

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Bantalan (*bearing*) merupakan salah satu bagian dari elemen mesin rotasi yang memegang peranan sangat penting yaitu menjaga kinerja mesin tetap dalam kondisi baik. Bantalan berfungsi sebagai penunpu beban sebuah poros agar poros dapat berputar tanpa mengalami gesekan yang berlebihan. Cacat pada bantalan akan berakibat fatal pada kinerja mesin seperti menurunnya performa mesin dan berhentinya mesin beroperasi. Oleh karena itu, penting untuk menjaga bantalan tetap dalam kondisi baik. Beberapa peneliti telah melakukan penelitian tentang metode deteksi cacat bantalan berbasis sinyal getaran, sinyal getaran dapat digunakan untuk menganalisa cacat pada bantalan.

Aji (2007) dalam jurnal penelitian yang berjudul "Deteksi Kerusakan Bantalan Gelinding Pada Pompa Sentrifugal dengan Analisa Sinyal Getaran", menganalisis cacat pada bantalan bola nomor seri 6305, diameter luar 62 mm, diameter dalam 25 mm menggunakan metode analisa frekuensi sinyal getaran. Karakteristik frekuensi sinyal getaran pada bantalan dengan kondisi baik adalah mendekati frekuensi cacat. Sedangkan bantalan rusak/cacat memiliki karakteristik frekuensi yang acak (*random*). Pada domain frekuensi, indikasi pertama kerusakan bantalan dapat diamati pada daerah kisaran frekuensi tinggi. Hasil penelitian menjelaskan, bantalan yang mengalami kerusakan pada lintasan dalam menghasilkan amplitudo dominan pada 435 Hz (4xBPFI), kerusakan lintasan luar menghasilkan amplitudo dominan pada 197,5 Hz (3xBPFO), kerusakan bola akan menghasilkan amplitudo dominan pada 62,5 Hz (2xBSF). Nilai amplitudo pada bantalan kondisi baik adalah 0,802, sedangkan pada cacat lintasan dalam 1,249, cacat lintasan luar 1,662 dan cacat pada bola 2,006.

Susilo (2009) dalam jurnal penelitian yang berjudul "Pemantauan Kondisi Mesin Berdasarkan Sinyal Getaran", merumuskan bahwa setiap pemantauan kondisi bantalan mempunyai data yang berbeda-beda. Jika bantalan dalam kondisi normal, frekuensi cacat bantalan tidak terlihat sedangkan jika kondisi dalam

keadaan cacat/rusak, frekuensi cacat bantalan akan muncul sesuai dengan kondisi cacat. Metode yang digunakan adalah domain waktu, domain frekuensi, statistic sinyal dan transformasi wavelet. Hasil yang didapat bahwa terlihat amplitudo getaran yang tinggi pada frekuensi 435 Hz dan 187,5 Hz. Dua frekuensi ini merupakan 4 x BPF1 dan 4 x BSF. Kenaikan amplitudo pada frekuensi harmonik ini mengindikasikan adanya cacat yang terjadi pada lintasan dalam dan bola pada bantalan. Hal ini sesuai dengan keadaan bantalan setelah dibongkar.

Wahyudi, dkk (2016) dalam jurnal penelitian yang berjudul “Mendeteksi Kerusakan Bantalan Dengan Menggunakan Sinyal Vibrasi”, menganalisis kerusakan bantalan dalam 4 cacat varian yaitu, cacat bagian dalam, cacat bagian luar, cacat *rolling element* dan cacat secara alami 2205-K-2RS-TVH-C3. Tujuan dari penelitian adalah untuk mengetahui tingkat kerusakan dan karakteristik spektrum vibrasi dari bantalan dengan kondisi normal, bantalan yang cacat 30% di lintasan dalam, bantalan yang cacat 30% di lintasan luar dan cacat 30% di *rolling element*. Pada masing-masing varian dilakukan pengujian dengan 3 sampel yang sama dengan metode RMS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bantalan dengan kondisi normal memiliki karakteristik amplitudo *velocity* dibawah 1,8 mm/s dan spektrum vibrasi FFT *velocity* dan *demodulation of acceleration* yang tidak berhimpitan dengan garis frekuensi *impuls* naik BPF1, BPFO dan BSF. Bantalan cacat 30% di lintasan dalam menghasilkan amplitudo *velocity* yang tinggi, bantalan cacat 30% di lintasan luar dan cacat 30% di *rolling element* menghasilkan amplitudo *velocity* cenderung bervariasi. Bantalan yang cacat 30% di lintasan dalam, lintasan luar ataupun di *rolling element* menghasilkan spektrum vibrasi FFT *velocity* dan *demodulation of acceleration* dengan garis puncak frekuensi berhimpitan dengan garis frekuensi *impuls* masing-masing BPF1, BPFO atau BSF.

Rusli, dkk (2015) dalam jurnal penelitian yang berjudul “Kaji Banding Prediksi Kerusakan Pada Bantalan Gelinding Melalui Sinyal Getaran Dan Sinyal Suara Bantalan”, menganalisis bantalan dengan membandingkan bantalan dalam dua kondisi yaitu bantalan kondisi normal dan bantalan yang sengaja dibuat rusak/cacat. ASB 6002 2RS (*single row deep ball bearing*) sebanyak tiga buah (2,3,4) merupakan bantalan yang tidak mengalami cacat dan bantalan SKF 16002

(*single row deep ball bearing*) (1) dalam kondisi rusak . Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jarak mikrofon ke sumber suara pada jarak 10 cm, 30 cm dan 50 cm dan pada kecepatan konstan 0,02 m/s, motor berputar pada kecepatan 2982 rpm dan dianggap konstan. Berdasarkan hasil eksperimen, diperoleh indikasi kerusakan yang terjadi pada frekuensi 86,6 Hz dan 162,9 Hz merupakan nilai sinyal getaran pada bantalan 1 yang merupakan bantalan yang mengalami kerusakan. Nilai-nilai ini dipilih karena memiliki kecenderungan amplitudo yang lebih besar bila dibandingkan dengan bantalan lainnya, sedangkan nilai frekuensi 274,1 Hz pada bantalan 3 dipilih karena amplitudo yang dimilikinya lebih besar dibandingkan dengan bantalan yang lain. Untuk nilai frekuensi yang terdeteksi baik pada jarak 10 cm, 30 cm dan 50 cm memiliki kecenderungan nilai yang hampir sama. Namun nilai yang diperoleh lebih mendekati dari nilai kerusakan bantalan pada jarak yang lebih dekat yaitu 10 cm. Munculnya sinyal suara gangguan dari luar atau suara pantulan menyebabkan analisis suara lebih sulit untuk dilakukan.

Sedangkan penelitian cacat bantalan yang terjadi secara simultan atau multi jenis telah dilakukan oleh Sukendi, dkk (2016) dalam jurnal penelitian yang berjudul “Analisa Karakteristik Getaran Dan *Machine Learning* Untuk Deteksi Dini Kerusakan *Bearing*”. Bantalan yang digunakan adalah jenis *bearing unit pillow block* NTN UCP 204 DI, dengan melakukan variasi putaran (400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm dan 1200 rpm) tanpa memvariasikan beban. Pengukuran dilakukan pada posisi sumbu axial, horizontal, vertikal dan pengolahan data menggunakan *coding* dari program Matlab dengan metode frekuensi domain. Bantalan yang digunakan berjumlah 8 dengan 2 macam kondisi, yaitu 4 bantalan (A, B, C dan D) dengan kondisi baru dan 4 bantalan (1, 2, 3 dan 4) dengan kondisi cacat/rusak. Bantalan no.1 mengalami cacat tunggal yaitu pada elemen bola (BSF) dengan frekuensi 167,7667 Hz, Bantalan no.2 mengalami cacat tunggal yaitu cacat lintasan luar (BPFO) dengan frekuensi 200,833 Hz (4xBPFO). Sedangkan cacat yang terjadi secara simultan atau multi jenis terjadi pada bantalan cacat no. 3 dan no. 4, dimana bantalan no.3 mengalami cacat lintasan luar (BPFO) dengan frekuensi 200,5667 Hz (4xBPFO) akibat cacat dari bolanya (6xBSF) dan cacat pada sangkar (FTF). Bantalan no.4 mengalami cacat lintasan dalam (BPFI) dengan

frekuensi 167,7667 Hz (2xBPFI) dan cacat pada elemen bola (5xBSF). Dapat disimpulkan bahwa *bearing* yang bagus, akan menghasilkan gelombang yang halus dan tidak terlihat puncak amplitudo pada kisaran frekuensi tinggi. Sedangkan *bearing* yang mengalami cacat akan menghasilkan gelombang dengan amplitudo tinggi pada kisaran frekuensi tersebut.

