

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah. Energi angin juga bisa dimanfaatkan. Pemanfaatan energi angin dilakukan dengan cara menggunakan turbin angin. Dengan menggunakan turbin angin, energi kinetik angin dapat diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan generator. Akan tetapi, pada umumnya turbin angin sering mengalami kerusakan dikarenakan besarnya angin yang diterima secara terus-menerus. Kerusakan paling umum yang sering terjadi pada turbin angin terjadi pada gear dan bantalan. Bantalan (*bearing*) merupakan salah satu komponen yang berperan sangat penting dalam proses kerja turbin angin yang berfungsi sebagai penumpu dan penahan beban aksial maupun radial. Kerusakan bantalan pada umumnya sering terjadi pada bagian lintasan dalam, lintasan luar, bola, dan sangkar (*cage*) yang dapat mengakibatkan kinerja turbin angin tidak optimal.

Sudah banyak penelitian-penelitian yang dilakukan untuk mengetahui kerusakan yang terjadi pada bantalan. Seperti yang dilakukan oleh Setiyadi dan Raharjo (2016), melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui cacat sangkar (*cage*) pada bantalan gelinding. Karakteristik getaran pada bantalan gelinding yang mengalami cacat sangkar (*cage*) bisa diketahui dengan percobaan pada *test rig*. Parameter pengukuran getaran yaitu variasi putaran dan tingkat cacat pada sangkar (*cage*) (kerusakan ringan, sedang, dan berat). Analisa yang digunakan analisa *descriptive*, *trending*, dan *comparative* dari amplitudo, spektrum (*frequency domain*), dan sinyal (*time domain*). Dari hasil pengukuran dan analisa yang dilakukan diketahui bahwa dengan bertambahnya tingkat kerusakan pada bantalan maka terjadi kenaikan amplitudo pada *time domain* dan terjadi perubahan amplitudo antara bantalan kondisi normal dengan bantalan yang mengalami cacat sangkar (*cage*) pada frekuensi 8,4 Hz dimana frekuensi tersebut adalah frekuensi cacat sangkar (*cage*) atau disebut FTF (*Fundamental Train Frequency*).

Contoh lain seperti yang dilakukan oleh Wahyudi,dkk (2016), melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui tingkat kerusakan (cacat) dan karakteristik spektrum getaran dari bantalan yang masih bagus, cacat 30% di lintasan dalam (*inner race*), 30% di lintasan luar (*outer race*), cacat 30% di *rolling element*, dan bantalan yang rusak secara alami. Penelitian ini dilakukan dengan rig tool menggunakan bantalan seri 2205-K2RS-TVH-C3 pada kecepatan 1500 RPM, dimana sinyal getaran diukur menggunakan alat FAG Detector III yang kemudian dilakukan analisa dengan *trendline software*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa bantalan dengan kondisi normal mempunyai karakteristik amplitudo *velocity* dibawah 1,80 mm/s dan spektrum getaran *FFT velocity* dan *demodulation of acceleration* yang tidak berimpitan dengan garis frekuensi impuls baik BPFI, BPFO, dan BSF. Bantalan cacat 30% di lintasan dalam (*inner race*) menghasilkan amplitudo *velocity* yang tinggi. Bantalan cacat 30% di lintasan luar (*outer race*) dan cacat 30% di *rolling element* mempunyai amplitudo *velocity* yang cenderung bervariasi. Bantalan yang cacat 30% di lintasan dalam, lintasan luar ataupun *rolling element* menghasilkan spektrum vibrasi *FFT velocity* dan *demodulation of rolling element* dengan garis puncak frekuensi berimpitan dengan garis frekuensi impuls masing-masing BPFI, BPFO, ataupun BSF.

Penelitian yang dilakukan oleh (Suhardjono, 2004) tentang analisis getaran pada bantalan bola untuk menentukan jenis dan tingkat kerusakannya. Melakukan pengujian pada tiga buah bantalan dengan seri ASB No. 6203. Bantalan pertama adalah bantalan baru (baik), bantalan kedua adalah bantalan cacat (cacat lintasan dalam, lintasan luar, cacat bola, cacat sangkar) dan bantalan ketiga adalah bantalan yang sudah bekas. Pengukuran dilakukan pada arah vertical dan horizontal dengan memakai metode analisis domain frekuensi dan domain waktu. Hasil yang didapat setiap kerusakan pada bantalan dibagian lintasan dalam, lintasan luar, bola, sangkar (*cage*), dan bantalan bekas menunjukkan kenaikan nilai amplitudo pada frekuensinya masing-masing. Sinyal getaran untuk cacat pada bola juga terjadi karena tumbukan secara periodik, tetapi lebih teratur dan amplitudonya relatif besar.

Walaupun metode spektrum frekuensi sukses digunakan untuk mendeteksi cacat pada bantalan, namun sering tidak berhasil mendeteksi cacat dini pada bantalan. Hal tersebut disebabkan oleh amplitudo yang dihasilkan oleh cacat dini bantalan sangat lemah/rendah. Sehingga berpotensi tertutup dari frekuensi getaran yang lainnya. Metode *envelope* adalah metode lain yang dapat digunakan dalam mendeteksi cacat bantalan. Beberapa penelitian yang berhasil mendeteksi cacat bantalan berbasis analisis *envelope* adalah sebagai berikut.

Dwi Susanto (2017) melakukan penelitian yang bertujuan untuk menguji keefektifan metode analisis *envelope* dalam mendeteksi kerusakan lintasan dalam bantalan bola tipe *double row*. Pengukuran getaran dilakukan pada model sederhana sistem poros rotor, dimana getaran akan diukur menggunakan accelerometer. Jenis bantalan yang digunakan yaitu jenis *Self-aligning ball bearing*, merk SKF 1207 EKTN9/C3 dengan kondisi normal dan kondisi cacat dalam. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan putaran poros yaitu, (1000 RPM, 1200 RPM, 1400 RPM, dan 1600 RPM) yang kemudian sinyal getaran yang dihasilkan pada proses pengujian akan dianalisis menggunakan spektrum dan analisis *envelope*. Dari hasil penelitian, menunjukkan bahwa bantalan kondisi normal sinyal getaran yang dihasilkan mendekati harmonik (sinusoidal) dan tidak terlihat frekuensi dengan nilai amplitudo tinggi. Sedangkan pada bantalan kondisi cacat lintasan dalam (*inner race*) menghasilkan sinyal getaran berbentuk stokastik (*random*) dan muncul amplitudo frekuensi cacat bantalan lintasan dalam disekitar BPFI (*Ball Pass Frequency Inner Race*). Pada bantalan cacat lintasan dalam (*inner race*) menghasilkan frekuensi dengan amplitudo dominan pada daerah $1 \times \text{BPFI}$, $2 \times \text{BPFI}$ dan $3 \times \text{BPFI}$. Serta muncul juga side band pada kedua sisi amplitudo frekuensi cacat bantalan yang menjadi ciri khas dari frekuensi cacat bantalan lintasan dalam (*inner race*).

Tiwari da Jatola (2013) dalam penelitiannya yang berjudul *Fault Detection in Bearing Using Envelope Analysis*, menunjukkan keunggulan dari metode analisis *envelope*. Benda uji yang digunakan adalah bantalan tipe SKF 6002-2Z. Jenis kerusakan komponen terdapat pada lintasan luar, lintasan dalam dan bola bantalan. Analisis menggunakan metode *envelope* menemukan frekuensi

kerusakan pada nilai 7.43 Hz untuk lintasan luar BPFO, 10.83 Hz untuk lintasan dalam BPFI dan 5.70 Hz untuk bola bantalan BSF. Proses *high pass filter* yang terdapat pada analisis *envelope* merupakan cara yang akurat untuk menghilangkan frekuensi-frekuensi rendah yang memiliki amplitudo yang tinggi pada spektrum. Dengan menghilangkan frekuensi-frekuensi rendah pada spektrum, maka frekuensi tinggi yang memiliki nilai amplitudo yang rendah seperti BPFO, BPFI dan BSF akan mudah untuk diamati keberadaannya.

Dari hasil penelitian diatas maka dapat disimpulkan bahwa analisis *envelope* lebih superior untuk mendeteksi kerusakan level dini pada bantalan dibandingkan dengan analisis spectrum frekuensi.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kincir angin

Kincir angin awalnya dibuat untuk mengakomodasikan kebutuhan petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dan lain lain. Kincir angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lain yang lebih dikenal dengan *Windmill*. Pada saat ini kincir angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan adanya prinsip konversi energi. Kincir angin merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi gerak, dimana energi penggerakannya berasal dari angin. Energi gerak selanjutnya diteruskan berupa putaran sudu dan poros generator sehingga menghasilkan energi listrik.

Sesuai dengan namanya, kincir angin menggunakan energi kinetik dari angin sebagai tenaga pendorongnya. Angin menggerakkan bilah kincir yang berputar pada porosnya, pada gilirannya mendorong perangkat tertentu, misalnya generator untuk menghasilkan listrik. Kincir yang berputar ini terhubung ke generator, bisa juga melalui *gearbox* atau langsung. Menariknya, sebagian besar turbin modern berputar searah jarum jam.

Cara kerja dari pembangkit listrik tenaga angin ini yaitu awalnya energi angin memutar kincir angin. Kincir angin bekerja tidak seperti kipas angin (bukan menggunakan listrik untuk menghasilkan angin, namun menggunakan angin

untuk menghasilkan listrik). Kemudian angin akan memutar sudu kincir, lalu diteruskan untuk memutar rotor pada generator di bagian belakang kincir angin. Generator mengubah energi gerak menjadi energi listrik dengan teori medan elektromagnetik, yaitu poros pada generator dipasang dengan material feromagnetik permanen. Pada sekeliling poros terdapat stator yang menyerupai kumparan-kumparan kawat yang membentuk *loop*. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya terjadi perubahan fluks yang menghasilkan tegangan dan arus listrik.

2.2.2 Jenis Kincir angin

1. Tipe *Horizontal Axis Wind Turbin*

Kincir angin sumbu horizontal mempunyai poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya memakai sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. Hampir semua mempunyai sebuah *gearbox* yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi berputar lebih cepat. Karena sebuah menara menghasilkan gerakan udara yang tidak beraturan di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah angin pada menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan dibuat sedikit miring.

Karena gerakan angin yang tidak beraturan tadi menyebabkan rusaknya struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar kincir ini merupakan mesin *up wind* (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan pada gerakan angin yang tidak beraturan tadi, mesin *down wind* (menurut jurusan angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena di saat angin berhembus dengan kencang, bilah-bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan dan dengan demikian juga mengurangi resistensi angin dari bilah-bilah itu.



