

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Setelah peneliti melakukan telaah terhadap beberapa penelitian yang sudah ada, berikut adalah beberapa penelitian yang memiliki keterkaitan dengan peneliti yang sebelumnya dilakukan tentang metode deteksi kerusakan bantalan bola berbasis sinyal getaran.

Maladzi dkk (2017) melakukan penelitian tentang kerusakan bantalan gelinding pada bagian *inner race*, *outer race*, *ball*, dan *cage*. Metode yang digunakan adalah metode envelope. Dalam penelitian ini kecepatan motor yang digunakan ada tiga variasi yaitu 900 rpm, 1200 rpm, dan 1500 rpm. Hasil kerusakan yang didapatkan dari hasil perhitungan *Bearing Fundamental Frequency* (BFF) adalah pada kecepatan 900 rpm pada BPFO 53,58 Hz, BPFI 81,45 Hz, FTF 6,4 Hz, dan BSF 34,83 Hz, untuk kecepatan 1200 rpm pada BPFO 71,44 Hz, BPFI 108,6 Hz, FTF 8,04 Hz dan BSF 46,44 Hz, dan untuk kecepatan 1500 rpm pada BPFO 89,3 Hz, BPFI 135,75 Hz, FTF 10,05 Hz dan BSF 58,05 Hz.

Kamiel dkk (2017) meneliti tentang pengukuran getaran bantalan bola pada pompa sentrifugal dengan tiga buah kondisi yaitu kondisi normal, cacat lintasan luar, dan cacat lintasan dalam menggunakan analisis spektrum dan analisis *envelope*. Dalam penelitian ini putaran poros yang digunakan bervariasi dari 1200 rpm, 1600 rpm, 2000 rpm, dan 2400 rpm. Pada kecepatan poros 1200 rpm spektrum-spektrum dari bantalan normal tidak menunjukkan keberadaan *peak* amplitudo pada frekuensi cacat. Akan tetapi *peak* amplitudo terlihat pada spektrum frekuensi dan *envelope* yang berasal dari cacat lintasan luar. Namun pada spektrum frekuensi hanya terlihat pada 2x BPFO dan 3x BPFO, sedangkan pada spektrum *envelope* cacat bantalan lintasan luar terlihat jelas mulai 1x BPFO sampai 6x BPFO. Untuk kecepatan 1600 rpm *peak* amplitudo pada spektrum frekuensi terlihat dari 1x BPFO sampai 4x BPFO, sedangkan untuk spektrum *envelope* *peak* amplitudo terlihat dari 1x BPFO sampai 5x BPFO. Untuk kecepatan 2000 rpm dan 2400 rpm menunjukkan bahwa spektrum dari cacat bantalan lintasan luar *peak* amplitudo lebih tinggi dan

jelas pada frekuensi BPFO. Untuk cacat bantalan lintasan dalam pada kecepatan poros 1200 rpm menunjukkan spektrum envelope di 1x BPFI sebesar 293,1 Hz dan 2x BPFI sebesar 586,0 Hz beserta *side band*-nya di kanan kiri. Pada kecepatan poros 1600 rpm spektrum frekuensi menunjukkan *noise* yang sangat tinggi sehingga mengganggu proses analisis, sedangkan pada spektrum envelope terlihat pada 1x BPFI sebesar 389,3 Hz dan 2x BPFI sebesar 778,5 Hz dan beserta *side band*-nya, sedangkan pada putaran poros pompa 2000 rpm dan 2400 rpm spektrum frekuensi *noise* semakin tidak terlihat sehingga proses identifikasi sulit, akan tetapi pada spektrum envelope hanya terlihat 1x BPFI di harmonik ke-2 dengan hasil sebesar 482,99 Hz dan 579,30 Hz.

Setyawan dan Suryadi (2018) melakukan penelitian tentang kerusakan *spherical roller bearing* menggunakan analisis spektrum pada bagian bantalan lintasan luar, bantalan lintasan dalam dan bantalan pada bola. Ada tiga buah jenis pengukuran yang dipakai yaitu pengukuran horizontal, vertikal, dan aksial, untuk bantalan yang dipakai ada dua model SKF-23138CC dan SKF-23032CC. Pada pengukuran horizontal untuk model bantalan SKF-23138CC rusak pada bagian bola timbul pada harmonik 1x BSF, 3x BSF, 6x BSF, 9x BSF, dan 12x BSF. Rusak bantalan bagian lintasan dalam harmonik yang timbul pada 1x BPFI, 2x BPFI, 3x BPFI, 4x BPFI, dan 6x BPFI. Untuk pengukuran vertikal rusak pada bagian bola harmonik yang timbul pada 1x BSF, 3x BSF, BSF Rpm, 9x BSF, dan 12x BSF. Untuk rusak pada bagian lintasan dalam harmonik yang timbul pada 1x BPFI, 2x BPFI, 3x BPFI, dan 4x BPFI. Adapun pengukuran aksial pada kerusakan bagian bola harmonik yang timbul pada 1x, 3x, 6x, 9x, dan 12x BSF. Untuk kerusakan bantalan lintasan dalam pada pengukuran aksial harmonik yang timbul pada 1x, 2x dan 3x BPFI. Pada bantalan model SKF-23032CC kerusakan pada bagian lintasan luar pada pengukuran horizontal harmonik yang timbul pada 1x, 2x, 3x, 4x, 6x, dan 7x BPFO. Untuk pengukuran vertikal harmonik yang timbul pada 1x, 2x, 4x, 5x, dan 8x BPFO, dan untuk pengukuran aksial harmonik yang timbul pada 1x, 2x, 3x, 4x, 5x, 6x, 7x, dan 8x BPFO.

Sukendi dkk (2015) meneliti tentang kerusakan pada bearing dengan analisa karakteristik getaran dan melakukan analisa hubungan velocity dengan

variasi kecepatan putaran mulai dari 400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm dan 1200 rpm, dan melakukan analisa frekuensi domain dan dapat diperoleh dengan menggunakan Fast Fourier Transform (FFT). Bantalan rusak no.1 pada bagian bola terjadi pada frekuensi 167,7667 Hz atau pada (5x BSF), untuk kerusakan bantalan no.2 pada bagian lintasan luar terjadi pada frekuensi 200,833 Hz atau (4x BPFO), kerusakan bantalan no.3 pada bagian lintasan luar dengan frekuensi 200,5667 Hz atau (4x BPFO) akibat cacat dari bola (6x BPFO) dan kerusakan pada cage, kerusakan bantalan no.4 pada bagian bantalan lintasan dalam pada frekuensi 167,7667 Hz atau (2x BPFI) dan pada bagian bolanya (5x BPFI).