Contoh lain penelitian cacat bantalan secara simultan atau multi jenis adalah penelitian yang dilakukan Surojit dan Madan (2013) dalam jurnal penelitian yang berjudul “*Ball Bearing Fault Detection Using Vibration Parameter*”, menganalisis kerusakan bantalan tipe MB ER-10K. kondisi bantalan dibagi menjadi 4 varian yaitu cacat lintasan dalam, cacat lintasan luar, cacat bola dan cacat multi jenis (lintasan dalam, lintasan luar dan bola). Pengujian dilakukan pada kecepatan poros 16,60 Hz untuk masing-masing kerusakan dengan metode FFT. Hasil penelitian didapatkan plot domain frekuensi bantalan dengan cacat lintasan dalam, cacat lintasan luar dan cacat bola memunculkan amplitudo tinggi pada frekuensi 50,30 Hz menandakan kerusakan lintasan dalam, frekuensi 81,00 Hz menandakan kerusakan pada lintasan luar dan 65,90 Hz menandakan kerusakan pada bola. Kemudian hasil eksperimen tersebut dibandingkan dengan hasil hitungan kalkulasi yaitu BPFO 50,663 Hz, BPFI 82,173 dan BSF 66,134 Hz. Sementara pada bagian multi jenis memunculkan semua cacat yang ada pada bantalan menandakan banyaknya cacat pada bantalan uji, terlihat dari plot domain frekuensi yang muncul.

Dari beberapa penelitian di atas menunjukkan bahwa metode domain frekuensi banyak digunakan untuk mendeteksi cacat pada bantalan. Metode domain frekuensi dianggap unggul dalam mendeteksi kerusakan pada bantalan karena sinyal frekuensi dapat langsung dianalisis, sehingga dari sinyal frekuensi tersebut sudah dapat diketahui kerusakan yang terjadi pada bantalan. Namun kelemahan dari analisis domain frekuensi adalah kemungkinan tertutupnya frekuensi bantalan yang memiliki amplitudo yang rendah dengan frekuensi dari getaran komponen yang lain. Untuk itu, dalam penelitian ini diusulkan penggunaan analisis *envelope* yang dapat menghindari kemungkinan tertutupnya frekuensi bantalan yang memiliki amplitudo rendah. Metode analisis *envelope* dapat mengekstrak dampak dengan

energi yang sangat rendah dan yang tersembunyi oleh sinyal getaran komponen lain.

2.2 Bantalan

Bantalan adalah elemen mesin yang menumpu poros yang mempunyai beban, sehingga putaran atau gerakan bolak-baliknya dapat berlangsung secara halus, aman, dan mempunyai umur yang panjang. Dalam ilmu mekanika, bantalan adalah sebuah elemen yang berfungsi untuk membatasi gerak relatif antara dua atau lebih komponen mesin agar selalu bergerak pada arah yang diinginkan. Bantalan menjaga poros (*shaft*) agar selalu berputar terhadap sumbu porosnya, atau juga menjaga suatu komponen bergerak linier agar selalu berada pada jalurnya. Bantalan harus cukup kokoh untuk memungkinkan poros serta elemen mesin lainnya bekerja dengan baik. Jika bantalan tidak berfungsi dengan baik maka prestasi seluruh sistem tidak dapat bekerja secara semestinya.

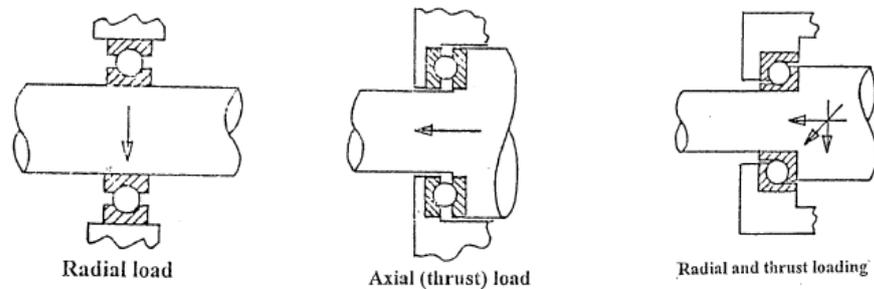
Sejarah penggunaan bantalan untuk mengurangi efek gesekan dapat ditelusuri dari hasil penemuan kereta sederhana yang telah berumur 5000 tahun di Euphrates di dekat sungai Tigris. Dalam sejarah modern, desain penggunaan bantalan yang tedokumensai dengan baik dimuai oleh Leonardo Davinci. Dia menggunakan *Roller Bearing* untuk kincir air penggilingan gandum. Paten pertama tentang bantalan didaftarkan di Prancis 400 tahun kemudian. Selanjutnya, katalog bantalan pertama di dunia diterbitkan di Inggris pada tahun 1900. Saat ini, penggunaan bantalan sebagai komponen anti gesek telah digunakan secara luas dengan variasi ukuran, variasi beban, variasi putaran yang sangat lebar.

2.2.1 Klasifikasi Bantalan

Secara umum bantalan dapat diklasifikasikan berdasarkan arah beban dan berdasarkan konstruksi atau mekanisme mengatasi gesekan.

1. Berdasarkan arah dan pembebanannya terdiri atas
 - a. *Journal Bearing* : Bantalan yang bebannya ditahan dalam arah radial tegak lurus dengan poros
 - b. Bantalan aksial / *thrust bearing* : Bantalan yang menahan beban dalam arah aksial

- c. Bantalan Kombinasi : Bantalan yang mampu menahan kombinasi beban dalam arah radial dan arah aksial. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Arah Beban Bantalan

Sumber : <http://nanihendi.com/artikel/bantalan-bearing-dan-jenisnya>

2. Berdasarkan konstruksi atau mekanisme mengatasi gesekan
- a. Bantalan Luncur (*slider bearing*)

Bantalan luncur yang biasa disebut *slider bearing* atau *plain bearing* menggunakan mekanisme *sliding*, dimana dua permukaan komponen mesin saling bergerak relatif. Diantara kedua permukaan terdapat pelumas yang berfungsi untuk mengurangi gesekan antara kedua permukaan. *Slider bearing* untuk beban arah radial disebut *journal bearing* dan untuk beban aksial disebut *thrust bearing*. Pada bantalan ini terjadi gesekan luncur antara poros dan bantalan karena permukaan poros ditumpu oleh permukaan bantalan dengan perantara lapisan pelumas. Contoh konstruksi bantalan luncur dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Bantalan Luncur

Sumber: <https://www.indiamart.com/bearings.html>

- b. Bantalan gelinding menggunakan elemen *rolling* untuk mengatasi gesekan antara dua komponen yang bergerak. Diantara kedua permukaan elemen geiding misalnya bola, rol taper dan lain-lain. Kontak gelinding terjadi anatara elemen ini dengan komponen lain berarti pada permukaan kontak tidak ada gerakan relatif. Contoh konstruksi *roller bearing* dilihat pada Gambar 2.3 dimana gambar (a) menunjukkan bantalan bola *single row* dan gambar (b) menunjukkan bantalan bola *double row*.