Gambar 2.1. Kincir Angin Tipe *Horizontal*
(<https://id.wikipedia.org>, 2016)

2. Tipe *Vertical Axis Wind Turbin*

Turbin angin sumbu vertikal/tegak memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. Kincir angin tipe ini dapat menggunakan angin dari berbagai arah.

Dengan sumbu yang vertikal, generator serta *gearbox* bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah di jangkau pada saat *maintenance*. Tapi ini menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. *Drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) bisa saja tercipta saat kincir berputar.

Karena sulit dipasang di atas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah, sehingga yang tersedia adalah energi angin yang sedikit. Aliran udara di dekat tanah dan obyek yang lain mampu menyebabkan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan *bearing wear* yang akan menyebabkan biaya *maintenance* menjadi tinggi atau memperpendek umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang

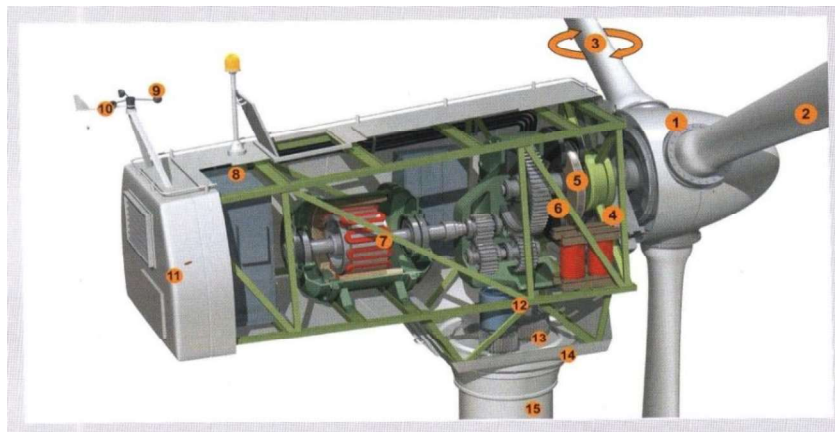
dipasangi menara turbin kira-kira 50% dari tinggi bangunan, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal.



Gambar 2.2 Kincir Angin Tipe Vertikal
(<https://id.wikipedia.org>, 2016)

2.2.3 Komponen Utama Turbin Angin

Komponen pertama yang akan terlihat jelas dari sebuah turbin angin adalah baling-baling (*blade*) berukuran besar yang bisa berputar ketika angin berhembus. Meskipun demikian, menurut Nugroho (2013) dalam bukunya, demi berfungsinya dengan baik, sebuah turbin angin terdiri dari beragam komponen utama dapat dilihat pada gambar 2.1 sebagai berikut:



Gambar 2.3 Komponen Utama Turbin Angin
(Nugroho, 2013)

1. Rotor

Rotor merupakan bagian utama dari komponen fisik sebuah turbin angin yang bisa nampak dari luar. Bagian rotor sebenarnya juga meliputi beberapa komponen lainnya, yaitu *blade* yang juga meliputi sistem pengarah sudut dari sudut *blade* terhadap tiupan angin dengan istilah *pitch control*.

2. Blade

Komponen ini merupakan bagian yang nampak paling jelas dan paling menarik perhatian dari sebuah turbin angin. Fungsi *blade* adalah untuk menangkap tenaga angin yang melewatinya, dan mentransfer energi gerak ini menjadi gerakan menjadi gerakan putaran melalui poros atau as. Ada berbagai macam bentuk dan ukuran baling-baling pada sebuah turbin. Ukuran dan bentuk ini disesuaikan dengan kebutuhan serta jumlah tenaga listrik yang ingin dibangkitkan

3. Pitch, Pengatur Sudut Baling-baling

Turbin angin didesain untuk bekerja optimal pada kecepatan angin tertentu. Bila angin bertiup pada skala kecepatan rendah, turbin angin tidak akan dapat bekerja dengan baik dalam membangkitkan tenaga listrik sesuai dengan yang diharapkan. Sebaliknya, angin yang bertiup dengan skala terlalu kencang akan membuat putaran yang terlalu cepat dan hal ini tidak akan menguntungkan karena bisa merusak kinerja dari motor pembangkit listrik tersebut. Untuk alasan inilah, kecepatan putaran baling-baling perlu dikurangi agar tetap berada pada tingkat kecepatan rotasi yang optimal baik. *Pitch control* didesain untuk memenuhi tugas tersebut. Untuk menghentikan putaran apabila putaran baling-baling terlalu kencang, *pitch control* bekerja sama dengan rem (*brake*) yang juga merupakan salah satu komponen turbin angin. Kecepatan angin yang diukur menggunakan alat anemometer yang biasanya merupakan salah satu komponen pada turbin angin ini akan memberi sinyal bahwa kecepatan angin terlalu cepat atau terlalu lambat, maka sistem *pitch control* akan mengatur kembali sudut dari setiap sudut baling-baling hingga berada pada kondisi yang normal atau optimal.

4. Rem (*Brake*)

Sebagian besar turbin angin yang beroperasi mempunyai sistem yang bekerja sebagai rem (*brake*) untuk mengurangi kecepatan hingga menghentikan putaran *blade* yang diakibatkan oleh angin yang terlalu kencang. Dalam kondisi angin yang sangat kencang, putaran yang terlalu tinggi akan menghancurkan sebuah turbin angin. Karena itu, komponen rem (*brake*) ini dibutuhkan untuk sebuah turbin angin.

5. Poros (*As*)

Tenaga putaran yang berasal dari *blade* akan ditransfer menggunakan poros atau *as*. Poros pertama yang berhubungan langsung dengan baling-baling akan berputar dengan kecepatan rotasi yang relatif cukup rendah. Hal ini dibuat demikian agar baling-baling tidak perlu bergerak bergerak terlalu cepat sehingga sistem baling-baling tidak cepat rusak.

6. Roda gigi (*Gearbox*)

Roda gigi ini juga dikenal dengan istilah teknis sebagai gearbox, yang merupakan komponen yang bekerja untuk mengubah kecepatan rotasi dari cepat menjadi perlahan atau dari perlahan menjadi cepat. Perubahan kecepatan ini biasanya berdasarkan perbedaan ukuran diameter dari roda gigi yang berputar. Disamping untuk mengubah kecepatan putaran, sistem roda gigi juga memiliki fungsi keselamatan. Dalam desain turbin angin pada tahun 1990-an, banyak terjadi kecelakaan dari sebuah turbin angin yang dikarenakan gagal berfungsinya sistem roda gigi dari turbin angin tersebut. Saat roda gigi tidak berfungsi, putaran dari baling-baling beserta porosnya tidak bisa menjadi energi listrik. Inilah yang akan menyebabkan putaran tidak terkontrol dan putaran ini berubah menjadi energi panas yang berlebihan serta menyebabkan terbakarnya turbin angin yang diikuti dengan kehancuran turbin angin.

7. Dinamo Generator Pembangkit Listrik

Fungsi dari generator listrik atau dinamo yang dipasang dalam turbin angin adalah untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik dengan adanya tenaga putaran atau rotasi dari *blade* yang ditiup oleh angin. Dalam sebuah turbin angin, baling-baling biasanya berputar pada kecepatan rotasi sebesar 5-20 RPM,

sedangkan kecepatan rotasi ini masih jauh lebih rendah dibandingkan yang dibutuhkan oleh generator yaitu sekitar 750-3600 RPM. Untuk alasan inilah dibutuhkan generator listrik yang tersedia dari mulai ukuran kecil sekitar 300 Watt, 1 kWatt, hingga 100 kWatt, bahkan dalam ukuran lebih besar dari 1 MegaWatt untuk sebuah turbin angin.

8. Kontrol Elektronik

Kontrol elektronik adalah bagian penting agar turbin angin terhindar dari kerusakan. Alat kontrol ini akan memberikan izin sistem untuk bekerja bila angin bertiup pada kecepatan 12-25 km/jam. Akan tetapi jika kecepatan angin mulai melebihi 88-100 km/jam, maka sistem kontrol akan memberikan perintah otomatis agar berhenti untuk bekerja. Dalam kondisi inilah baling-baling akan menjadi terlalu cepat dan sistem turbin mengalami *overheating* yang apabila dibiarkan maka akan mengakibatkan kerusakan pada salah satu sistem turbin angin.

9. Anemometer

Anemometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang dipasangkan pada turbin-turbin angin modern yang memiliki sistem kontrol yang cukup kompleks. Dengan adanya anemometer ini akan memudahkan untuk mengetahui apabila ada kondisi yang perlu diperhatikan, terutama jika angin bertiup sangat kencang dan akan membahayakan turbin angin dengan cara memberikan sinyal kepada sistem kontrol.

10. Pendeteksi Arah Angin (*Wind Vane*)

Alat pendeteksi arah tiupan angin ini juga merupakan alat yang biasanya dipasang pada turbin angin modern. Alat ini juga mengirimkan sinyal data kepada sistem kontrol untuk memberikan data arah tiupan angin. Sesuai data dari alat ini, sistem pengontrol kemudian akan mengirimkan perintah kepada pemutar rotor arah baling-baling (*Yaw Drive*) untuk memutar arah rotor baling-baling turbin agar tetap bergerak mengikuti arah angin yang bertiup guna memaksimalkan tenaga angin yang dapat ditangkap oleh turbin angin.

11. Pengungkung Sistem (*Nacelle*)

Nacelle adalah istilah yang diberikan untuk bagian dari sebuah turbin angin yang menutupi bagian yang bergerak yang merupakan bagian penting dari sistem pembangkitan listrik didalam turbin angin. *Nacelle* ini memiliki fungsi untuk melindungi komponen-komponen penting dalam turbin angin dari berbagai kerusakan dari pengaruh hujan, panas sinar matahari, dll. Biasanya *nacelle* pada turbin angin modern ini dibuat menggunakan bahan komposit serat gelas (*fiber glass*) sebagai bahan utamanya karena kekuatan serta bobotnya yang sangat ringan.

12. Poros Pemutar Dinamo Kecepatan Rotasi Tinggi

Putaran rotasi rotor baling-baling turbin yang berkecepatan rendah akan di konversikan menjadi putaran dengan RPM yang lebih tinggi dengan memanfaatkan sebuah sistem roda gigi (*gearbox*). Putaran tinggi ini dikirim menuju ke generator listrik melalui poros yang berputar dengan kecepatan yang sudah diatur hingga kecepatannya cukup ideal untuk generator tersebut dalam membangkitkan listrik.

