

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pemanfaatan energi angin dapat dilakukan dengan menggunakan turbin angin. Dengan turbin angin energi kinetik angin dapat diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan bantuan generator. Pada umumnya turbin angin sering mengalami masalah dikarenakan besarnya kecepatan angin yang diterima. Kerusakan yang sering terjadi pada turbin angin terdapat pada *gear*, *unbalance*, dan kerusakan pada bantalan (*bearing*). Bantalan merupakan salah satu komponen yang berperan sangat penting dalam proses kelancaran putaran poros. Selain itu bantalan juga berfungsi sebagai penumpu dan penahan beban dari poros baik berupa beban aksial maupun radial. Kerusakan cacat bantalan pada umumnya terjadi pada bagian lintasan dalam, lintasan luar, bola dan sangkar. Jika bantalan mengalami kerusakan maka akan mengakibatkan kinerja turbin angin menurun.

Oleh karena itu kondisi bantalan harus selalu diperiksa agar kondisi turbin angin tetap stabil dan dapat bekerja secara optimal. Wahyudi, dkk. (2016) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui tingkat kerusakan dan karakteristik spektrum vibrasi menggunakan bantalan pada kondisi normal, bantalan cacat 30% pada lintasan dalam, bantalan cacat 30% pada lintasan luar, bantalan cacat 30% pada *rolling element*, dan bantalan yang rusak secara alami. Penelitian dilakukan dengan *rig tool* menggunakan bantalan 2205-K-2RS-TVH-C3 pada kecepatan 1500 rpm, sinyal vibrasi diukur menggunakan alat FAG *Detector III*. Selanjutnya dilakukan analisa dengan *trendline software*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bantalan dengan kondisi normal memiliki karakteristik amplitudo *velocity* di bawah 1,80 mm/s dan spektrum vibrasi FFT *velocity* dan *demodulation of acceleration* yang tidak berimpitan dengan garis frekuensi impuls baik BPFI, BPFO dan BSF. Bantalan kondisi cacat 30% pada lintasan dalam menghasilkan amplitudo *velocity* yang lebih tinggi. Bantalan cacat 30% pada lintasan luar dan cacat 30% pada *rolling element* menghasilkan amplitudo *velocity* yang cenderung bervariasi. Bantalan cacat 30% pada lintasan dalam, lintasan luar maupun pada *rolling element* menghasilkan spektrum vibrasi FFT *velocity* dan *demodulation of acceleration* dengan garis puncak frekuensi berimpitan dengan garis frekuensi impuls masing-masing BPFI, BPFO atau BSF.

Penelitian lain juga dilakukan oleh Suhardjono (2005) tentang analisis sinyal getaran pada bantalan bola untuk mengetahui jenis serta tingkat kerusakannya. Pengujian dilakukan pada tiga buah bantalan seri (ASB 6203) pengujian pertama dilakukan menggunakan bantalan dengan kondisi normal, bantalan kedua menggunakan bantalan yang sengaja dirusak pada bagian lintasan luar, lintasan dalam, bola, bantalan ketiga menggunakan bantalan bekas. Pengujian dilakukan pada arah vertikal dan horizontal menggunakan metode analisis domain frekuensi dan domain waktu. Hasil pengujian pada setiap bantalan di bagian lintasan dalam, lintasan luar, bola, sangkar (*cage*), dan bantalan bekas menunjukkan kenaikan nilai amplitudo pada frekuensi masing-masing bantalan. Sinyal getaran untuk cacat pada bola juga terjadi karena benturan secara periodik, tetapi lebih teratur dan amplitudo relatif besar. Namun metode ini memiliki kekurangan yaitu tidak dapat mendeteksi frekuensi rendah yang dapat mengurangi akurasi analisis.

Poddar, dkk. (2013) melakukan penelitian yang berjudul “*Ball Bearing Fault Detection Using Vibration Parameter*”, menganalisa kerusakan bantalan tipe MB ER-10K. Penelitian dilakukan menggunakan 4 jenis bantalan yaitu bantalan cacat pada lintasan dalam, bantalan cacat pada lintasan luar, bantalan cacat pada bola dan bantalan cacat multi jenis (lintasan dalam, lintasan luar dan bola). Pengujian dilakukan pada kecepatan 16,60 Hz untuk setiap kerusakan menggunakan metode FFT. Hasil penelitian didapatkan plot domain frekuensi bantalan dengan cacat lintasan dalam, cacat lintasan luar dan cacat bola menunjukkan amplitudo tinggi pada frekuensi 50,30 Hz menandakan kerusakan pada lintasan dalam, frekuensi 81,00 Hz menandakan kerusakan pada lintasan luar, dan 65,90 Hz menandakan kerusakan pada bola. Selanjutnya hasil eksperimen tersebut dibandingkan dengan hasil perhitungan kalkulasi yaitu BPFO 50,663 Hz, BPF1 82,173 dan BSF 66,134 Hz. Sedangkan pada bagian multi jenis memunculkan semua cacat pada bantalan, menandakan banyaknya cacat pada bantalan uji, terlihat dari plot domain frekuensi yang muncul.

Sukendi, dkk. (2015) dalam jurnal penelitian “Analisa Karakteristik Getaran Dan Deteksi Dini Kerusakan Bantalan”. Penelitian dilakukan menggunakan bantalan jenis *pillow block* NTN UCP 204 DI, menggunakan variasi putar (400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm dan 1200 rpm) tanpa memvariasikan beban. Pengujian dilakukan pada posisi sumbu vertikal, horizontal, axial sedangkan pengolahan data menggunakan *coding* dari program Matlab dengan metode frekuensi domain. Penelitian menggunakan bantalan berjumlah 8 dengan 2 macam kondisi, yaitu 4

bantalan (A, B, C dan D) dengan kondisi normal dan 4 bantalan (1, 2, 3 dan 4) dengan kondisi cacat/rusak. Bantalan no.1 mengalami cacat tunggal pada elemen bola (BSF) dengan frekuensi 167,7667 Hz, Bantalan no.2 mengalami cacat tunggal pada cacat lintasan luar (BPFO) dengan frekuensi 200,833 Hz (4xBPFO). Sedangkan cacat yang terjadi secara multi jenis terjadi pada bantalan cacat no. 3 dan no. 4, dimana bantalan no.3 mengalami cacat pada lintasan luar (BPFO) dengan frekuensi 200,5667 Hz (4xBPFO) akibat cacat dari bola (6xBSF) dan cacat pada sangkar (FTF). Bantalan no.4 mengalami cacat pada lintasan dalam (BPFI) dengan frekuensi 167,7667 Hz (2xBPFI) dan cacat pada elemen bola (5xBSF). Dapat disimpulkan bahwa bantalan pada kondisi normal, akan menghasilkan gelombang yang halus dan tidak terlihat puncak amplitudo pada kisaran frekuensi tinggi. Sedangkan bantalan yang mengalami cacat akan menghasilkan gelombang dengan amplitudo tinggi pada kisaran frekuensi tersebut.

Ashesh, dkk. (2013) melakukan penelitian dengan judul *Fault Detection in Bearing Using Envelope Analysis*, penelitian menggunakan bantalan tipe SKF 6002-2Z. Pengujian dilakukan dengan merusak bantalan pada lintasan luar, lintasan dalam dan bola bantalan. Analisis *envelope* digunakan karena metode ini mampu mendeteksi kerusakan level dini pada bantalan, metode ini mampu menghilangkan frekuensi rendah yang menyebabkan tertutupnya amplitudo. Dari hasil penelitian ditemukan frekuensi kerusakan pada nilai 7.43 Hz pada lintasan luar BPFO, 10.83 Hz pada lintasan dalam BPFI dan 5.70 Hz pada bola bantalan BSF. Proses *high pass filter* yang terdapat pada analisis *envelope* merupakan cara akurat untuk menghilangkan frekuensi-frekuensi rendah yang memiliki amplitudo tinggi pada spektrum. Dengan menghilangkan frekuensi-frekuensi rendah pada spektrum, maka frekuensi tinggi yang memiliki nilai amplitudo yang rendah seperti BPFO, BPFI dan BSF akan mudah terdeteksi.

