

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Banyak metode deteksi yang telah dikembangkan dalam mendiagnosis kerusakan yang terjadi pada bantalan. Salah satu metode yang telah dikembangkan dan digunakan untuk melihat adanya kerusakan/cacat pada suatu komponen permesinan adalah dengan analisis getaran (*vibration analysis*). Karena metode ini mudah digunakan dan hasil yang diperoleh dapat langsung mengindikasikan adanya cacat disebuah komponen mesin tersebut. Metode ini telah banyak digunakan oleh para peneliti untuk mendeteksi cacat pada bantalan, seperti yang dilakukan oleh Aji (2007) tentang deteksi kerusakan bantalan gelinding pada pompa sentrifugal dengan analisis sinyal getaran.

Penelitiannya bertujuan untuk mengetahui karakteristik getaran yang dihasilkan oleh pompa sentrifugal yang mengalami kerusakan pada bantalannya. Metode analisis frekuensi diterapkan pada penelitian ini dengan membandingkan karakteristik sinyal getaran bantalan baik dan bantalan rusak. Sinyal getaran diambil menggunakan sensor *piezoelectric accelerometer*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerusakan pada bantalan pompa sentrifugal dapat dideteksi dengan menggunakan metode analisis frekuensi sinyal getaran. Indikasi pertama kerusakan bantalan dapat terlihat pada plot frekuensi kisaran tinggi. Selanjutnya, bantalan yang mengalami cacat pada lintasan luarnya, akan meningkatkan amplitudo getaran yang dominan pada daerah frekuensi $3 \times \text{BPFO}$ (197,5 Hz), bantalan yang mengalami kerusakan pada lintasan dalamnya akan meningkatkan amplitudo getaran pada daerah $4 \times \text{BPFI}$ (435 Hz). Sedangkan kerusakan pada elemen bola, timbul getaran dengan amplitudo pada daerah frekuensi $2 \times \text{BSF}$ (62,5 Hz). Nilai amplitudo pada bantalan kondisi baik adalah 0,802 volt, sedangkan pada cacat lintasan dalam 1,294 volt, cacat lintasan luar 1,662 volt dan cacat pada bola 2,006 volt.

Suharjhono (2004), melakukan penelitian tentang analisis sinyal getaran untuk menentukan jenis dan tingkat kerusakan bantalan bola (*ball bearing*). Metode

yang digunakan adalah dengan mengukur karakteristik getarannya baik dalam domain waktu maupun domain frekuensi yang terjadi pada arah radial. Penelitian 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 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, sangkar atau kerusakan bola harus disinkronkan antara frekuensi getaran dan perhitungan yang berdasarkan data dari parameter bantalannya. Hasil pengukuran secara teoritik bahwa frekuensi cacat bantalan dengan cacat pada lintasan dalam *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPFI) sebesar 240,3 Hz, sedangkan hasil pengukuran didapat 242 Hz. Pengukuran secara teoritik frekuensi cacat bantalan dengan cacat pada lintasan luar *Ball Pass Frequency Outer Race* (BPFO) sebesar 157,33 Hz, hasil pengukuran didapat 159 Hz. Pengukuran secara teoritik frekuensi cacat bantalan dengan cacat pada bagian bola *Ball Spin Frequency* (BSF) sebesar 113,08 Hz, sedangkan hasil pengukuran 159 Hz. Pengukuran secara teoritik frekuensi cacat aktif bantalan dengan cacat pada bagian sangkar *Fundamental Train Frequency* (FTF) sebesar 19.67 Hz, hasil pengukuran didapat 20 Hz. Bantalan bola yang semua komponennya aus/rusak memperlihatkan munculnya getaran dengan frekuensi yang sesuai dengan semua jenis kerusakan diatas.

Teknik inspeksi yang cukup handal untuk mengetahui karakteristik getaran pada bantalan gelinding yang mengalami kerusakan adalah dengan mengukur getarannya. Karakteristik pengukuran getaran ini dilakukan pada bantalan bola menyelaras sendiri (*self aligning*) karena kerusakan sangkar. Parameter yang digunakan untuk pengukuran getaran pada penelitian ini adalah dengan memvariasi putaran dan tingkat kerusakan pada *cage* (kerusakan ringan, sedang dan berat). Analisa yang digunakan adalah analisa *comparative*, *trending* dan *descriptive* dari

amplitudo, sinyal (*time domain*) dan spektrum (*frequency domain*). Berdasarkan hasil pengukuran dan analisa diketahui bahwa terjadi korelasi positif antara tingkat kerusakan *cage* terhadap amplitudo getaran. *Fundamental train frequency* (FTF) pada bantalan gelinding 1207K dengan kerusakan *cage* yang diputar 1200 rpm adalah 8.4 Hz (Setiyadi dan Parno, 2016).

Betea (2013), dalam penelitiannya mendemonstrasikan *comparision between envelope detection methods for bearing defects diagnosis*. Penelitian ini difokuskan pada bantalan cacat dibagian lintasan luar (*inner race*). Jenis bantalan yang digunakan dalam penelitiannya adalah *Deep Groove Ball Bearings* type SKF 6205-2RS. Data getaran yang akan dianalisis diambil menggunakan sensor *accelerometer* dengan kecepatan putar yang digunakan adalah 1797 rpm. Metode yang digunakan dalam penelitiannya adalah analisis envelope. Analisis envelope yang berbasis *Hilbert transform* merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk mendeteksi kerusakan. Hasil yang diperoleh dengan menerapkan metode ini lebih baik jika dibandingkan dengan menggunakan spektrum frekuensi. Proses *high pass filter* yang terdapat pada analisis ini akan melakukan penyaringan untuk menghilangkan frekuensi-frekuensi rendah yang memiliki amplitudo tinggi. Hasil dari spektrum envelope menunjukkan adanya kenaikan amplitudo pada frekuensi cacat bantalan dibagian lintasan luar (BPFO) dengan nilai 107,3 Hz diikuti dengan 4 kali harmoniknya.

Berdasarkan literatur diatas, metode analisis getaran telah banyak digunakan pada penelitian sebelumnya untuk mendeteksi cacat/kerusakan pada bantalan. Metode ini dapat dikatakan berhasil untuk mengetahui cacat yang terjadi pada bantalan. Maka dari itu pada penelitian ini akan merekonstruksi ulang deteksi kerusakan bantalan bola menggunakan analisis spektrum. Namun, analisis spektrum mempunyai kelemahan yaitu amplitudo cacat bantalannya cenderung tertutupi oleh amplitudo yang lebih besar yang dihasilkan oleh frekuensi dari komponen yang lainnya. Untuk menutupi kelemahan dari analisis spektrum frekuensi tersebut, pada penelitian ini juga akan menerapkan metode analisis envelope. Kelebihan dari metode analisis envelope ini adalah dapat menghilangkan amplitudo yang besar di frekuensi rendah yang dihasilkan dari komponen lainnya.

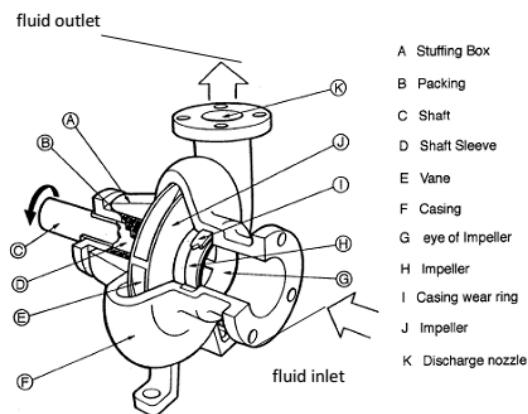
2.2. Landasan Teori

2.2.1. Pompa

Pompa didefinisikan sebagai perangkat mekanik yang berputar untuk memindahkan cairan dari satu tempat ke tempat yang diinginkan. Sebuah pompa dirancang untuk mentransfer fluida dari satu titik ke titik yang lain. Pompa mentransfer dari daerah tekanan rendah ke daerah tekanan yang lebih tinggi.

A. Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal adalah salah satu jenis pompa kerja dinamis yang prinsip kerjanya mengubah energi kinetik (kecepatan) cairan menjadi energi potensial melalui suatu *impeller* yang berputar dalam casing (*volute*). Pompa ini mempunyai konstruksi sedemikian rupa hingga aliran zat cair yang keluar dari *impeller* akan melalui sebuah bidang tegak lurus poros pompa. Pompa sentrifugal merupakan pompa kerja dinamis yang banyak digunakan karena mempunyai bentuk yang sederhana dan harga yang relatif murah. Pompa sentrifugal beserta komponennya dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1 Komponen pompa sentrifugal
(http://www.pumpfundamentals.com/pump_glossary.htm.)

B. Cara Kerja Pompa Sentrifugal

Sebuah pompa sentrifugal merupakan salah satu peralatan yang paling sederhana dalam berbagai proses yang ada pada industri/pabrik. Tujuannya adalah untuk mengubah energi dari penggerak utama (motor listrik atau turbin) dalam

kecepatan atau energi kinetik dan kemudian menjadi energi tekanan fluida yang sedang dipompa. Perubahan energi terjadi berdasarkan dua bagian utama dari pompa, *impeller* dan *volute* atau *diffuser*. *Impeller* adalah bagian berputar yang mengubah energi mekanik menjadi energi kinetik. *Volute* atau *diffuser* adalah bagian stasioner yang mengubah energi kinetik menjadi energi tekanan (Sumber: Basic Concepts of Operation, Maintenance, and Troubleshooting Part I: Centrifugal Pumps).