13. Pemutar Arah Rotor Baling-baling (*Yaw Drive*)

Turbin angin modern mempunyai komponen yang berfungsi untuk memutar arah depan dari *blade* agar selalu berhadapan pada posisi tegak lurus terhadap angin. Sistem *yaw drive* ini dikontrol oleh sistem pengontrol elektronik yang mendapatkan informasi arah angin dari alat *wind vane*, yaitu memberikan data ke mana arah angin bertiup. Sinyal ini lalu di proses oleh sistem pengontrol elektronik, untuk kemudian pengontrol elektronik ini memberikan perintah kepada *yaw drive* agar memutar arah *nacelle* dan rotor sehingga berhadapan langsung secara tegak lurus dengan arah tiupan angin. Dengan demikian, baling-baling akan selalu berada pada posisi optimal untuk menangkap tenaga angin semaksimal mungkin.

14. Motor Penggerak *Yaw Drive*

Motor listrik atau sistem hidrolik digunakan pada *yaw drive* dikarenakan beban tenaga yang harus diberikan saat memutar *nacelle* dan rotor yang cukup

berat. Kontrol terhadap sistem ini dilakukan dengan sistem elektronik sehingga semua dilakukan tanpa intervensi seorang operator.

15. Struktur Penyangga Turbin Angin

Komponen penyangga turbin angin ini merupakan struktur yang akan menyangga seluruh berat dari komponen turbin angin dan juga merupakan komponen yang menjamin keselamatan di sekitar berdirinya turbin angin. Bahaya dapat saja terjadi ketika misalkan angin bertiup sangat kencang, gempa bumi, atau terjadinya kebakaran pada komponen turbin angin. Oleh karena itu, komponen menara haruslah dibuat dari material yang sangat kuat tetapi ringan dan di rancang untuk berdiri kokoh.

2.2.4 Metode Perawatan (*Maintenance*)

Manajemen perawatan mesin merupakan hal sangat penting dalam sebuah industri. Melihat akan dampak yang diakibatkan oleh buruknya sebuah manajemen perawatan, yang dapat mengakibatkan kerugian di berbagai aspek didalam perusahaan. Maka dari itu, perawatan adalah kegiatan yang diperlukan untuk mempertahankan (*retaining*) dan mengembalikan (*restoring*) mesin ataupun peralatan kerja ke kondisi yang terbaik sehingga dapat melakukan produksi dengan optimal. Sistem perawatan atau pemeliharaan terbagi menjadi jenis antara lain yaitu:

a. *Breakdown Maintenance*

Breakdown maintenance merupakan suatu kegiatan perawatan yang dilakukan tanpa adanya rencana terlebih dahulu. Dimana kerusakan terjadi secara mendadak pada alat/mesin yang sedang beroperasi, sehingga mengharuskan perbaikan secara menyeluruh ataupun menggantinya.

Hal yang menyebabkan terjadinya kerusakan biasanya terjadi karena berbagai macam faktor, seperti kurangnya perhatian terhadap mesin atau alat. Pada umumnya proses *breakdown maintenance* sering dilakukan tanpa suatu perencanaan atau dadakan sehingga proses tersebut tidak direncanakan secara matang dan memerlukan biaya yang tidaklah murah.

b. *Preventive Maintenance*

Preventive maintenance adalah pekerjaan perawatan yang bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan, atau cara perawatan yang direncanakan untuk pencegahan. Ruang lingkup pekerjaan *preventif* termasuk: inspeksi, perbaikan kecil, pelumasan dan penyetelan, sehingga mesin selama beroperasi dapat terhindar dari kerusakan. Ada beberapa jenis pemeliharaan secara *Preventive maintenance* antara lain: 1). *Routine maintenance* yaitu kegiatan perawatan yang dilakukan secara rutin, dan 2). *Periodic maintenance* yaitu kegiatan perawatan yang dilakukan secara periodic atau dalam jangka waktu tertentu.

c. *Predictive maintenance*

Maintenance jenis ini memiliki kemiripan dengan *preventive maintenance* namun tidak dijadwal secara teratur. *Predictive maintenance* mengantisipasi kegagalan suatu peralatan sebelum terjadi kerusakan total. Biaya penerapan *predictive maintenance* lebih kecil bila dibandingkan dengan *preventive maintenance* ataupun *breakdown maintenance*. Cara kerja *maintenance* jenis ini berdasarkan hasil monitoring kondisi peralatan, analisis kerusakan dan diagnosa.

2.2.5 *Condition Based Maintenance (CBM)*

Condition based maintenance (CBM) diperkenalkan untuk mencoba memelihara peralatan yang benar di saat yang tepat. *CBM* didasarkan pada penggunaan *real-time data* untuk memprioritaskan dan mengoptimalkan sumber daya pemeliharaan. Pengamatan status dari sebuah sistem dikenal sebagai *condition monitoring*. Sistem ini akan mampu dengan sempurna menentukan kesehatan peralatan, dan dilakukan hanya ketika pemeliharaan benar-benar perlu.

Condition Based Maintenance (CBM) merupakan jenis perawatan dengan memantau kondisi suatu komponen, oleh karena itu banyak digunakan karena mempunyai banyak manfaat dan kelebihan seperti:

- a. peningkatan keandalan sistem
- b. mengurangi biaya pemeliharaan
- c. *breakdown* tak terduga berkurang atau bahkan dihilangkan
- d. hidup Peralatan dimaksimalkan.

2.2.6 Metode-metode *Condition Monitoring*

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

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

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

2.2.7 *Condition monitoring (CM) untuk Metode CBM*

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

Dalam hal membuat jadwal perawatan memonitor kerusakan mesin, catatan jadwal waktu ditentukan dari proses pengamatan kondisi komponen mesin saat beroperasi. Untuk itu dibutuhkan data yang menunjukkan serangkaian proses operasi mesin yang sudah terukur, dan sudah terekam secara periodik dan berkelanjutan.

Maka dapat disimpulkan, metode memonitor kondisi mesin untuk sebuah pengamatan kerusakan, terdiri dari lima tahapan yaitu: deteksi kerusakan,

diagnosis kerusakan, prognosis terkait perkembangan kerusakan, menentukan tempat kerusakan yang akan di perbaiki, evaluasi. Tahapan diagnosis kerusakan, merupakan proses yang menentukan lokasi kerusakan pada sebuah komponen mesin, dan hal ini merupakan tahapan yang paling penting dari proses memonitor kondisi mesin.

2.2.8 Condition Based Maintenance (CBM) Berbasis Getaran

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

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

- a. Penangkap sinyal/*transducer*
- b. *Signal analyzer*
- c. *Software* analisis
- d. Komputer/PC

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

2.3 Bantalan

2.3.1 Pengertian Bantalan

Bantalan yang biasa disebut bantalan dalam Bahasa Indonesia adalah sebuah elemen mesin yang berfungsi untuk membatasi gerak relatif antara dua komponen mesin atau lebih agar selalu bergerak pada arah yang diinginkan. Posisi bantalan harus kuat, hal ini agar elemen mesin dan poros dapat bekerja dengan baik. Pada suatu peralatan/mesin dapat dipastikan bahwa terdapat banyak

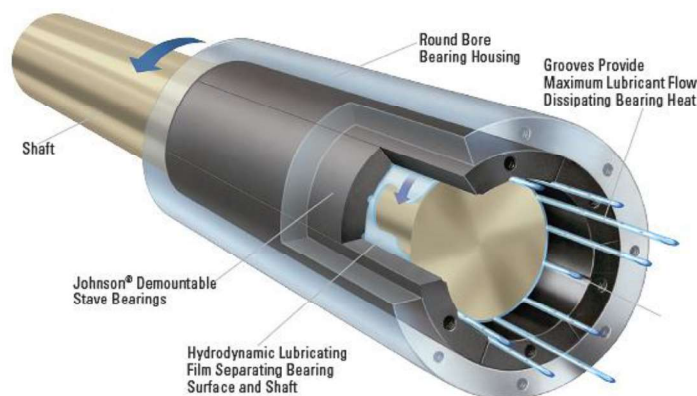
komponen yang bergerak baik dalam bentuk gerakan angular maupun gerakan linear. peralatan. Tumbukan antara komponen mesin tersebut dapat diminimalisir dengan menggunakan *bearing* pada poros/as. Terdapat 2 jenis mekanisme yang digunakan bantalan dalam mengatasi gesekan yaitu mekanisme *sliding* dan mekanisme *rolling*. Untuk mekanisme *sliding*, dimana terjadi gerakan relatif antar permukaan, maka penggunaan pelumas memiliki peranan yang sangat penting. Sedangkan mekanisme *rolling*, dimana tidak boleh terjadi gerakan relatif antara permukaan yang berkontak, manfaat pelumas lebih kecil. Bentuk pelumas dapat berupa gas, cair maupun padat.

2.3.2 Jenis-jenis Bantalan

Bantalan di bagi menjadi beberapa jenis diantaranya berdasarkan konstruksi atau mekanismenya dan juga berdasarkan arahnya. Bantalan berdasarkan konstruksi atau mekanismenya terdiri atas :

1. Bantalan luncur (*sliding bearing*)

Bantalan luncur atau biasa disebut *sliding bearing* ini menggunakan mekanisme sliding, dimana dua permukaan komponen mesin saling bergerak relatif. Diantara kedua permukaan diberi lapisan pelumas sebagai agen utama untuk mengurangi tumbukan antara kedua permukaan. Bantalan luncur untuk beban arah radial disebut *journal bearing* dan untuk beban arah aksial disebut *plain thrust bearing*. Contoh konstruksi bantalan luncur (*sliding bearing*) bisa dilihat dari gambar 2.4.



Gambar 2.4 Bantalan Luncur (*Sliding Bearing*)
<http://www.duramaxmarine.com/advanced-stave.htm>

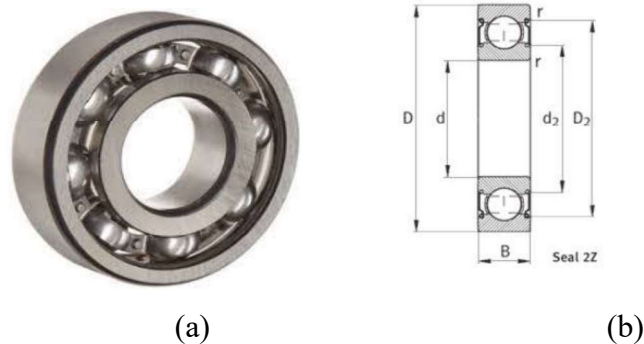
2. Bantalan Gelinding (*rolling bearing*)

Pada bantalan ini terjadi gesekan gelinding antara bagian yang berputar dengan yang diam melalui elemen gelinding seperti bola (peluru), rol atau rol jarum dan rol bulat. Bantalan gelinding menggunakan elemen rolling untuk mengatasi gesekan antara dua komponen yang bergerak. Diantara kedua permukaan ditempatkan elemen gelinding seperti misalnya bola, rol, taper, dll.