Gambar 2.3 Bantalan Bola, (a) Single-row, (b) Double-row
 Sumber : <https://www.tracepartsonline.net/partdetails.aspx>
<https://www.tolexo.com/bearing-tc13nbc0001.html>

Adapun klasifikasi bantalan gelinding berdasarkan bentuk elemen gelindingnya dapat dibagi menjadi dua yaitu bantalan bola (*ball bearing*) dan bantalan rol (*roll bearing*). Kelebihan yang dimiliki bantalan gelinding dengan klasifikasi bola dan rol adalah gesekan yang ditimbulkan oleh kedua bantalan ini relatif kecil jika dibandingkan dengan bantalan lainnya. Namun, fokus bantalan pada penelitian ini hanya tertuju pada bantalan bola jenis *Double row self aligning ball bearings*. *Double row* berarti bantalan ini mempunyai dua baris bola, sedangkan *self aligning* berarti bagian dalamnya mampu bergerak untuk menyesuaikan posisinya.

2.2.2 Double Row Self Aligning Ball Bearings

Jenis ini mempunyai dua baris bola, masing-masing baris mempunyai alur sendiri-sendiri pada cincin bagian dalamnya. Pada umumnya terdapat alur bola

pada cincin luarnya. Cincin bagian dalamnya mampu bergerak sendiri untuk menyesuaikan posisinya. Inilah kelebihan dari jenis ini, yaitu dapat mengatasi masalah poros yang kurang sebaris atau *misalignment*. Bantalan *double row* banyak digunakan untuk mesin putar yang mempunyai poros panjang, karena poros yang panjang sangat rawan terhadap masalah poros tak sejajar (*misalignment*). Gambar 2.4 merupakan contoh bantalan jenis *double row self aligning ball bearings*.



Gambar 2.4 *Double Row Self Aligning Ball Bearings*

Sumber :

<http://www.dungannonbearingco.co.uk/category/products/bearings/page/2>

2.2.3 Bantalan Bola

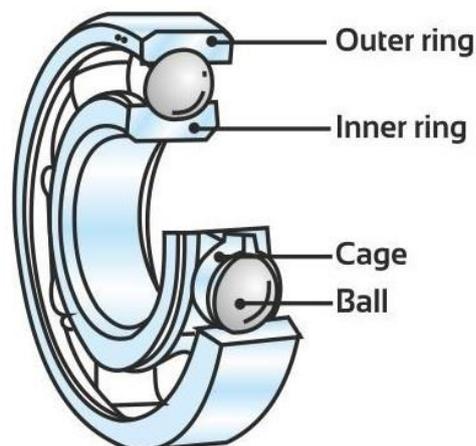
Bantalan bola adalah jenis bantalan elemen rol yang menggunakan bola untuk mempertahankan permisahan antara sisi bantalan. Tujuan bantalan bola adalah untuk mengurangi gesekan radial dan aksial. Terdapat dua sisi pada sebagian besar aplikasi dalam bantalan yaitu, satu sisi yang bersifat stasioner atau diam dan yang lainnya terpasang pada unit yang berputar. Bantalan rol dapat mendukung kedua radial (tegak lurus pada poros) dan aksial beban (parallel ke poros). Untuk muatan bantalan ringan, bola menawarkan gesekan lebih rendah dari rol. *Self Alignment* bantalan bola juga dapat beroperasi ketika cincin bantalan sejajar. Bantalan bola dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Bantalan Bola

Sumber : <https://www.bearingboys.co.uk/SKF--FAG/3206ATN9-SKF-Double-Row-Angular-Contact-Ball-Bearing--Polyamide-Cage--22094-p>

Bantalan bola merupakan bantalan yang banyak menerima beban radial yang besar, namun juga dapat menerima beban aksial yang kecil. Bantalan bola terdiri dari elemen-elemen yaitu lintasan dalam (*inner race*), lintasan luar (*outer race*), elemen gelinding (*ball*) dan sangar (*cage*). Elemen bantalan bola dapat dilihat pada Gambar 2.6. Dimana tipe bantalan bola yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 merupakan bantalan bola dengan tipe *Deep Groove Single Row Ball Bearing*.



Gambar 2.6 Elemen Bantalan Bola

Sumber : <https://www.tneutron.net/industri/bantalan-gelinding>

2.2.4 Jenis – Jenis Cacat Bantalan

Bantalan merupakan salah satu bagian dari elemen mesin yang sangat penting perannya dalam permesinan, oleh karena itu kerusakan atau keausan pada bantalan merupakan bagian yang sangat penting untuk diperhatikan, karena dapat berakibat fatal dalam proses permesinan, seperti rusaknya mesin yang mengakibatkan berhentinya operasi, hingga kerugian jam operasi perusahaan yang mengakibatkan kurangnya produksi yang dapat merugikan perusahaan.

Dalam komponen yang berputar, pasti menghasilkan frekuensi pada komponennya masing-masing. Khususnya pada Bantalan bola, terdapat rumus-rumus frekuensi getaran yang dapat digunakan untuk mengetahui cacat yang terjadi pada bantalan tersebut, diantaranya :

1. Cacat Lokal pada Linatasan Dalam (*Inner Race*)

Frekuensi ekstitensi impuls akibat adanya cacat local pada lintasan dalam bantalan disebut *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPFI), yang dinyatakan dengan persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$\text{BPFI} = \frac{N_b}{2} \times f_r \times \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

2. Cacat Lokal pada Lintasan Luar (*Outer Race*)

Frekuensi eksitasi impuls akibat adanya cacat local pada lintasan luar bantalan disebut *Ball Pass Frequency Outer Race* (BPFO), yang dinyatakan dengan persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$\text{BPFO} = \frac{N_b}{2} \times f_r \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha \right) \dots\dots\dots (2.2)$$

3. Cacat Lokal pada Bola (*rolling Element*)

Frekuensi impuls yang terjadi disebut *Ball Spin Frequency* (BSF). Besarnya dapat dihitung dengan persamaan 2.3 berikut ini:

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

4. Cacat Lokal pada Pemisah (*Cage*)

Frekuensi akibat adanya cacat pada pemisah (*cage*) disebut *Fundamental Train Frequency* (FTF). Besarnya FTF dapat dihitung dengan persamaan 2.4 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 ball*),

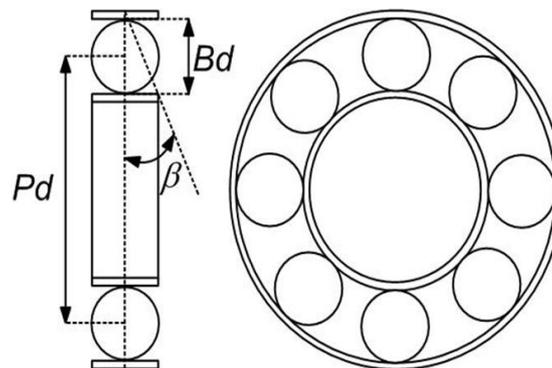
f_r = Frekuensi putaran kerja pompa (*Hz*),

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

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

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

Gambar 2.7 menjelaskan dimensi diameter bola dan diameter pitch yang digunakan sebagai komponen perhitungan dalam mencari frekuensi cacat bantalan.



Gambar 2.7 Dimensi Bantalan

Sumber : <https://www.intechopen.com/books/vibration-analysis-and-control-new-trends-and-developments/bearings-fault-detection-using-inference-tools>

2.3 Perawatan (*Maintenance*)

Dalam istilah perawatan, disebutkan ada dua pekerjaan yang dapat dilakukan, yaitu istilah perawatan dan istilah perbaikan, dimana perawatan yang dimaksud adalah sebagai aktifitas untuk mencegah terjadinya kerusakan, sedangkan perbaikan adalah tindakan yang dilakukan untuk memperbaiki kerusakan.

