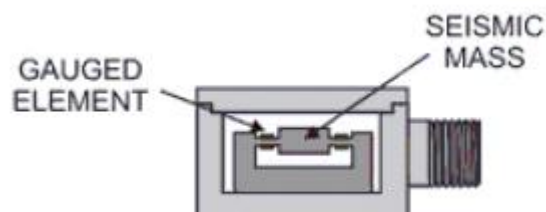
Merupakan akselerometer yang memakai substrate piezo-resistive pada kristalnya. Piezo-resistive memiliki keunggulan dibandingkan piezo-electric, yaitu dapat mengukur frekuensi percepatan pada kisaran 0 Hz. Permisalan bentuk *Piezo-resistive accelerometer* dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 *Piezo-resistive accelerometer*  
(Aji, 2007)

### 4. *Strain gauged based accelerometer*

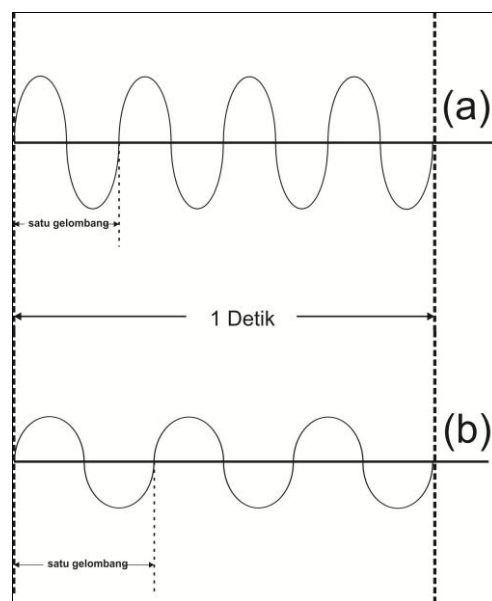
Merupakan akselerometer yang dapat mengidentifikasi defleksi pada sebuah massa seismic dengan memakai *foil strain gauged* atau silikon. Keunggulan yang dimiliki *strain gauge* juga sama dengan keunggulan yang dimiliki *piezo-resistive*, yaitu dapat mengukur frekuensi percepatan pada kisaran 0 Hz. Gambar 2.13 merupakan ilustrasi dari akselerometer *Strain gauged*.



Gambar 2.13 *Strain gauged based accelerometer*  
(Aji, 2007)

### 2.8.6. Frekuensi

Frekuensi dapat diartikan sebagai banyaknya jumlah gelombang yang terjadi dalam 1 detik, dengan satuan ukuran yang disebut *hertz* (Hz). Pada gambar 2.14 dapat dilihat ilustrasi dari grafik frekuensi, yang mana terdapat 2 gelombang yang berbeda. Gelombang 1 memiliki frekuensi 4 Hz lebih besar daripada gelombang 2 yang hanya memiliki 3 Hz.



Gambar 2.14 grafik frekuensi

Secara matematis rumus frekuensi dapat ditulis:

$$f = \frac{1}{T} \quad 2.5$$

$f$  = frekuensi (Hz)

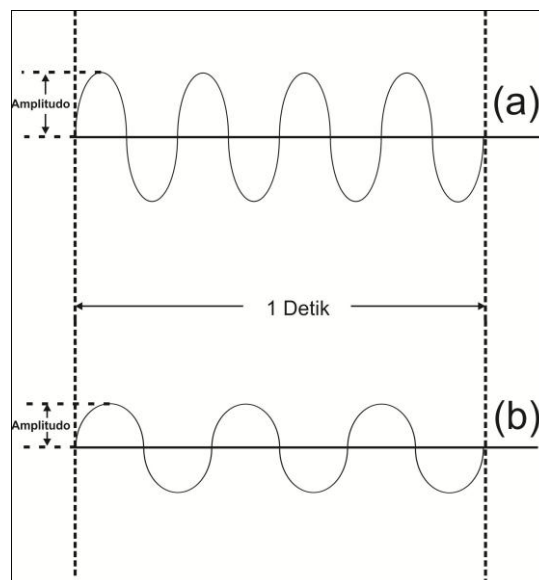
$T$  = Periode (s)

### 2.8.7. Amplitudo

Dalam setiap gelombang pasti memiliki titik puncak dan lembah. Setiap titik puncak memiliki ketinggian yang berbeda-beda. Ukuran titik tertinggi dari suatu gelombang dinamakan amplitudo. Apabila terdapat dua gelombang yang memiliki ukuran panjang gelombang yang sama, salah satunya akan memiliki nilai puncak lebih tinggi atau bahkan lebih rendah dari gelombang lainnya (Scheffer dan Girdhar, 2004). Adanya amplitudo