Jenis-jenis bantalan gelinding:

a. Bantalan bola radial alur dalam baris tunggal

Bantalan ini mempunyai alur dalam pada kedua cincinnya. Karena memiliki alur, maka jenis ini mempunyai kapasitas dapat menahan beban secara ideal pada arah radial dan aksial. Maksud dari beban radial adalah beban yang tegak lurus terhadap sumbu poros, sedangkan beban aksial adalah beban yang searah sumbu poros.



Gambar 2.5. (a) Bantalan bola radial alur dalam baris tunggal
(b) Potongan Lintang Bantalan

(<http://www.mechanicall-engineering.net/2016/10/pengertian-bearing-serta-fungsi-dan.html?m=1>)

Keterangan :

D : Diameter Luar

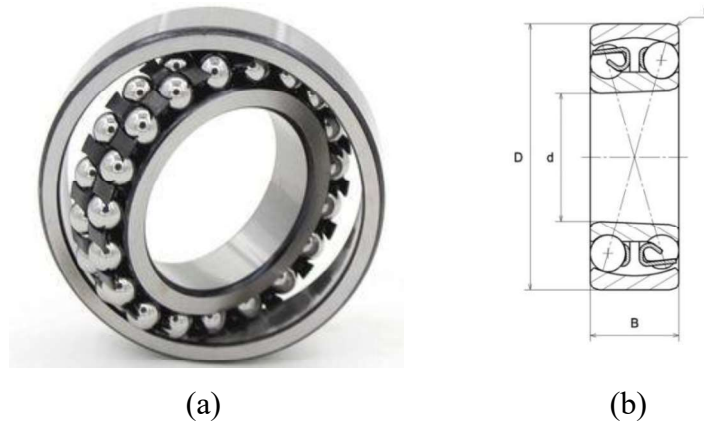
d : Diameter Dalam

B : Lebar

b. Bantalan bola mapan sendiri baris ganda

Jenis ini mempunyai dua baris bola, masing-masing baris memiliki 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.

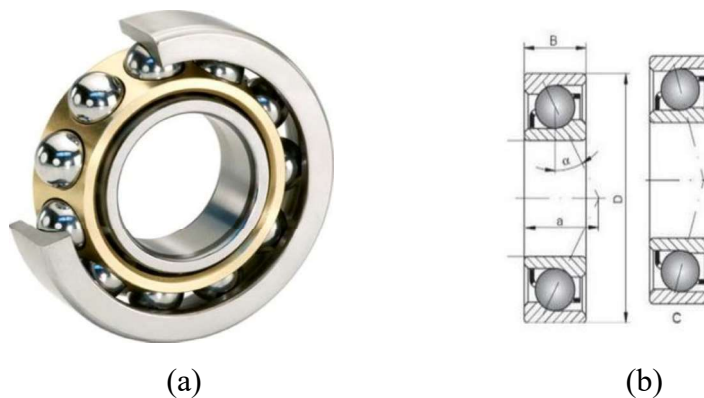


Gambar 2.6. (a) Bantalan bola mapan sendiri baris ganda
(b) Potongan Lintang Bantalan

(<http://www.mechanicall-engineering.net/2016/10/pengertian-bearing-serta-fungsi-dan.html?m=1>)

c. Bantalan bola kontak sudut baris tunggal

Berdasarkan konstruksinya, jenis ini sangat baik untuk beban radial. *Bearing* ini biasanya dipasangkan bersama *bearing* lain, baik dipasang secara paralel maupun bertolak belakang sehingga dapat juga untuk menahan beban aksial.

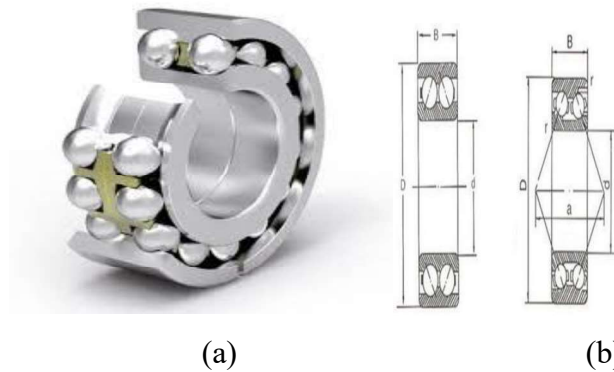


Gambar 2.7. (a) Bantalan bola kontak sudut baris tunggal
(b) Potongan Lintang Bantalan

(<http://www.mechanicall-engineering.net/2016/10/pengertian-bearing-serta-fungsi-dan.html?m=1>)

d. Bantalan bola kontak sudut baris ganda

Selain dapat menahan beban radial, bantalan ini juga bisa menahan beban aksial dalam 2 arah. Karena konstruksinya juga, jenis ini dapat menahan beban torsi. Jenis ini juga digunakan untuk mengganti dua buah *bearing* jika ruangan yang tersedia tidak mencukupi.

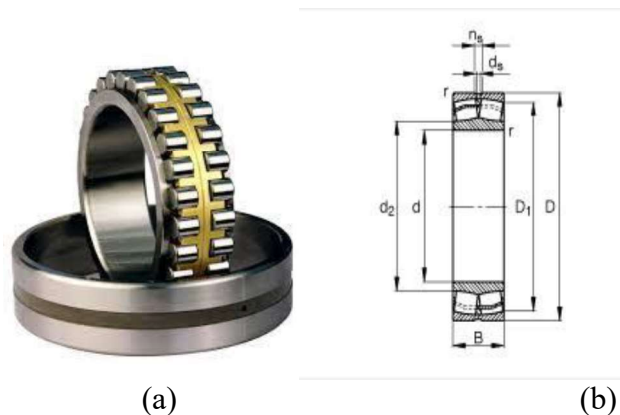


Gambar 2.8. (a) Bantalan bola kontak sudut baris ganda
(b) Potongan Lintang Bantalan

(<http://www.mechanicall-engineering.net/2016/10/pengertian-bearing-serta-fungsi-dan.html?m=1>)

e. Bantalan rol barrel baris ganda

Bearing ini memiliki 2 baris elemen *roller* yang pada umumnya mempunyai alur berbentuk bola pada cincin luarnya. Bantalan ini memiliki kapasitas beban radial yang besar sehingga ideal untuk menahan beban kejut.

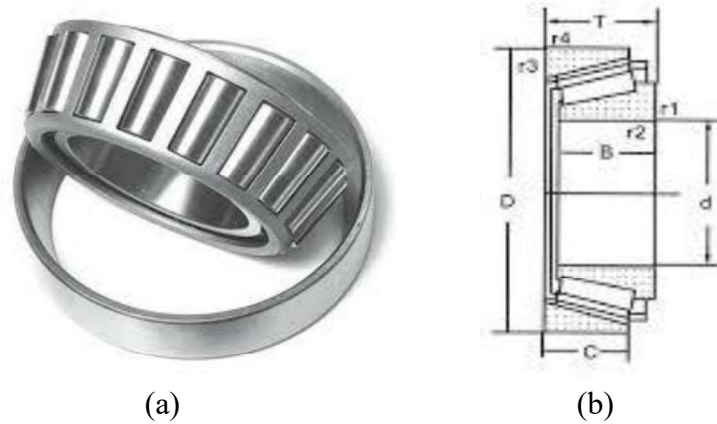


Gambar 2.9. (a) Bantalan rol barrel baris ganda
(b) Potongan Lintang Bantalan

(<http://www.mechanicall-engineering.net/2016/10/pengertian-bearing-serta-fungsi-dan.html?m=1>)

f. Bantalan rol kerucut baris tunggal

Dilihat dari konstruksinya, jenis *bearing* ini sangat cocok untuk beban aksial maupun radial. Bantalan ini dapat dipisah, dimana cincin dalam nya dipasang bersama dengan *roller* nya dan cincin luarnya terpisah.

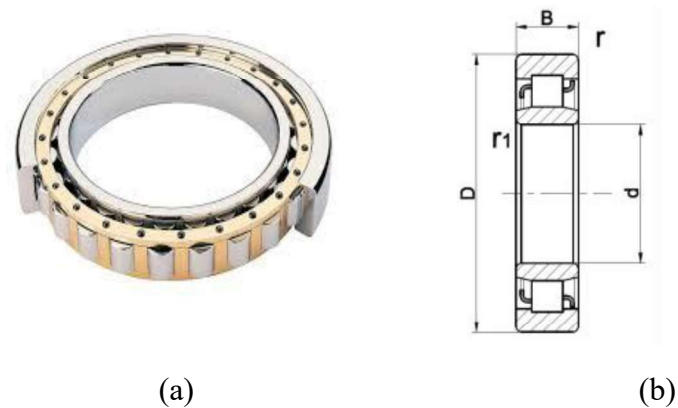


Gambar 2.10. (a) Bantalan rol kerucut baris tunggal
(b) Potongan Lintang Bantalan

(<http://www.mechanicall-engineering.net/2016/10/pengertian-bearing-serta-fungsi-dan.html?m=1>)

g. Bantalan rol silinder baris tunggal

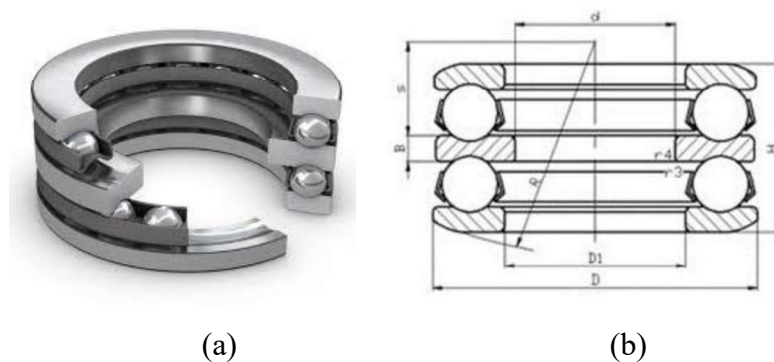
Jenis ini mempunyai dua alur pada satu cincin yang biasanya terpisah. Efek dari pemisahan ini adalah cincin dapat bergerak aksial dengan mengikuti cincin yang lain. Hal ini merupakan suatu keuntungan karena apabila bearing harus mengalami perubahan bentuk karena suhu, maka cincin nya akan dengan mudah menyesuaikan posisinya. Jenis bantalan ini mempunyai kapasitas beban radial yang besar pula dan juga cocok untuk kecepatan tinggi.