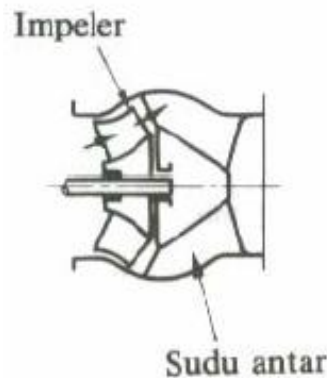
C. Klasifikasi Pompa Sentrifugal

Pompa kerja dinamis atau sering disebut dengan pompa sentrifugal dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara yaitu:

a. Klasifikasi Menurut Jenis Aliran Dalam *Impeller*

1. Pompa Aliran Campur

Seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.2 secara diagramatik aliran yang meninggalkan *impeller* akan bergerak sepanjang permukaan kerucut di dalam pompa aliran campuran ini.

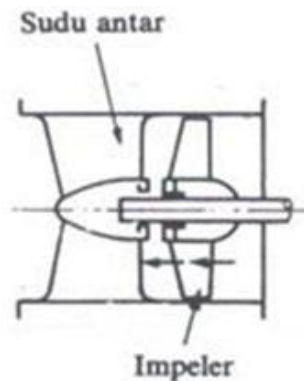


Gambar 2.2 Pompa aliran campuran/*mixed-flow*
(Sularso, 2000)

Salah satu ujung poros dimana *impeller* dipasang, ditumpu oleh bantalan dalam. Pada ujung yang lain dipasang kopling dengan sebuah bantalan luar didekatnya. Bantalan luar terdiri dari sebuah bantalan aksial dan sebuah bantalan radial, yang pada umumnya berupa bantalan gelinding. (Sularso, 2000).

2. Pompa Aliran Aksial

Seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.3 aliran zat cair yang meninggalkan *impeller* akan bergerak sepanjang permukaan silinder ke luar.



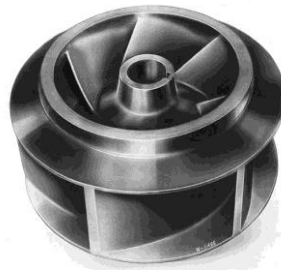
Gambar 2.3 Pompa aksial
(Sularso, 2000)

b. Klasifikasi Menurut Jenis *Impeller*

Impeller memiliki beberapa jenis dan bentuk yang berbeda, diantaranya adalah *impeller* jenis tertutup, *impeller* jenis setengah terbuka, dan *impeller* jenis terbuka. Masing-masing jenis *impeller* akan dijelaskan sebagai berikut:

1. *Impeller* Tertutup

Sudu-sudu ditutup oleh dua buah dinding yang merupakan satu kesatuan, digunakan untuk memompa zat cair yang bersih atau sedikit mengandung kotoran. *Impeller* tertutup dapat dilihat pada Gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 *Impeller* tertutup
(<http://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-pompa-centrifugal/>)

2. *Impeller* Setengah Terbuka

Impeller jenis ini terbuka di sebelah sisi masuk (depan) dan tertutup di sebelah belakang. Digunakan untuk memompa zat cair yang mengandung

sedikit kotoran, misalnya air yang bercampur pasir. *Impeller* setengah terbuka ditunjukkan pada Gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5 *Impeller* setengah terbuka
(<http://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-pompa-centrifugal/>)

3. *Impeller* Terbuka

Impeller jenis ini tidak ada dindingnya di depan ataupun di belakang, bagian belakang ada sedikit dinding yang disisakan untuk memperkuat sudu-sudu. Jenis ini banyak digunakan untuk memompa zat cair yang banyak mengandung kotoran yang volumenya lebih besar dari butiran pasir. *Impeller* terbuka ditunjukkan pada Gambar 2.6 dibawah ini.



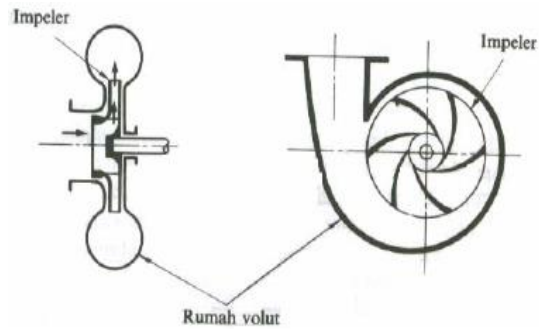
Gambar 2.6 *Impeller* terbuka
(<http://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-pompa-centrifugal/>)

c. Klasifikasi Menurut Bentuk Rumah

Pompa sentrifugal memiliki beberapa bentuk rumah diantaranya adalah pompa volut, pompa difuser, dan pompa aliran campur jenis volut. Masing-masing jenis pompa ini akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Pompa Volut

Sebuah pompa sentrifugal dimana zat cair dari *impeller* secara langsung dibawak kerumah volut. Pompa volut ditunjukkan pada Gambar 2.7 dibawah ini.

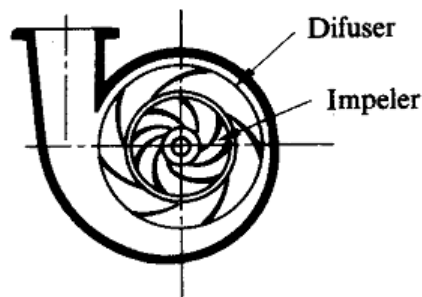


Gambar 2.7 Pompa volut
(Sularso, 2000)

2. Pompa Difuser

Sebuah pompa sentrifugal yang dilengkapi dengan sudu difuser dikelilingi luar impellernya. Kontruksi bagian-bagian lain pompa ini adalah sama dengan pompa volut.

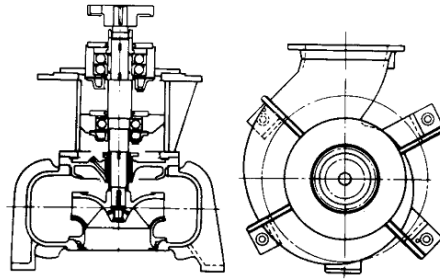
Karena sudu-sudu difuser, disamping memperbaiki efisiensi pompa, juga menambah kokoh rumah, maka kontruksi ini sering dipakai pada pompa besar dengan *head* tinggi. Pompa difuser dapat dilihat seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.8 Pompa diffuser
(Sularso, 2000)

3. Pompa Aliran Campur Jenis Volut

Pompa ini memiliki jenis aliran campur dan sebuah rumah volut. Pada pompa jenis ini tidak dipergunakan sudu-sudu diffuser melainkan dipakai saluran yang lebar untuk mengalirkan zat cair. Adapun *impeller* yang dipergunakan adalah jenis setengah terbuka, yaitu tidak mempunyai tutup depan. Pompa aliran campur jenis volute dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pompa aliran campur jenis volut
(Sularso, 2000)

d. Klasifikasi Menurut Jumlah Tingkat

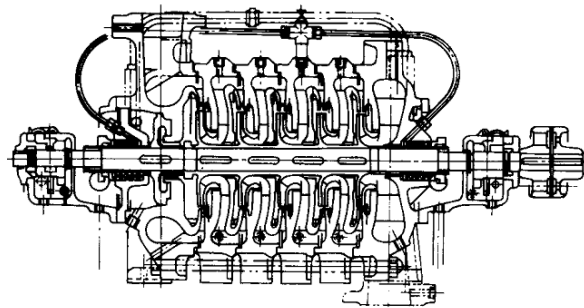
Pompa ini dapat dibedakan menjadi 2, antara lain adalah pompa satu tingkat dan pompa bertingkat banyak. Masing-masing jenis pompa ini akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Pompa Satu Tingkat

Pompa ini hanya mempunyai satu *impeller* seperti pada Gambar 2.8. *Head* total yang ditimbulkan hanya berasal dari satu *impeller* dan relatif rendah.