Dari hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa metode analisis *envelope* lebih unggul dalam mendeteksi kerusakan tahap awal pada bantalan dibandingkan dengan analisis spektrum.

2.2 Dasar Teori

2.2.1. Turbin Angin

Turbin angin pada awalnya dibuat untuk memenuhi kebutuhan para petani dalam melakukan kegiatan seperti irigasi, dan lain-lain. Turbin angin dahulu banyak dibangun di negara-negara eropa yang lebih dikenal dengan *windmill*. Pada saat ini turbin angin lebih banyak

digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Turbin angin merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi gerak yang disebabkan oleh tiupan angin. Energi gerak yang berupa putaran selanjutnya akan diteruskan oleh poros untuk menggerakkan generator sehingga energi gerak berubah menjadi energi listrik.

Cara kerja pembangkit listrik tenaga angin ini terjadi dikarenakan tiupan angin yang memutar baling-baling turbin angin. Prinsip kerja turbin angin merupakan kebalikan dari kipas angin. Kipas angin memanfaatkan energi listrik untuk menghasilkan angin, sedangkan turbin angin digunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Tiupan angin akan memutar sudu turbin, lalu diteruskan untuk memutar generator di bagian belakang kincir angin. Generator berfungsi untuk mengubah energi gerak menjadi energi listrik dengan teori medan elektromagnetik, poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Pada sekeliling poros terdapat stator yang berupa kumparan-kumparan kawat tembaga yang membentuk *loop*. Ketika poros generator berputar maka akan terjadi perubahan tegangan pada stator yang menghasilkan tegangan dan arus listrik.

2.2.1.1. Jenis Turbin Angin

1. Tipe *Horizontal Axis Wind Turbin*

Turbin angin horizontal memiliki generator dan *shaft* rotor pada puncak menara yang mengarah pada arah angin bertiup. Turbin angin jenis ini memiliki *blade* yang berputar pada sumbu vertikal, turbin angin jenis ini kebanyakan dilengkapi dengan *gearbox* yang berfungsi untuk mengubah putaran kincir yang pelan yang diakibatkan oleh tiupan angin yang kecil menjadi lebih cepat sehingga listrik yang dihasilkan dari generator akan tetap stabil. Contoh turbin angin horizontal dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Turbin Angin Horizontal
(Sumber : Nugroho, 2013)

Kekurangan turbin angin horizontal

- a. Membutuhkan konstruksi *tower* yang besar untuk menahan beban *gearbox*, *blade* dan generator.
- b. Membutuhkan sistem pengereman untuk mencegah turbin mengalami kerusakan pada saat mendapat tekanan angin terlalu kencang.
- c. Membutuhkan pengawasan berkala untuk mengarahkan *blade* ke arah angin.

Kelebihan turbin angin horizontal

- a. Ketinggian *tower* mempengaruhi tekanan angin yang diterima sehingga mendapatkan energi yang lebih besar.
- b. Efisiensi lebih tinggi dikarenakan *blade* menghadap tegak lurus terhadap arah angin.

2. Tipe Vertikal Axis Wind Turbin

Turbin angin vertikal memiliki bilah yang memanjang dari atas ke bawah. Turbin angin vertikal rata-rata memiliki ketinggian 100 meter dengan lebar 50 kaki, Dengan sumbu vertikal. generator dan komponen lainnya dapat diletakkan pada permukaan tanah, sehingga *maintanance* lebih mudah. Dibandingkan dengan turbin angin poros horizontal, turbin angin jenis ini memiliki kecepatan yang lambat, sehingga energi angin yang dibutuhkan pun lebih rendah. Contoh turbin angin tipe vertikal dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Turbin Angin Vertikal
(Sumber : Nugroho, 2013)

Kekurangan turbin angin poros vertikal

- a. Jika di bandingkan dengan turbin angin poros horizontal, turbin angin poros vertikal memiliki penurunan efisiensi. Hal ini di sebabkan adanya hambatan tambahan yang dimiliki sebagai pisau memutar ke arah angin.
- b. Memiliki kecepatan putar yang rendah, dikarenakan turbin angin poros vertikal memiliki rotor yang terletak pada permukaan tanah.

Kelebihan turbin angin poros vertikal

- a. Turbin angin vertikal tidak banyak memerlukan perawatan, sehingga akan lebih menghemat biaya.
- b. Turbin angin vertikal membutuhkan kecepatan angin yang rendah sehingga dapat digunakan pada daerah yang memiliki tekanan angin rendah.
- c. Turbin angin vertikal tidak perlu diarahkan ke arah angin.

2.2.1.2. Komponen Utama Turbin Angin

Turbin angin memiliki beberapa komponen agar dapat bekerja secara maksimal serta menghasilkan energi listrik. Contoh komponen pada turbin angin dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Komponen Turbin Angin
(Sumber : Burton, 2011)

a. Rotor

Rotor adalah komponen utama dari sebuah turbin angin yang terlihat dari luar. Rotor mencakup beberapa komponen lainnya, yaitu baling-baling (*blade*) yang dilengkapi sistem pengarah sudut dari sudut baling-baling terhadap arah tiupan angin.

b. Baling-baling (*blade*)

Komponen ini merupakan bagian yang terlihat paling jelas dan menjadi ciri khas dari turbin angin. Fungsi dari baling-baling (*blade*) adalah menerima tekanan angin, dan merubah energi angin menjadi gerakan putar melalui poros atau as. Terdapat berbagai macam bentuk serta ukuran baling-baling pada sebuah turbin. Ukuran dan bentuk tersebut disesuaikan dengan kebutuhan listrik yang akan dihasilkan.

c. Rem (*brake*)

Rem berfungsi untuk mengurangi kecepatan putar baling-baling jika tekanan angin yang diterima terlalu besar. Putaran yang terlalu tinggi akan merusak turbin angin.

d. Poros (*As*)

Poros (*as*) berfungsi sebagai penerus putaran baling-baling yang dihasilkan dari tekanan angin.

e. Roda gigi (*Gearbox*)

Roda gigi juga biasa disebut sebagai *gearbox*, roda gigi merupakan sebuah komponen yang berfungsi untuk merubah kecepatan rotasi dari cepat menjadi lambat atau dari lambat menjadi cepat. Perubahan kecepatan ini disebabkan perbedaan ukuran diameter dari roda gigi yang digunakan.

f. Generator Pembangkit Listrik

Generator listrik atau dinamo yang di pasang pada turbin angin berfungsi untuk mengkonversi energi gerak menjadi energi listrik dikarenakan adanya putaran dari baling-baling yang dihasilkan oleh tiupan angin.

g. Pengungkung Sistem (*Nacelle*)

Nacelle adalah salah satu komponen yang berfungsi sebagai pelindung komponen lain yang berada didalamnya. *Nacelle* pada umumnya terbuat dari bahan komposit yaitu *fiber glass* sebagai bahan utamanya bahan ini dipilih karena kekuatan serta bobotnya yang ringan, serta tahan terhadap kondisi cuaca apapun.

h. Penyangga Turbin Angin

Menara atau *tower* penyangga turbin angin berfungsi sebagai dudukan, sehingga komponen ini memerlukan desain serta bahan yang kuat untuk menghindari terjadinya kecelakaan yang bisa terjadi dikarenakan penyangga tidak kuat menahan beban.

