

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian tentang kavitasi dan penggunaan metode sinyal getaran dalam mendeteksi performa dan kerusakan pompa telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Berikut tinjauan beberapa hasil penelitian yang sudah dilakukan;

Karassik dkk (1976) menyatakan bahwa kavitasi adalah peristiwa terbentuknya gelembung-gelembung uap di dalam cairan yang dipompa akibat turunnya tekanan cairan sampai di bawah tekanan uap jenuh. Siklus gelembung uap ini terjadi dalam proses yang sangat singkat. Waktu yang diperlukan mulai dari terbentuk hingga pecahnya gelembung hanya sekitar 0,003 detik. Peristiwa ini bila dibiarkan terjadi dalam jangka waktu yang lama akan menyebabkan terjadinya kerusakan pada dinding pipa.

Al thobiani dkk (2010) meneliti suatu metode pengukuran kavitasi pada pompa sentrifugal menggunakan teknik *vibro-acoustic*. Mereka menilai teknik *vibro-acoustic* dengan konvensi parameter statistik seperti faktor *peak* dan *kurtosis* dari domain waktu dan domain frekuensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor *peak* dan *kurtosis* tidak efisien untuk menunjukkan kavitasi. Namun, mereka menemukan spektrum entropi yang lebih tepat untuk mendeteksi kavitasi dimana spektrum entropi dari sinyal akustik udara memberikan kinerja diagnosa lebih baik daripada diagnosa getaran permukaan.

Albraik dkk (2012) melakukan penelitian menggunakan sinyal getaran untuk mengetahui kondisi dan performa pompa sentrifugal dengan percobaan menggunakan 5 impeler. Pada penelitian tersebut dilakukan perbandingan dengan sinyal getaran, dimana impeler kondisi baik dengan 4 impeler kondisi cacat dan menggunakan tingkat laju aliran yang berbeda. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya kenaikan getaran pada kurva (menunjukkan laju aliran, *head*

tekan, efisiensi dan NPSH) disetiap percobaan kerusakan impeler yang dilakukan yang dibandingkan dengan kurva impeler dalam kondisi baik.

Farokhzad (2013) pada penelitiannya menerapkan teknik FFT dari sinyal getaran untuk mendiagnosa kesalahan pada pompa sentrifugal dan menggunakan fitur tersebut sebagai vektor masukan dalam *adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS). Penelitian tersebut untuk mengetahui berbagai kondisi dari pompa sentrifugal seperti kerusakan impeler, impeler usang, kebocoran, dan kavitasi. Kinerja dari metode ini divalidasi dengan menerapkan pengujian data kedalam mode ANFIS dan hasilnya menunjukkan sebuah teknik klasifikasi dengan total akurasi adalah 90.67%.

Berdasarkan tinjauan penelitian terdahulu diatas, metode deteksi kerusakan komponen dan kavitasi pada pompa sentrifugal berbasis domain frekuensi sinyal getaran menunjukan hasil yang baik dan tervalidasi. Fenomena terjadinya kavitasi dapat diidentifikasi dengan adanya kenaikan nilai amplitudo (spektrum getaran) frekuensi *fundamental*, harmonik, dan frekuensi komponen pada pompa.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal adalah jenis pompa yang menggunakan prinsip gaya sentrifugal dimana impeler mendorong fluida ke sisi luar sehingga kecepatan fluida meningkat. Pompa sentrifugal pada dasarnya terdiri dari satu impeler atau lebih yang dilengkapi dengan sudu-sudu yang dipasangkan pada poros yang berputar dan diselembungi dengan sebuah rumah (*casing*). Prinsip kerja pompa sentrifugal adalah fluida memasuki impeler secara aksial didekat poros yang menciptakan energi kinetik maupun potensial yang diberikan melalui sudu-sudu. Konversi energi terjadi disebabkan fluida yang terdapat di *volute* (rumah keong) atau suatu seri laluan difuser yang mentransformasikan energi kinetik menjadi tekanan (Austin, 1993). Pada pompa sentrifugal energi yang dihasilkan saat konversi terjadi ialah *head* tekanan, *head* kecepatan, energi potensial selama

fluida mengalir secara terus-menerus. Pompa jenis ini beroperasi pada kecepatan yang tinggi dan biasanya langsung dihubungkan dengan penggerak sehingga rugi-rugi transmisi mejadi kecil. Dalam penggunaanya pompa sentrifugal tidak memerlukan ruang yang besar dan biaya instalasi yang relatif murah dan perawatan yang terbilang sederhana. Pada gambar 2.1 menunjukkan bentuk pompa sentrifugal pada umumnya.