Manajemen perawatan mesin merupakan hal sangat penting dalam sebuah industri. Buruknya sebuah manajemen perawatan dapat mengakibatkan kerugian di berbagai aspek di dalam perusahaan. Salah satu metode yang unggul digunakan untuk mendeteksi kerusakan komponen mesin seperti bantalan (*bearing*), adalah *Condition-Based Maintenance* (CBM). Dengan salah satu metodenya yang handal dan umum digunakan oleh peneliti yaitu analisis berbasis getaran, sehingga dapat mempermudah upaya menemukan kerusakan pada komponen bantalan.

CBM merupakan salah satu metode handal baru yang digunakan oleh peneliti sebagai perkembangan metode perawatan pernah ada. Metode perawatan yang sebelumnya menjadi acuan peneliti agar dapat mengetahui kekurangan dari metode-metode sebelum CBM. Metode-metode perawatan tersebut adalah : *Preventive Maintenance*, *Breakdown Maintenance* dan *Predictive Maintenance*. Berikut adalah sedikit penjelasan tentang metode-metode perawatan.

a. Perawatan Preventif (*Preventive Maintenance*)

Preventive Maintenance atau *run time based maintenance* adalah menjadwalkan aktivitas perawatan pada interval waktu yang sudah ditentukan, berdasarkan jam kerja (*running hours*) mesin atau kalender. Perbaikan atau pengantian komponen mesin dilakukan sebelum masalah sebenarnya terjadi. Filosofi ini baik untuk mesin atau peralatan yang tidak bekerja secara kontinu, dan jika personil mempunyai cukup ketrampilan (*skill*) dan waktu untuk melakukan pekerjaan perawatan. Kerugiannya, bahwa aktivitas perawatan mungkin saja dilakukan terlalu cepat atau terlalu lambat. Hal ini sangat mungkin terjadi, meskipun suatu komponen mesin atau peralatan dapat diganti sekalipun masih memiliki sisa umur pemakaian.

b. Perawatan Setelah Terjadi Kerusakan (*Breakdown Maintenance*)

Breakdown Maintenance adalah perawatan yang dilakukan ketika sudah terjadi kerusakan pada mesin atau peralatan kerja sehingga mesin tersebut tidak dapat beroperasi secara normal atau terhentinya operasional secara total dalam kondisi mendadak. *Breakdown Maintenance* ini harus dihindari karena akan terjadi kerugian akibat berhentinya mesin produksi yang menyebabkan tidak tercapai kualitas ataupun output produksi.

c. Perawatan Prediktif (*Predictive Maintenance*)

Filosofi Prediktif atau *Condition Based Maintenance* adalah bahwa aktivitas perawatan yang dilakukan hanya bila dideteksi ada indikasi kerusakan (kegagalan fungsi). Kondisi operasional dan fungsional suatu mesin dipantau / dimonitor secara periodik, jika ditemukan adanya indikasi ke arah yang tidak sehat, maka dilakukan indentifikasi pada komponen-komponen mesin yang mengalami kelainan dan dilakukan penjadwalan untuk perawatan. Pada waktu yang paling memungkinkan mesin tersebut akan dimatikan untuk dilakukan penggantian komponen yang rusak.

2.3.1 *Condition Based Maintenance* (CBM)

Condition Based Maintenance merupakan sebuah program perawatan yang rekomendasi keputusan perawatannya didasarkan pada pengumpulan informasi dan kondisi pengukuran suatu mesin. CBM atau yang juga dikenal *predictive maintenance* menggunakan proses *condition monitoring* (CM) untuk memantau kondisi kinerja suatu mesin dan mengumpulkan data informasi. Objek dari metode ini adalah melakukan perawatan ketika terjadi hal yang tidak normal pada mesin sehingga dapat mengurangi biaya perawatan. Sistem manajemen pemeliharaan berbasis kondisi yang dibangun di sekitar *real-time* sensor pemantauan dan telematika teknologi menawarkan fleksibilitas dan penghematan biaya dalam hal memberikan kontrol yang lebih besar ketika melakukan pemeliharaan, bagian mana untuk per-order dan bagaimana optimal jadwal kerja (Gopalakrishna Palem, 2013). Metode ini mempunyai tiga tahap, yaitu

1. Tahap pengumpulan informasi (*data acquisition*)

Akuisisi data merupakan sebuah proses untuk mengumpulkan data dan menyimpan data atau informasi yang berguna sesuai dengan yang dibutuhkan untuk keperluan CBM.

2. Tahap Pemrosesan data (*data processing, conditioning*)

Tahap awal dari pemrosesan data adalah menyeleksi data. Tahap ini penting, terutama untuk data kejadian yang biasanya dimasukkan secara manual, selalu mengandung *error*.

3. Tahap pembuatan keputusan perawatan (*decision-making proses*)

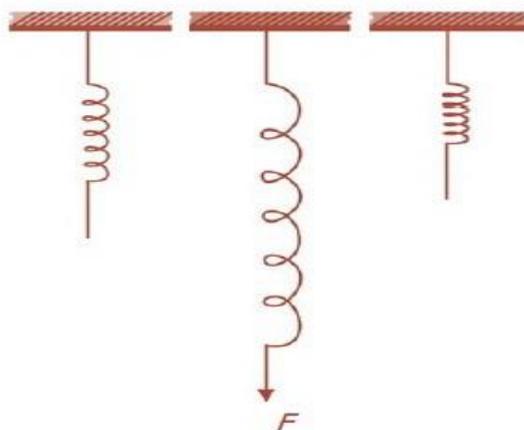
Tahap pengambilan keputusan perawatan perawatan dalam CBM dapat digolongkan ke dalam dua kategori utama yaitu prognosis dan diagnosis.

2.3.2 CBM Berbasis Getaran

Salah satu keunggulan yang dimiliki CBM berbasis getaran adalah mampu mengidentifikasi perkembangan kerusakan sebelum masuk pada tahap kerusakan yang berat. Semua mesin yang berputar, akan menghasilkan getaran. Dari getaran tersebut, terdapat ukuran amplitudo pada frekuensi yang memberikan informasi terkait kesejajaran, keseimbangan poros, kondisi bantalan dan *gear*, serta efek resonansi yang diakibatkan oleh komponen lainnya. Analisis vibrasi merupakan metode yang tidak mengganggu selama mesin beroperasi secara normal.

2.4 Getaran

Getaran adalah peristiwa gerak bolak balik secara teratur suatu benda melalui satu titik seimbang. Karena terjadi dengan teratur, getaran sering juga disebut gerak periodik. Kuat atau lemahnya pergerakan benda tersebut dipengaruhi oleh jumlah energi yang diberikan. Semakin besar energi yang diberikan maka semakin kuat pula getaran yang terjadi. Satu getaran sama dengan satu kali gerak bolak balik penuh dari benda tersebut. Dapat dilihat gambar pegas pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Getaran Pegas

Sumber : <http://fisikazone.com/pengertian-elastisitas/sifat-elastisitas-pada-pegas/>

Pegas tersebut tidak akan bergerak/bergetar sebelum ada gaya yang diberikan kepadanya. Setelah gaya tarik (F) dilepas maka pegas akan bergetar, bergerak bolak-balik disekitar posisi netral.

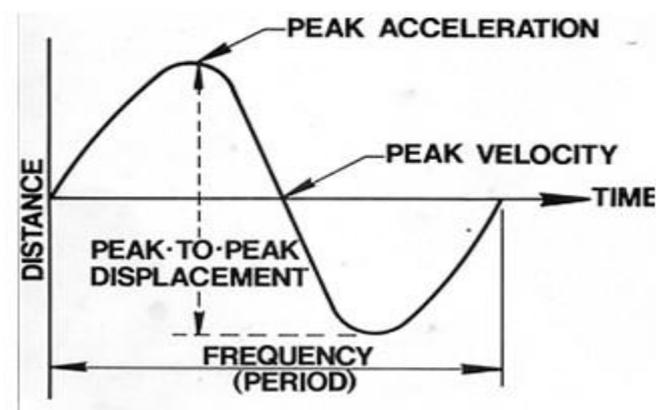
2.5 Karakteristik Getaran

Getaran adalah suatu gerak bolak-balik secara teratur di sekitar kesetimbangan. Karena terjadi secara teratur, getaran juga sering disebut gerak periodik. Kuat atau lemahnya pergerakan benda tersebut dipengaruhi oleh jumlah energi yang diberikan. Semakin besar energi, semakin kuat pula getaran yang terjadi. Satu getaran sama dengan satu kali gerak bolak-balik penuh dari benda tersebut.