2. Pompa Bertingkat Banyak

Pompa ini menggunakan beberapa *impeller* yang dipasang secara berderet (seri) pada satu poros. Zat cair yang keluar dari *impeller* pertama dimasukkan ke *impeller* berikutnya dan seterusnya hingga *impeller* yang terakhir. Berikut ini adalah jenis pompa bertingkat banyak seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Pompa bertingkat banyak
(Sularso, 2000)

2.2.2. Metode Perawatan

Perawatan adalah kegiatan untuk memelihara atau menjaga peralatan pabrik dan mengadakan perbaikan atau penggantian yang diperlukan agar mendapatkan suatu keadaan operasi produksi yang memuaskan sesuai dengan apa yang direncanakan. Metode *maintenance*/perawatan ini biasanya dapat dibagi menjadi empat kategori yang berbeda:

a. *Breakdown Maintenance*

Breakdown Maintenance merupakan perbaikan yang dilakukan tanpa adanya rencana terlebih dahulu. Dimana suatu mesin mengalami kegagalan dan memerlukan perbaikan atau penggantian komponen rusak sebelum mesin tersebut benar-benar berhenti beroperasi akibat kegagalan suatu komponen yang mengakibatkan satu sistem secara penuh (Girdhar, 2004).

b. *Preventive Maintenance*

Pemeliharaan ini biasa disebut *calendar based* (terencana), pemeliharaan yang bersifat rutin dan menggunakan teori yang menyebutkan bahwa umur mesin terbatas dan kegagalan akan meningkat seiring meningkatnya umur mesin. Pemeliharaan ini dilakukan untuk mencegah kerusakan komponen dan meminimalisir terjadinya *breakdown maintenance* akibat komponen yang tidak terawat secara baik dan berkala (Girdhar, 2004).

c. *Predictive Maintenance*

Metode ini biasa disebut *condition based maintenance* (CBM) adalah pemeliharaan yang disesuaikan dengan kondisi, pada metode ini membutuhkan teknologi dan keahlian orang untuk menggabungkan semua data diagnostic dengan *performance* yang ada, *maintenance histories*, data operasi dan desain untuk membuat suatu keputusan kapan dilakukan tindakan perawatan pada suatu mesin (Girdhar, 2004).

A. Perkembangan Perawatan

Perawatan disuatu industri telah berkembang dari perawatan *breakdown* ke perawatan *preventive*. Saat ini metode perawatan yang paling populer adalah *predictive maintenance*. Keuntungan *predictive maintenance* bisa diterima di

industri untuk saat ini, karena manfaat yang nyata dalam hal peringatan dini tentang masalah mekanik dan struktur disuatu industri. Metode ini sekarang dipandang sebagai deteksi dan diagnosis alat/mesin yang memiliki dampak tertentu dalam mengurangi biaya pemeliharaan, operasional maupun *downtime*.

Selama bertahun-tahun perawatan *prediktive* telah banyak membantu industri dalam meningkatkan produktivitas, kualitas produk, dan efektivitas produksi. Oleh karena itu perkembangan *maintenance* ini telah membawa umur pakai peralatan lebih lama, tingkat keamanan lebih tinggi, kualitas produk yang lebih baik dan biaya perawatan lebih rendah yang dipicu oleh kegagalan mekanik dari suatu peralatan (Girdhar, 2004).

B. Teknik Perawatan Prediktif

Dari penjelasan perkembangan perawatan diatas dapat disimpulkan bahwa untuk saat ini metode perawatan yang banyak digunakan adalah *predictive maintenance*, karena metode ini memiliki keuntungan tersendiri dan dapat memberikan kontribusi yang tinggi disebuah industri. Ada banyak teknik yang dapat dilakukan dengan metode *predictive maintenance*, antara lain adalah sebagai berikut:

a. *Vibration monitoring*

Tidak diragukan lagi, menurut Girdhar (2004) teknik yang paling efektif untuk mendeteksi cacat/kerusakan mekanik pada suatu mesin yang berputar adalah dengan menggunakan *vibration monitoring*.

b. *Acoustic emission*

Dapat digunakan untuk mendeteksi, mencari dan memantau secara kontinyu adanya keretakan dalam suatu struktur dan jaringan perpipaan.

c. *Oil analysis*

Untuk melihat suatu peralatan melalui minyak pelumas yang digunakan. Minyak pelumas dianalisis dan terjadinya keberadaan suatu partikel tertentu didalam cairan fluida tersebut dapat dikaitkan dengan kondisi kerusakan bantalan dan roda gigi.

d. *Corrosion monitoring*

Pemantauan dengan menggunakan sinyal ultrasonik pada struktur jaringan perpipaan untuk melacak terjadinya keausan korosif.

e. *Thermography*

Thermography digunakan untuk menganalisis peralatan listrik dan mekanik aktif. Metode ini dapat mendeteksi cacat termal atau mekanis di generator, saluran udara, boiler, dan banyak cacat lainnya.

2.2.3. Bantalan (*bearing*)

Bantalan merupakan komponen yang sangat penting untuk mendukung sebuah mesin beroperasi. Fungsi bantalan adalah untuk menahan beban baik berupa beban aksial maupun beban radial dan juga sebagai peredam gesekan yang terjadi antar komponen mesin, dimana hal ini akan banyak mempengaruhi efisiensi kinerja mesin saat beroperasi. Suatu elemen mesin yang menumpu suatu poros pembebanan, akan sangat membutuhkan sebuah bantalan untuk membantu dalam menompang poros, sehingga gerakan-gerakan yang terjadi seperti bolak-balik maupun putaran dapat terjadi secara aman, halus, dan berumur panjang. Apabila sebuah bantalan mengalami ketidak fungsian dengan baik, maka kerusakan juga akan dialami pada komponen-komponen mesin lainnya, sehingga akan berpengaruh juga pada prestasi mesin ketika beroperasi.

Analisis yang baik terhadap pantauan kondisi kerusakan pada komponen bantalan sangat berguna untuk keberlangsungan proses produksi disebuah industri. Dalam hal ini, penerapan jadwal perawatan serta manajemen yang baik terkait diagnosis 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). Seperti pada pompa sentrifugal fungsi dari bantalan ini sangat penting dalam kelancaran putaran poros, sehingga kondisi bantalan ini harus selalu

dipantau agar tetap baik. Kondisi baik yang diberikan oleh pompa sentrifugal ini akan berdampak pada berjalannya suatu proses produksi diindustri yang melibatkan penggunaan pompa sentrifugal.

A. Jenis-Jenis Bantalan

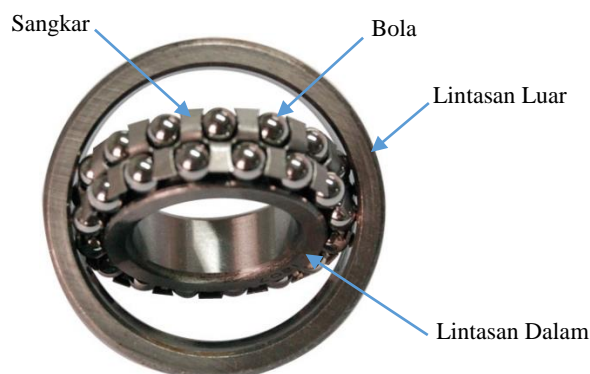
Penggunaan bantalan yang secara luas menimbulkan banyak jenis dan bentuk yang disesuaikan dengan kegunaannya. Sularso dalam bukunya menjelaskan tentang klasifikasi bantalan sebagai berikut:

- a. Klasifikasi berdasarkan gerakan bantalan terhadap poros
 1. Bantalan luncur. Pada bantalan ini terjadi gesekan luncur antara poros dan bantalan karena permukaan poros ditumpu oleh permukaan bantalan dengan perantaraan lapisan pelumas.
 2. 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.
- b. Klasifikasi berdasarkan arah beban terhadap poros
 1. Bantalan radial. Pada bantalan ini arah beban yang ditumpu bantalan adalah tegak lurus sumbu poros.
 2. Bantalan aksial. Pada bantalan ini arah beban bantalan sejajar dengan sumbu poros.
 3. Bantalan gelinding khusus. Bantalan ini dapat menumpu beban yang arahnya sejajar dan tegak lurus sumbu poros.

Bantalan gelinding jenis *Self Aligning Double Row* adalah topik utama dari penelitian ini. Bantalan gelinding menggunakan elemen *rolling* untuk mengatasi gesekan antara dua komponen yang bergerak. Pada pompa sentrifugal bantalan ini sebagai pendukung gerakan putaran poros. Jenis bantalan yang banyak digunakan untuk menumpu poros pompa baik poros impeller maupun motor penggerak adalah bantalan gelinding, bantalan gelinding merupakan salah satu jenis bantalan yang memungkinkan gerakan relatif secara radial pada sumbu gerakannya (Susilo, 2016).