2.2.1.3. Metode Perawatan (*Maintenance*)

Perawatan mesin merupakan hal yang sangat penting pada sebuah industri, hal ini dilakukan demi menghindari kerugian yang bisa saja terjadi akibat kerusakan mesin pada saat beroperasi, untuk menghindari hal tersebut maka perawatan mesin harus dilakukan secara berkala, sistem perawatan mesin terbagi dalam beberapa jenis diantaranya :

a. Breakdown Maintenance

Breakdown maintenance adalah kegiatan perawatan mesin yang dilakukan tanpa terencana yang diakibatkan terjadinya kerusakan mesin secara mendadak pada saat mesin beroperasi, sehingga harus dilakukan perbaikan dan mengganti komponen-komponen yang rusak. Kerusakan biasanya terjadi dikarenakan kurangnya perawatan pada mesin.

b. Preventive Maintenance

Preventive maintenance adalah perawatan yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan secara mendadak, atau perawatan yang sudah direncanakan, perawatan ini biasanya berupa perbaikan kecil, pelumasan, penggantian komponen yang perlu diganti agar mesin dapat bekerja secara optimal pada saat beroperasi.

c. Predictive Maintenance

Predictive Maintenance adalah perawatan yang hampir sama dengan *preventive maintenance* hanya saja *predictive maintenance* tidak dilakukan secara teratur. Perawatan jenis ini dilakukan untuk mengantisipasi kerusakan pada tahap awal mesin sebelum terjadi kerusakan total. *Predictive maintenance* membutuhkan biaya lebih kecil jika dibandingkan dengan *preventive maintenance* maupun *breakdown maintenance*. *Predictive maintenance* dilakukan berdasarkan hasil monitoring kondisi mesin dan juga dari hasil analisis kerusakan.

2.2.1.4. Condition Based Maintenance (CBM)

Condition based maintenance digunakan untuk melakukan perawatan peralatan yang benar pada saat yang tepat, CBM didasarkan oleh pemakaian secara *real time data* untuk memprioritaskan dan mengoptimalkan sumber daya perawatan. Pengamatan pada saat proses dilakukan, dikenal dengan *condition monitoring*. Penggunaannya memungkinkan perawatan dijadwalkan untuk menghindari konsekuensi kegagalan, sebelum terjadi kegagalan. Namun, penyimpangan dari nilai referensi (misalkan suhu atau perilaku getaran) harus terjadi untuk mengidentifikasi kerusakan.

Condition based maintenance merupakan jenis perawatan dengan metode pemantauan kondisi suatu komponen, maka dari itu jenis perawatan ini memiliki keunggulan diantaranya:

- a. Peningkatan kendala sistem
- b. Mengurangi biaya pemeliharaan
- c. *Breakdown* tak terduga berkurang atau bahkan hilang

2.2.1.5. Jenis – Jenis Condition Based Maintenance (CBM)

Condition based maintenance memiliki beberapa metode yang digunakan dalam pemantauan kondisi suatu komponen, diantaranya:

a. *Vibration Analysis*

Vibration analysis (analisa getaran) banyak diterapkan pada suatu peralatan yang berputar (*rotating equipment*) seperti kompresor, pompa, motor dan semua yang menunjukkan tingkat getaran tertentu. Saat peralatan tersebut mengalami penurunan performa, maka jumlah getaran yang dihasilkan meningkat. *Vibration analysis* dapat diterapkan untuk mendeteksi saat jumlah getaran yang dihasilkan meningkat.

b. *Thermography*

Infrared thermography telah banyak digunakan dalam 10 tahun terakhir karena peralatan yang mudah digunakan dan memiliki tingkat keefektifan yang tinggi. *Thermography* dapat melakukan pemantauan sebelum munculnya masalah dan menentukan lokasi munculnya kerusakan dengan cepat. Hasil pemantauan akan ditampilkan secara visual, sehingga akan memudahkan manajemen perawatan yang akan diterapkan.

c. *Oil Analysis*

Proses analisis spektrometrik minyak (*spectrometric oil analysis process*) merupakan teknik dalam laboratorium yang menggunakan berbagai instrumen untuk menganalisis oli bekas dari mesin. Sebuah spektrometer digunakan untuk menunjukkan kapan terjadinya aus yang signifikan sedang berlangsung. Analisis ini tidak hanya menunjukkan adanya keausan, tetapi juga memungkinkan menentukan lokasi keausan pada mesin. Dengan analisis ini, maka dapat dilakukan tindakan yang tepat untuk mencegah kerusakan.

2.2.1.6. Bantalan (*bearing*)

Bantalan merupakan suatu elemen mesin yang berfungsi untuk membatasi gerak relatif antara dua komponen mesin atau lebih agar selalu bergerak pada arah yang diinginkan. Bearing merupakan komponen yang sangat penting karena berfungsi sebagai penumpu sebuah poros agar poros dapat berputar tanpa mengalami gesekan yang berlebihan. Letak atau posisi suatu bantalan harus kuat, hal ini dilakukan agar poros dan komponen mesin lainnya dapat bekerja secara optimal. Pada suatu peralatan/mesin terdapat banyak komponen yang bergerak baik gerakan *angular* maupun gerakan *linear*. Gesekan antara komponen mesin tersebut dapat diminimalkan dengan menggunakan bantalan (*bearing*) yang dipasang pada poros. Terdapat dua jenis mekanisme bantalan dalam mengurangi gesekan yaitu mekanisme *sliding* dan mekanisme *rolling*.

2.2.1.7. Jenis - Jenis Bantalan

Bantalan dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan bentuk dan fungsinya:

a. *Single row groove ball bearings*

Bantalan jenis ini memiliki alur pada bagian dalam di kedua cincinnya sebagai lintasan bola sehingga bantalan jenis ini mampu menahan beban secara ideal pada arah radial maupun aksial. Contoh bantalan tipe *Single row groove ball bearings* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Single row groove ball bearings*
(Sumber : Nskamericas, 2018)

b. *Linear Bearing*

Bantalan jenis ini biasanya digunakan pada dua komponen mesin yang saling bergerak relatif. Bantalan jenis ini sangat mengandalkan peran pelumas yang berfungsi untuk mengurangi gesekan pada kedua permukaan. Contoh *linear bearing* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *linear bearing*
(Sumber : Nskamericas, 2018)

c. *Double row self aligning ball bearings*

Bantalan jenis ini memiliki dua alur serta dua baris bola di dalamnya, cincin pada bagian dalam dapat bergerak menyesuaikan posisi poros sehingga bantalan tetap berfungsi dengan baik walaupun poros tidak sejajar. Contoh *Double row self aligning ball bearings* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Double row self aligning ball bearings*
(Sumber : Nskamericas, 2018)

d. *Double row angular contact ball bearings*

Bantalan jenis ini mempunyai konstruksi yang hampir sama dengan *Double row self aligning ball bearings* yang juga memiliki dua buah bola di dalamnya, hanya saja bantalan jenis ini tidak dapat bergerak menyesuaikan posisi poros. Bantalan jenis ini memiliki kelebihan mampu menahan beban dalam dua arah, bantalan jenis ini biasanya digunakan

untuk mengganti fungsi dari dua buah bantalan apabila ruangan tidak memungkinkan. Contoh *Double row angular contact ball bearings* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 *Double row angular contact ball bearings*
(Sumber : Nskamericas, 2018)

e. *Double row barrel roller bearings*

Bantalan jenis ini memiliki dua baris elemen *roller* yang berbentuk silinder. Bantalan jenis ini mampu menahan beban radial yang besar sehingga ideal untuk menahan beban kejut. Contoh *Double row barrel roller bearings* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Double row barrel roller bearings*
(Sumber : Nskamericas, 2018)

f. *Tapered roller bearings*

Bantalan jenis ini sangat cocok untuk menahan beban aksial maupun radial. Bantalan jenis ini memiliki cincin luar yang dapat dipisah, bantalan jenis ini biasanya digunakan pada kendaraan seperti bus dan truk. Contoh *Tapered roller bearings* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Tapered roller bearings*
(Sumber : Nskamericas, 2018)

2.2.1.8. Jenis - Jenis Kerusakan Bantalan dan identifikasi berbasis getaran

Jenis kerusakan bantalan dibagi menjadi 3 seperti yang dikatakan Suhardjono (2005), bahwa frekuensi yang dihasilkan dari masing-masing komponen bantalan akibat cacat lokal dapat dihitung dengan rumus-rumus berikut:

a. Cacat Lokal pada Lintasan Luar (*Inner Race*)