Gambar 2.11. (a) Bantalan rol silinder baris tunggal
 (b) Potongan Lintang Bantalan
 (<http://www.mechanicall-engineering.net/2016/10/pengertian-bearing-serta-fungsi-dan.html?m=1>)

h. Bantalan bola aksial satu arah baris ganda

Bearing jenis ini hanya cocok untuk menahan beban aksial dalam satu arah saja. Elemen nya dapat dipisahkan sehingga mudah melakukan pemasangan. Beban aksial minimum yang dapat ditahan tergantung dari kecepatannya. Jenis ini sangat sensitif terhadap ketidaksebarisan (*misalignment*) poros terhadap rumahnya.



Gambar 2.12. (a) Bantalan bola aksial satu arah baris ganda
 (b) Potongan Lintang Bantalan
 (<http://www.mechanicall-engineering.net/2016/10/pengertian-bearing-serta-fungsi-dan.html?m=1>)

Bantalan berdasarkan arah bebannya diklasifikasikan dalam 3 jenis yaitu:

1. Bantalan radial : bantalan yang menahan beban pada arah radial atau tegak lurus dengan poros.
2. Bantalan aksial : bantalan yang menahan beban pada arah aksial atau sejajar dengan poros.
3. Bantalan khusus : bantalan yang menahan kombinasi beban pada arah radial dan aksial.

2.3.3 Jenis-Jenis Kerusakan Bantalan (*Bearing*)

Suhardjono (2005) mengatakan, frekuensi yang dihasilkan oleh masing-masing komponen bantalan (*bearing*) akibat kerusakan lokal dapat dihitung dengan rumus-rumus sebagai berikut:

- a. Kerusakan Lokal pada Lintasan Luar (*Outer Race*)

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

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



Gambar 2.14 Kerusakan Lokal pada Lintasan Luar
(http://jadanalysis.co.uk;http://www.nskamericas.com/cps/rde/xchg/na_en/hs.xsl/cage-damage.html;)

Keterangan :

Nb: Jumlah bola

Fr : Frekuensi relatif antara lintasan luar dan lintasan dalam (Hz)

Bd: Diameter bola (mm)

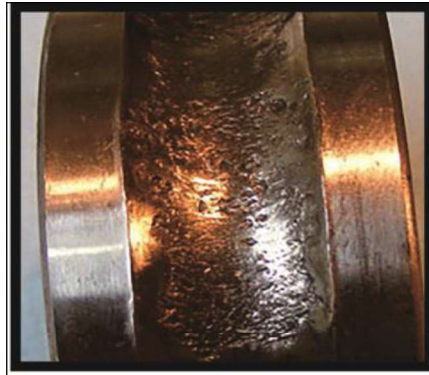
Pd: Diameter pitch

α : Sudut Kontak (derajat)

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

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

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

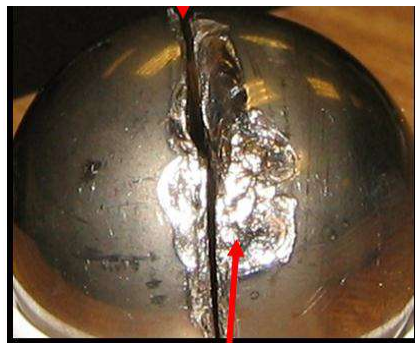


Gambar 2.15 Kerusakan Lokal pada Lintasan Dalam
(http://jadanalysis.co.uk;http://www.nskamericas.com/cps/rde/xchg/na_en/hs.xsl/cage-damage.html;)

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

Jika muncul kerusakan pada bola, maka kemunculan frekuensi *impuls* yang terjadi dinamakan *Ball Spin Frequency* (BSF). Sehingga besarnya dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

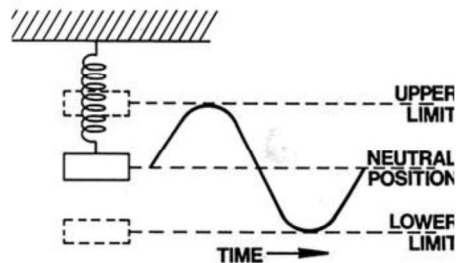
$$\text{BSF} = \frac{Nb}{2Bd} \times fr \times \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right)^2\right)$$



Gambar 2.16 Kerusakan Lokal pada Bola
(http://jadanalysis.co.uk;http://www.nskamericas.com/cps/rde/xchg/na_en/hs.xsl/cage-damage.html;)

2.4 Getaran

Getaran adalah suatu gerak bolak-balik di sekitar kesetimbangan. Kesetimbangan di sini maksudnya adalah keadaan di mana suatu benda berada pada posisi diam jika tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut. Getaran mempunyai amplitudo (jarak simpangan terjauh dengan titik tengah) yang sama. Satu getaran sama dengan satu kali gerak bolak balik benda secara penuh. Dapat dilihat gambar getaran pegas pada gambar 2.17.



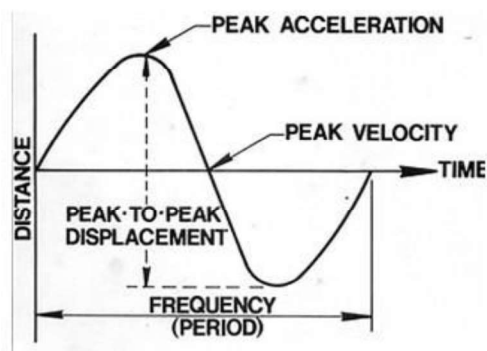
Gambar 2.17 Getaran Pegas

(<http://www.vibrasindo.com/blogvibrasi/detail/21/apa-itu-getaran-vibration>)

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

2.5 Karakteristik Getaran

Kondisi suatu mesin dan masalah-masalah mekanik yang terjadi bisa diketahui dengan cara mengukur karakteristik getaran pada mesin tersebut. Dengan mengacu pada gerakan pegas, kita dapat mempelajari karakteristik suatu getaran dengan membuat pemetaan gerakan dari pegas tersebut terhadap fungsi waktu. Karakteristik getaran suatu mesin dapat dilihat pada gambar 2.18



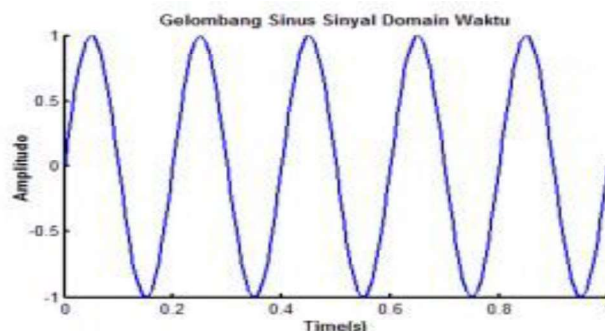
Gambar 2.18 Karakteristik Getaran
(Kunto, 2007)

Gerakan bandul pegas 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 untuk satu interval waktu tertentu disebut frekuensi. Dalam analisis getaran mesin, frekuensi lebih bermanfaat karena berhubungan dengan rpm (putaran) suatu mesin.

Sinyal getaran merupakan besaran fisik yang nilai dan variasi nilainya terhadap waktu, memuat informasi-informasi tertentu. Bentuk sinyal getaran pada umumnya berupa keadaan, laju perubahan, level bentuk, serta frekuensi. Pengukuran getaran terhadap komponen suatu mesin memberikan informasi yang berbeda-beda, oleh karena itu perlu dilakukan proses pengolahan data agar proses analisis sinyal getaran yang ditampilkan oleh komponen mesin yang mengalami cacat atau 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. Ada dua pandangan dalam persoalan analisa getaran yaitu domain waktu dan domain frekuensi.

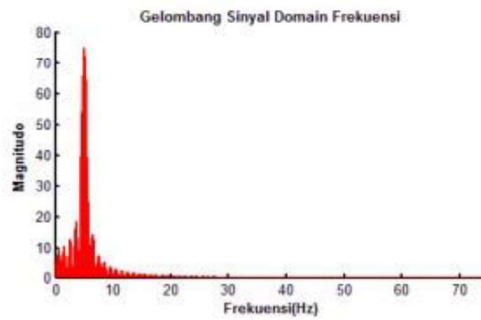
Perubahan simpangan suatu getaran terhadap waktu bisa diamati secara detail dengan grafik domain waktu. Gelombang sinyal getaran domain waktu dapat dilihat pada gambar 2.19 dimana kebanyakan dari sinyal dalam prakteknya adalah sinyal domain waktu. Maka karena itu, apapun sinyal yang diukur adalah

fungsi waktu, dimana ketika diplot salah satu sumbu dengan variabel waktu maka variabel lainnya adalah amplitudo. Ketika diplot, sinyal domain waktu berupa gelombang berjalan yang direpresentasikan pada waktu terhadap amplitudo dari sinyal. Amplitudo pada sinyal domain waktu menunjukkan terjadinya keras lemahnya sinyal yang diterima. Sehingga sinyal yang diterima tidak memiliki karakteristik yang berbeda di tiap waktunya.