Kondisi suatu getaran mesin dan masalah-masalah mekanik yang terjadi dapat diketahui dengan mengukur karakteristik getaran pada mesin tersebut. Karakteristik-karakteristik getaran yang penting antara lain adalah :

- Frekuensi getaran
- Perpindahan getaran
- Kecepatan getaran
- Percepatan getaran
- *Phase* getaran

Dengan mengacu gerakan pegas, kita dapat mempelajari karakteristik suatu getaran dengan memetakan gerakan dari pegas tersebut terhadap fungsi waktu.



Gambar 2.9 Karakteristik Getaran

Sumber : <http://es.scribd.com/doc/269063051/BAB-II-Pembahasan-Getaran-Massa>

Gerakan bandul dari posisi netral ke batas atas dan kembali lagi ke posisi netral dan dilanjutkan ke batas bawah dan kembali lagi ke posisi netral disebut satu siklus getaran (satu periode). Jumlah siklus yang dihasilkan dalam satu interval waktu tertentu disebut frekuensi. Dalam analisis getaran mesin, frekuensi lebih bermanfaat karena berhubungan dengan rpm (putaran) suatu mesin. Karakteristik getaran suatu mesin dapat dilihat pada Gambar 2.9.

2.5.1 Sinyal Getaran

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

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

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

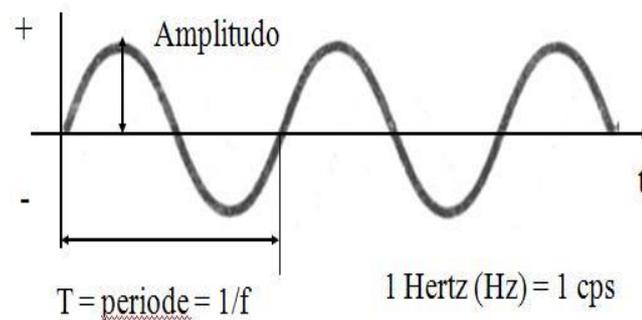
2.5.2 Frekuensi Getaran (*Vibration Frequency*)

Frekuensi adalah banyaknya periode getaran yang terjadi dalam satu putaran waktu. Besarnya frekuensi yang timbul pada saat terjadinya vibrasi dapat mengidentifikasi jenis-jenis gangguan yang terjadi. Gangguan yang terjadi pada mesin sering menghasilkan frekuensi yang jelas atau mengasikkan contoh frekuensi yang dapat dijadikan sebagai bahan pengamatan. Dengan diketahuinya frekuensi pada saat mesin mengalami vibrasi, maka peneliti atau pengamatan secara akurat dapat dilakukan untuk mengetahui penyebab atau sumber dari permasalahan. Frekuensi biasanya ditunjukkan dalam bentuk Cycle per menit (CPM), yang

biasanya disebut dengan istilah Hertz (dimana $\text{Hz} = \text{CPM}$). Biasanya singkatan yang digunakan untuk Hertz adalah Hz.

2.5.3 Amplitudo

Amplitudo adalah ukuran atau besarnya sinyal vibrasi yang dihasilkan. Amplitudo dari sinyal vibrasi mengidentifikasi besarnya gangguan yang terjadi. Makin tinggi amplitudo yang ditunjukkan menandakan makin besar gangguan yang terjadi, besarnya amplitudo bergantung pada tipe mesin yang ada. Pada mesin yang masih bagus dan baru, tingkat vibrasinya biasanya bersifat relatif. Contoh gelombang amplitudo dapat dilihat pada Gambar 2.10.

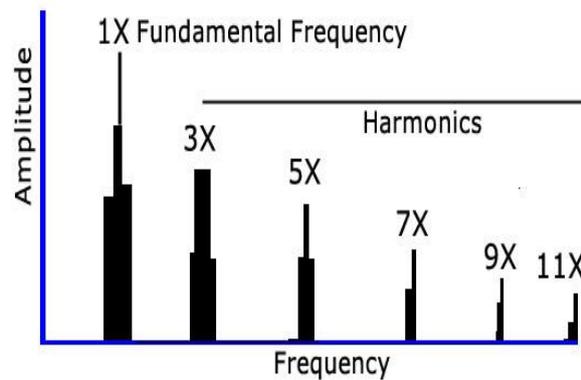


Gambar 2.10 Gelombang Amplitudo
Sumber : <https://brainly.co.id/tugas/1999800>

Amplitudo adalah simpangan vibrasi, yaitu seberapa jauh jarak dari titik keseimbangan massa jika dilihat pada gambar pegas dan diagram harmonik.

2.5.4 Harmonik

Harmonik merupakan fenomena yang timbul akibat terdistorsi gelombang sinusoidal secara periodik yang disebabkan oleh 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, misalnya suatu sistem tenaga listrik memiliki frekuensi dasar 50 Hz, maka harmonik keduanya ialah 100 Hz dan seterusnya. Pada Gambar 2.11 dapat dilihat harmonik getaran.



Gambar 2.11 Harmonik Getaran
Sumber : Girdhar, 2004

2.6 Analisa Vibrasi

Setiap mesin memiliki karakteristik getaran sendiri akibat dari torsi bantalan, poros, roda gigi dan impeller dll. Analisa vibrasi digunakan untuk menentukan kondisi mekanis dan operasional dari peralatan. Keuntungan utama dari analisa vibrasi adalah mengidentifikasi munculnya masalah sebelum menjadi masalah yang lebih serius dan menyebabkan berhentinya mesin beroperasi. Hal ini bisa dicapai dengan melakukan monitoring secara regular terhadap getaran mesin baik secara kontinyu maupun pada interval waktu yang terjadwal. Monitoring vibrasi secara regular dapat mendeteksi detorisasi atau cacat pada bantalan, kehilangan mekanis (*mechanical looseness*) dan gigi-gigi yang rusak atau aus. Analisa vibrasi dapat juga mendeteksi *misalignment* dan ketidakseimbangan (*unbalance*) sebelum kondisi ini menyebabkan kerusakan pada bantalan dan poros.

Analisa Vibrasi dapat menggunakan unit Pemindahan (*Displacement*), Velocity (Kecepatan) dan Percepatan (Accelerometer), ditampilkan sebagai waktu Waveform (TWF), tapi paling umum spektrum yang digunakan berasal dari Fast Fourier Transform dari TWF. Spektrum getaran menyediakan informasi frekuensi penting yang dapat menentukan komponen yang rusak. Dasar-dasar analisis getaran dapat dipahami dengan mempelajari model massa-pegas-peredam sederhana.

2.7 Sinyal Vibrasi

Sinyal getaran merupakan besaran fisik terhadap waktu yang variasi nilainya memuat informasi-informasi tertentu kondisi suatu komponen mesin.

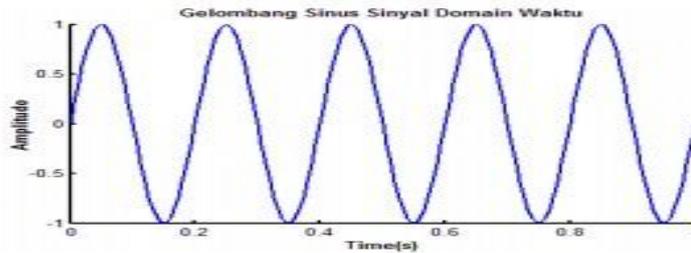
Pengukuran getaran terhadap komponen suatu mesin memberikan informasi yang berbeda-beda, untuk itu perlu dilakukan proses pengolahan data agar proses analisis sinyal getaran yang ditampilkan oleh komponen mesin yang mengalami kerusakan akan mudah dibaca. Analisis terkait data-data getaran mesin mengandung banyak informasi yang dibutuhkan untuk menentukan kondisi suatu kompoen mesin seperti, informasi terkait kondisi mesin, informasi terkait letak kerusakan suatu mesin dan penyebab kerusakan suatu komponen mesin.