Dari penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa sinyal getaran maupun sinyal suara dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan bantalan dari masing-masing tipe frekuensi yang berbeda. Analisis sinyal dari suara lebih sulit dari sinyal getaran karena sinyal suara rentan terhadap gangguan dari suara luar maupun dari suara pantulan.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Fan* (Kipas)

Fan (kipas) merupakan sebuah alat yang digunakan untuk menghasilkan aliran fluida yang berupa udara. *Fan* banyak digunakan dimana saja contohnya seperti dirumah, tempat umum, industri dan diotomotif. *Fan* di industri banyak digunakan untuk pendingin ruangan dan sebagai pendingin mesin yang sedang beroperasi. *Fan* biasanya terdiri dari beberapa komponen yaitu, *blade* (bilah), casing, motor listrik, bantalan, dan poros. Apabila *fan* digunakan terus menerus tanpa henti akan menyebabkan komponen dari *fan* panas dan aus. Oleh karena itu *fan* harus dirawat dengan baik agar komponennya tidak terjadi cacat atau rusak yang parah.

Fan dapat digolongkan menjadi dua jenis yaitu *fan aksial* dan *fan sentrifugal* berikut adalah penjelasannya:

A. *Fan Aksial* (Kipas Aksial)

Fan aksial adalah jenis *fan* yang menggerakkan aliran udaranya sepanjang arah sumbu *fan* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Cara kerja jenis *fan aksial* ini seperti impeler pada pesawat terbang. *Blade* (bilah) pada *fan* menghasilkan daya angkat aerodinamis yang dapat menekan aliran udara. *Fan* jenis ini sering digunakan di industri karena bentuknya yang kompak, harganya murah, dan ringan.



Gambar 2.1 Kipas Aksial

(Sumber: <https://www.aircontrolindustries.com/products/industrial-fans/axial-fans/>)

Fan aksial sering digunakan dalam aplikasi pembuangan dengan ukuran partikel udara yang kecil contohnya seperti debu, asap, dan uap. *Fan aksial* juga juga berguna daam aplikasi ventilasi yang membutuhkan kemampuan untuk menghasilkan aliran udara balik. Walaupun *fan* ini biasanya dirancang untuk menghasilkan aliran dalam satu arah, *fan* ini juga dapat beroperasi dalam arah berlawanan. Karakteristik tersebut berguna ketika ruang mungkin memerlukan udara segar yang harus disediakan (Benson, 2013). *Fan aksial* memiliki 3 jenis *fan* utama menurut arah alirannya yaitu *propeller fan*, *tubeaxial fan*, dan *vaneaxial fan*. Penjelasan dari ketiga *fan* tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *Propeller Fan* (kipas baling-baling)

Fan jenis *propeller* mampu menghasilkan laju aliran udara yang tinggi pada tekanan yang rendah. Karena *fan* ini tidak menghasilkan banyak tekanan. *Fan*

ini biasanya tidak dikombinasikan dengan saluran udara yang luas. *Fan* jenis ini cenderung memiliki efisiensi yang relatif rendah, tetapi harganya murah dan memiliki konstruksi sederhana. Karena memiliki efisiensi yang rendah *fan* ini cenderung relatif berisik. Kebutuhan daya kipas ini akan berkurang apabila ada peningkatan aliran udara. *Fan* jenis ini sering digunakan dalam aplikasi ventilasi pada atap (Benson, 2013). Berikut adalah gambar dari *propeller fan*.



Gambar 2.2 Propeller Fan

(Sumber: WWW.TCF.COM)

2. Tubeaxial Fan

Fan tubeaxial sering digunakan dalam aplikasi pembuangan karena *fan* jenis ini dapat membuat tekanan yang cukup untuk mengurangi rugi-rugi saluran yang relatif menghemat uang. Sama seperti fan baling-baling, fan tubeaxial juga memiliki daerah ketidakstabilan yang harus dihindari. *Fan tubeaxial* dapat terhubung langsung ke sebuah motor atau didorong melalui konfigurasi *belt*. Karena kecepatan operasi motor yang tinggi, *fan tubeaxial* biasanya menggunakan belt drive untuk mencapai kecepatan *fan* dibawah 1100 putaran per menit (Benson 2013). Berikut adalah gambar dari *fan tubeaxial*.



Gambar 2.3 Tubeaxial Fan

(Sumber: <http://www.aerovent.com/products/tubeaxial-fans>)

3. Vaneaxial Fan

Seperti *fan* aksial lainnya, *fan vaneaxial* mampu menghasilkan aliran dalam arah terbalik yang juga dapat digunakan dalam aplikasi ventilasi. Namun aplikasi tersebut masih memerlukan pasokan udara segar dan melakukan penghilangan udara yang terkontaminasi. *Fan vaneaxial* ini sangat efisien ketika dilengkapi dengan blade airfoil dan dirancang dengan jarak kecil. Efisien yang dapat dicapai oleh fan vaneaxial yaitu hingga 85 persen. Fan jenis ini sering terhubung langsung ke poros motor tanpa ada perantaranya. Berikut adalah gambar dari *fan vaneaxial*.



Gambar 2.4 *Fan Vaneaxial*

(Sumber: <http://www.aerovent.com/products/vaneaxial-fans>)

2.2.2 Metode Perawatan

Perawatan (maintenance) merupakan kegiatan untuk menjaga atau memelihara peralatan pabrik dan mengadakan perbaikan atau penggantian yang diperlukan agar mendapatkan suatu keadaan operasi produksi yang maksimal dan memuaskan sesuai dengan apa yang direncanakan. Metode perawatan dapat dibagi menjadi tiga kategori yaitu:

1. *Breakdown Maintenance*

Perawatan jenis ini adalah perawatan atau perbaikan yang dilakukan tanpa terencana atau secara mendadak. Dimana suatu mesin mengalami kegagalan atau kerusakan dan tidak berfungsi secara normal akibat adanya suatu kerusakan

sehingga perlu adanya perbaikan atau penggantian komponen mesin yang rusak (Paresh & Scheffer, 2004).

2. *Preventive Maintenance*

Perawatan jenis ini adalah perawatan atau pemeliharaan secara rutin yang terencana. Pemeliharaan ini menggunakan teori yang menyebutkan bahwa umur mesin terbatas dan kegagalan akan meningkat seiring bertambahnya umur mesin. (Paresh & Scheffer, 2004).

3. *Predictive Maintenance*

Perawatan ini sering disebut *condition based maintenance* (CBM) yaitu perawatan atau pemeliharaan yang disesuaikan dengan kondisi. Perawatan ini membutuhkan teknologi dan keahlian orang untuk menggabungkan semua data diagnostik pada suatu mesin (Paresh & Scheffer, 2004).

A. Teknik Perawatan Prediktif

Dari penjelasan perkembangan perawatan diatas dapat disimpulkan bahwa untuk saat ini metode perawatan yang banyak adalah *predictive maintenance*, karena metode ini memiliki keuntungan sendiri dan dapat memberikan kontribusi yang tinggi disuatu industri. Ada banyak teknik yang dapat dilakukan dengan metode ini, anantara lain yaitu:

1. *Vibration monitoring*

Teknik jenis ini merupakan teknik yang ampuh dan efektif dalam mendeteksi cacat atau kerusakan mekanik pada suatu mesin yang berputar.