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

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

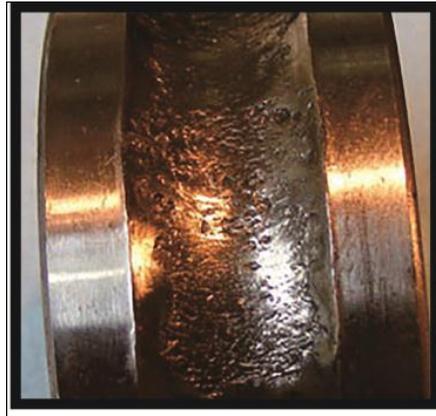


Gambar 2.10 cacat local pada lintasan luar
(Sumber : Analysis, 2018)

b. Cacat Lokal pada Lintasan Dalam (*Inner Race*)

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

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

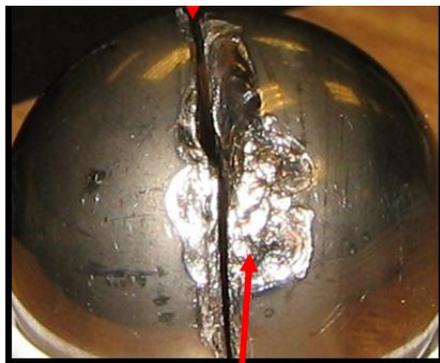


Gambar 2.11 cacat lokal pada lintasan dalam
(Sumber : Analysis, 2018)

c. Cacat Lokal pada Bola (*Rolling Element*)

Apabila terdapat kerusakan pada bola, maka munculnya frekuensi *impuls* yang terjadi dinamakan *Ball Spin Frequency* (BSF). Sehingga besarnya dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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



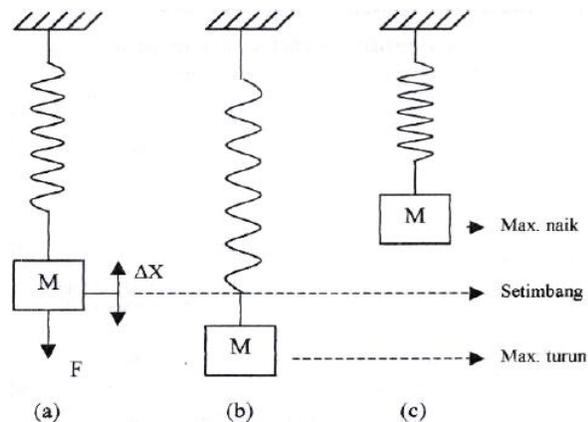
Gambar 2.12 cacat pada bola
(Sumber : Analysis, 2018)

Keterangan :

- Nb : Jumlah bola
- Fr : Frekuensi relatif antara lintasan dalam dan lintasan luar (Hz)
- Bd : Diameter bola (mm)
- Pd : Diameter *pitch*
- A : sudut kontak (derajat)

2.2.2. Getaran

Getaran adalah suatu gerakan bolak balik suatu partikel secara periodik pada suatu titik kesetimbangan. Satu getaran sama dengan satu kali gerakan bolak balik secara penuh. Contoh fenomena getaran dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Getaran Pegas
(Sumber : Zone, 2018)

Pada awalnya semua sistem dalam keadaan setimbang. jika massa diberi gaya F maka massa akan turun sampai pada batas tertentu. Perpindahan massa tergantung dari besarnya gaya F . Jika gaya F tidak lagi dibebankan pada massa, maka massa akan tertarik ke atas oleh pegas karena adanya gaya potensial yang terdapat pada pegas. Massa akan kembali pada posisi setimbang, selanjutnya bergerak ke atas sampai batas tertentu. Perpindahan dipengaruhi oleh kekuatan tarik pegas dan massa dari benda. Proses tersebut akan terjadi berulang-ulang sampai batas waktu tertentu, gerakan tersebut disebut dengan osilasi mekanis

2.2.2.1. Sinyal Getaran

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

- Informasi tentang kondisi terbaik untuk beroperasi.
- Analisis perubahan kondisi mesin.

c. Data penyebab kerusakan mesin.

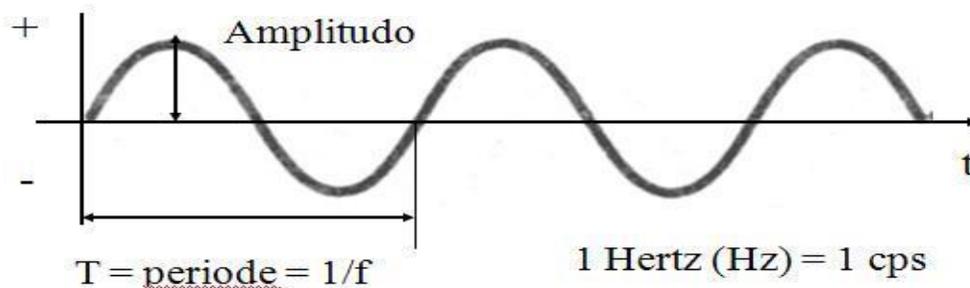
Pada saat sebuah sensor memberikan sinyal saat proses pengukuran suatu mesin, informasi getaran yang diberikan akan berupa macam-macam gaya dari dalam maupun luar mesin. Maka dari itu perlu dilakukan proses klasifikasi data terkait sinyal yang di dapat, agar proses analisis sinyal getaran yang di dapat dari elemen mesin yang mengalami kerusakan mudah dibaca.

2.2.2.2. Frekuensi Getaran (*Vibration Frequency*)

Frekuensi merupakan jumlah getaran yang terjadi dalam satu putaran waktu. Besarnya frekuensi yang muncul saat terjadinya vibrasi dapat mengidentifikasi jenis-jenis gangguan yang terjadi. Gangguan pada suatu mesin akan menghasilkan contoh frekuensi yang dapat dijadikan sebagai bahan penelitian. Dengan diketahuinya frekuensi saat mesin mengalami vibrasi, maka penelitian dapat dilakukan untuk mengetahui penyebab dari gangguan pada mesin. Frekuensi pada umumnya ditunjukkan dalam bentuk *Circle* per menit (CPM), atau biasa disebut dengan *Hertz* (dimana $\text{Hz} = \text{CPM}$).

2.2.2.3. Amplitudo

Amplitudo adalah ukuran besarnya sinyal vibrasi yang dihasilkan. Amplitudo dari sinyal vibrasi mengidentifikasikan besarnya gangguan yang terjadi pada suatu mesin. Semakin tinggi amplitudo yang ditunjukkan menandakan bahwa semakin besar gangguan yang terjadi pada mesin, besarnya amplitudo tergantung pada tipe mesin yang digunakan. Mesin yang masih dalam kondisi baik atau normal, pada umumnya tingkat vibrasinya bersifat relatif. Contoh gelombang amplitudo dapat dilihat pada gambar 2.14.

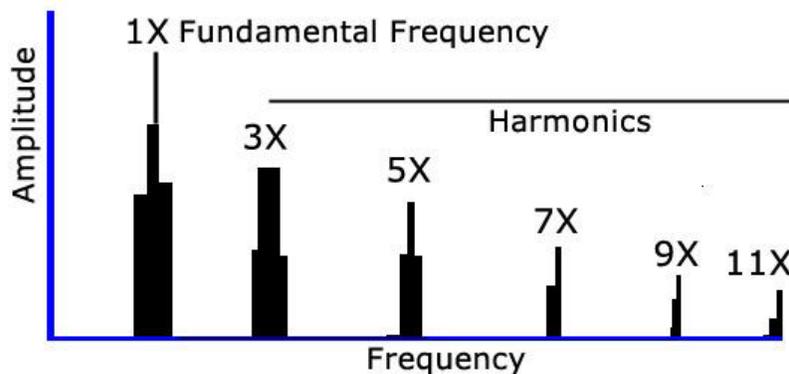


Gambar 2.14 Gelombang Amplitudo
(Sumber : Zone, 2018)

Amplitudo yaitu simpangan vibrasi, atau seberapa jauh jarak dari titik keseimbangan massa jika dilihat pada diagram harmonik.