Dalam proses menganalisis sinyal getaran, menguraikan data sinyal yang bertumpuk dan kompleks, merupakan cara yang paling efektif. Dalam hal ini, ada dua proses analisis dasar, yang pada umumnya sering digunakan dalam melakukan pengamatan, yaitu domain waktu dan domain frekuensi. Dari kedua proses awal inilah, sinyal getaran memunculkan tanda-tanda kerusakan pada masing-masing komponen, walaupun sebagian besar belum terlihat dengan jelas.

1. **Domain waktu (*time domain*):** yang memandang getaran sebagai simpangan dengan waktu, dimana memberikan gambaran fenomena getaran secara fisik.
2. **Domain frekuensi (*frequency domain*):** yang memandang getaran berupa amplitudo sebagai fungsi frekuensi, dimana merupakan cara yang cocok untuk mengidentifikasi komponen-komponennya. (Kunto Aji, 2007)

2.7.1 Domain Waktu (*Time Domain*)

Domain waktu merupakan grafik yang menunjukkan bentuk serta ukuran dari sinyal gelombang berdasarkan waktu per detik. Domain waktu juga bisa disebut *Waveform* dalam dunia analisis getaran. Bentuk yang ditunjukkan merupakan wujud dari gelombang sinusoidal (sinus/kosinus), tergantung dari bentuk sinyal gelombang yang masuk diawal. Sebagai contoh dari bentuk domain waktu bisa dilihat pada gambar 2.12, dimana bentuk gelombang ditunjukkan dalam grafik sinus. Pada grafik arah y menunjukkan nilai amplitudo gelombang, sedangkan arah x menunjukkan nilai waktu.

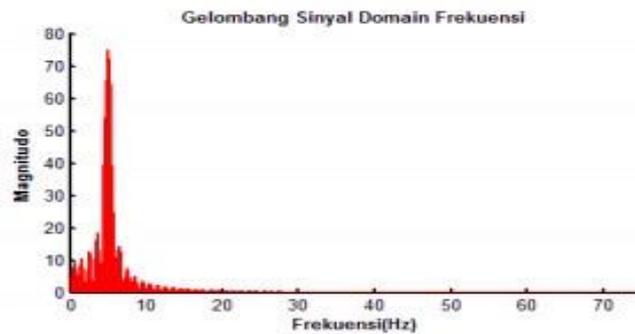


Gambar 2.12 Gelombang Sinus Sinyal Domain Waktu
 Sumber : Lyons, 1997. Understanding Digital Signal Processing. Prentice Hall PTR.

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

2.7.2 Domain Frekuensi

Pada sinyal domain frekuensi, ketika diplot berupa spektrum dengan penyajian frekuensi terhadap magnitudo. Informasi yang penting tersembunyi di dalam 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. Dengan kata lain, keras lemahnya sinyal tidak mempengaruhi frekuensi yang didalamnya. Sinyal domain frekuensi dapat dikembalikan ke sinyal domain waktu. Gelombang sinyal getaran domain frekuensi dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Gelombang Sinyal Domain Frekuensi

Sumber : Lyons, 1997. *Understanding Digital Signal Processing*. Prentice Hall PTR.

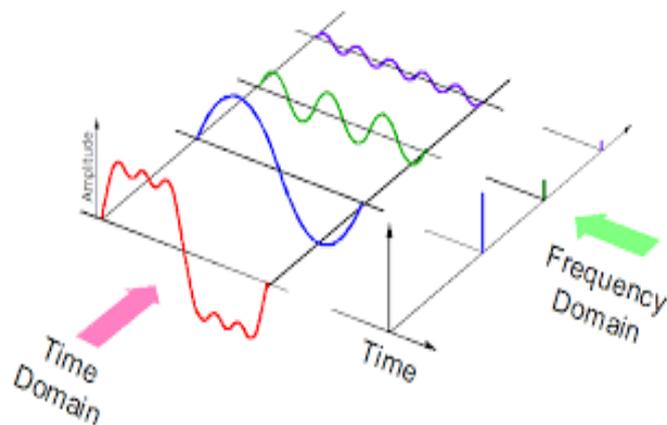
2.8 Fast Fourier Transform (FFT)

Analisis *Fourier* adalah istilah lain untuk transformasi gelombang yang semula sebagai fungsi terhadap waktu yang diubah menjadi indikator amplitudo berbanding nilai frekuensi (Hamid, 2012). 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 dianggap sebagai teknik analisis sinyal yang paling populer dan pada umumnya telah diterapkan untuk mengenali komponen frekuensi 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 2.14 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.

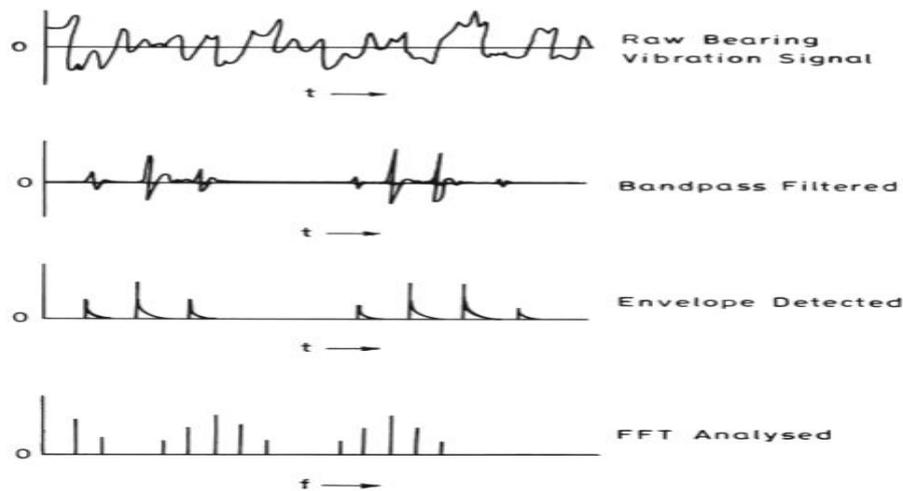


Gambar 2.14 Transformasi *Fourier*
 Sumber : <http://math.stackexchange.com/>

2.9 Analisis *Envelope*

Analisis *Envelope* adalah teknik terkenal untuk mengekstrak dampak periodik dari sinyal getaran mesin. Metode ini mampu mengekstrak dampak dampak dengan frekuensi yang sangat rendah bahkan tersembunyi oleh sinyal getaran lainnya. Oleh karena itu metode ini lebih populer daripada metode perawatan yang lain. Analisis *Envelope* juga merupakan metode yang khusus digunakan pada analisis kerusakan pada *bearing* dan *gearboxes*. Dimana metode ini fokus pada wilayah spektrum yang

memiliki frekuensi tinggi, dengan filter yang digunakan yaitu *high-pass filter*. (Girdhar, 2004). Gambar 2.15 adalah skema envelope.



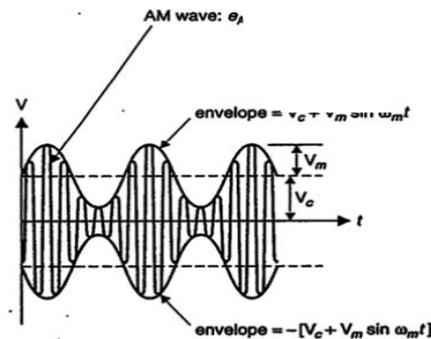
Gambar 2.15 Skema *Envelope*
Sumber : Tandon dan Choudhury, 1999

High-pass filter hanya menyaring frekuensi-frekuensi yang tinggi dan menghilangkan frekuensi rendah. Menghilangkan *peaks* 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).