2. *Acoustic emission*

Teknik jenis ini dapat digunakan untuk mencari, mendeteksi, dan memantau secara kontinu adanya keretakan dalam suatu struktur dan jaringan dalam perpipaan.

3. *Oil analysis*

Teknik jenis ini dapat digunakan untuk melihat suatu peralatan melalui minyak pelumas yang digunakan. Minyak pelumas tersebut dianalisis dan apabila terdapat keberadaan suatu partikel tertentu didalam cairan fluida tersebut maka dapat dikaitkan dengan kondisi kerusakan yang dialami oleh bantalan dan roda gigi.

4. *Corrossion moitoring*

Teknik jenis ini dapat digunakan untuk melakukan pemantauan dengan menggunakan sinyal ultrasonik pada struktur jaringan perpipaan untuk melacak terjadinya keausan korosif.

5. *Thermography*

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

2.2.3 Bantalan (*Bearing*)

Bantalan merupakan salah satu komponen dari elemen mesin yang penting karena untuk mendukung sebuah mesin saat beroperasi. Fungsi dari bantalan ialah, untuk menjaga poros agar tetap dalam tumpuannya. Fungsi lain dari bantalan sebagai peredam gesekan yang terjadi antara komponen mesin dimana hal ini akan banyak mempengaruhi efisiensi kinerja dari mesin tersebut saat beroperasi. Apabila sebuah bantalan mengalami kerusakan maka kerusakan juga akan dialami pada komponen mesin lainnya, sehingga akan berpengaruh pada kinerja mesin pada saat beroperasi. Gesekan yang timbul akibat dari gaya berlawanan yang terjadi antara satu komponen dengan komponen lainnya, sehingga gesekan yang terjadi akan sangat berpengaruh pada ketahanan sebuah komponen mesin. Dalam hal ini, gaya gesekan yang terjadi pada komponen poros berputar diatasi dengan bantalan.

Analisis yang baik terhadap pantauan kondisi cacat pada komponen bantalan, sangat berguna untuk keberlangsungan proses produksi sebuah industri. Dalam hal ini jadwal perawatan serta manajemen yang baik terkait diagnose cacat pada bantalan, merupakan suatu hal yang menguntungkan untuk perusahaan. Karena dampak dari cacat komponen mesin akan sangat mengganggu proses berjalanya produksi. Ketika terganggunya produksi, maka pendapatan sebuah perusahaan pun akan terganggu. Untuk itu manajemen perawatan menjadi hal yang penting bagi sebuah perusahaan sebagai usaha pencegahan. Adapun dampak lainnya memengaruhi keselamatan pekerja di perusahaan itu (Latuny, 2013). Seperti pada fan industri fungsi dari sebuah bantalan ini sangat penting dalam kelancaran putaran

poros, maka kondisi bantalan ini harus selalu dipantau agar keadaannya tetap baik. Kondisi baik yang diberikan oleh fan industri akan berdampak baik pada proses berjalannya produksi diindustri yang melibatkan penggunaan fan industri.

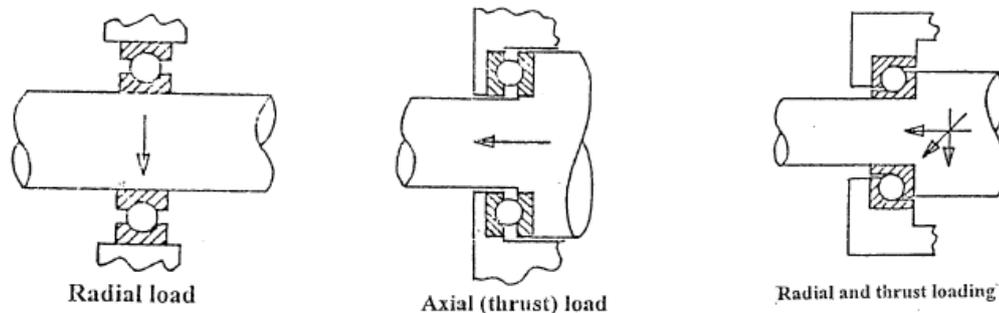
2.2.4 Jenis-Jenis Bantalan

Penggunaan bantalan secara luas menimbulkan banyak jenis dan bentuk yang disesuaikan dengan kebutuhan dan kegunaannya, berikut ini adalah klasifikasi bantalan:

a. Berdasarkan arah bebannya bantalan terhadap poros diklasifikasikan dalam 3 jenis yaitu:

1. Bantalan radial / *journal bearing*: bantalan yang menahan beban pada arah radial.
2. Bantalan aksial / *thrust bearing*: bantalan yang menahan beban pada arah aksial.
3. Bantalan kombinasi: bantalan yang mampu menahan kombinasi beban pada arah aksial dan arah radial.

Berikut adalah gambar arah beban pada bearing:

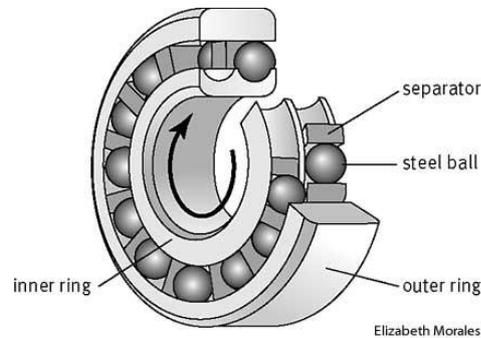


Gambar 2.5 Arah Beban Bantalan
(Negara, 2018)

b. Berdasarkan mekanisme dan konstruksi mengatasi gesekan, bantalan dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu bantalan gelinding (*roller bearing*) dan bantalan peluncur (*slider bearing*).

1. Bantalan gelinding adalah bantalan yang menggunakan elemen *rolling* untuk mengatasi gesekan antara dua komponen yang bergerak. Diantara kedua permukaan ditempatkan elemen gelinding seperti misalnya taper, bola, rol, dan

lainnya. Kontak gelinding terjadi antara elemen ini dengan komponen yang lainnya, hal ini disebabkan tidak ada pergerakan relative pada permukaan kontak. Contoh model roller bearing ditunjukkan pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Bantalan Gelinding

Sumber (<https://student.unud.ac.id/elgaprayoga/news/1346>)

2. Bantalan luncur disebut bantalan *slider bearing* atau *plain bearing* menggunakan mekanisme *sliding*, dimana dua buah permukaan komponen mesin saling bergerak relatif. Diantara kedua permukaan terdapat pelumas yang berfungsi untuk mengurangi gesekan antara kedua bagian permukaan. Bantalan luncur untuk beban arah radial disebut dengan *journal bearing* dan untuk beban arah aksial disebut dengan *thrust bearing*. Contoh model bantalan luncur ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Bantalan Luncur

(Sugiyarto, 2011)

Bantalan gelinding jenis *Self Aligning Double Row* merupakan topik utama dari penelitian ini. Bantalan gelinding yang menggunakan elemen *rolling* untuk mengatasi gesekan antara dua komponen yang bergerak. Pada prototipe fan industri

bantalan ini sebagai pendukung gerakan putaran poros. Jenis bantalan yang banyak digunakan untuk menumpu poros pada fan industri dan pada poros-poros mesin lainnya adalah bantalan gelinding.