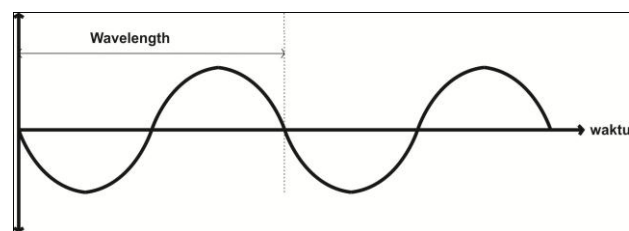
memberikan indikasi relatif terkait besarnya nilai energi yang tersebar pada suatu gelombang. Pada gambar 2.15 dapat dilihat terdapat 2 macam gelombang yang memiliki amplitudo yang berbeda, gelombang 1 memiliki amplitudo yang lebih tinggi dibandingkan gelombang 2.



Gambar 2.15 bentuk dari ukuran amplitudo

### 2.8.8. Panjang Gelombang (wavelength)

Panjang gelombang (wavelength) adalah jarak yang ditempuh oleh gelombang dalam satu periode, dengan lamda sebagai bentuk lambangnya ( $\lambda$ ). Dalam Sistem Internasional (SI), satuan dari panjang gelombang adalah meter (m) sebagaimana ilustrasi yang dapat dilihat pada gambar 2.16, dimana terdapat 2 gelombang dalam 1 waktu dengan ukuran yang digambarkan pada salah satunya. Apabila suatu gelombang sudah terukur besarnya, maka panjang gelombang (wavelength) tersebut sudah memiliki jarak dari titik awal gelombang sampai titik gelombang selanjutnya.



Gambar 2.16 bentuk dari ukuran *wavelength*/ panjang gelombang

Rumus panjang gelombang dapat ditulis :

$$\lambda = v \times T \text{ atau } \lambda = \frac{v}{f} \quad 2.6$$

$\lambda$  = panjang gelombang (m)

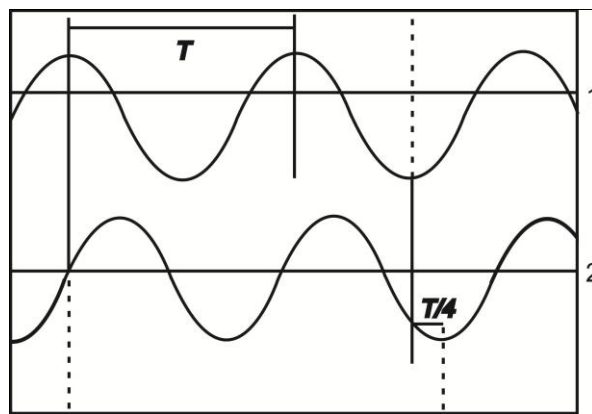
$v$  = cepat rambat gelombang (m/s)

$T$  = periode (s)

$f$  = frekuensi (Hz)

### 2.8.9. Phase

Adalah posisi titik point dalam waktu pada *waveform*, yang menunjukkan ukuran dari derajat sudutnya. Agar lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.17, dimana terdapat 2 macam gelombang, yang pertama berupa gelombang sinus, yang kedua berupa gelombang cosinus. Masing-masing dari gelombang memiliki titik awal yang berbeda, sehingga selisih perbedaan antara 2 gelombang tersebut terlihat pada  $T/4$ , selisih inilah yang disebut *phase*.

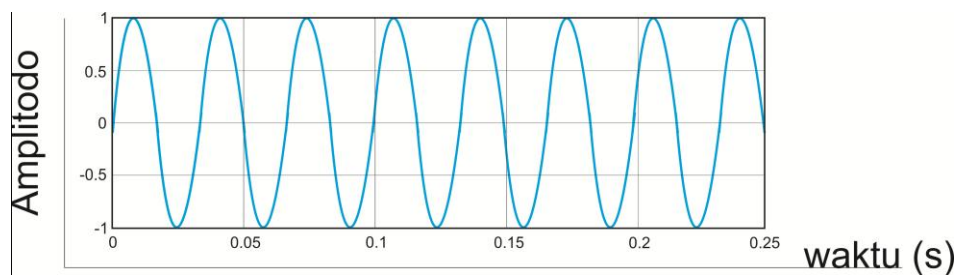


Gambar 2.17 Ilustrasi *phase*

### 2.8.10. Domain Waktu

Merupakan grafik yang menunjukkan bentuk serta ukuran dari sinyal gelombang berdasarkan waktu per detik. Domain waktu juga bisa disebut *Waveform* dalam dunia analisis getaran. Bentuk yang ditunjukkan merupakan