Gambar 2.19 Gelombang sinyal sinus domain waktu
(Lyons, Richard G. 1997)

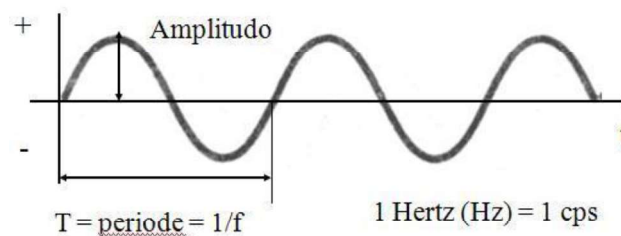
Sedangkan pada sinyal domain frekuensi, ketika diplot berupa spektrum dengan penyajian frekuensi terhadap magnitudo. Informasi yang penting tersembunyi di dalam frekuensi sinyal. Spektrum frekuensi sinyal pada dasarnya adalah komponen frekuensi (spektral frekuensi) sinyal yang menunjukkan frekuensi apa yang muncul. Frekuensi memperlihatkan tingkat perubahan. Jika suatu variabel sering berubah, maka disebut berfrekuensi tinggi, ataupun sebaliknya jika tidak sering berubah, maka disebut berfrekuensi rendah dan apabila variabel tersebut tidak berubah sama sekali, maka disebut tidak mempunyai frekuensi (nol frekuensi). Magnitudo pada sinyal domain frekuensi memperlihatkan tinggi rendahnya sinyal yang diterima. Dengan kata lain, keras lemahnya sinyal tidak mempengaruhi frekuensi yang ada didalamnya. Sinyal domain frekuensi dapat dikembalikan ke sinyal domain waktu. Gelombang sinyal getaran domain frekuensi dapat dilihat pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Gelombang sinyal domain frekuensi
(Lyons, Richard G. 1997)

2.5.1 Amplitudo

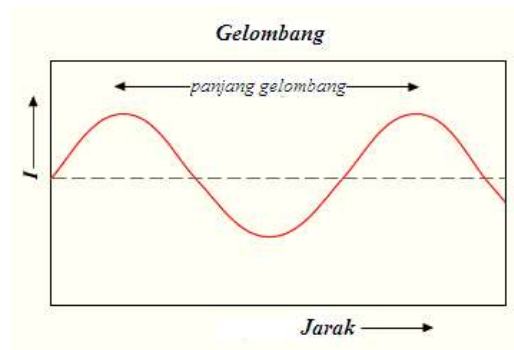
Dalam setiap gelombang pasti memiliki titik puncak dan lembah. Setiap titik puncak memiliki ketinggian yang berbeda-beda. Ukuran titik tertinggi dari suatu gelombang dinamakan amplitudo. Apabila terdapat dua gelombang yang memiliki ukuran panjang gelombang yang sama, salah satunya akan memiliki nilai puncak lebih tinggi atau bahkan lebih rendah dari gelombang lainnya (Scheffer dan Girdhar, 2004). Adanya amplitudo memberikan indikasi relatif terkait besarnya nilai energi yang tersebar pada suatu gelombang. Pada gambar 2.21 dapat dilihat terdapat 2 macam gelombang yang memiliki amplitudo yang berbeda, gelombang 1 memiliki amplitudo yang lebih tinggi dibandingkan gelombang 2.



Gambar 2.21 Bentuk dari ukuran amplitudo
(<https://brainly.co.id/tugas/1999800>)

2.5.2 Frekuensi

Fekuenasi dapat diartikan sebagai banyaknya jumlah gelombang yang terjadi dalam 1 detik, dengan satuan ukuran yang disebut *hertz* (Hz). Pada gambar 2.22 dapat dilihat ilustrasi dari grafik frekuensi, yang mana terdapat 2 gelombang yang berbeda. Gelombang 1 memiliki frekuensi 4 Hz lebih besar daripada gelombang 2 yang hanya memiliki 3 Hz.



Gambar 2.22 Grafik frekuensi
(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/id/e/e4/Panjang_gelombang.PNG)

Secara matematis, rumus frekuensi dapat ditulis dengan:

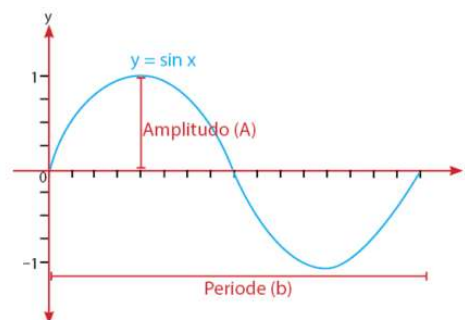
$$f = \frac{1}{T} \quad 2.1$$

Keterangan : f = frekuensi (Hz)

T = Periode

2.5.3 Periode

Periode adalah waktu yang digunakan untuk melakukan satu kali getaran. Pengertian ini digunakan untuk menggambarkan berapa lama waktu yang dibutuhkan oleh suatu getaran ketika melakukan satu kali getaran atau bahkan lebih. Periode ini sangat erat kaitannya dengan frekuensi. Untuk menghitung periode maka digunakan frekuensi sebagai faktor pembagi angka satu. Jika suatu benda melakukan getaran, maka getaran tersebut membutuhkan waktu untuk menempuh satu kali putaran. Pada gambar 2.23, dapat dilihat ilustrasi dari grafik periode.



Gambar 2.23 Grafik Periode
(<https://idschool.net/wp-content/uploads/2017/10/Grafik-Sinus-11-e1508818920895.png>)

2.6 Deret *Fourier*

Dalam matematika, Deret *fourier* merupakan penguraian fungsi periodik menjadi jumlahan fungsi-fungsi beresilasi, yaitu fungsi sinus dan kosinus, ataupun eksponensial kompleks. Study deret Fourier merupakan cabang analisis *fourier*. Deret *fourier* diperkenalkan oleh Joseph Fourier (1768-1830) untuk memecahkan masalah persamaan panas di lempeng logam.

Persamaan panas merupakan persamaan diferensial parsial. Sebelum *fourier*, pemecahan persamaan panas ini tidak diketahui secara umum, meskipun solusi khusus diketahui bila sumber panas bersifat dalam cara sederhana, terutama bila sumber panas merupakan gelombang sinus atau kosinus. Solusi sederhana ini saat ini kadang-kadang disebut sebagai solusi *eigen*. Gagasan *fourier* adalah memodelkan sumber panas ini sebagai superposisi (atau kombinasi linear) gelombang sinus dan kosinus sederhana, dan menuliskan pemecahannya sebagai superposisi solusi *eigen* terkait. Superposisi kombinasi linear ini disebut sebagai deret *fourier*.

Meskipun motivasi awal adalah untuk memecahkan persamaan panas, kemudian terlihat jelas bahwa teknik serupa dapat diterapkan untuk sejumlah besar permasalahan fisika dan matematika. Deret *fourier* saat ini memiliki banyak penerapan di bidang teknik elektro, analisis vibrasi, akustika, optika, pengolahan citra, mekanika kuantum, dan lain-lain.

2.6.1 *Fast Fourier Transform (FFT)*

Pada tahun 1960, Cooley dan Tukey, berhasil merumuskan suatu teknik perhitungan algoritma *Fourier Transform* yang efisien. Teknik perhitungan algoritma ini dikenal dengan sebutan *Fast Fourier Transform* atau lebih populer dengan istilah *FFT* yang diperkenalkan oleh Bendat dan Piersol pada 1986. *Fast Fourier Transform* dalam bahasa indonesia adalah Transformasi *Fourier* Cepat adalah sumber dari suatu algoritma untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (Transformasi *Fourier* Diskrit atau DFT) dengan cepat, efisien dan inversnya. Agar memperjelas proses transformasi *fourier*, dapat dilihat pada gambar 2.24.

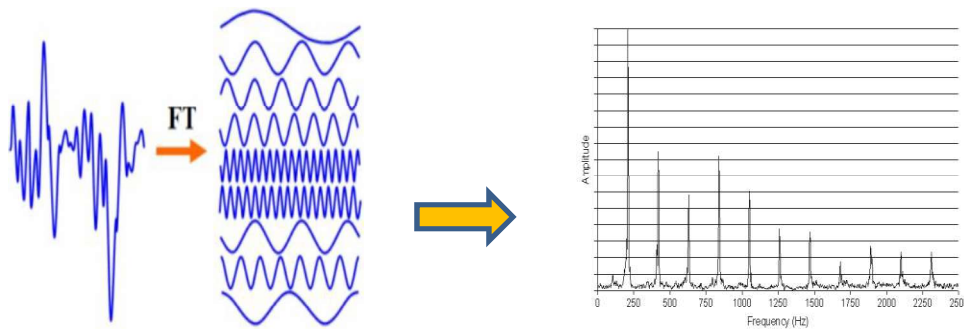
Transformasi fourier adalah transformasi yang dapat merubah suatu sinyal dari domain waktu $S(t)$ kedalam domain frekuensi $S(f)$. fungsi dilakukannya tranformasi ini bertujuan untuk mendapatkan informasi apakah suatu sinyal memiliki frekuensi tertentu atau tidak. Transformasi fourier menggabungkan sinyal ke bentuk fungsi eksponensial dari frekuensi yang berbeda-beda.

Caranya adalah dengan didefinisikan ke dalam persamaan berikut:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi t} dt \quad 2.4$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} d f \quad 2.5$$

Dapat kita katakan dari dua persamaan diatas bahwa $X(f)$ adalah transformasi Fourier dari $x(t)$ yang mengubah $x(t)$ dari domain waktu ke domain frekuensi, dan untuk persamaan ke2 adalah kebalikan dari persamaan ke1 atau bisa di sebut dengan invers transformasi faurier.



Gambar 2.24 Transformasi *Fourier*

(<http://dinus.ac.id/repository/docs/ajar/YEPE-MengapaKitaButuhFFT-2016.ppt>)

Algoritma pada *Fast Fourier Transform* (FFT) memeriksa ketidaklancaran modulasi frekuensi yang terdapat pada gelombang spektrum, dimana hal ini terjadi ketika sinyal non frekuensi muncul pada sinyal gelombang (Girdhar, 2004).

1. Kelebihan *Fast Transformasi Fourier* (FFT)

Definisi transformasi *fourier* sebagai alat/tool untuk mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi, menjelaskan kepada kita bahwa transformasi fourier ini mempunyai kelebihan:

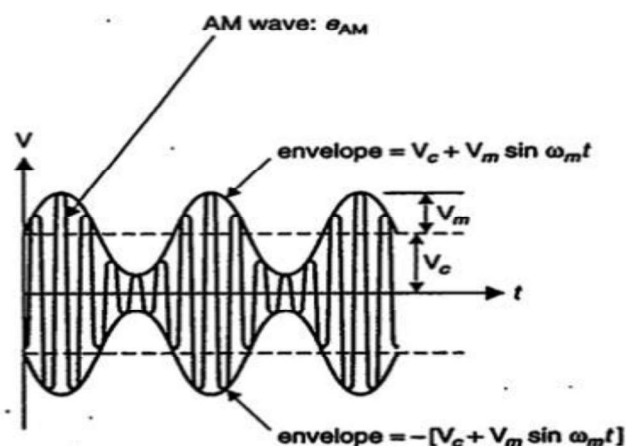
- a. Mampu menunjukkan berapa banyak komponen frekuensi yang ada di dalam sinyal
 - b. Mampu menunjukkan kandungan frekuensi yang terkandung di dalam sinyal.
2. Kekurangan *Fast Transformasi Fourier* (FFT)

Transformasi *Fourier* ini hanya memberikan informasi berupa semua kandungan frekuensi yang terdapat pada sinyal, akan tetapi tidak bisa memperlihatkan waktu terjadinya frekuensi tersebut secara bersamaan.

2.7 Amplitudo Modulation (AM)

Modulasi merupakan proses untuk merubah parameter suatu sinyal (sinyal pembawa) dengan menggunakan sinyal yang lain (yaitu sinyal pemodulasi yang berupa sinyal informasi). Sinyal informasi dapat berbentuk sinyal video, sinyal audio, sinyal getaran atau sinyal yang lain.