B. Bantalan Bola Jenis *Self Aligning Double Row*

Bantalan bola merupakan bantalan yang banyak menerima beban radial yang besar juga dapat menerima beban aksial yang kecil. Berbeda dengan bantalan rol, dimana pada umumnya hanya mampu menerima beban radial. Bantalan bola jenis *Self Aligning Double Row* mempunyai dua baris yang masing-masing baris mempunyai alur tersendiri pada cincin bagian dalamnya. Pada umumnya terdapat alur bola pada cincin luarnya. Cincin bagian dalamnya mampu bergerak sendiri untuk menyesuaikan posisinya. Kelebihan dari bantalan jenis ini yaitu dapat mengatasi masalah poros yang kurang sebaris. Bantalan bola jenis *Self Aligning Double Row* terdiri dari beberapa komponen elemen didalamnya yaitu: bola (*ball*), lintasan luar (*outer race*), lintasan dalam (*inner race*), sangkar (*cage*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11 Elemen Bantalan Bola Jenis *Self Aligning Double Row*
(<https://indonesian.alibaba.com>)

C. Jenis Cacat Pada Bantalan

Kerusakan atau cacat pada bantalan merupakan hal yang sering terjadi dalam dunia permesinan. Untuk itu perlu dilakukan penanganan yang serius terkait hal ini. Cacat pada bantalan disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah keretakan, keausan, pemasangan, dan penggunaan minyak pelumas yang tidak sesuai. Jika suatu bantalan mengalami kerusakan/cacat maka akan timbul getaran yang disebabkan oleh adanya gaya kontak pada cacat tersebut. Cacat pada bantalan bola dapat dikelompokkan dalam dua kategori yaitu cacat terdistribusi dan cacat lokal. Jenis cacat yang terdistribusi pada bantalan bola diakibatkan oleh lintasan

luar dan lintasan dalam yang tidak bulat, serta bentuk sumbu yang tidak sama (*misalignment*) antara lintasan sumbu luar dan lintasan sumbu dalam, dan juga dimensi bola yang tidak sama. Jenis cacat lokal adalah adanya goresan, keausan, ataupun retak pada lintasan dalam, lintasan luar, sangkar dan bola. Sinyal yang berasal dari adanya cacat lokal ini berupa impuls, yaitu pada saat elemen rotasi bersentuhan dengan cacat lokal tersebut (Susilo, 2008). Getaran akibat cacat lokal pada bantalan tersebut akan menghasilkan frekuensi dari masing-masing elemennya, dan dapat dihitung menggunakan rumus getaran yang akan dijelaskan sebagai berikut:

- a. Cacat lokal yang terjadi pada lintasan luar (*Outer Race*)

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:

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

- b. Cacat lokal yang terjadi pada lintasan dalam (*Inner Race*).

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:

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

- c. Cacat Lokal yang terjadi pada bola (*ball*).

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

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

- d. Cacat Lokal yang terjadi 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:

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

Dimana:

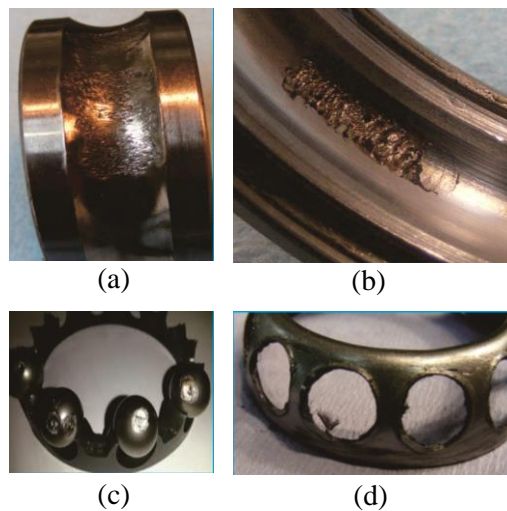
N_b = Jumlah bola (*Number of balls*)

f_r = Frekuensi putaran kerja poros (Hz)

Bd = Diameter bola (*Ball diameter*) mm

Pd = Diameter pitch (*Pitch diameter*) mm

α = Sudut kontak (*Contact angle*) derajat



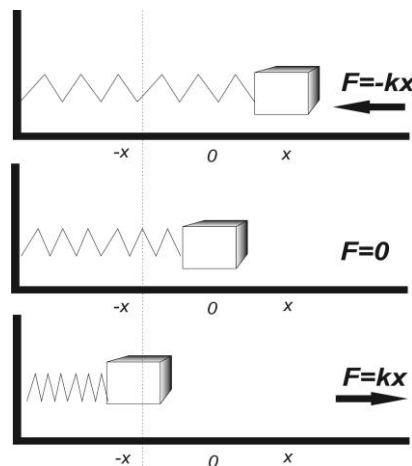
Gambar 2.12 (a) cacat lokal di lintasan dalam pada bantalan bola, (b) cacat lokal di lintasan luar, (c) cacat lokal komponen bola, (d) cacat lokal pada komponen sangkar.

(<http://jadanalysis.co.uk>)

2.2.4. Teori Getaran

Getaran merupakan sebuah gerakan bolak balik atau bisa disebut osilasi. Contoh pergerakan getaran ini dapat di jelaskan dengan ilustrasi pada gambar 2.12 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 bawah dari ilustrasi Gambar 2.12, 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 2.13 Gerakan bolak-balik yang medasari terjadinya sebuah getaran (Girdhar, 2004)

A. Sensor Getaran

Dalam pengukuran getaran terdapat alat atau *transduser* yang digunakan untuk mengukur tingkat getaran yang dihasilkan dari suatu komponen yang dimonitor, hasil dari pengukuran getaran ini yang nantinya akan digunakan sebagai data analisis untuk mengetahui kondisi dari komponen tersebut. Sensor getaran yang dipilih pada penelitian ini untuk mengukur seberapa besar getaran yang dihasilkan dari bantalan bola pompa sentrifugal adalah dengan menggunakan akselerometer. Akselerometer adalah *transduser* yang mampu mengukur percepatan, mendeteksi, dan mengukur suatu getaran (Aji, 2007). Akselerometer ini dipilih karena jika frekuensi yang dihasilkan dari suatu komponen semakin tinggi, maka akan semakin baik untuk menggunakan sensor akselerometer. Dalam penggunaannya accelerometer banyak digunakan dalam aplikasi *condition monitoring*, kondisi dari komponen bantalan atau roda gigi pada saat rusak/cacat akan menghasilkan getaran dan frekuensi yang tinggi, oleh karena itu kondisi

tersebut dapat dipantau menggunakan akselerometer (Girdhar, 2004). Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam penggunaan akselerometer, antara lain adalah:

a. Sensitivitas

Sensitivitas adalah seberapa jauh kepekaan sensor akselerometer terhadap kuantitas yang diukur. Sensor akselerometer yang digunakan untuk memantau getaran biasanya dirancang dengan sensitivitas 100 mV/g. Akan tetapi sensitivitas untuk aplikasi khusus seperti analisis struktur, geofisika, maupun untuk analisis mesin dengan kecepatan sangat rendah juga tersedia (Girdhar, 2004).

b. Rentang Frekuensi (*frequency range*)

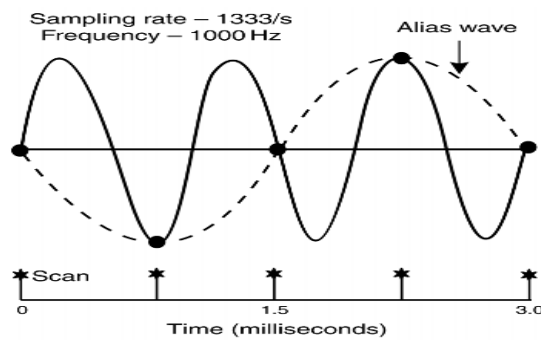
Akselerometer dirancang untuk mengukur getaran pada rentang frekuensi tertentu. Setelah rentang frekuensi dari mesin tertentu diketahui, maka dapat dipilih akselerometer yang sesuai dengan rentang frekuensi tersebut. Biasanya, akselerometer untuk mengukur getaran mesin akan memiliki rentang frekuensi dari 1 atau 2 Hz sampai 8 atau 10 kHz. Akan tetapi akselerometer dengan rentang frekuensi yang lebih tinggi juga tersedia (Girdhar, 2004).

c. *Sampling Rate*

Sampling rate adalah proses pencatatan informasi gelombang amplitudo yang diberikan pada saat perekaman, dan kemudian menghasilkan kurva dari titik rekaman. Jika gelombang digital direkonstruksi harus terlihat mirip dengan gelombang aslinya, maka seberapa cepat kita harus mencatat amplitudonya, atau dengan kata lain mengambil sampel sehingga gelombang digital merupakan replika yang sama dari gelombang analog yang asli.

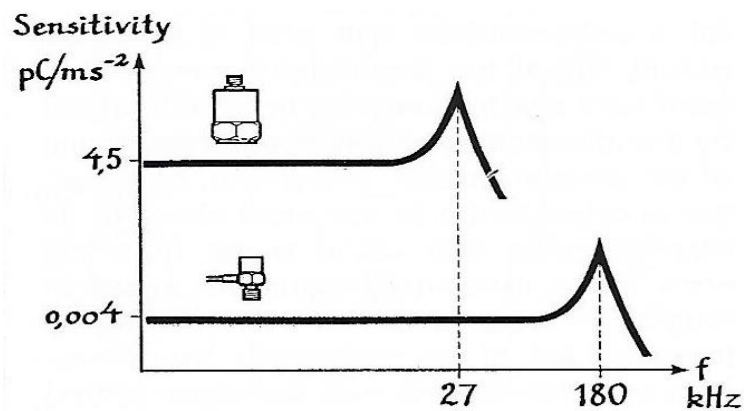
Jawabannya terdapat pada Nyquist teorema sampling, yang mengatakan “jika kita tidak ingin kehilangan informasi yang terkandung dalam sinyal sampel, kita harus sampel pada tingkat frekuensi paling sedikit dua kali dari frekuensi tertinggi yang diminta”. Gambar 2.14 menunjukkan kasus dimana *sampling rate* kurang dari dua kali lipat frekuensi gelombang. Empat interval sampel dikumpulkan dalam 3 miliseconds akan menghasilkan gelombang yang bergaris putus-putus. Gelombang ini adalah frekuensi yang lebih rendah dan sama sekali tidak benar gambaran dari bentuk gelombang yang sebenarnya. Fenomena pembentukan gelombang frekuensi rendah ini karena *undersampling* atau biasa

disebut aliasing. Aliasing adalah pembentukan gelombang frekuensi rendah. Pada proses sampling seperti gambar 2.14 terjadi efek aliasing. Oleh karena itu, biasanya proses analisis telah dilengkapi dengan anti-aliasing filter yang merupakan elektronik low-pass filter yang memungkinkan untuk frekuensi rendah bisa terdeteksi dengan frekuensi yang lebih tinggi (Girdhar, 2004).