2.2.2.4. Harmonik

Harmonik adalah fenomena yang muncul akibat terdistorsi gelombang sinusoidal secara periodik, yang disebabkan dari penggunaan beban listrik yang bersifat nonlinier. Bentuk gelombang yang terdistorsi dapat dianggap sebagai penjumlahan dari frekuensi dasar gelombang sinusoidal dan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasarnya. Frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar ini disebut dengan frekuensi harmonik. Bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut dengan angka urutan harmonik, sebagai contoh suatu sistem tenaga listrik memiliki frekuensi dasar 50 Hz, maka harmonik keduanya adalah 100 Hz dan seterusnya. Contoh harmonik getaran dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Harmonik Getaran
(Sumber : Girdhar, 2004)

2.2.2.5. Analisa Vibrasi

Setiap mesin akan memiliki karakteristik getaran tersendiri yang disebabkan dari torsi bantalan, roda gigi, poros. Analisa vibrasi digunakan untuk menentukan kondisi mekanis dan operasional dari peralatan. kelebihan dari analisa vibrasi yaitu dapat mengidentifikasi munculnya masalah sebelum bertambah parah dan menyebabkan berhentinya mesin pada saat beroperasi. Hal ini dapat dilakukan dengan cara memonitoring secara regular terhadap getaran mesin baik secara rutin maupun berkala. Monitoring vibrasi secara rutin dapat mendeteksi cacat pada bantalan, serta roda gigi yang rusak atau aus. Analisa vibrasi juga dapat mendeteksi

misalignment dan ketidak seimbangan (*unbalance*) sebelum menyebabkan kerusakan pada poros dan bantalan.

Analisa Vibrasi dapat menggunakan unit Pindahan (*Displacement*), kecepatan (*Velocity*) dan percepatan (*Accelerometer*), ditampilkan sebagai waktu *Waveform* (TWF), pada umumnya spektrum yang digunakan berasal dari *Fast Fourier Transform* dari TWF. Spektrum getaran akan menampilkan informasi frekuensi yang dapat menentukan komponen yang mengalami masalah. Dasar analisis getaran dapat di pahami dengan mempelajari model massa-pegas-peredam sederhana.

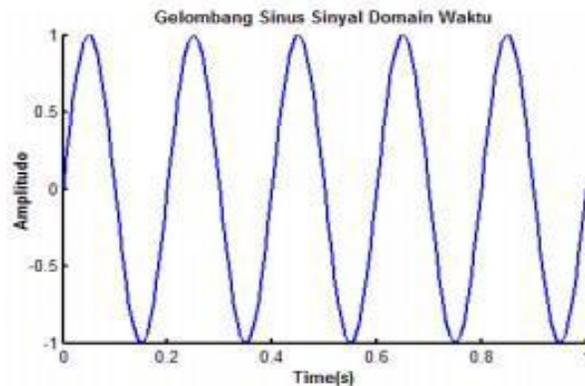
1. Sinyal Vibrasi

Sinyal getaran merupakan besaran fisik terhadap waktu yang variasi nilainya terdapat informasi-informasi tertentu kondisi suatu komponen mesin. Pada proses menganalisis sinyal getaran, penguraian data sinyal yang bertumpuk dan kompleks, adalah cara paling efektif. Dalam hal ini terdapat dua proses analisis dasar, yang umumnya sering digunakan untuk melakukan penelitian, yaitu domain waktu dan domain frekuensi. Dari dua proses inilah, sinyal getaran memunculkan gejala kerusakan pada tiap-tiap komponen, walaupun sebagian besar belum dapat terlihat dengan jelas. Pengukuran getaran terhadap komponen suatu mesin dapat memberikan informasi yang berbeda-beda, maka dari itu perlu dilakukan proses pengolahan data agar proses analisis sinyal getaran yang ditampilkan dari komponen mesin yang mengalami kerusakan akan lebih mudah dibaca. Analisis terkait data getaran mesin mengandung berbagai informasi yang sangat dibutuhkan untuk menentukan kondisi suatu komponen mesin seperti, informasi kondisi mesin, informasi tentang letak kerusakan suatu mesin dan penyebab kerusakan suatu komponen mesin.

Dalam menganalisis sinyal getaran, penguraian data sinyal yang bertumpuk dan kompleks, adalah cara paling efektif. Dalam hal ini, terdapat dua proses analisis dasar, yaitu domain waktu dan domain frekuensi yang sering digunakan dalam proses pengamatan. Dari dua proses inilah, sinyal getaran akan menunjukkan jika terjadi kerusakan pada suatu komponen mesin, walaupun sebagian belum dapat dilihat dengan jelas.

2. Domain Waktu (Time Domain)

Domain waktu adalah grafik yang menunjukkan bentuk serta ukuran sinyal gelombang berdasarkan waktu per detik. Domain waktu bisa juga disebut dengan *Waveform* dalam analisis getaran. Bentuk yang ditunjukkan adalah wujud dari gelombang sinus/kosinus. Contoh bentuk domain waktu dapat dilihat pada gambar 2.16 dimana bentuk gelombang ditunjukkan dalam grafik sinus. Grafik arah y menunjukkan nilai amplitudo gelombang, dan arah x menunjukkan nilai waktu.



Gambar 2.16 Gelombang Sinus Sinyal Domain Waktu
(Sumber : Lyons, 2018)

Gambar 2.16 menunjukkan bentuk alamiah sinyal getaran yang dihasilkan oleh suatu mesin. Sehingga sinyal impuls yang dihasilkan sangat bermanfaat dalam proses analisis. Meskipun sinyal dari domain waktu tidak dapat secara langsung menunjukkan gejala kerusakan suatu elemen mesin, yang disebabkan karena terdapat beberapa data yang saling berhimpitan. Namun data tersebut sangat bermanfaat sebagai dasar proses yang akan dianalisa lebih lanjut.

3. Domain frekuensi

Pada sinyal domain frekuensi, ketika diplot berupa spektrum yang menampilkan frekuensi terhadap magnitudo. Informasi penting terdapat didalam frekuensi sinyal. Spektrum frekuensi sinyal pada dasarnya adalah komponen frekuensi (spektral frekuensi) sinyal yang menunjukkan frekuensi apa yang muncul. Frekuensi menunjukkan tingkat perubahan. Jika suatu variabel sering berubah, maka disebut berfrekuensi tinggi. Namun jika tidak sering berubah, maka disebut berfrekuensi rendah. Jika variabel tersebut tidak berubah sama sekali, maka disebut tidak mempunyai frekuensi (nol frekuensi). Magnitudo pada sinyal

domain frekuensi menunjukkan tinggi rendahnya sinyal yang diterima. Atau dengan kata lain, kuat lemahnya sinyal tidak berpengaruh terhadap frekuensi yang ada didalamnya. Sinyal domain frekuensi dapat dikembalikan ke sinyal domain waktu. Gelombang sinyal getaran domain frekuensi dapat dilihat pada Gambar 2.17



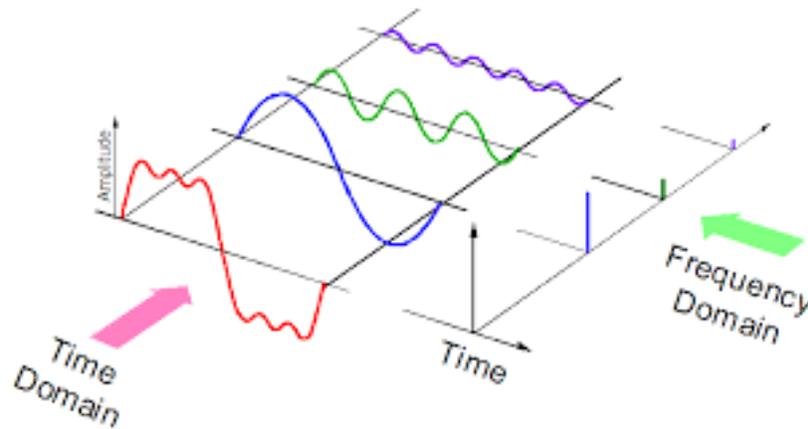
Gambar 2.17 Gelombang Sinyal Domain Frekuensi
(Sumber : Lyons, 2018)

4. Fast Fourier Transform (FFT)

Analisis *Fourier* adalah istilah lain untuk transformasi gelombang yang semula sebagai fungsi terhadap waktu yang diubah menjadi indikator amplitudo berbanding nilai frekuensi. Analisis ini adalah teknik penyelesaian matematis yang sangat teliti yang mengubah bentuk gelombang dari domain waktu ke domain frekuensi yang disebut juga sebagai analisis indikator dan dilakukan dengan “*fast fourier transform*” (FFT).