2.9.1 Amplitudo Modulasi (AM)

Modulasi merupakan proses mengubah-ubah parameter suatu sinyal (sinyal pembawa atau *carrier*) dengan menggunakan sinyal yang lain (yaitu sinyal pemodulasi yang berupa sinyal informasi). Sinyal informasi dapat berbentuk sinyal audio, sinyal video, sinyal getaran atau sinyal yang lain

Pada modulasi amplitudo, sinyal pemodulasi atau sinyal informasi mengubah-ubah amplitudo sinyal pembawa. Besarnya amplitudo sinyal pembawa akan berbanding lurus dengan amplitudo sinyal pemodulasi seperti pada Gambar 2.16.

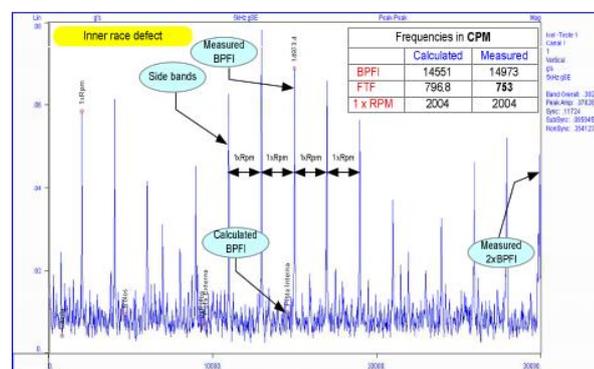


Gambar 2.16 Sinyal Amplitudo Modulasi
Sumber : Susilawati, 2009

Dalam domain frekuensi, amplitudo modulasi menghasilkan sinyal dengan daya terkonsentrasi pada frekuensi pembawa dan dua *side bands* yang berdekatan. Setiap *side bands* sama dengan *bandwidth* dengan sinyal modulasi.

2.9.2 Karakteristik Analisis Envelope Cacat Lintasan Dalam (BPF1)

Gambar 2.17 menjelaskan bahwa karakteristik cacat lintasan dalam (BPF1) akan terbentuk *side bands* dan harmoniknya dapat terlihat dengan jelas. jika diukur jarak antara *side bands*, jarak tersebut merupakan kelipatan harmonik frekuensi putaran poros. *Side bands* tersebut menunjukkan fakta bahwa elemen bantalan lintasan dalam merupakan bagian yang berputar. Munculnya *side bands* karena pada hasil domain waktu sinyal frekuensi terbentuk amplitudo modulasi (AM), sehingga hasil plot analisis envelope muncul *side bands* pada samping kanan dan kiri dari frekuensi cacat bantalan lintasan dalam (BPF1).

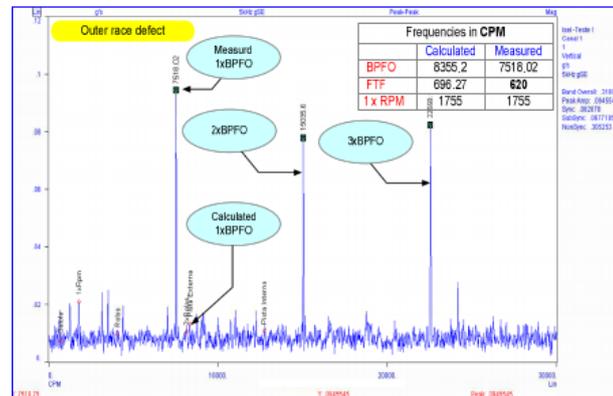


Gambar 2.17 Karakteristik Envelope Cacat Lintasan Dalam (BPF1)
Sumber : https://www.researchgate.net/figure/228421260_fig4_Fig-7-Envelope-spectrum-defect-BPFO

Side bands terjadi karena pada saat bantalan berputar, posisi bantalan cacat lintasan dalam ikut berputar sesuai dengan putaran poros. Saat cacat bantalan lintasan dalam berputar keatas, beban yang ditumpu akan semakin ringan sehingga amplitudo yang muncul akan semakin rendah. Berbeda saat posisi cacat bantalan lintasan dalam berputar turun kebawah, beban yang ditumpu akan semakin besar sehingga menghasilkan nilai amplitudo yang meningkat dan semakin tinggi.

2.9.3 Karakteristik Analisis Envelope Cacat Lintasan Luar (BPFO)

Melalui Gambar 2.18 dapat dengan mudah diverifikasi bahwa setiap cacat pada bantalan memiliki hasil plot dengan karakteristik frekuensi yang tipikal atau khas, karakteristik cacat frekuensi ini dapat digunakan sebagai pendukung keputusan dalam menganalisis cacat pada bantalan. Frekuensi cacat lintasan luar (BPFO) pada bantalan tidak memunculkan *side bands*, ini terjadi karena tipe fiksasi pada bantalan yang diuji, dimana bantalan lintasan luar merupakan bantalan yang diam atau tidak berputar, oleh karena itu tidak ada *side bands* yang muncul.



Gambar 2.18 Karakteristik Analisis Envelope Cacat Lintasan Luar (BPFO)
Sumber : https://www.researchgate.net/figure/228421260_fig4_Fig-7-Envelope-spectrum-defect-BPFO

2.10 Data Akuisisi

Data akuisisi atau yang disebut juga Data Acquisition (DAQ). Didefinisikan sebagai suatu sistem yang berfungsi untuk mengambil, mengumpulkan dan menyiapkan data, hingga memprosesnya untuk menghasilkan data yang dikehendaki. Nikolay Kirianaki mendefinisikan bahwa akuisisi data adalah pengukuran sinyal elektrik dari transduser dan peralatan pengukuran kemudian

memasukkannya ke komputer untuk diproses (Kirianaki et al, 2002). Ada juga yang mendefinisikan akuisi data adalah semua besaran fisik yang akan diukur, diamati, disimpan, dan dikontrol dapat berupa suhu, tekanan, suara, getaran dll.

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

1. Sensor : mengubah parameter fisis kedalam sinyal elektrik.
2. *Signal conditioning circuitry* : mengubah sinyal yang berasal dari sensor kedalam bentuk yang sinyal digital.
3. Analog to *Digital Converter* : menghasilkan sinyal digital yang sebelumnya sudah dikondisikan terlebih dahulu. Pada Gambar 2.19 dapat dilihat komponen *DAQ System*.

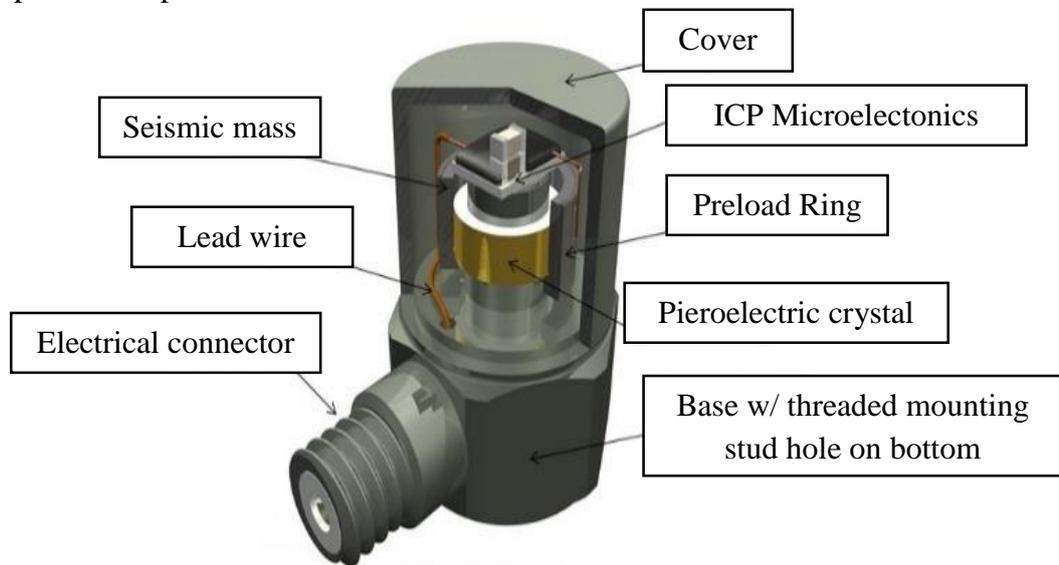


Gambar 2.19 Komponen DAQ System
 Sumber : http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/Tech_Accelerometers

2.11 Accelerometer

Accelerometer merupakan perangkat yang mengukur 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 padanya.