wujud dari gelombang sinusoidal (sinus/kosinus), tergantung dari bentuk sinyal gelombang yang masuk diawal. Sebagai contoh dari bentuk time domain bisa dilihat pada gambar 2.18 dimana bentuk gelombang ditunjukkan dalam grafik sinus. Pada grafik arah y menunjukkan nilai amplitudo gelombang, sedangkan arah x menunjukkan nilai waktu.

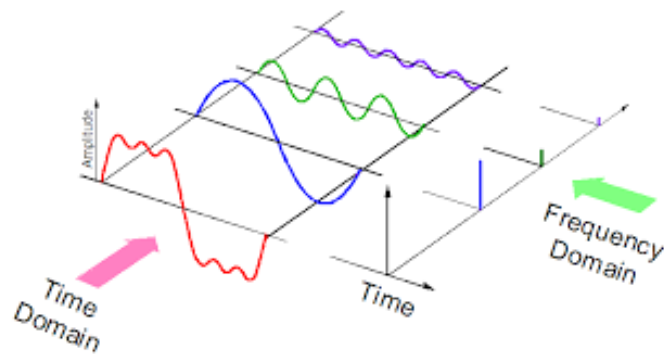


Gambar 2.18. ilustrasi domain waktu

Dari ilustrasi yang ditunjukkan oleh domain waktu tersebut, menunjukkan bentuk alamiah dari sinyal getaran yang dihasilkan suatu mesin. Sehingga sinyal impuls yang dihasilkan sangat berguna untuk proses analisis, dan juga fase antara sinyal satu dengan yang lainnya ditunjukkan secara menyeluruh. Meskipun sinyal yang didapat dari domain waktu tidak dapat secara langsung menunjukkan gejala kerusakan elemen suatu mesin, dikarenakan beberapa data yang saling berhimpitan, namun data tersebut sangat berguna sebagai dasar dari proses yang akan dilakukan nantinya untuk analisis lebih lanjut.

### 2.8.11. Spektrum

Dalam spektrum getaran dipandang berupa amplitudo sebagai fungsi frekuensi, dimana merupakan cara yang cocok untuk mengidentifikasi komponen-komponennya. (Aji, 2007). Setiap sinyal yang ada pada spektrum dimunculkan dalam grafik berdasarkan ketinggian dari amplitudonya. Pada gambar 2.19, sudut pandang spektrum yang melihat berdasarkan ketinggian amplitudo dari masing-masing gelombang yang berbeda. Sehingga dari grafik yang dimunculkan pada spektrum, akan semakin mudah mengidentifikasi masing-masing gelombang.



Gambar 2.19 pengertian antara grafik domain waktu dan spektrum  
(Sumber: <http://math.stackexchange.com/>)

## 2.9. Metode analisis getaran

Dalam melakukan analisis menggunakan metode CBM, terutama yang berbasis pada analisis getaran, didalamnya terdapat berbagai macam metode pendukung yang mana saling berkaitan satu dengan yang lainnya. Metode-metode tersebut memiliki karakter kelebihan dan kekurangan masing-masing dalam melakukan pengolahan data sinyal getaran yang diterima. Untuk itu, dalam hal ini penggunaan teknik kombinasi metode-metode tersebut akan sangat menguntungkan dalam proses analisis kerusakan mesin. Karena masing-masing metode akan saling melengkapi kekurangan-kekurangan yang ada pada metode lainnya.

### 2.9.1. Analisis Domain Waktu

Analisis domain waktu pada sinyal getaran, diuraikan secara langsung bersama dengan *time-based waveform*, dimana informasi data sinyal dari *time-based waveform* didapat dari perangkat sensor yang digunakan ketika melakukan analisis (Latuny, 2013). Dalam *analisis domain waktu*, terdapat beberapa metode analisis statistik deskriptif yang digunakan untuk mendapatkan informasi data sinyal seperti: kurtosis, *root mean square (RMS)*, *variance*, *mean*, *standard deviation*, *skewness*.