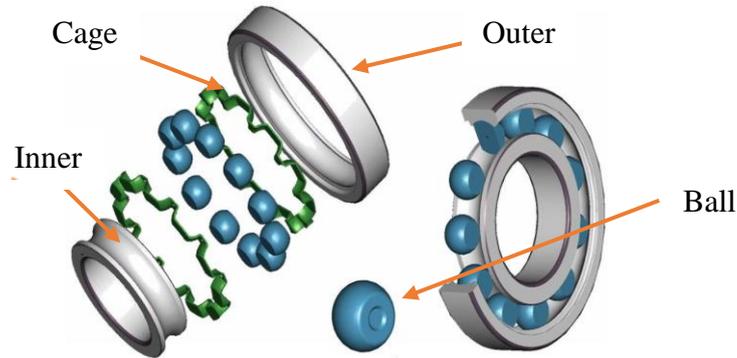
2.2.5 Bantalan Bola Jenis *Self Aligning Double Row*

Bantalan bola adalah 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 barisnya mempunyai alur tersendiri pada bagian lintasan dalamnya. Pada umumnya terdapat alur bola pada lintasan luarnya. Lintasan bagian dalamnya mampu bergerak sendiri untuk menyesuaikan posisinya. Kelebihan dari bantalan jenis ini terdiri dari beberapa beberapa bagian komponen elemen didalamnya yaitu: bola (ball), sangkar (cage), lintasan dalam (inner), dan lintasan luar (outer).



Gambar 2.8 Bantalan Bola Jenis *Self Aligning Double Row*

Bantalan bola adalah bantalan gelinding yang menggunakan bola-bola baja sebagai media yang bergesekan antara komponen yang bergerak. Pada gambar 2.9 ditunjukkan komponen bantalan bola.



Gambar 2.9 Bagian Komponen Bantalan
(Susilo, 2008)

- Inner race* : Bantalan bagian lintasan dalam.
Outer race : Bantalan bagian lintasan luar.
Ball : Penahan gaya tekanan dan gesekan bantalan.
Cage : Merupakan sangkar atau tempat bola bantalan.

2.2.6 Jenis Cacat Pada Bantalan Bola

Cacat pada bantalan merupakan hal yang sering terjadi dalam dunia pemesinan. Untuk itu perlu untuk dilakukan penanganan yang lebih terkait hal ini. Para peneliti sudah melakukan klasifikasi kerusakan bantalan bola dengan definisi menggunakan rumus-rumus getaran, sehingga mempermudah analisis untuk menemukan kerusakan pada elemen mesin secara detail. Dengan adanya metode yang handal dalam menganalisis getaran, maka akan mengurangi kontak manusia dengan mesin secara langsung, sehingga tingkat keselamatan dalam proses perawatan akan menjadi lebih terjaga dengan baik. Keuntungan lainnya yang dihasilkan dari metode baru ialah, semakin menghindari ketidakakuratan hasil pengamatan yang disebabkan oleh panca indra yang minim dalam membedakan getaran yang bervariasi serta memiliki kecepatan yang tinggi. Ada beberapa jenis cacat yang terjadi pada bantalan bola, bagian komponen yang cacat bias dilihat pada gambar berikut ini.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2.10 (a). Cacat pada bagian bola; (b). Cacat pada bagian sangkar (cage);
(c). Cacat pada bagian lintasan dalam; (d). Cacat pada bagian lintasan luar.

(Zulfaini, 2011)

Cacat yang terdapat pada komponen bantalan tersebut dapat didefinisikan menggunakan rumus getaran, yang akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Cacat lokal yang terjadi pada bagian lintasan luar.

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

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

Dimana:

Nb = Jumlah bola (*Number of ball*).

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

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

Pd = Diameter pitch (*Pitch diameter*) mm.

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

2. Cacat lokal yang terjadi pada bagian lintasan dalam.

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

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

3. Cacat local yang terjadi pada bagian bola.

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

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

4. Cacat lokal yang terjadi pada bagian sangkar (*Cage*).

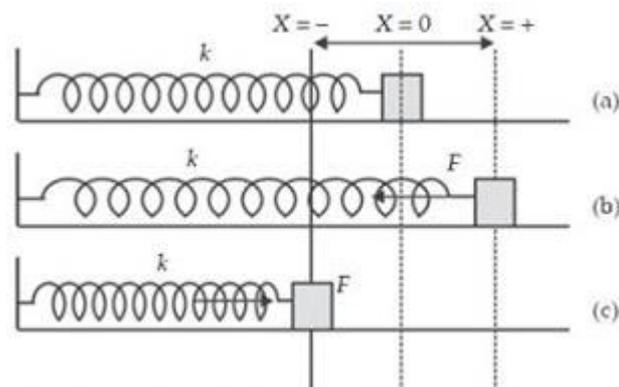
Cacat yang muncul pada sangkar (*Cage*), munculnya dengan adanya frekuensi yang disebut dengan *Fundamental Train Frequency* (FTF). Besarnya FTF dapat ditunjukkan dalam persamaan sebagai berikut:

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

2.2.7 Teori Getaran

Getaran merupakan sebuah gerak bolak balik atau biasa disebut osilasi. Pergerakan getaran tersebut dapat di jelaskan dengan ilustrasi pada gambar 2.11, yang menunjukkan sebuah pegas terpasang pada sebuah benda, kemudian dibebankan dengan sebuah benda yang memiliki berat masa 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 2.11, 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 juga beban memiliki gaya $F = kx$ yang akan dilepaskan kembali ke posisi semula pada 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 2.11 Gerakan bolak-balik yang mendasari terjadinya getaran
(Rutherford, 2015)

2.2.8 Sinyal Getaran

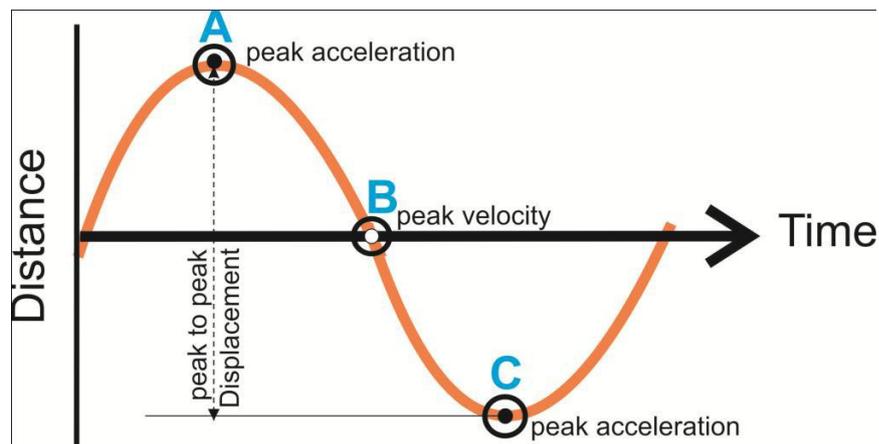
Sinyal merupakan besaran fisik yang nilai dan variasi nilainya terhadap waktu, memuat informasi-informasi tertentu. Bentuk pada umumnya berupa keadaan, laju perubahan, level bentuk, serta frekuensi. Analisis terkait data-data getaran mesin mengandung banyak informasi yang dibutuhkan untuk menentukan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

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 didapatkan, agar proses analisis sinyal getaran yang dimunculkan dari elemen mesin yang mengalami kerusakan akan mudah dibaca.