Gambar 2.1 Pompa Sentrifugal
(Anta, 2013)

2.2.2 Klasifikasi Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal dibedakan berdasarkan beberapa kriteria, antara lain (Sitorus, 2010) :

a. Kapasitas :

1. Kapasitas rendah: $< 20 \text{ m}^3 / \text{jam}$
2. Kapasitas menengah: $20\text{-}60 \text{ m}^3 / \text{jam}$
3. Kapasitas tinggi: $> 60 \text{ m}^3 / \text{jam}$

b. Tekanan *Discharge* :

1. Tekanan rendah: $< 5 \text{ Kg} / \text{cm}^2$
2. Tekanan menengah: $5 - 50 \text{ Kg} / \text{cm}^2$
3. Tekanan tinggi: $> 50 \text{ Kg} / \text{cm}^2$

c. Jumlah / Susunan Impeler dan Tingkat :

1. *Single stage* : Terdiri dari satu impeler dan satu *casing*
2. *Multi stage* : Terdiri dari beberapa impeler yang tersusun seri dalam satu *casing*.
3. *Multi impeler*: Terdiri dari beberapa impeler yang tersusun paralel dalam satu *casing*.
4. *Multi impeler – Multi stage*: Kombinasi *multi impeler* dan *multi stage*.

d. Posisi Poros :

1. Poros tegak
2. Poros mendatar

e. Jumlah *Suction* :

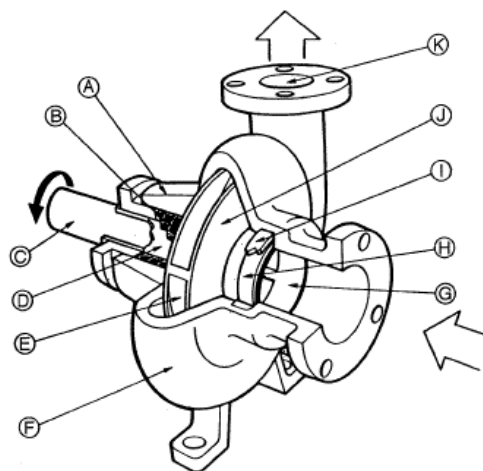
1. *Single suction*
2. *Double suction*

f. Arah aliran keluar impeler :

1. *Radial flow*
2. *Axial flow*
3. *Mixed flow*

2.2.3 Bagian-Bagian Pompa Sentrifugal

Secara umum pompa sentrifugal tersusun atas beberapa bagian penting yaitu (Dietzel, 2010):



Gambar 2.2 Bagian-Bagian Pompa Sentrifugal

(Dietzel, 2010)

a. *Stuffing Box*

Stuffing Box berfungsi untuk mencegah kebocoran pada daerah dimana poros pompa menembus casing.

b. *Packing*

Digunakan untuk mencegah dan mengurangi bocoran cairan dari casing pompa melalui poros. Biasanya terbuat dari asbes atau teflon.

c. *Shaft*

Shaft/poros berfungsi untuk meneruskan momen puntir dari penggerak selama beroperasi dan tempat kedudukan impeler dan bagian-bagian berputar lainnya.

d. *Shaft sleeve*

Shaft sleeve berfungsi untuk melindungi poros dari erosi, korosi dan keausan pada *stuffing box*. Pada pompa *multi stage* dapat sebagai *leakage joint*, *internal bearing* dan *interstage* atau *distance sleever*.

e. *Vane*

Sudu dari impeler sebagai tempat berlalunya cairan pada impeler.

f. *Casing*

Casing merupakan bagian paling luar dari pompa yang berfungsi sebagai pelindung elemen yang berputar, tempat kedudukan difuser (*guide vane*), *inlet* dan *outlet* nozel serta tempat memberikan arah aliran dari impeler dan mengkonversikan energi kecepatan cairan menjadi energi dinamis (*single stage*).

g. *Eye of Impeller*

Bagian sisi masuk pada arah isap impeler.

h. Impeler

Impeler berfungsi untuk mengubah energi mekanis dari pompa menjadi energi kecepatan pada cairan yang dipompakan secara kontinyu, sehingga cairan pada sisi isap secara terus menerus akan masuk mengisi kekosongan akibat perpindahan dari cairan yang masuk sebelumnya.

i. *Casing Wearing Ring*

Wearing ring berfungsi untuk memperkecil kebocoran cairan yang melewati bagian depan impeler maupun bagian belakang impeler, dengan cara memperkecil celah antara casing dengan impeler.

j. *Bearing*

Bearing (bantalan) berfungsi untuk menumpu dan menahan beban dari poros agar dapat berputar, baik berupa beban radial maupun beban axial. *Bearing* juga memungkinkan poros untuk dapat berputar dengan lancar dan tetap pada tempatnya, sehingga kerugian gesek menjadi kecil.