### 2.10.1.1. Kurtosis

Dalam analisis statistik domain waktu, kurtosis merupakan istilah yang sudah tidak asing sebagai salah satu metode statistik untuk mengolah data sinyal getaran. Kurtosis dapat didefinisikan sebagai empat momen amplitudo yang terdistribusi berupa ukuran puncak tertinggi dan terendah yang berbanding dengan distribusi normal. Dalam arti lain bisa didefinisikan sebagai derajat keruncingan suatu distribusi. Untuk rumus persamaannya dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$Kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^4}{N\sigma^4} \quad 2.7$$

$\mu = \text{mean}$

$\sigma = \text{standard deviation}$

$X_i = (i = 1-N)$

### 2.10.1.2. Root Mean Square (RMS)

*Root Mean Square* (RMS) merupakan indikator tingkatan level energi atau tingkatan level power dari sinyal getaran. Namun juga bisa di artikan sebagai rata-rata kuadrat sinyal getaran, dimana hal itu mengindikasikan level energi sinyal secara keseluruhan (Latuny, 2013).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad 2.8$$

$N =$  cacah point dari sinyal data

$\bar{x} =$  nilai rata-rata sinyal

$x_i = i$  pangkat tiga dari elemen data set

### 2.10.1.3. Standard Deviation

Merupakan sebaran yang menentukan seberapa jauh dan dekatnya nilai/data terhadap *mean*. Standard deviation digunakan untuk mengukur nilai rata-rata dan relatif dari energi pada *sub-band* yang dimulai pada saat sinyal

getaran yang sebelumnya ternormalisasi dalam kondisi rata-rata nol dan unit *variance* (Gligorijevic, 2016).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{(N-1)\sigma^4}} \quad 2.9$$

$x_i$  = nilai dari setiap data set

$\bar{x}$  = rata-rata dari setiap data set

$N$  = cacah dari data point

#### 2.10.1.4. Variance

*Variance* merupakan derajat dari standar deviasi.

$$Variance = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad 2.10$$

$\bar{x}$  = rata – rata dari data set

$x_i$  = nilai yang didapat dari data set

$N$  = cacah point dari sinyal data

#### 2.10.1.5. Mean

Adalah rata-rata dari semua total sampel nilai sinyal getaran. (Pratyusha dkk, 2014)

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \quad 2.11$$

$N$  = total sampel getaran

$x(n)$  = sinyal data getaran

#### 2.10.1.6. Skewness

Variance adalah derajat ketidaksimetrisan distribusi yang dilihat dari bentuk kurva frekuensi. Jika kurva frekuensi memanjang kekanan, maka nilainya positif, jika memanjang ke kiri maka nilainya negatif. Arah kurva dengan nilai positif atau negatif dilihat dari nilai *mean*.

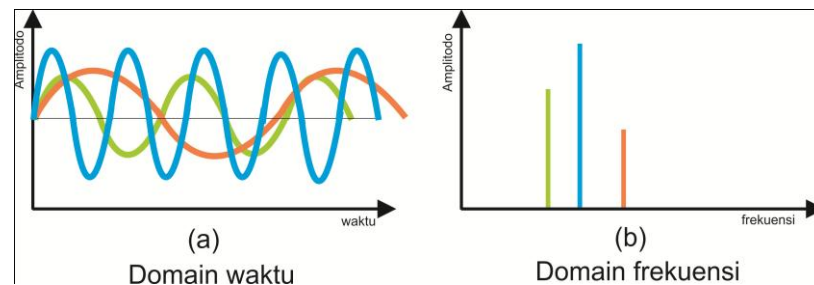
$$Skewness = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{(N-1)\sigma^3} \quad 2.12$$

#### 2.9.2. Spektrum dan Fast Fourier Transform (FFT)

Pada spektrum, data yang berupa sinyal getaran, tidak dapat secara langsung dimunculkan pada saat proses pengambilan data. Semua sinyal data yang terekam melalui sensor, hanya dapat dimunculkan pada domain waktu. Sedangkan spektrum adalah wadah lanjutan dari hasil analisis sinyal getaran yang sudah dikonversi dari domain waktu. Untuk itu dibutuhkan sebuah metode untuk mentransformasikan data domain waktu menjadi spektrum.

Pada tahun 1960, J. W. Cooley dan J. W. Tukey, berhasil merumuskan suatu teknik perhitungan algoritma fourier transform yang efisien. Teknik perhitungan algoritma ini dikenal dengan sebutan *Fast Fourier Transform* atau lebih populer dengan istilah FFT yang diperkenalkan oleh J.S.Bendat dan A.G.Piersol pada 1986. *Fast Fourier Transform* dalam bahasa Indonesia disebut Transformasi Fourier Cepat, dimana merupakan sumber dari suatu algoritma untuk menghitung Discrete Fourier Transform (transformasi fourier diskrit atau DFT) dengan cepat, efisien. Algoritma pada FFT memeriksa ketidaklancaran modulasi frekuensi yang terdapat pada gelombang spektrum, dimana hal ini terjadi ketika sinyal non frekuensi muncul pada sinyal gelombang (Scheffer dan Girdhar, 2004).