2.2.9 Karakter Getaran

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



Gambar 2.12 Karakter Getaran

1. Acceleration

Percepatan getaran dapat dikatakan sebagai perubahan laju aliran dari kecepatan getaran. Jika dilihat pada gambar 2.12, 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 2.12, titik B merupakan kondisi dimana getaran memiliki kecepatan maksimal. Sedangkan pada titik A dan C, getaran berada pada kondisi nol.

3. Displacement

Perpindahan getaran merupakan suatu jarak yang ditempuh dari satu puncak ke puncak lainnya. Pada gambar 2.12, jarak puncak A ke puncak B merupakan ilustrasi dari perpindahan sebuah getaran.

2.2.10 Sensor Getaran

Dalam pengukuran getaran terdapat alat atau *transducer* 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 komponen tersebut. Sensor getaran yang dipilih pada penelitian ini untuk mengukur seberapa besar getaran yang dihasilkan dari bantalan bola pada prototipe fan industri menggunakan akselerometer. Akselerometer merupakan *transducer* yang mampu mengukur suatu getaran, dan pendeteksi percepatan (Aji, 2007). Akselerometer memiliki beberapa karakteristik yang dijadikan sebagai acuan dalam memilih sensor yang digunakan, berikut adalah karakteristik tersebut:

1. Sensitivitas

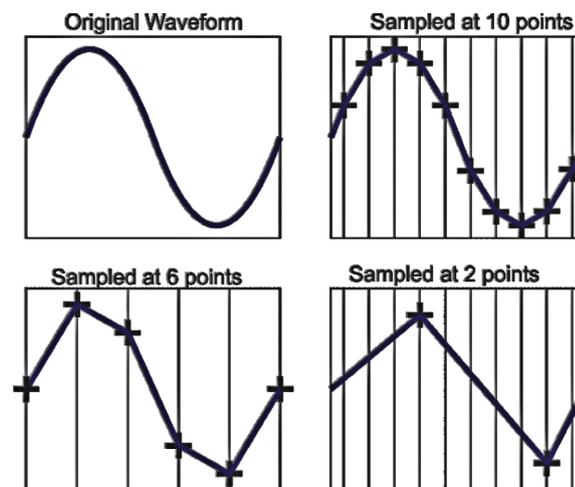
Sensitivitas adalah seberapa jauh kepekaan sensor akselerometer terhadap kuantitas yang diukur. Sensor akselerometer yang digunakan untuk mendeteksi getaran biasanya dirancang dengan sensitivitas 100mV/g .

2. Rentang Frekuensi

Rentang frekuensi dirancang untuk mengukur suatu getaran pada rentang frekuensi tertentu. Setelah rentang frekuensi dari mesin itu telah diketahui, maka dapat dipilih akselerometer yang sesuai dengan rentang frekuensi tersebut. Pada umumnya, rentang frekuensi pada akselerometer berkisar antara 1 Hz sampai dengan 10 Hz.

3. *Sampling Rate*

Sampling rate merupakan jumlah sample yang direkam dalam satu detik. Semakin besar *sampling rate*-nya yang digunakan dalam merekam sebuah data getaran, maka sinyal getaran yang ditampilkan akan sesuai dengan aslinya. Ilustrasi *sampling rate* dapat dilihat pada gambar 2.13. Jika dilihat pada gambar 2.13, bentuk dari gelombang original *waveform* berbeda dengan yang lainnya dikarenakan bentuk *waveform* sesuai berdasarkan jumlah *sampling rate* yang diberikan. Semakin rendah *sampling rate* yang diberikan maka bentuk dari gelombang tersebut akan jauh berbeda dari bentuk aslinya.



Gambar 2.13 *Sampling Rate*

(Sumber: <https://labtronix.co.uk/drupal/content/about-oscilloscope-sample-rate>)

Jika bentuk dari gelombang getaran tidak sesuai dengan bentuk aslinya, maka kejadian tersebut dinamakan aliasing. Contohnya yang terjadi pada sample 6 dan 2.

2.2.11 Metode Pemasangan Sensor

Untuk mendapatkan hasil yang maksimal dalam pengukuran, terdapat beberapa metode yang bias digunakan dalam pemasangan sebuah akselerometer, metode tersebut antara yaitu ialah:

1. Pemasangan Stud

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

2. Pemasangan Dengan *Beeswax*

Metode ini merupakan pemasangan yang cepat karena dapat dilakukan untuk pengukuran diberbagai lokasi, *beeswax* dapat digunakan dalam metode pemasangan sensor akselerometer. Karena *beeswax* akan menjadi lunak pada saat temperatur tinggi yaitu batas temperature yang bias digunakan sekitar 40°C.

3. Pemasangan Menggunakan Magnet

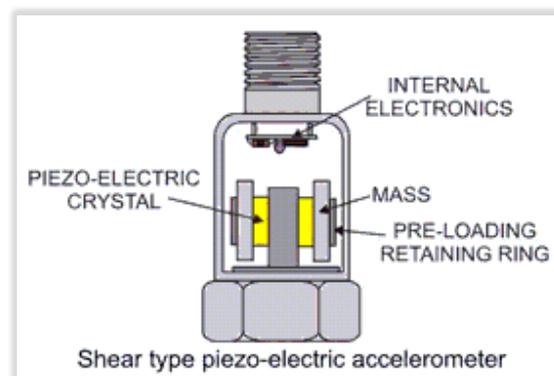
Metode ini adalah metode yang paling mudah dan cepat untuk pemasangan sensor akselerometer yaitu menggunakan magnet permanen yang bias digeser dari satu posisi ke posisi yang lain. Akan tetapi metode ini hanya dilakukan untuk survey karena rentang frekuensi terbatas sekitar 2,5 kHz. Metode ini terbatas 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 yang akan menimbulkan sinyal getaran dari komponen lainnya.

2.2.12 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 akselerometer tersebut ialah:

1. *Shear Type Accelerometer*

Akselerometer ini dirancang untuk aplikasi distorsi *base* karena pengaruh perubahan panas yang terjadi atau digunakan pada struktur yang fleksibel. Berikut adalah jenis dari *shear type accelerometer* seperti pada gambar 2.14.