Gambar 2.14 Sampling Rate
(Girdhar, 2004)

Hubungan antara ukuran akselerometer terhadap sensitivitas dan frekuensi range dapat dilihat pada gambar 2.15. Ketika akselerometer terkena tingkat akselerasi yang konstan, ia akan memberikan sinyal keluaran konstan melalui rentang frekuensi yang sangat luas sampai mendekati frekuensi resonansi. Secara umum hubungan antara ukuran akselerometer terhadap sensitivitas dan rentang frekuensi ini adalah semakin besar akselerometer yang digunakan maka akan semakin tinggi sensitivitasnya dan semakin kecil rentang frekuensi yang berguna.



Gambar 2.15 Hubungan antara ukuran akselerometer terhadap sensitivitas dan frequency range
(Courrech, 1990)

d. Metode Pemasangan Sensor (*mounting*)

Untuk mendapatkan hasil yang maksimal dalam pengukuran, terdapat beberapa metode yang bisa digunakan dalam pemasangan akselerometer, metode tersebut antara lain adalah:

1. Pemasangan Stud (*mounting studs*)

Metode pemasangan stud adalah metode terbaik untuk aplikasi pemasangan permanen. Metode ini dilakukan dengan cara mengaitkan/menempelkan sensor pada stud. Metode ini memungkinkan *transduser* untuk mengukur getaran dengan cara yang paling ideal dan dapat digunakan dengan sebaik mungkin.

2. Pemasangan dengan *Beeswax*

Metode ini merupakan pemasangan yang cepat. Untuk pengukuran getaran diberbagai lokasi, *beeswax* bisa digunakan dalam metode pemasangan akselerometer. Karena *beeswax* akan menjadi lunak pada saat temperatur tinggi, batas temperatur yang dapat digunakan pada metode ini sekitar 40 °C.

3. Pemasangan dengan Magnet

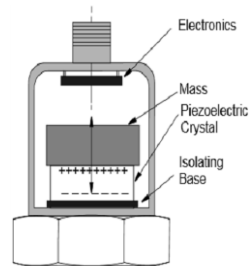
Metode ini merupakan pemasangan akselerometer yang mudah dan cepat dengan menggunakan magnet permanen yang dapat digeser dari satu posisi ke posisi yang lain. Namun metode ini hanya digunakan untuk survei karena rentang frekuensi terbatas sekitar 2,5 kHz. Metode ini terbatas untuk digunakan pada permukaan feromagnetik dan rentang dinamik karena kekuatan magnet yang terbatas. Magnet dalam metode pemasangan ini menyediakan isolasi listrik antara akselerometer dan permukaan yang disatukan, hal ini lah yang akan menimbulkan sinyal getaran dari komponen lainnya.

Akselerometer juga memiliki berbagai jenis dan karakter yang unik, adapun jenis-jenis *transduser* akselerometer ini seperti yang telah dijelaskan dalam penelitiannya Aji (2004) sebagai berikut:

a. *Piezoelectric Accelerometer*

Piezoelectric accelerometer adalah sensor yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengukur tingkat getaran yang terjadi pada pompa sentrifugal seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16. Akselerometer ini terdiri dari kristal dalam kotak

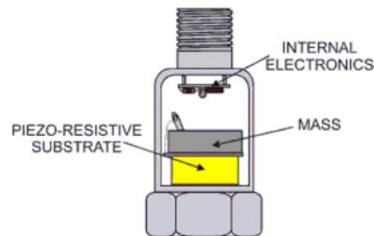
dengan massa yang terpasang ke bodi akselerometranya. Kristal *piezoelectric* yang terdapat pada accelerometer jenis ini mengeluarkan tegangan yang selanjutnya dikonversi menjadi percepatan. Muatan listrik akan timbul pada permukaan keping kristal *piezoelectric* karena adanya tekanan yang bekerja pada permukaanya.



Gambar 2.16 *Piezoelectric accelerometer*
(Vogler, 2015)

b. *Single ended compression accelerometer*

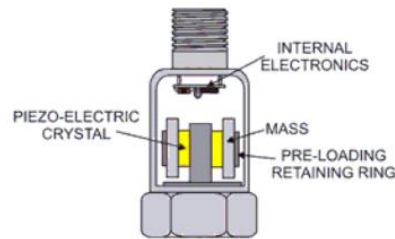
Single ended compression accelerometer sangat rentan terhadap *base strain*, dan untuk menghindari masalah ini kristal diisolasi dari *base* menggunakan sebuah isolasi *washer* atau dengan mengurangi luas *mounting* dimana kristal diletakan pada base. Berikut ini merupakan jenis dari *single ended compression accelerometer* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 *Single ended compression accelerometer*
(Aji, 2007)

c. *Shear type Accelerometer*

Accelerometer ini dirancang untuk aplikasi distorsi *base* karena pengaruh perubahan panas yang terjadi, atau digunakan pada struktur yang fleksibel. Berikut ini jenis dari *shear type accelerometer* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 *Shear type Accelerometer*
(Aji, 2007)

B. Karakteristik Getaran

Sinyal getaran yang didapat dari proses analisis kerusakan mulai dikelompokkan serta dikuatkan sesuai dengan karakter masing-masing bentuknya. Hal ini dilakukan agar informasi dari kerusakan yang ditunjukkan oleh sinyal getaran dapat ditemukan dengan mudah. Ada beberapa karakter getaran yang digunakan untuk mengetahui masalah dari pengukuran getaran mesin yang dimonitor antara lain *displacement*, *velocity*, dan *acceleration*, akan tetapi getaran yang diukur memiliki batas frekuensi untuk memungkinkan menggunakan salah satu dari tiga karakter getaran tersebut yang sesuai dengan tingkat getaran yang diukur.

a. *Displacement*

Displacement (perpindahan) adalah jarak yang ditempuh oleh gerakan bolak balik (getaran) pada suatu periode waktu tertentu. Pengukuran getaran ini hanya dapat mengukur peak to peak *displacement*, yaitu jarak dari positif maksimum ke negatif maksimum.

b. *Velocity*

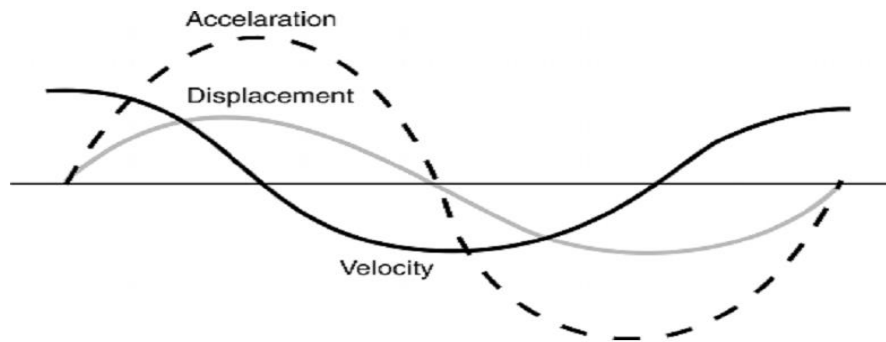
Velocity (kecepatan) adalah perubahan jarak per satuan waktu. Kecepatan ini selalu berubah sepanjang jarak yang ditempuhnya, dimana pada posisi positif maksimum dan negatif maksimum kecepatan adalah nol. Dalam pengukuran getaran kita hanya dapat mengukur kecepatan maksimum atau disebut peak *velocity*.

c. *Acceleration*

Acceleration (percepatan) merupakan kecepatan per satuan waktu. Percepatan selalu berubah sepanjang jarak yang ditempuhnya, dimana

maksimum pada saat displacement mencapai positif maksimum atau mendekati negatif maksimum. Dalam pengukuran getaran kita hanya dapat mengukur percepatan getaran maksimum atau disebut peak acceleration.

Hubungan antara ketiga karakter getaran ini jika digambarkan masing-masing merupakan kurva sinusoidal seperti pada gambar 2.19 berikut ini.



Gambar 2.19 Hubungan sinusoidal dari parameter *displacement*, *velocity*, dan *acceleration*. (Girdhar, 2004).