Agar memperjelas proses transformasi dari domain waktu menjadi spektrum menggunakan FFT, dapat dilihat pada gambar 2.20, dimana menunjukkan posisi grafik sebagaimana halnya grafik yang dimunculkan pada metode analisis getaran pada umumnya. Jika dilihat dari grafik *time domain* (domain waktu), maka terlihat 3 macam gelombang yang berbeda, mulai dari bentuk serta tinggi amplitudonya. Sedangkan pada grafik *frequency domain* (spektrum), dapat dilihat bentuk grafik yang menggambarkan 3 gelombang sebelumnya (domain waktu) berdasarkan ketinggian masing-masing amplitudonya.



Gambar 2.20 proses transformasi dari domain waktu menjadi spektrum

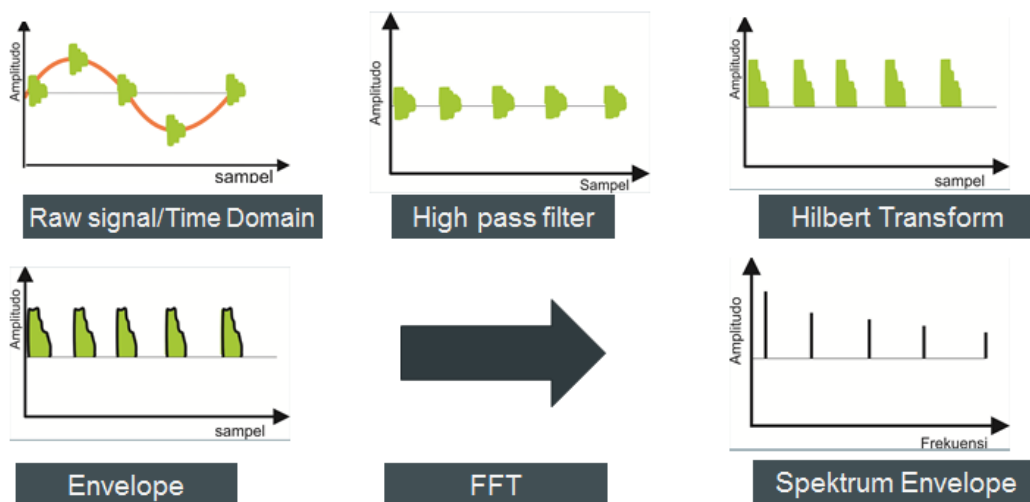
### 2.9.3. Analisis Envelope

Analisis *Envelope* merupakan metode yang khusus digunakan pada analisis kerusakan pada bantalan dan *gearboxes*. Metode ini fokus pada wilayah spektrum yang memiliki frekuensi tinggi, dengan filter yang digunakan yaitu *high-pass filter* (Scheffer dan Girdhar, 2004). Pada data spektrum, terdapat bermacam-macam frekuensi dari berbagai sumber sinyal gelombang yang terekam oleh alat *accelerometer*. Tidak hanya frekuensi dari kerusakan komponen bantalan yang muncul, namun harmonik dari frekuensi fundamental pun juga muncul di awal grafik. Perlunya dilakukan penyaringan sinyal frekuensi tersebut, karena pada umumnya data frekuensi yang tidak dilakukan proses penyaringan atau filtrasi, memiliki spektrum yang bergerombol dan rumit, dimana hal ini akan mempersulit proses analisis data. (Scheffer dan Girdhar, 2004).