FFT dianggap sebagai teknik analisis sinyal yang paling populer, pada umumnya telah diterapkan untuk mengenali frekuensi komponen yang diinginkan. FFT mengubah domain waktu ke domain frekuensi yang menghasilkan spektrum kompleks dari sinyal sampel. Mengukur tingkat daya spektrum dan fase sinyal dari rentang frekuensi nol sampai setengah frekuensi yang disampel. Salah satu keuntungan FFT dari teknik frekuensi domain adalah mempertahankan tahap informasi sinyal yang mungkin membuat transformasi inverse dan relatif sederhana. Keuntungan lainnya adalah FFT dapat mengevaluasi pengukuran *multi-channel* dan analisis sistem seperti fungsi respon frekuensi, kohersi, dan korelasi. FFT merupakan algoritma yang efisien untuk mempercepat konversi dari domain waktu menjadi domain frekuensi dari *Discrete Fourier Transform* (DFT) dan inversenya.

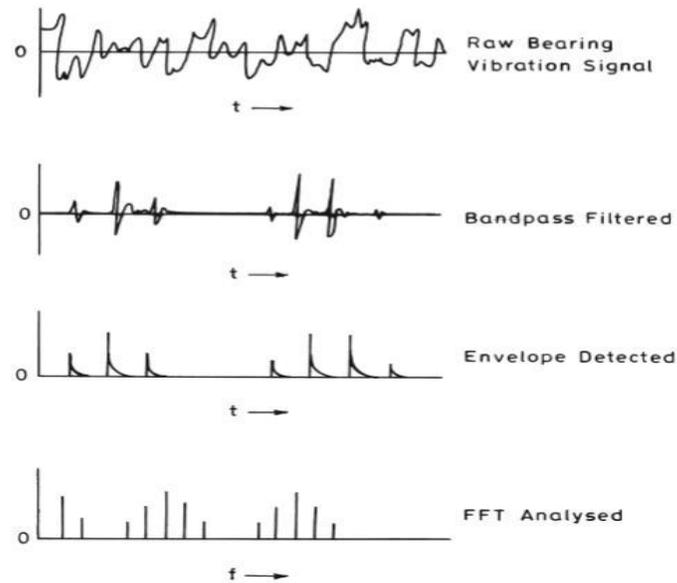
Data hasil penguraian dari domain frekuensi umumnya dapat menunjukkan kesalahan mesin lebih baik dari penggunaan domain waktu secara langsung. Hal ini karena karakteristik komponen frekuensi seperti komponen frekuensi resonansi yang mudah diamati dan dipantau apabila ada kesalahan. Pada prinsipnya pengolahan data dilakukan dengan mengonversi data waktu dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Pengolahan data menggunakan FFT ini mempercepat dalam mengkonversi data domain waktu menjadi domain frekuensi dan mampu menyajikan banyak komponen frekuensi yang terdapat dalam sinyal. Gambar 2.18 adalah skema perubahan plot dalam FFT. Dasar teknik FFT untuk diagnosis kesalahan meliputi, menyajikan dan menganalisis data getaran yang hanya dari getaran spektrum. Dengan konsep FFT maka sinyal getaran ini dapat dianalisis menjadi komponen dalam bentuk sinyal sinus yang frekuensinya merupakan frekuensi-frekuensi dasar dan harmoniknya. Umumnya tujuan pengolahan data frekuensi ini dilakukan untuk memeriksa dan mendeteksi kondisi pada suatu komponen mesin dalam kondisi baik atau rusak dan mengetahui batas kinerja suatu komponen yang sesuai standar.



Gambar 2.18 Transformasi *Fourier*
(Sumber : Lyons, 2018)

2.2.2.6. Analisis *Envelope*

Analisis *Envelope* adalah metode khusus yang digunakan pada analisis *bearing* dan *gearbox*. Metode ini mampu menghilangkan frekuensi-frekuensi rendah dan memfilter frekuensi-frekuensi tinggi menggunakan *high pass filter*, sehingga pada grafik hanya muncul frekuensi-frekuensi tinggi yang merupakan frekuensi cacat bantalan. Skema *envelope* dapat dilihat pada gambar 2.19

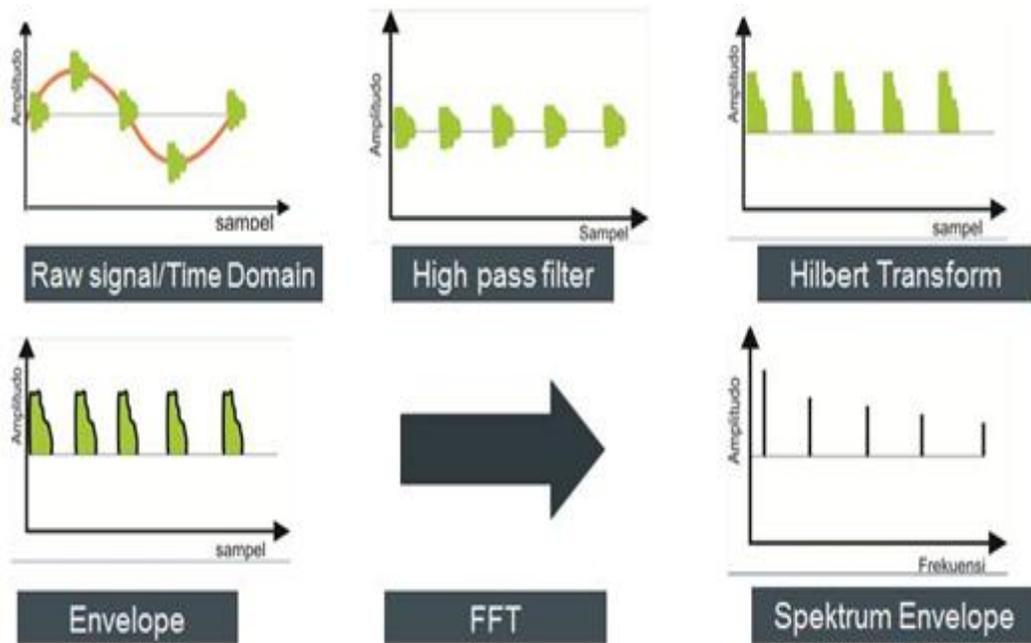


Gambar 2.19 Skema *Envelope*
(Sumber : Zin, dkk, 2008)

High-pass filter akan menyaring frekuensi-frekuensi tinggi dan menghilangkan frekuensi-frekuensi rendah. Menghilangkan peaks rendah agar sinyal data frekuensi lebih mudah dibaca. Karena pada umumnya data frekuensi yang tidak melalui proses penyaringan atau filtrasi, memiliki spektrum yang bergerombol dan susah untuk dibaca, hal ini akan mempersulit pada saat proses analisis data (Girdhar, 2004).

Urutan pengolahan data pada metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.20. Sinyal getaran dalam domain waktu pertama kali disaring menggunakan *high-pass filter*, pada *high-pass filter* ini sinyal akan di saring atau di perbaiki, dan sinyal yang telah di saring menggunakan *high-pass filter* akan ditransformasikan menggunakan *Hilbert transform* dan menghasilkan sinyal *envelope*. Selanjutnya di hitung menggunakan FFT sehingga menghasilkan bentuk akhir yaitu spektrum *envelope* (Zin, dkk, 2008).