Getaran juga memiliki tiga tolak ukur yang dijadikan sebagai parameter dari pengukuran getaran. ketiga parameter ini akan dijelaskan sebagai berikut:

d. Amplitudo

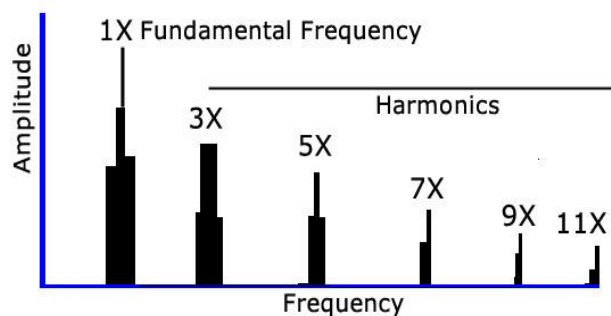
Amplitudo adalah ukuran titik tertinggi dari suatu gelombang. Setiap gelombang memiliki ukuran titik tertinggi yang berbeda beda. Apabila terdapat dua gelombang yang memiliki ukuran panjang gelombang yang sama, salah satunya akan memiliki nilai puncak lebih tinggi atau bahkan lebih rendah dari gelombang lainnya (Girdhar, 2004). Adanya amplitudo memberikan indikasi terkait besarnya nilai getaran pada suatu benda.

e. Frekuensi

Frekuensi adalah banyaknya jumlah siklus gelombang dalam satu putaran waktu. Dimana frekuensi ini sangat berguna dalam menentukan letak permasalahan pada sebuah mesin. Identifikasi terkait sinyal getaran frekuensi dapat mengidentifikasi secara rinci kerusakan komponen dari sebuah mesin (Aji, 2007). Frekuensi dapat dinyatakan dalam satuan hertz (Hz).

f. Harmonik

Harmonik merupakan gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian dari bilangan frekuensi yang sama. Misalnya, frekuensi suatu gelombang sinyal getaran adalah 20 Hz, maka harmonik keduanya adalah gelombang sinyal getaran dengan frekuensi 40 Hz, kemudian harmonik yang ketiga sebesar 60 Hz dan seterusnya. Harmonik dapat dilihat seperti pada Gambar 2.20 dibawah ini.



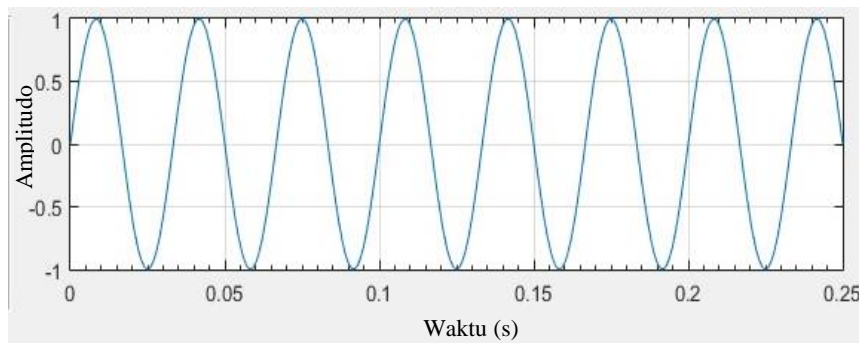
Gambar 2.20 Harmonik
(Girdhar, 2004)

g. Fase

Fase adalah gambaran akhir dari karakteristik suatu getaran pada mesin yang sedang bekerja. Fase merupakan perpindahan posisi dari bagian-bagian yang bergetar secara *relative* untuk menentukan titik awal pada bagian lain yang bergetar (Adista, 2014).

C. Domain Waktu

Pada grafik domain waktu, analisis terkait perubahan simpangan suatu getaran terhadap waktu dapat diamati dengan jelas dan terinci. Bentuk yang ditunjukkan pada domain waktu merupakan wujud dari gelombang sinusoidal (sinus/kosinus), tergantung dari bentuk sinyal gelombang yang masuk diawal. Seperti pada Gambar 2.21 dimana bentuk gelombang ditunjukkan dalam grafik sinus.



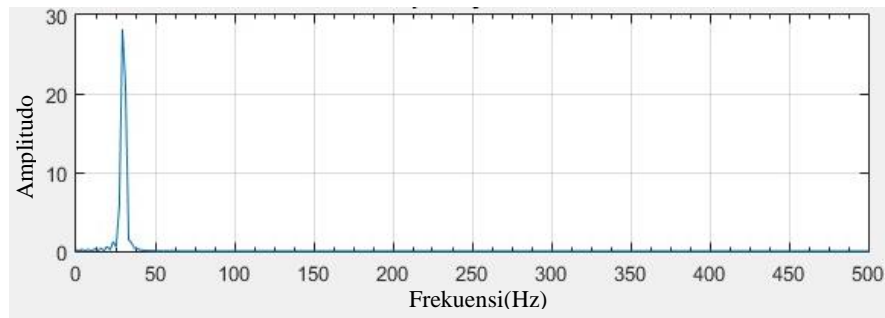
Gambar 2.21 Domain waktu
<https://pemrogramanmatlab.wordpress.com/tag/contoh-program-matlab-sederhana/>, Pamungkas, 2015)

Gambar 2.21 menunjukkan bentuk alamiah dari sinyal getaran dalam bentuk domain waktu 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. Jika dilihat pada grafik domain waktu tersebut indikasi dari kerusakan suatu komponen yang dimonitor tidak dapat terlihat, meskipun sinyal yang didapat dari domain waktu tidak dapat secara langsung menunjukkan gejala kerusakan elemen suatu mesin, serta rumitnya analisis data yang saling berhimpitan, namun data tersebut sangat berguna sebagai dasar dari proses yang akan dilakukan nantinya untuk analisis lebih lanjut (Aji, 2007).

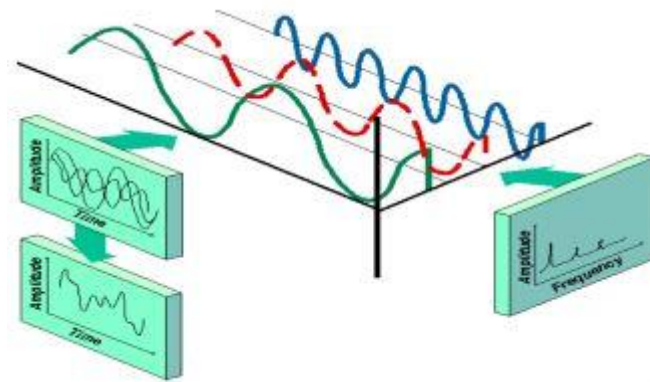
D. Domain Frekuensi

Domain frekuensi adalah wadah lanjutan dari hasil analisis sinyal getaran yang sudah dikonversi dari domain waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.22 (Aji, 2007). Pada domain frekuensi, grafik yang muncul berupa nilai amplitudo yang berbeda beda, tergantung dari besarnya getaran yang dihasilkan oleh mesin. Munculnya amplitudo tersebut disebabkan oleh adanya getaran yang tinggi, sehingga dapat dijadikan indikasi adanya kerusakan pada suatu komponen yang dimonitor.

Adapun perbedaan karakteristik grafik sinyal domain waktu dan domain frekuensi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.23.



Gambar 2.22 Domain Frekuensi
 (<https://pemrogramanmatlab.wordpress.com/tag/contoh-program-matlab-sederhana/>, Pamungkas, 2015)



Gambar 2.23 Perbedaan antara parameter grafik domain waktu dan domain frekuensi
 (www.dinus.ac.id)

Jika dilihat dari Gambar 2.23 diatas dengan mentransformasikan sinyal domain waktu menjadi domain frekuensi, komponen/mesin yang mempengaruhi sinyal getaran tersebut dapat diidentifikasi dan memiliki frekuensi dari beberapa sinyal gelombang yang muncul pada domain waktu.

E. Metode Analisis Getaran

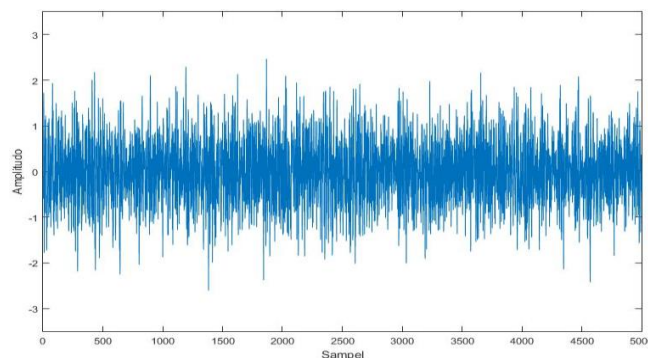
Dalam melakukan analisis getaran, didalamnya terdapat berbagai macam metode pendukung yang mana saling berkaitan satu dengan yang lainnya. Metode-metode tersebut memiliki karakter kelebihan dan kekurangan masing-masing dalam melakukan pengolahan data sinyal getaran yang diterima. Untuk itu, dalam hal ini

penggunaan teknik kombinasi metode-metode tersebut akan sangat menguntungkan dalam proses analisis kerusakan/cacat yang terjadi pada suatu komponen.