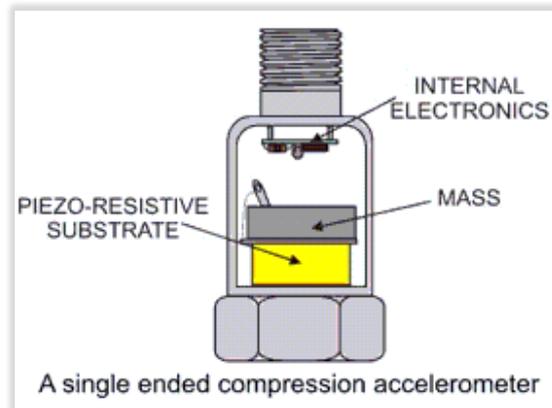
Gambar 2.14 *Shear Type Accelerometer*

(Sumber www.mastec.xo.nz)

2. *Single Ended Compression Accelerometer*

Akselerometer ini 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 adalah gambar dari *single ended compression accelerometer* seperti pada gambar 2.15.

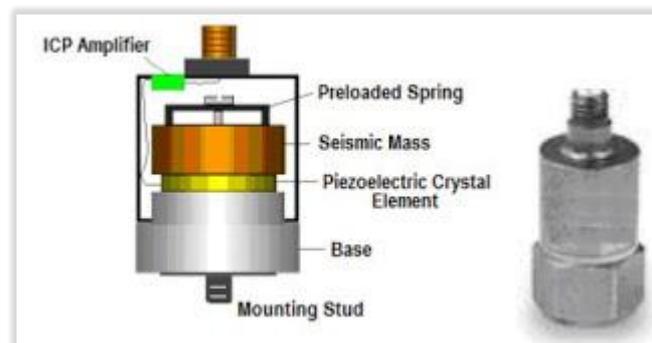


Gambar 2.15 *Single Ended Compression Accelerometer*

(Sumber www.mastec.xo.nz)

3. *Piezoelectric Accelerometer*

Merupakan akselerometer yang memakai *substrate piezo-resistive* pada kristalnya. *Piezo-resistive* memiliki keunggulan dibandingkan dengan *piezo-electric*, yaitu dapat mengukur frekuensi percepatan pada kisaran 0 Hz. Bentuk dari *piezo-resistive accelerometer* ini dapat dilihat pada gambar 2.16.



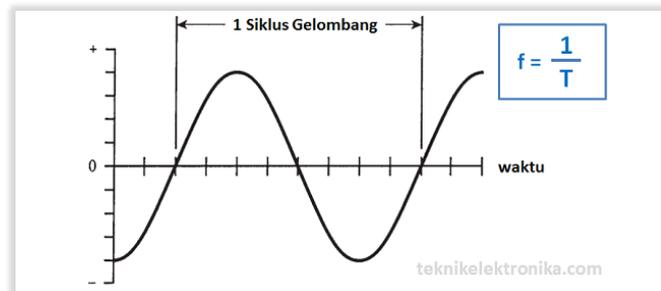
Gambar 2.16 *Piezoelectric Accelerometer*

(Sumber <http://www.info-elektro.com/2017/06/prinsip-kerja-transducer-piezoelectric.html>)

2.2.13 Frekuensi

Frekuensi dapat diartikan sebagai banyaknya jumlah siklus gelombang yang terjadi dalam satu detik, dengan satuan ukuran yang disebut *hertz* (Hz).

Dimana frekuensi ini sangat berguna dalam menentukan permasalahan sebuah mesin. Dapat dilihat pada gambar 2.17 berikut ini.



Gambar 2.17 Siklus Gelombang Frekuensi

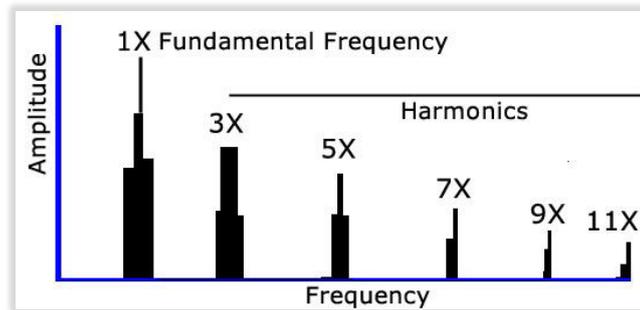
(Sumber <https://teknikelektronika.com/pengertian-frekuensi-cara-menghitung-frekuensi/>)

2.2.14 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 (Ghirdhar, 2004). Adanya suatu amplitudo memberikan tanda bahwa besarnya nilai getaran pada suatu benda.

2.2.15 Harmonik

Harmonik merupakan gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi yang berbeda yang merupakan perkalian dari bilangan frekuensi yang sama. Misalnya, frekuensi suatu gelombang sinyal getaran adalah 15 Hz, maka harmonik keduanya pada gelombang sinyal getaran adalah 30 Hz, begitu pula dengan harmonik ketiga yaitu sebesar 45 Hz dan seterusnya. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19.

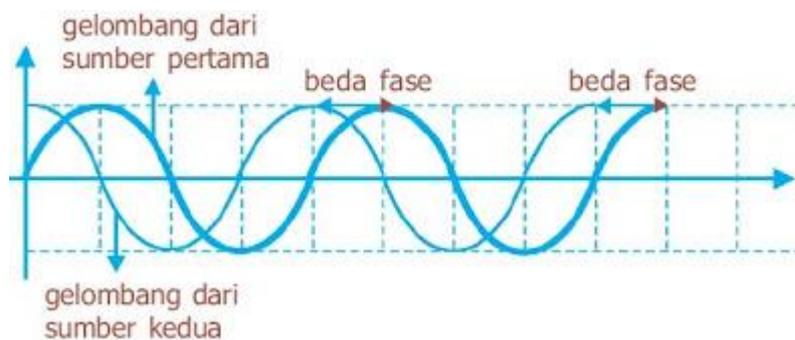


Gambar 2.18 Harmonik

(Girdhar, 2004)

2.2.16 Fase

Fase adalah titik point dalam waktu pada *waveform*, yang menunjukkan ukuran dari derajat sudutnya. Agar lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.19, dimana terdapat dua gelombang yang berbeda yaitu sinus dan cosinus. Masing masing gelombang tersebut memiliki titik awal yang berbeda, sehingga jika ditarik garis lurus tidak sejajar.

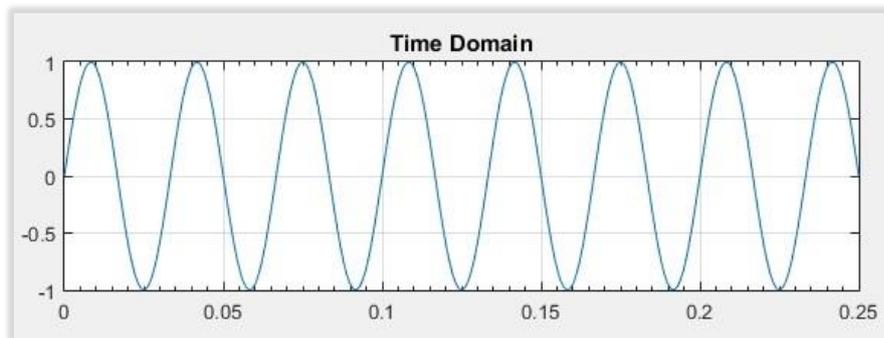


Gambar 2.19 Ilustrasi Fase

(Budiyanto, 2009)

2.2.17 Domain Waktu

Domain waktu merupakan grafik yang menunjukkan bentuk serta ukuran dari sinyal gelombang berdasarkan waktu per detik. Bentuk yang ditunjukkan pada domain waktu merupakan wujud dari gelombang sinus dan cosinus, tergantung dari bentuk masuknya gelombang dari awal. Contohnya seperti pada gambar 2.20 berikut ini.