Pada modulasi amplitudo, sinyal pemodulasi atau sinyal informasi mengubah amplitudo sinyal pembawa. Besarnya amplitudo sinyal pembawa akan berbanding lurus dengan amplitudo sinyal pemodulasi seperti pada gambar 2.25.

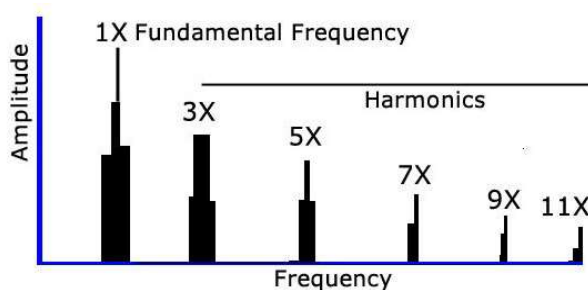


Gambar 2.25 Sinyal Amplitudo Modulasi
(Susilawati, 2009)

Dalam domain frekuensi, amplitude modulasi menghasilkan sinyal dengan daya yang terkonsentrasi pada frekuensi pembawa dan dua side bands yang berdekatan

2.8 Harmonik

Setiap gerak yang terjadi secara berulang dalam selang waktu yang sama disebut gerak periodik. Karena gerak ini terjadi secara teratur maka disebut juga sebagai gerak harmonik. Apabila suatu partikel melakukan gerak periodik pada lintasan yang sama maka geraknya disebut gerak osilasi/getaran. Harmonik pada dasarnya adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Hal ini disebut frekuensi harmonik yang timbul pada bentuk gelombang aslinya sedangkan bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonik. Misalnya, frekuensi dasar suatu sistem gelombang sinyal getaran adalah 50 Hz, maka harmonik keduanya adalah gelombang sinyal getaran dengan frekuensi sebesar 100 Hz, begitupun seterusnya. Seperti pada gambar 2.26 dapat dilihat harmonik getaran

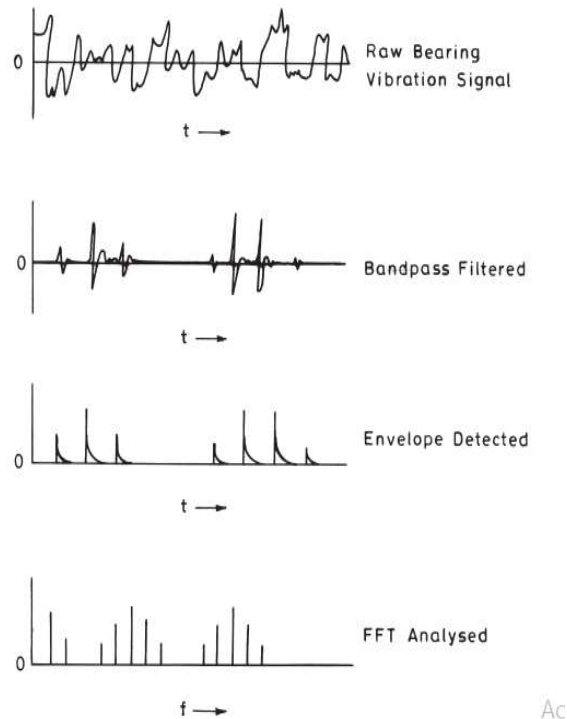


Gambar 2.26 Harmonik Getaran
(Girdhar, 2004)

2.9 Analisis Envelope (*Envelope Analysis*)

Analisis envelope merupakan teknik terkenal untuk mengekstrak dampak periodik yang disebabkan dari sinyal getaran mesin. Metode ini dapat mengekstrak dampak dengan frekuensi yang sangat rendah dan yang tersembunyi oleh sinyal getaran lainnya. Oleh karena itu metode ini adalah metode yang paling

populer dibandingkan metode pemeliharaan yang lainnya. Pada gambar 2.27 ini merupakan sinyal envelope.



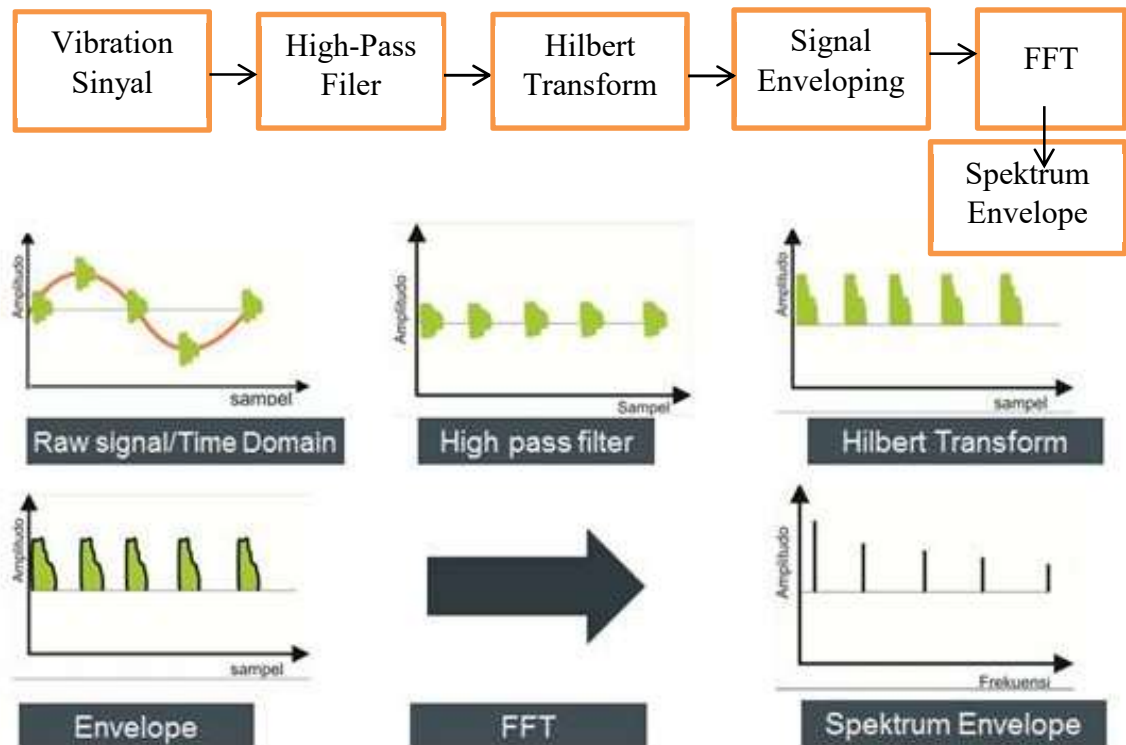
Gambar 2.27 Sinyal Envelope
(Tendon, 1999)

Analisis *envelope* 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).

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).

Urutan pengolahan data yang terlibat dalam teknik ini ditunjukkan pada Gambar 2.28. Sinyal getaran dalam domain waktu pertama kali di saring menggunakan *high-pass filter*, pada *high-pass filter* ini sinyal akan di saring atau

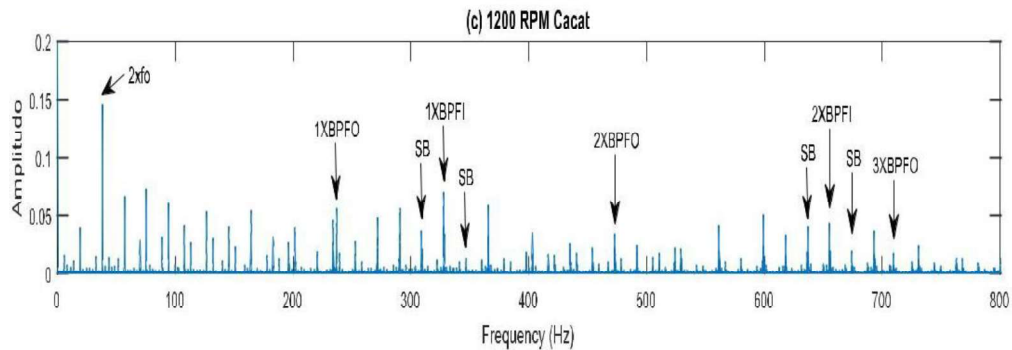
diperbaiki, dan sinyal yang telah di saring menggunakan *high-pass filter* akan ditransformasikan menggunakan *Hilbert transform* dan menghasilkan sinyal envelope. Selanjutnya dihitung menggunakan FFT sehingga menghasilkan bentuk akhir yaitu *spectrum envelope* (Tan dan Leong, 2008).



Gambar 2.28 Skema Envelope
(Fanani Wilda, 2017)

2.9.1 Karakteristik Analisis Envelope Cacat Bantalan Lintasan Luar (BPFO)

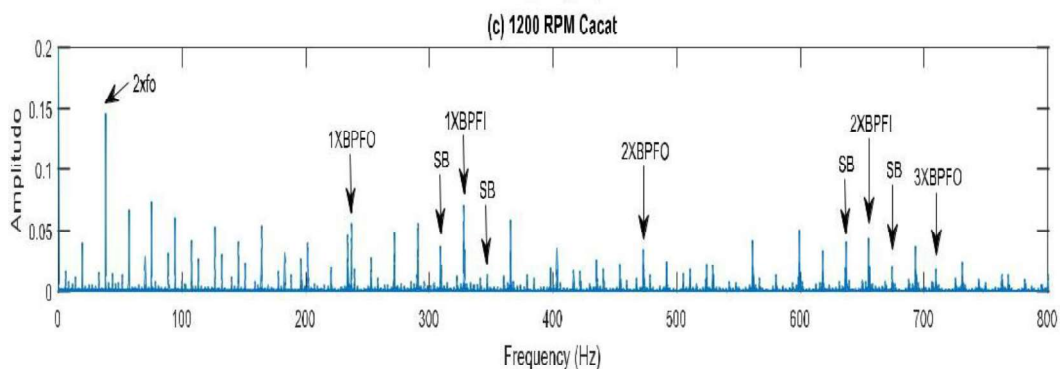
Pada gambar 2.29 dapat dengan mudah diverifikasi bahwa setiap cacat pada bantalan memiliki hasil plot dengan karakteristik frekuensi yang tipikal atau khas, karakteristik cacat frekuensi ini dapat digunakan sebagai pendukung keputusan dalam menganalisis cacat pada bantalan. Frekuensi cacat lintasan luar (BPFO) pada bantalan tidak menunjukkan *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 2.29 Gambar Grafik Domain Waktu Cacat Multi Jenis pada Bantalan pada 1200 rpm (Gusnandar Abdi, 2017)

2.9.2 Karakteristik Analisis Envelope Cacat Bantalan Lintasan Dalam (BPF1)

Pada Gambar 2.30 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 2.30 Gambar Grafik Domain Waktu Cacat Multi Jenis pada Bantalan pada 1200 rpm (Gusnandar Abdi, 2017)

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.