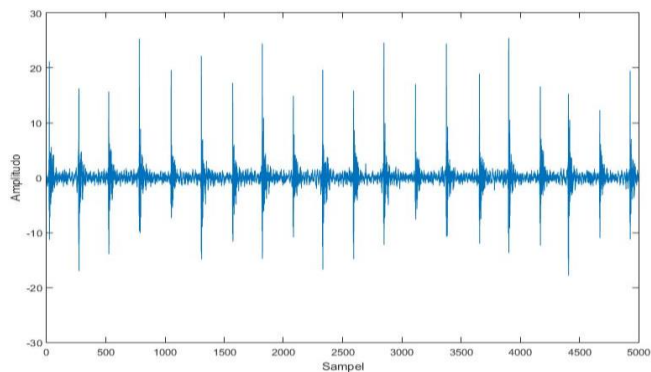
F. Time Domain Analisis

Secara umum, data getaran diperoleh dalam domain waktu sebagai rangkaian data yang menunjukkan perpindahan, kecepatan, atau percepatan. Dalam *time-domain analysis*, terdapat beberapa metode analisis statistik deskriptif yang dapat digunakan sebagai alat untuk mendapatkan informasi data sinyal seperti: kurtosis, *root mean square (RMS) variance*, *mean*, *standard deviation*, *crest factor*, *skewness* (Latuny, 2013). Dengan menggunakan beberapa metode statistik tersebut dapat memberikan informasi mengenai tingkat getaran dan kerusakan pada suatu komponen yang dianalisis.

Hasil plot dari domain waktu pada kondisi bantalan normal dan kondisi bantalan cacat dapat dilihat pada Gambar 2.24 dan 2.25. Gambar 2.24 dan 2.25 merupakan hasil dari data akuisisi yang diperoleh secara langsung dari pengujian bantalan bola pada pompa sentrifugal. Hasil dari plot domain waktu yang ditunjukkan pada Gambar 2.24 menunjukkan bahwa belum adanya kenaikan amplitudo yang signifikan. Hal ini dikarenakan pada plot domain waktu masih menggunakan pengujian bantalan dengan kondisi normal (tanpa cacat). Sedangkan gambaran plot domain waktu pada pengujian bantalan dengan kondisi cacat di lintasan luarnya dapat dilihat pada Gambar 2.25 dibawah ini. Pada domain waktu bantalan cacat ini terlihat adanya kenaikan amplitudo yang tinggi jika dibandingkan pada domain waktu pada bantalan kondisi normal.



Gambar 2.24 Hasil Plot Domain Waktu Pada Kondisi Bantalan Normal (tanpa cacat) dengan Kecepatan Putar 1226 rpm



Gambar 2.25 Hasil Plot Domain Waktu Pada Kondisi Bantalan Cacat di Lintasan Luar Dengan Kecepatan Putar 1226 rpm

G. Frekuensi Domain Analisis

Analisis frekuensi domain adalah merupakan prinsip dari transformasi sinyal, yaitu dengan melakukan transformasi sinyal getaran yang terdapat pada domain waktu ke domain frekuensi. Karena pada time domain analisis untuk mengetahui tingkat kerusakan yang terjadi pada suatu komponen tidak dapat terlihat dengan jelas. Analisis frekuensi domain memberikan kemampuan untuk mengidentifikasi dan mengisolasi frekuensi dari suatu komponen, seperti frekuensi dari bantalan yang memberikan informasi tentang kondisi bantalan tersebut (Latuny, 2013).

Dalam domain frekuensi analisis, sinyal getaran yang sudah melewati proses transformasi, dilakukan proses identifikasi dan isolasi untuk memilih komponen-komponen sinyal yang diperlukan untuk melakukan diagnosis kerusakan pada komponen mesin yang dianalisis. Beberapa metode transformasi sinyal dari time ke frekuensi tersebut adalah *Fast Fourier Transform* (FFT) dan analisis envelope (*envelope analysis*).

a. Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier Transform (FFT) adalah suatu metode yang mentransformasikan sinyal getaran domain waktu menjadi sinyal frekuensi yang kompleks. Metode ini mampu menghitung tingkat kemampuan spektrum dan fase sinyal dari rentang frekuensi nol sampai setengah dari frekuensi sampling.

Banyaknya jumlah sample (frekuensi) yang di ambil dalam satuan waktu (detik) dari signal yang diterima dalam bentuk terus-menerus (*Continuous Signal*) menjadi signal yang terpisah (*Discrete Signal*) atau dalam bahasa sederhana adalah batas frekuensi yang dapat dikirim perdetiknya.

Sinyal FFT ini yang berada dalam sinyal domain waktu diubah menjadi domain frekuensi, sehingga sinyal akan dianalisis dari sinyal yang dihasilkan. *Fast Fourier Transform* (FFT) memiliki persamaan umum sebagai berikut (Kamiel, 2015 dalam Ramirez, 1988):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt, \dots \dots \dots (2.5)$$

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(f) e^{j2\pi ft} dt, \dots \dots \dots (2.6)$$

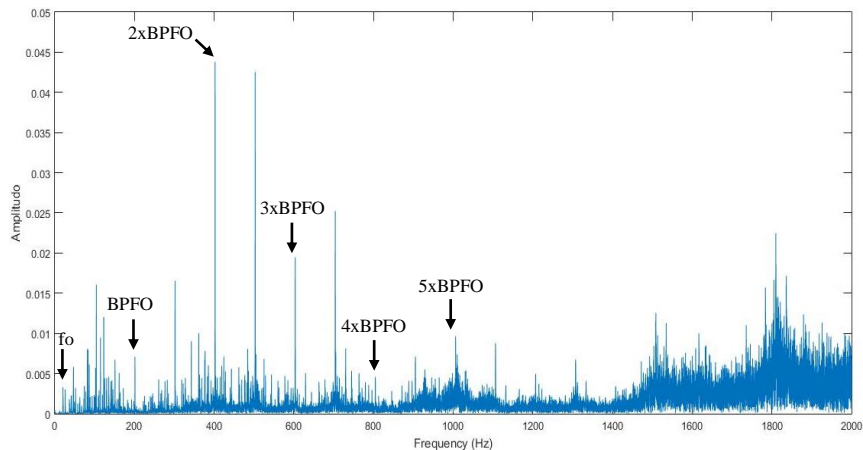
Dimana $X(f)$ merupakan fungsi sinyal dalam frekuensi domain, $X(t)$ merupakan fungsi sinyal dalam domain waktu.

Fast Fourier Transform (FFT) adalah sebuah algoritma untuk mendapatkan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan waktu perhitungan lebih singkat. DFT akan menghasilkan jumlah komputasi sebesar N^2 , sedangkan FFT akan menghasilkan jumlah komputasi sebesar $(N) \log_2(N)$. *Discrete Fourier Transform* (DFT) memiliki persamaan sebagai berikut:

$$X_d(K) = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \dots \dots \dots (2.7)$$

$$x(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{N-1} x_d(k) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \dots \dots \dots (2.8)$$

Metode FFT ini merupakan alat yang efektif untuk mendeteksi kesalahan getaran mesin berputar (Girdhar, 2004). Hasil dari proses FFT menghasilkan sebuah gambar domain frekuensi (spektrum frekuensi) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26 Hasil Plot FFT Pada Kondisi Bantalan Cacat di Lintasan Luar Dengan Kecepatan Putar 1226 rpm

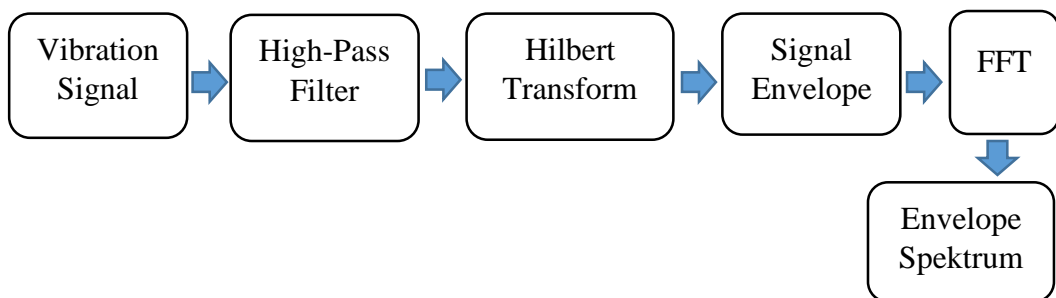
Gambar 2.25 diatas merupakan hasil plot FFT dari proses pengambilan data bantalan pada kondisi cacat dibagian lintasan luar dengan kecepatan putar 1206 rpm. Dari gambar tersebut terdapat data perbandingan antara frekuensi dengan amplitudo. Diketahui nilai frekuensi awal atau disebut juga frekuensi *fundamental* (FO) pompa sebesar 20.1 Hz. Nilai frekuensi *Fundamental* ini muncul secara alami (sebanding) dengan nilai putaran poros sebesar 1226 rpm. Nilai dari *Ball Pass Frequency Outer Race* (BPFO) juga muncul sampai dengan 5 kali harmonik, namun dari kelima harmonik BPFO ini amplitudo yang muncul tercampur dengan frekuensi dari komponen lainnya, bahkan frekuensi yang dihasilkan dari komponen lainnya itu memiliki amplitudo yang lebih tinggi, hal ini tentu akan berpengaruh terhadap proses analisis data. Inilah salah satu kekurangan dari metode *Fast Fourier Transform* (FFT) yang tidak dapat menghilangkan frekuensi dan amplitudo selain frekuensi dari cacat bantalan.

b. Analisis Envelope

Analisis envelope (*envelope analysis*) adalah sebuah teknik pemrosesan sinyal atau juga dikenal sebagai demodulasi amplitudo. Metode ini merupakan metode yang khusus digunakan pada analisis kerusakan pada bantalan dan *gearboxe*, dimana metode ini fokus pada wilayah spektrum yang memiliki frekuensi tinggi, dengan filter yang digunakan adalah *high-pass filter* (Girdhar, 2004).