Karena muatannya sebanding dengan gaya, dan massanya konstan, maka muatannya juga sebanding dengan percepatan. Pada Gambar 2.20 dapat dilihat komponen-komponen *accelerometer*.



Gambar 2.20 Komponen Accelerometer
 Sumber : http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/Tech_Accelerometers

Prinsip kerja dari transduser ini berdasarkan hukum fisika bahwa apabila suatu konduktor digerakkan melalui suatu medan magnet, atau jika suatu medan magnet digerakkan melalui suatu konduktor, maka akan timbul suatu tegangan induksi pada konduktor tersebut. *Accelerometer* yang diletakan di permukaan bumi dapat mendeteksi percepatan 1g (ukuran gravitasi bumi) pada titik vertikalnya, untuk percepatan yang dikarenakan oleh pergerakan horizontal maka accelerometer akan mengukur percepatannya secara langsung ketika bergerak secara horizontal. Hal ini sesuai dengan tipe dan jenis sensor *accelerometer* yang digunakan karena setiap jenis sensor berbeda-beda sesuai dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh perusahaan pembuatnya. Saat ini hampir semua sensor/transduser accelerometer sudah dalam bentuk digital (bukan dengan sistem mekanik) sehingga cara kerjanya hanya berdasarkan temperatur yang diolah secara digital dalam satu chip.

Kelebihan :

1. Respon sinyal yang baik antara 900 sampai 6000 cpm (15.>10.000 Hz).

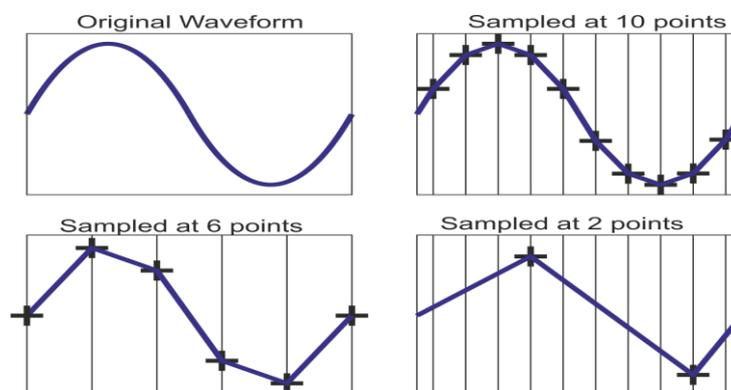
2. Respon fase datar sepanjang rentang operasi transducer.
3. Elektronik solid state dengan konstruksi yang kokoh dan andal.
4. Beroperasi dibawah mount frekuensi resonansi alami.
5. Tersedia unit khusus untuk aplikasi suhu tinggi.

Kekurangan :

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

2.12 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.



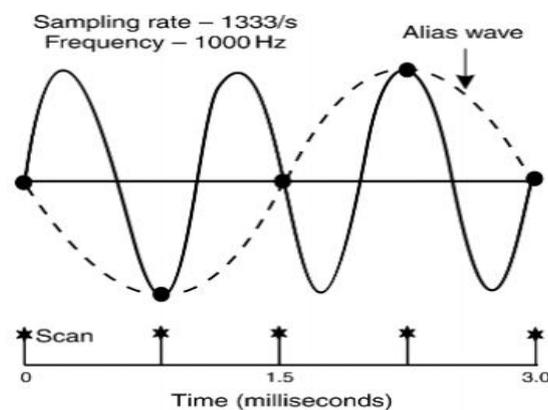
Gambar 2.21 *Sampling Rate*

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

Gambar 2.21 adalah 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.

2.13 Aliasing dan Nyquist Frekuensi

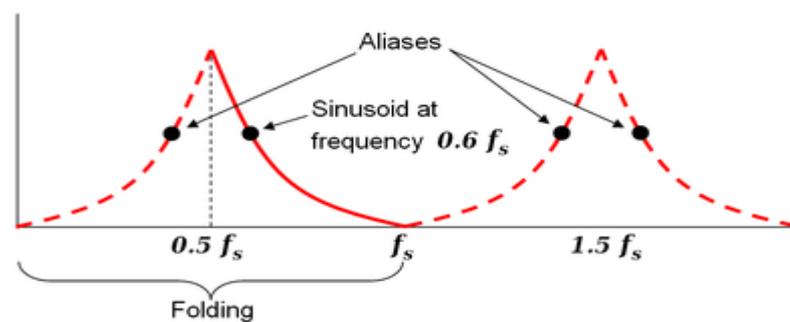
Dalam pemrosesan sinyal dan hubungannya terkait, *aliasing* adalah efek yang menyebabkan sinyal berbeda menjadi tidak dapat dibedakan saat dijadikan sampel. Ini juga mengacu pada distorsi atau artefak yang dihasilkan sinyal yang direkonstruksi dari sampel berbeda dari sinyal kontinu yang asli. *Aliasing* dapat terjadi dalam sinyal yang diambil sampel pada waktunya, misalnya audio digital, dan disebut *aliasing* temporal. *Aliasing* merupakan fenomena atau suatu efek yang terjadi akibat dari rekonstruksi sinyal yang tidak sesuai dengan sinyal aslinya yang saat pencuplikan, frekuensi pencuplikan dibawah standar ketentuan nyquits. Efek *aliasing* dapat dilihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Aliasing
(Girdhar, 2004)

Nyquist memberikan standar dalam pencuplikan dimana frekuensi pencuplikan (*sampling*) adalah minimum 2X dari batas maksimum frekuensi sinyal analog yang akan dikonversi. Bila sinyal analog yang akan dikonversi memiliki nilai frekuensi sebesar 100 Hz maka frekuensi pencuplikan (*sampling*) minimum dari ADC adalah 200 Hz.

Nyquist frekuensi, dinamai dari seorang insinyur elektronik yaitu Harry Nyquist. *Nyquist* frekuensi adalah setengah dari tingkat *sampling* dari sistem pemrosesan sinyal diskrit. Kadang-kadang dikenal sebagai frekuensi lipat dari sistem *sampling*. Contoh lipatan pada *Nyquist* frekuensi dapat dilihat pada Gambar 2.23, dimana f_s adalah laju *sampling* dan $0,5 f_s$ adalah *Nyquist* frekuensi yang sesuai. Titik hitam yang diplot pada $0,6 f_s$ mewakili amplitudo dan frekuensi sinusoidal yang frekuensinya 60% dari laju *sampling*. Tingkat *Nyquist* adalah dua kali frekuensi komponen maksimum dari fungsi yang dijadikan sampel. Sebagai contoh, tingkat *Nyquist* untuk sinusoid pada $0,6 f_s$ adalah $1,2 f_s$, yang berarti bahwa pada tingkat f_s , itu adalah *undersampled*. Dengan demikian, tingkat *Nyquist* adalah properti dari sinyal waktu kontinu, sedangkan frekuensi *Nyquist* adalah milik sistem diskrit-waktu.



Gambar 2.23 Lipatan Pada *Nyquist* Frekuensi
 Sumber : https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist_frequency