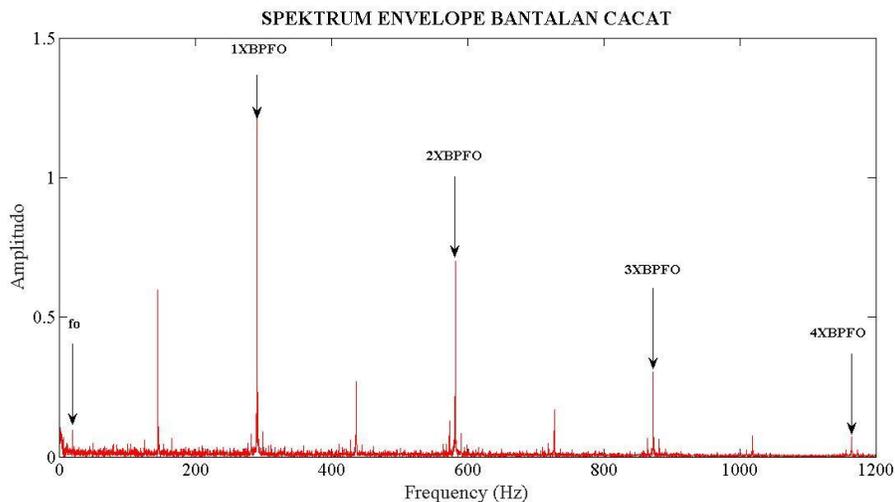
Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode deteksi cacat lintasan luar bantalan pada turbin angin menggunakan metode analisis *envelope*. Objek penelitian adalah bantalan bola jenis *double row self aligning* dengan kondisi normal dan kondisi cacat, pada turbin angin horizontal. Kondisi cacat pada bantalan bola di simulasikan dengan merusak bagian lintasan luar bantalan pada turbin angin.



Gambar 2.20 Skema *Envelope*
(Sumber : Wilda, M. F. 2017)

1. Karakteristik Analisis *Envelope* Cacat Bantalan Lintasan Luar (BPFO)

Pada gambar 2.21 dapat dengan mudah ditentukan bahwa setiap cacat pada bantalan menunjukkan amplitudo yang lebih tinggi dibandingkan bantalan dengan kondisi normal, Amplitudo tinggi yang muncul dapat dipastikan sebagai letak cacat pada bantalan dikarenakan muncul harmonik sampai dengan 4 X BPFO dan sesuai dengan perhitungan frekuensi cacat lintasan luar (BPFO) yang dapat dilihat pada persamaan 2.1.



Gambar 2.21 Grafik *Envelope* Bantalan Cacat lintasan luar pada 1200 rpm

2. Data Akuisisi

Data akuisisi merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk mengambil, dan menyiapkan data, agar data dapat diolah sehingga di dapat data yang dibutuhkan. Menurut Kirianaki, dkk (2002) data akuisisi adalah pengukuran sinyal elektrik dari transduser dan peralatan pengukuran kemudian memasukkannya ke komputer untuk di proses. Ada juga yang mendefinisikan bahwa akuisi data adalah semua besaran fisik yang akan diukur, diamati, disimpan, dan dikontrol dapat berupa suhu, tekanan, getaran dll.

Data akuisisi merupakan proses sampling dari sinyal yang berasal dari kondisi fisik suatu objek yang akan mengubah sampel-sampel tersebut ke dalam bentuk digital dan akan diolah lebih lanjut oleh komputer. *Data Acquisition* pada umumnya akan mengubah sinyal analog ke dalam bentuk digital dengan bantuan beberapa komponen berikut :

- a. *Sensor* : mengubah parameter fisik ke dalam sinyal elektrik.
- b. *Signal conditioning circuitry* : mengubah sinyal yang berasal dari *sensor* ke dalam bentuk yang sinyal digital.
- c. *Analog to Digital Converter* : menghasilkan sinyal digital yang sebelumnya sudah dikondisikan terlebih dahulu. Pada gambar 2.22 dapat dilihat komponen *DAQ System*.

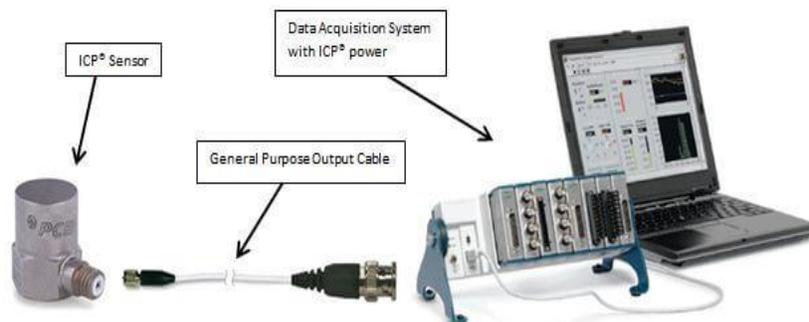


Figure 3: ICP[®] Sensor and Data Acquisition System with ICP[®] Power

Gambar 2.22 Komponen *DAQ System*
(Sumber : Tandon dan Choudhury, 2018)

3. Accelerometer

Accelerometer merupakan suatu alat ukur getaran, atau percepatan gerak struktur. Gaya yang disebabkan oleh getaran atau perubahan gerak (percepatan) menyebabkan massa "meremas" bahan *piezoelektrik* yang menghasilkan muatan listrik yang sebanding dengan

gaya yang diberikan. Karena muatannya sebanding dengan gaya, dan massanya konstan, maka muatannya juga sebanding dengan percepatan. Gambar 2.23 merupakan contoh komponen-komponen *accelerometer*.

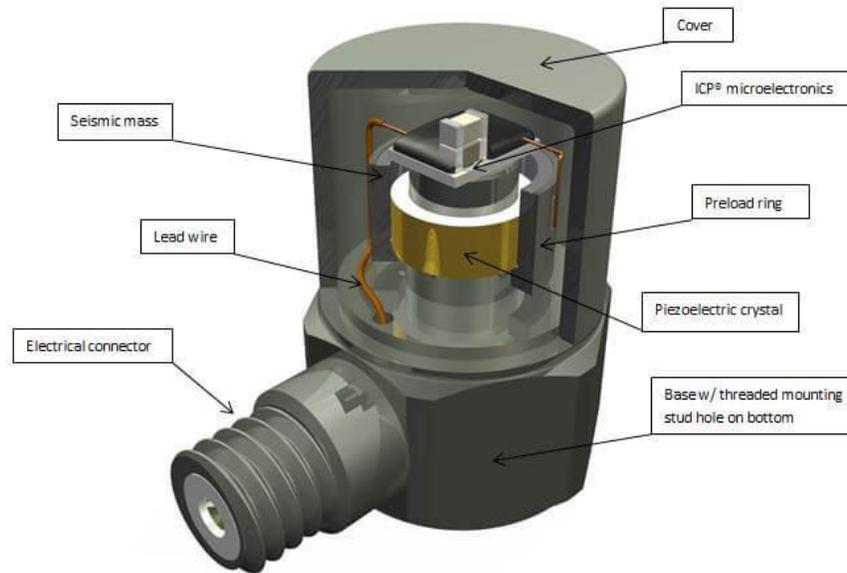
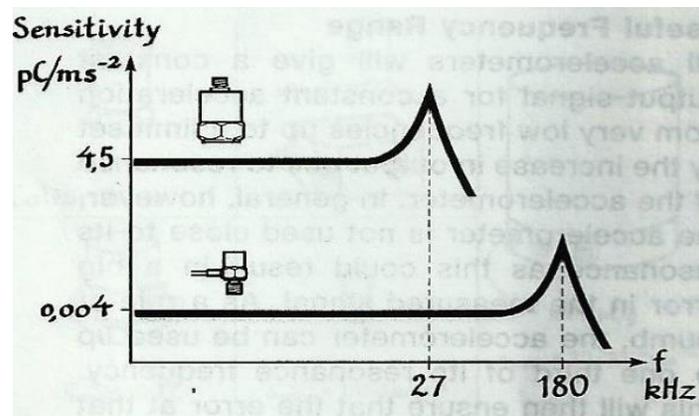


Figure 1: Typical ICP® Accelerometer

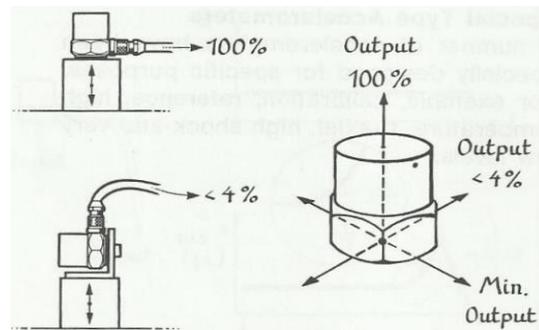
Gambar 2.23 Komponen *Accelerometer*
(Sumber : Courrech, 1990)

Pada gambar 2.24 menunjukkan ketika akselerometer terkena tingkat akselerasi konstan, alat ini akan memberikan sinyal keluaran konstan melalui rentang frekuensi yang sangat luas sampai frekuensi mendekati frekuensi resonansinya. Pada umumnya semakin besar *accelerometer* maka semakin tinggi tingkat sensitivitasnya, serta semakin kecil rentang frekuensi yang berguna dan sebaliknya.