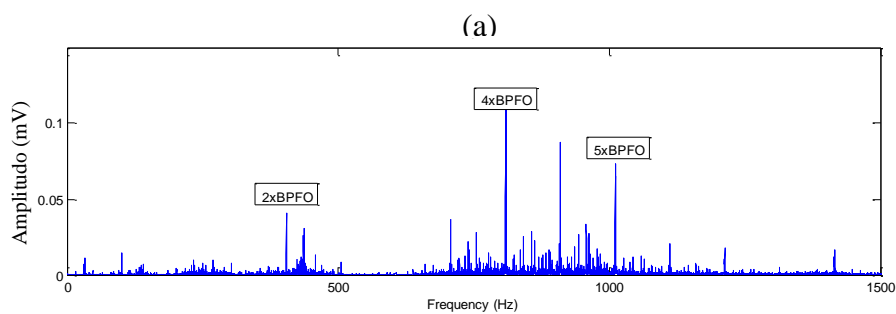
Pada umumnya kemunculan frekuensi fundamental muncul diawal grafik dengan amplitudo yang besar, hal ini biasa terjadi hingga 6 x harmonik, diikuti

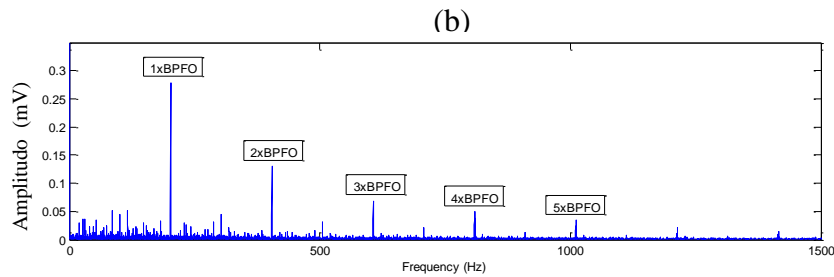


dengan kemunculan frekuensi dari kerusakan komponen bantalan, yang memiliki nilai amplitudo lebih kecil dibandingkan frekuensi fundamental. Dengan adanya teknik *band-pass filter/high-pass filter* pada analisis *envelope*, kemunculan harmonik dari frekuensi fundamental dapat dihilangkan. Sehingga frekuensi yang memiliki amplitudo kecil dapat dimunculkan lebih detail dalam grafik. Seperti yang dilihat pada gambar 2.21, yang menggambarkan proses analisis *envelope*. Dimulai dengan raw vibration signal yang bisa juga disebut data mentah berupa domain waktu, kemudian dilanjutkan pada proses penyaringan menggunakan *band-pass filter/high-pass filter*. Setelah dilakukan proses penyaringan, dilanjutkan dengan *envelope* dan diakhiri dengan proses FFT. Data yang didapatkan dari proses analisis *envelope* ini berupa spektrum *envelope*.



Gambar 2.21 skema proses *envelope*





Gambar 2.22 grafik (a) spektrum, grafik (b) spektrum *envelope*

Pada gambar 2.22 dapat dilihat perubahan yang terjadi akibat spektrum yang disaring menggunakan analisis *envelope*. Pada grafik (a) menunjukkan sinyal getaran dengan berbagai macam frekuensi. Frekuensi yang tercampur didalamnya meliputi fundamental frekuensi, frekuensi kerusakan bantalan, *noise* dan frekuensi dari gangguan2 lainnya. Secara dominan frekuensi yang terdapat pada spektrum memiliki nilai amplitudo yang tinggi. Pada umumnya nilai frekuensi kerusakan bantalan tidak muncul pada spektrum, karena memiliki nilai amplitudoyang lebih rendah dibandingkan frekuensi lainnya. Namun terkadang nilai frekuensi kerusakan bantalan juga muncul pada beberapa titik. Seperti yang terlihat pada grafik (a), dimana terdapat 3 frekuensi kerusakan komponen lintasan luar BPFO. Ketiga frekuensi tersebut adalah 2xBPFO dengan 404,3 Hz, 4xBPFO dengan 808,7 Hz dan 5xBPFO dengan 1011 Hz. Sedangkan pada grafik (b) menunjukkan kemunculan frekuensi-frekuensi yang hanya terfokus pada kerusakan bantalan. Hal ini dapat dilihat dari hilangnya beberapa frekuensi-frekuensi pada beberapa titik dan memunculkan frekuensi rusak komponen bantalan lintasan luar BPFO dengan 5xharmonik. Kelima frekuensi BPFO tersebut adalah 1xBPFO pada 202,2 Hz, 2xBPFO pada 404,4 Hz, 3xBPFO pada 606,6 Hz, 4xBPFO pada 808,8 Hz dan 5xBPFO pada 1011 Hz. Munculnya beberapa titik frekuensi BPFO pada grafik *envelope*, menunjukkan bahwa yang dilakukan pada metode *envelope* terhadap frekuensi yang memiliki amplitudo tinggi bisa dilakukan. Hal ini mengakibatkan frekuensi BPFO yang semula kecil dan tidak terlihat, menjadi muncul dengan harmonik yang berurutan dan memiliki amplitudo yang tinggi.