2.10 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. Data akuisisi menurut Kirianaki (2002) adalah pengukuran sinyal elektrik dari transduser dan peralatan pengukuran kemudian memasukkannya ke komputer untuk diproses. 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:

- a. Sensor : mengubah parameter fisik kedalam sinyal elektrik.
- b. *Signal conditioning circuitry* : mengubah sinyal yang berasal dari sensor kedalam bentuk yang sinyal digital.
- c. *Analog to Digital Converter* : menghasilkan sinyal digital yang sebelumnya sudah dikondisikan terlebih dahulu. Pada gambar 2.23 dapat dilihat komponen *DAQ System*.

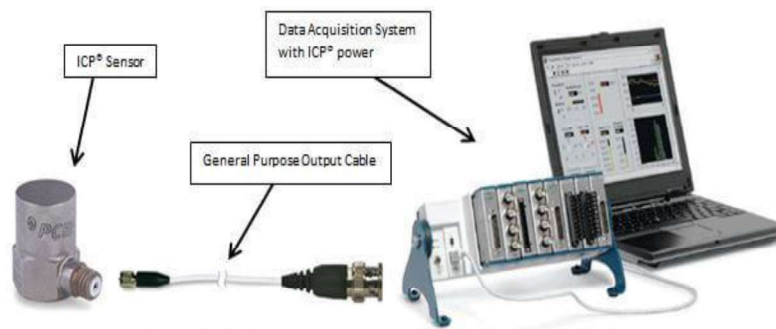


Figure 3: ICP® Sensor and Data Acquisition System with ICP® Power

Gambar 2.31 Komponen *DAQ System*

(http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/Tech_Accel)

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 2.32 dapat dilihat komponen-komponen *accelerometer*.

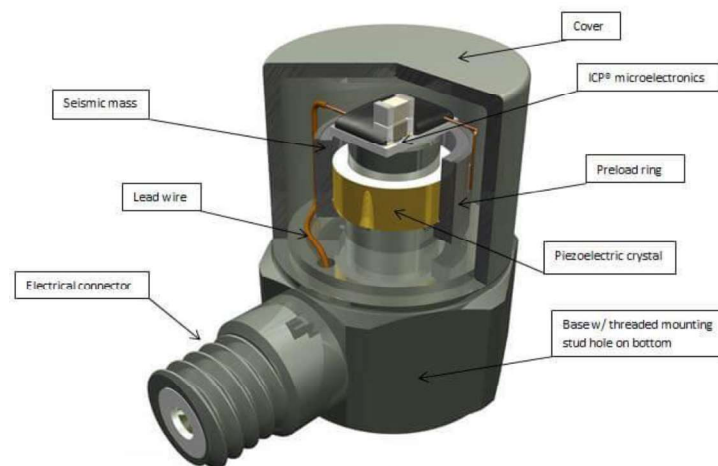
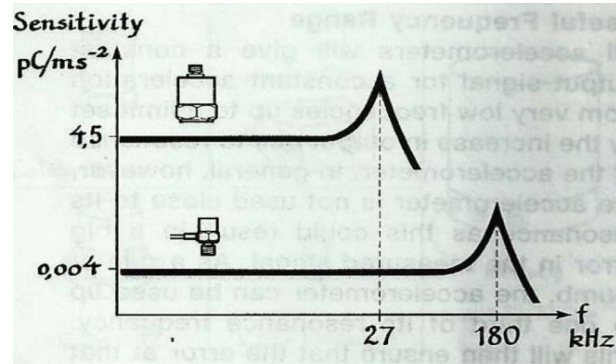


Figure 1: Typical ICP® Accelerometer

Gambar 2.32 Komponen *Accelerometer*

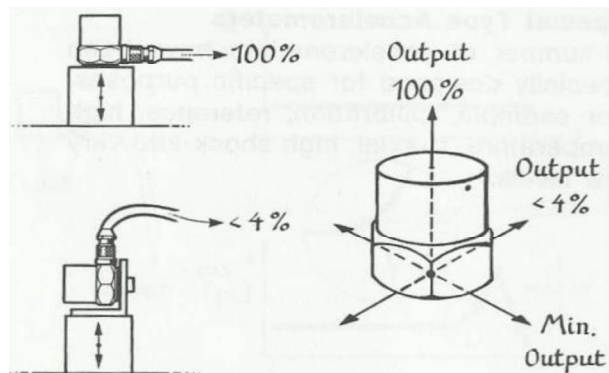
(http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/Tech_Accel)

Pada gambar 2.33 menjelaskan ketika akselerometer terkena tingkat akselerasi konstan, ia akan memberikan sinyal keluaran konstan melalui rentang frekuensi yang sangat luas - sampai frekuensi mendekati frekuensi resonansinya. Secara umum semakin besar akselerometer semakin tinggi sensitivitasnya, dan semakin kecil rentang frekuensi yang berguna dan sebaliknya.



Gambar 2.33 Sensivitas *Accelerometer*
(Brüel & Kjær, 1990)

Sedangkan pada gambar 2.34, menjelaskan bahwa accelerometer memiliki sensitivitas utamanya tegak lurus dengan dasar akselerometer. Namun, ini juga tidak terlalu sensitif terhadap getaran yang terjadi pada arah melintang ke arah ini. Dalam kasus terburuk, akan kurang dari 4% dari sensitivitas sumbu utama. Arah sensitivitas tranverse minimum ditunjukkan pada akselerometer dengan titik cat merah.



Gambar 2.34 Sensivitas transfer
(Brüel & Kjær, 1990)

Kelebihan *Accelerometer* :

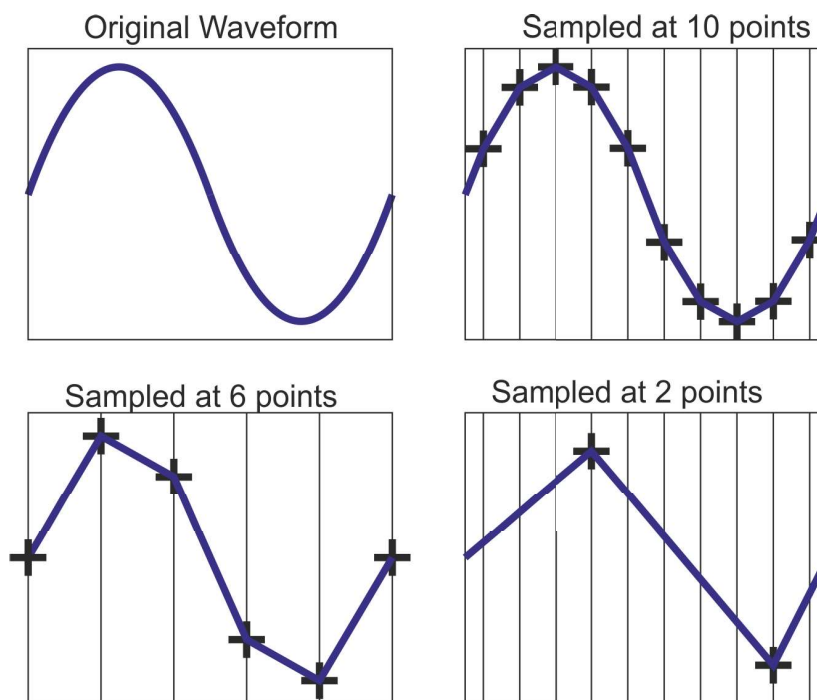
- a. Respon sinyal yang baik antara 900 sampai 600.000 cpm (15.>10.000 Hz).
- b. Respon fase datar sepanjang rentang operasi transducer.
- c. Beroperasi dibawah mount frekuensi resonansi alami.
- d. Elektronik solid state dengan konstruksi yang kokoh dan andal.
- e. Tersedia unit khusus untuk aplikasi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

Kekurangan *Accelerometer* :

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



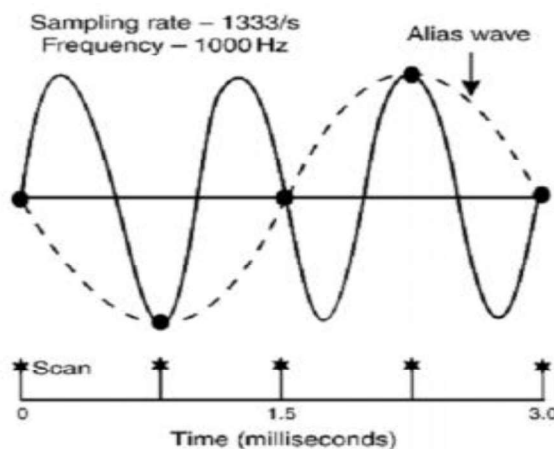
Gambar 2.35 Sampling Frekuensi
<https://labtronix.co.uk/drupal/content/about-oscilloscope-sample-rate>

Gambar 2.35 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 Fenomena *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 kontinyu 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. Rendahnya kecepatan sampling kurang dari dua kali frekuensi *Nyquist* dapat

menyebabkan tidak lengkapnya informasi yang ingin didapat. Walaupun sebenarnya dari perangkat pengambilan dan pengolahan data dapat secara otomatis dapat menentukan kecepatan perekaman untuk menghindari aliasing. Efek *aliasing* dapat dilihat pada Gambar 2.36.

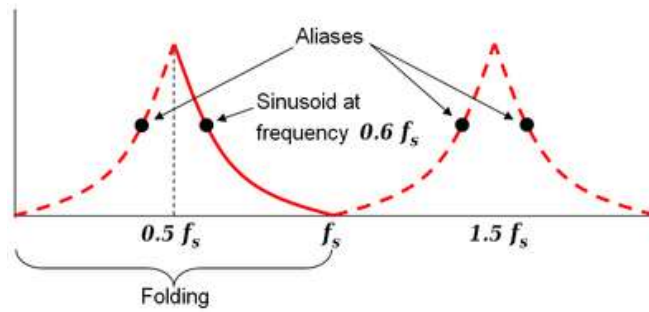


Gambar 2.36 Fenomena *Aliasing*
(Girdhar, 2004)

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 2.37, 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 2.37 Lipatan Pada *Nyquist* Frekuensi
(https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist_frequency)