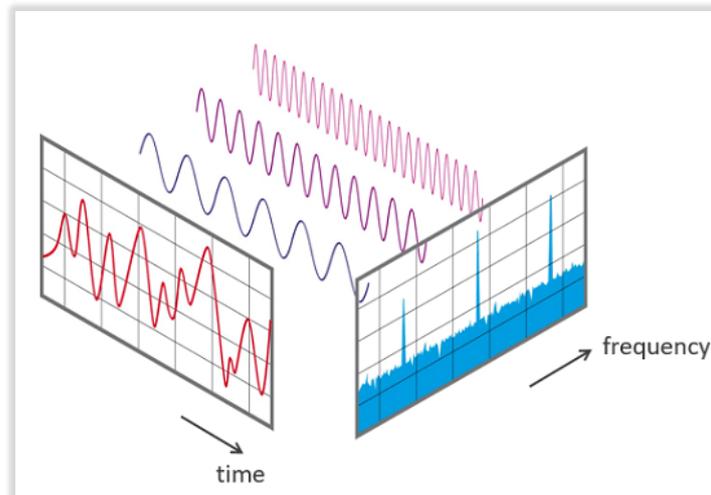
Gambar 2.20 Domain Waktu (*Time Domain*)

(Pamungkas, 2016)

Dari gambar 2.20 yang ditunjukkan oleh domain waktu, menunjukkan bahwa bentuk alamiah dari sinyal getaran yang dihasilkan oleh mesin. Sehingga sinyal ini sangat berguna untuk proses analisis. Meskipun sinyal getaran yang didapat pada domain waktu tidak dapat langsung menunjukkan gejala kerusakan pada elemen mesin, dikarenakan beberapa data yang saling berhimpitan, namun data tersebut sangat berguna sebagai dasar dari proses yang nantinya akan dilakukan untuk analisis lebih lanjut.

2.2.18 Spektrum

Dalam spektrum getaran dipandang berupa amplitudo sebagai fungsi frekuensi, dimana merupakan cara yang baik untuk mengidentifikasi komponen-komponennya (Aji, 2007). Setiap sinyal yang ada pada spektrum dimunculkan dalam grafik berdasarkan ketinggian dari amplitudonya. Pada gambar 2.21 sudut pandang pada spektrum yang melihat berdasarkan ketinggian amplitudo dari masing-masing gelombang yang berbeda. Sehingga dari grafik yang dimunculkan pada spektrum akan semakin mudah dalam proses identifikasi masing-masing gelombang.



Gambar 2.21 Spektrum

(Sumber <https://saintif.com/kehebatan-ilmuwan-indonesia/>)

2.3 Metode Analisis Getaran

Dalam melakukan analisis sebuah 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 penggunaan teknik kombinasi metode-metode tersebut akan sangat menguntungkan dalam proses analisis kerusakan yang terjadi pada komponen elemen mesin.

2.3.1 Time Domain Analysis

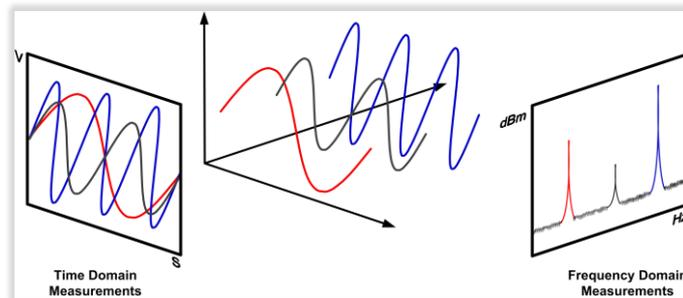
Secara umum data getaran diperoleh dalam domain waktu sebagai rangkaian data yang menunjukkan perpindahan kecepatan atau percepatan. Dalam *time domain* analisis, terdapat beberapa metode analisis statistik deskriptif yang dapat digunakan sebagai alat untuk meapatkan informasi data sinyal seperti, *kurtosis*,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

2.3.2 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 oleh 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 yang mentransformasikan data domain waktu menjadi spektrum.

Fast Furier Transform (FFT) merupakan metode yang mentransformasikan sinyal getaran domain waktu menjadi sinyal frekuensi yang kompleks. Metode ini mampu menghitung tingkat kemampuan spektrum dan fase sinyal dari rentang nol sampai setengah dari frekuensi sampling. 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 Fourire 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 TFD) dengan cepat, dan efisien. Algoritma pada FFT memeriksa ketidak lancaran modulasi frekuensi yang terdapat pada gelombang spektrum, dimana hal ini terjadi ketika sinyal non frekuensi muncul pada sinyal gelombang (Scheffer dan Girdhar, 2004).

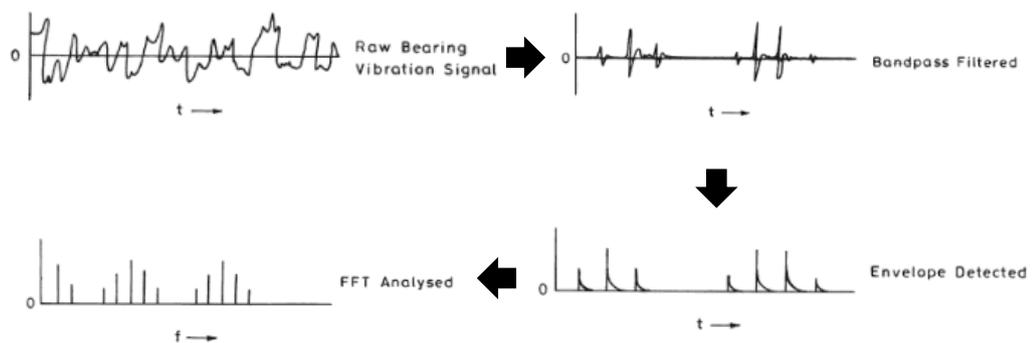
Agar dapat memperjelas proses transformasi dari domain waktu menjadi spektrum menggunakan FFT, dapat dilihat pada gambar 2.17, dimana menunjukan posisi grafik sebagaimana halnya grafik yang dimunculkan pada metode analisis getaran pada umumnya. Jika dari grafik *time domain*, maka terlihat tiga buah gelombang yang berbeda, mulai dari bentuk serta tingginya amplitudo. Sedangkan pada grafik frekuensi domain (spektrum), dapat dilihat bentuk grafik yang menggambarkan tiga buah gelombang sebelumnya (domain waktu) berdasarkan ketinggian masing-masing amplitudonya.