Gambar 2.24 Sensivitas *Accelerometer*
(Sumber : Courrech, 1990)

Sedangkan pada gambar 2.25 menjelaskan bahwa *accelerometer* memiliki sensitivitas utamanya tegak lurus dengan dasar *accelerometer*. Namun tidak terlalu sensitif terhadap getaran yang terjadi pada arah melintang. Dalam kasus terburuk, akan kurang dari 4% dari sensitivitas sumbu utama. Arah sensitivitas *transerse* minimum di tunjukkan pada *accelerometer* dengan titik cat merah.



Gambar 2.25 Sensivitas transfer
(Sumber : Courrech, 1990)

Kelebihan *Accelerometer* :

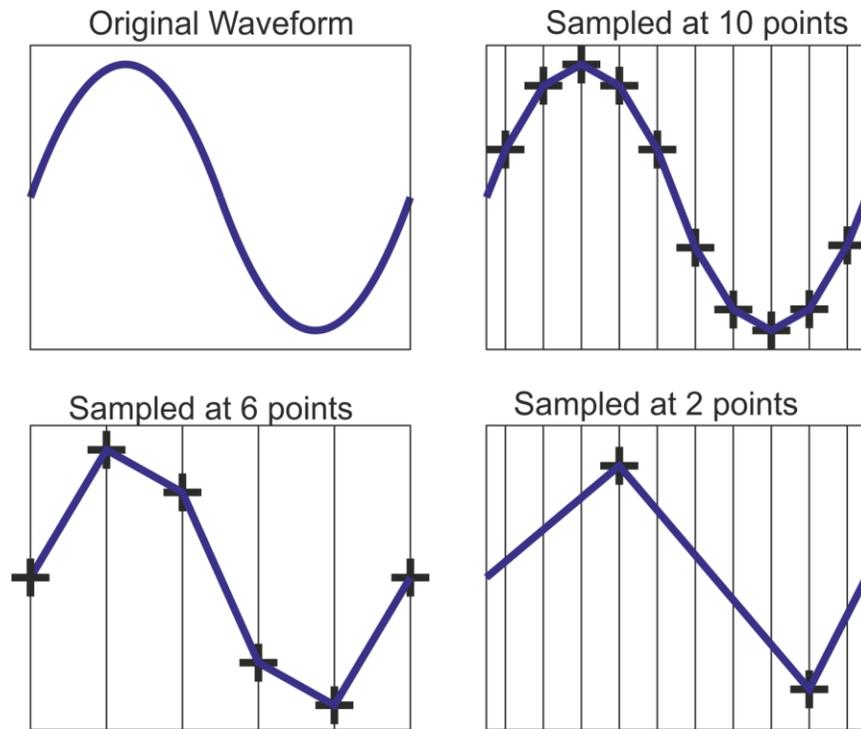
- Respon sinyal yang baik antara 900 sampai 600.000 cpm (15.>10.000 Hz).
- Respon fase datar sepanjang rentang operasi transducer.
- Beroperasi di bawah *mount* frekuensi resonansi alami.
- Elektronik *solid state* dengan konstruksi yang kokoh dan andal.
- Tersedia unit khusus untuk aplikasi suhu tinggi.

Kekurangan *Accelerometer* :

- Sensitif terhadap teknik pemasangan dan kondisi permukaan.
- Tidak mampu mengukur getaran atau posisi poros.
- Sumber daya eksternal yang dibutuhkan.
- Respon sinyal dinamis rendah dibawah 600 cpm (10 Hz).
- Kabel *transducer* yang peka terhadap kebisingan, gerak, dan gangguan listrik (terutama pada *accels charge-mode*).
- Pembatasan *temperature* 250 F untuk icp transduser.
- Jangkauan frekuensi yang diperluas seringkali membutuhkan penyaringan sinyal.
- Integrasi ganda seringkali mengalami gangguan frekuensi rendah.

4. *Sampling Rate*

Sampling Rate adalah banyaknya jumlah *sample* (titik) yang diukur dalam hertz (Hz) diambil dalam satuan waktu (detik) dari signal yang diterima dalam bentuk terus-menerus (*continuous signal*) atau dalam bahasa sederhana adalah batas frekuensi atau jumlah titik yang dapat dikirim perdetiknya. Setiap jenis data akuisisi mempunyai nilai *sampling rate* masing-masing.



Gambar 2.26 Sampling Frekuensi
(Sumber : Tronix, 2018)

Gambar 2.26 merupakan contoh *sampling rate*, terlihat bahwa semakin sedikit jumlah titik *sampling rate* yang diterima akan mempengaruhi hasil yang semakin kaku atau tidak sempurna dari grafik yang sebenarnya. Sedangkan, semakin banyak *sampling rate* yang diterima, maka hasil grafik akan mendekati grafik yang sebenarnya.

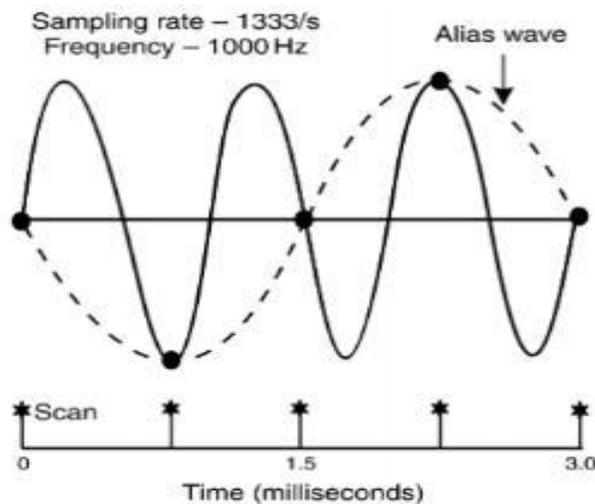
5. Frekuensi Nyquist

Sampling *nyquist* memberikan suatu kondisi yang cukup untuk pengambilan sampel dan rekonstruksi sinyal-band terbatas. Ketika rekonstruksi dilakukan melalui rumus

interpolasi *Whittaker-Shannon*, kriteria *nyquist* juga merupakan kondisi yang perlu untuk menghindari aliasing, dalam arti bahwa jika sampel yang di ambil pada tingkat lebih lambat dari dua kali batas band, maka ada beberapa sinyal yang tidak akan secara benar direkonstruksi. Namun, jika pembatasan lebih lanjut dikenakan pada sinyal, maka kriteria *nyquist* mungkin tidak lagi menjadi syarat mutlak.

6. *Aliasing*

Aliasing adalah suatu efek akibat dari rekontruksi sinyal yang tidak sesuai dengan sinyal aslinya yang saat pencuplikan memiliki frekuensi yang di bawah standar ketentuan *nyquist*. Efek dari *aliasing* dapat dilihat pada gambar 2.27.



Gambar 2.27 *Aliasing*
(Sumber : Girdhar, 2004)