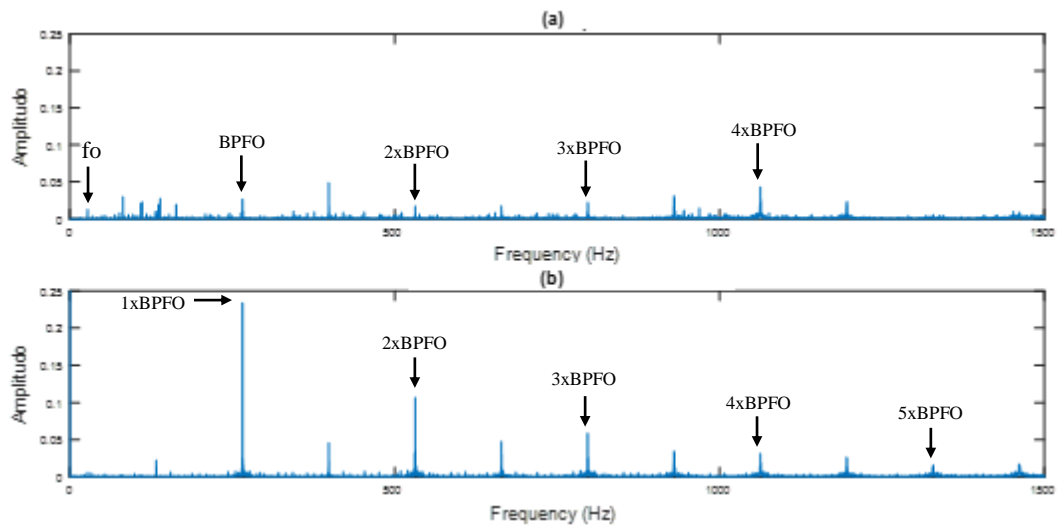
High-pass filter akan menyaring frekuensi-frekuensi yang tinggi dan menghilangkan frekuensi yang rendah. Menghilangkan peak rendah terlebih dahulu, agar mempermudah proses pembacaan sinyal data frekuensi. Karena pada umumnya data frekuensi yang tidak dilakukan proses penyaringan atau filtrasi, memiliki spektrum yang bergerombol dan rumit, dimana hal ini akan mempersulit proses analisis data (Girdhar, 2004).

Urutan pengolahan data yang terlibat dalam teknik ini ditunjukkan pada Gambar 2.7. Sinyal getaran dalam domain waktu pertama kali disaring menggunakan *high-pass filter*, pada *high-pass filter* ini sinyal akan disaring (atau diperbaiki), dan sinyal yang telah disaring menggunakan *high-pass filter* akan ditransformasikan menggunakan *hilbert transform* dan menghasilkan sinyal envelope, selanjutnya dihitung menggunakan FFT sehingga menghasilkan bentuk akhir yaitu spektrum envelope (Tan dan Leong, 2008).



Gambar 2.27 Proses analisis envelope
(Tan dan Leong, 2008)

Hasil dari proses analisis envelope dapat ditampilkan dalam bentuk spektrum envelope seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.28 (b), sedangkan yang menggunakan analisis spektrum frekuensi FFT dapat dilihat pada Gambar 2.28 (a). Kedua gambar tersebut diambil dalam satu kondisi bantalan dengan kecepatan putar yang sama. Sehingga dapat dijadikan perbandingan antara hasil plot spektrum frekuensi dengan hasil plot spektrum envelope.

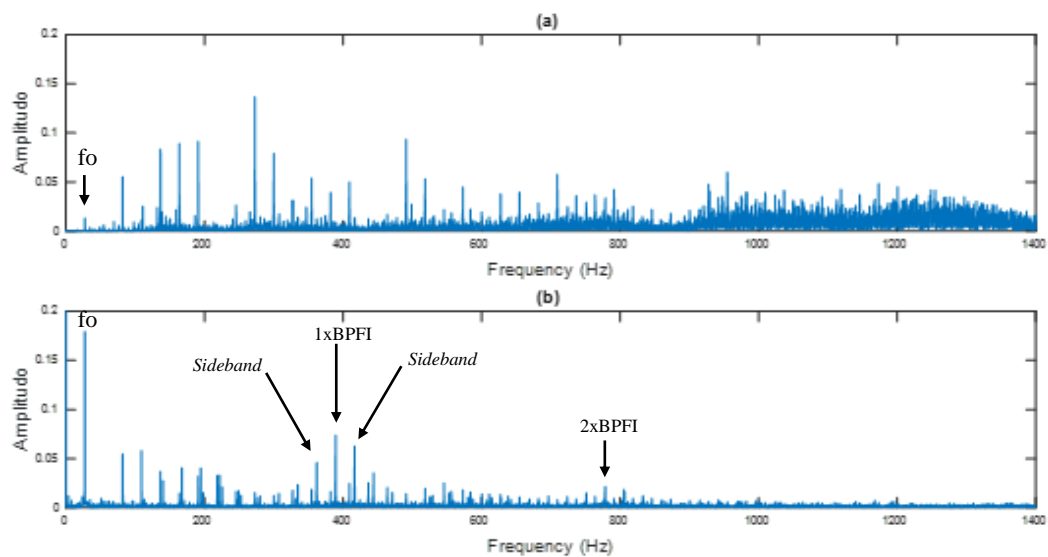


Gambar 2.28 (a) Hasil Plot Spektrum Frekuensi Pada Kecepatan Poros 1638 rpm, (b) Hasil Plot Spektrum Envelope Pada Kecepatan Poros 1638 rpm.

Analisis envelope seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.28 (b) adalah teknik yang banyak digunakan untuk mendeteksi cacat pada bantalan (*bearing*) dan roda gigi (*gearbox*). Frekuensi dengan amplitudo tertinggi yang ditunjukkan pada spektrum envelope merupakan frekuensi yang berasal dari bantalan cacat di bagian lintasan luar atau *Ball Pass Frequency Outer Race* (BPFO). Nilai 1xBPFO jika dilihat pada hasil plot spektrum envelope memiliki amplitudo yang tinggi jika dibandingkan dengan hasil plot spektrum frekuensi. Pada spektrum envelope terlihat tidak adanya frekuensi yang lebih besar yang berasal dari komponen lainnya, hal ini dikarenakan sinyal dari hasil pengukuran telah disaring (*filter*) menggunakan *high pass filter*. Sedangkan analisis spektrum frekuensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.28 (a) frekuensi dari bantalan cacat dibagian lintasan luar dapat terlihat juga, namun amplitudonya dominan tercampur dengan frekuensi dari komponen lain. Hal ini tentu akan mempersulit proses analisis cacat yang terjadi pada bantalan bola pada pompa sentrifugal.

Berbeda dengan hasil plot spektrum frekuensi pada kondisi bantalan cacat dibagian lintasan dalam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.29 (a), amplitudo yang muncul hanya berasal dari *fundamental* (fo) poros pompa saja, sedangkan amplitudo pada frekuensi cacat bantalannya tidak dapat terlihat sama sekali. Hal ini dipengaruhi oleh banyaknya *noise* dan amplitudo yang lebih tinggi yang dihasilkan

dari komponen lain. Sehingga pada hasil plot spektrum frekuensi cacat bantalan bola dibagian lintasan dalam sulit untuk dideteksi. Dengan menggunakan hasil plot spektrum envelope seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.29 (b) amplitudo pada frekuensi cacat bantalan dapat terlihat lebih jelas. Namun pada hasil plot ini memiliki perbedaan jika dibandingkan dengan hasil plot spektrum envelope pada kondisi cacat dibagian lintasan dalam.



Gambar 2.29 (a) Hasil Plot Spektrum Frekuensi Pada Kecepatan Poros 1638 rpm, (b) Hasil Plot Spektrum Envelope Pada Kecepatan Poros 1638 rpm.

Pada hasil plot spektrum envelope diatas dapat dilihat bahwa amplitudo pada frekuensi cacat bantalan terlihat dengan 2 harmoniknya diikuti dengan munculnya amplitudo pada sisi sebelah kiri maupun sebelah kanannya atau disebut juga dengan *sideband*. *Sideband* merupakan ciri khas dari hasil plot spektrum envelope kondisi cacat dibagian lintasan dalam. *sideband* akan muncul dengan sendirinya pada saat bantalan berputar memasuki area *loading zone*, ketika memasuki area *loading zone* amplitudonya mulai naik namun sedikit, ketika sampai kepalang bawah maka amplitudo yang muncul akan semakin tinggi. Hal ini akan menggambarkan bentuk sinyal yang muncul pada domain waktu kondisi bantalan cacat dibagian lintasan dalam berbentuk amplitudo modulasi (AM). Sehingga gambaran pada hasil FFT modulasi amplitudo ini akan memunculkan *sideband* pada sisi sebelah kiri dan kanan frekuensi cacat bantalan tersebut pada spektrum envelope seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.29 (b).