Gambar 2.22 Proses Transformasi Dari Domain Waktu Ke Domain Frekuensi
(Sumber <http://www.eenewsanalog.com/content/signal-chain-basics-56-clock-jitter-demystified%E2%80%9494random-jitter-and-phase-noise>)

2.3.3 Analisis *Envelope*

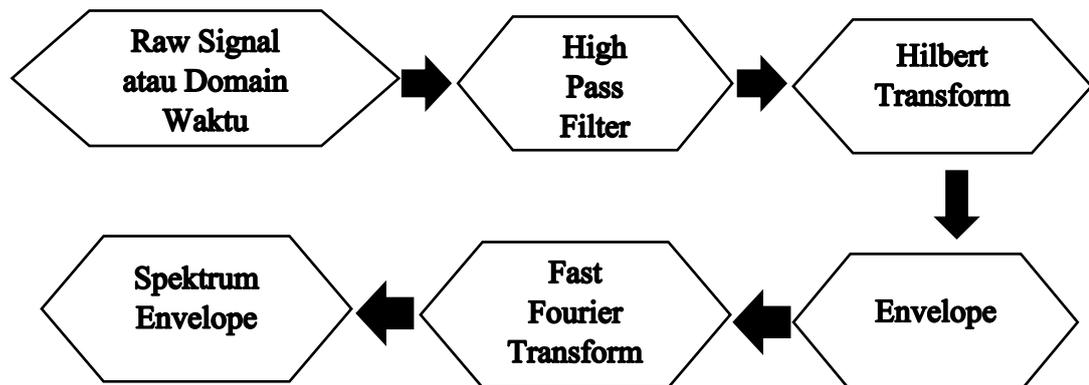
Merupakan metode yang khusus digunakan pada analisis cacat pada bantalan dan *gearboxes*. Metode ini fokus pada wilayah spektrum yang memiliki frekuensi tinggi, dengan filter yang digunakan yaitu *high pass filter* (Scheffer dan Girdhar, 2004). Pada data spektrum, terdapat bermacam-macam frekuensi dari berbagai berbagai sumber sinyal gelombang yang terekam pada sensor *accelerometer*. Tidak hanya frekuensi dari cacat komponen bantalan yang muncul, akan tetapi harmonik dari frekuensi fundamental pun juga muncul diawal grafik. Perlunya dilakukan penyaringan sinyal frekuensi tersebut, karena pada umumnya data frekuensi yang tidak dilakukan proses penyaringan atau filtrasi, mempunyai spektrum yang bergerombol dan rumit, dimana hal ini akan mempersulit proses analisa data. Berikut adalah skema dari envelope.



Gambar 2.23 Skema Envelope

(Tandon, 1999)

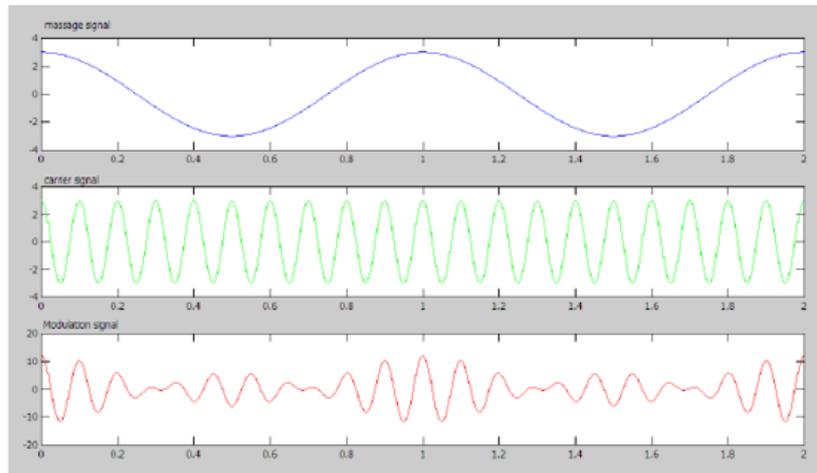
Pada umumnya kemunculan frekuensi fundamental muncul diawal grafik dengan amplitudo yang besar, hal ini biasa terjadi hingga 6x harmonik, diikuti dengan kemunculan frekuensi dari cacat komponen bantalan yang memiliki nilai amplitudo lebih kecil dibandingkan dengan frekuensi fundamental. Dengan adanya teknik *band pass filter* atau *high pass filter* pada analisis *envelope*. Kemunculan harmonik dari frekuensi fundamental dapat dihilangkan. Sehingga frekuensi yang mempunyai amplitudo kecil dapat dimunculkan lebih detail dalam grafik. Seperti yang dilihat pada gambar 2.23, menggambarkan proses analisis *envelope*. Dimulai dengan raw vibration signal yang biasa disebut dengan data mentah berupa domain waktu, kemudian dilanjutkan pada proses penyaringan menggunakan *band pass filter* atau *high pass filter*. Setelah dilakukannya proses penyaringan, dilanjutkan dengan *envelope*, dan diakhiri dengan proses FFT. Data yang dihasilkan dari proses analisis *envelope* ialah data berupa spektrum *envelope*.



Gambar 2.24 Skema Proses Analisa *Envelope*

2.3.4 Amplitudo Modulation

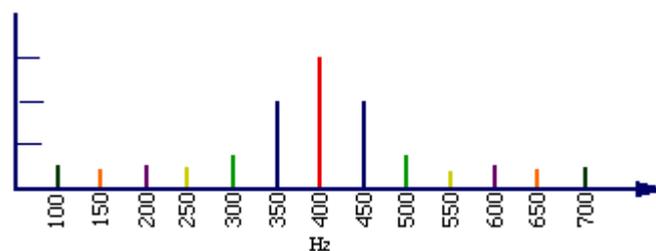
Amplitudo modulasi merupakan pengubah bentuk amplitudo gelombang pembawa sesuai dengan bentuk gelombang informasinya. Umumnya gelombang pembawa dan gelombang informasi yaitu berbentuk gelombang sinusoidal. (Carrier, 1967). Berikut adalah gambar dari amplitudo modulasi.



Gambar 2.25 Amplitudo Modulasi

2.3.5 Side Band

Side band merupakan suatu sinyal yang muncul akibat dari suatu modulasi dan mengambil tempat selebar spektrum frekuensi gelombang informasi yang memodulasi gelombang pembawa. *Side bands* biasanya terjadi pada bantalan bola yang mengalami cacat lintasan dalam (*inner race*). *Side bands* terjadi karena pada saat bantalan bola berputar, posisi bantalan cacat *inner race* ikut berputar sesuai dengan putaran poros. Saat cacat *inner race* pada bantalan bola berputar ke atas, beban yang ditumpu akan semakin ringan (relatif kecil) sehingga amplitudo yang muncul akan semakin rendah. Berbeda saat posisi cacat bantalan *inner race* berputar turun ke bawah, beban yang ditumpu akan semakin besar sehingga menghasilkan nilai amplitudo yang meningkat dan semakin tinggi, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut ini:



Gambar 2.26 Side Band

(Sumber: <http://www.indiana.edu/~emusic/fm/fm.htm>)