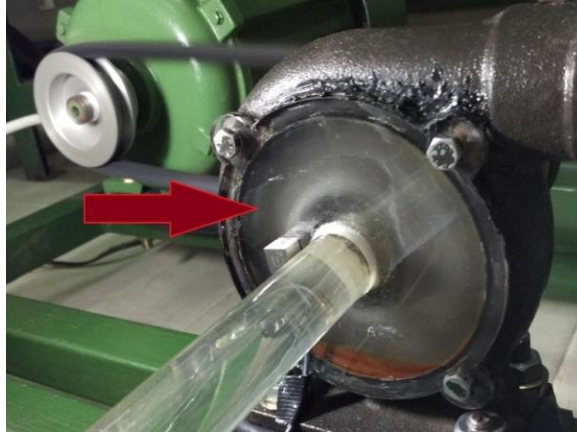
k. *Discharge Nozzle*

Saluran cairan keluar dari pompa dan berfungsi juga untuk meningkatkan energi tekanan keluar pompa.

2.2.4 Kavitasasi

Kavitasasi dalam pompa sentrifugal mempunyai dampak yang sangat signifikan pada performa pompa. Kavitasasi dapat mengakibatkan penurunan performa pompa dan dapat menyebabkan kerusakan komponen bagian dalam pompa. Kavitasasi merupakan peristiwa perubahan terbentuknya uap dari zat cair pada fluida yang mengalir (Jenny, 2009). Gejala terjadinya kavitasasi disebabkan karena menguapnya zat cair yang sedang mengalir didalam pompa atau diluar pompa, karena tekanan yang terjadi berkurang mencapai dibawah tekanan uap jenuhnya (Sularso, 1983), ketika zat cair mendidih, maka akan timbul gelembung-gelembung uap zat cair. Bagian pompa yang sering terjadinya kavitasasi ialah sisi isap pompa, dikarenakan tekanan pada sisi isap sering kali terlalu rendah hingga dibawah tekanan uap jenuhnya. Saat pengoperasian pompa sentrifugal yang mengalami kavitasasi akan menimbulkan kebisingan yang disebabkan gelembung uap yang pecah yang terus-menerus karena tekanan sekelilingnya. Akibat pecahan gelembung uap tersebut yang mengenai *casing* pompa yang akan berdampak terjadinya getaran dengan intensitas tinggi. Fenomena kavitasasi yang terjadi dalam sudu pompa sentrifugal akan menyebabkan kerusakan-kerusakan mekanis yaitu

dengan terjadinya lubang-lubang yang disebut erosi kavitasi (Soyama, 1992). Dapat dilihat pada gambar 2.3 fenomena kavitasi pada pompa sentrifugal.



Gambar 2.3 Fenomena Kavitasi pada Pompa Sentrifugal

2.2.5 Jenis-Jenis Kavitasi

Kavitasi merupakan peristiwa yang dapat merugikan kinerja pada pompa. Kavitasi yang terjadi bermacam-macam jenisnya, diantaranya yaitu (Kamiel, 2015):

a. *Incipient* Kavitasi

Kavitasi yang terjadi pada tahap awal kavitasi yang dimana baru dideteksi. Kavitasi ini pada umumnya terjadi pada turbulensi awal pada impeler yang menyebabkan tekanan lokal berada dibawah tekanan uap fluida pada pompa.

b. *Travelling* Kavitasi

Kavitasi ini terjadi dimana gelembung satu persatu bergerak bersamaan pada fluida dan kemudian menghilang. Biasanya terjadi ketika batas titik terendah pada aliran turbulensi.

c. *Vortex* Kavitasi

Kavitasi ini terjadi pada inti pusaran turbulensi yang dimana daerah tingkatan gesernya tinggi.

2.2.6 Penyebab Terjadinya Kavitas

Banyak sifat-sifat teknis pada pompa sentrifugal yang harus dipenuhi agar dapat beroperasi dengan baik. Namun dalam pengoperasian pompa salah satu permasalahan yang sering terjadi pada pompa sentrifugal ialah kavitas. Berikut beberapa penyebab kavitas pada pompa sentrifugal, diantaranya (Bachus & Custodio, 2003):

1. Penguapan (*Vaporation*)

Zat cair menguap dikarenakan tekanannya sangat rendah atau temperaturnya menjadi sangat tinggi. Setiap pompa sentrifugal memerlukan *head* (tekanan) pada sisi isap untuk mencegah penguapan.

2. Masuknya Udara Luar ke Dalam Sistem (*Air Ingestion*)

Udara dapat masuk ke dalam sistem melalui beberapa sebab, antara lain :

- a. Dari *packing stuffing box*, terjadi jika pompa dari kondensor, *evaporator* atau peralatan lainnya yang bekerja pada kondisi vakum.
- b. Letak *valve* di atas garis permukaan air (*water line*).
- c. *Flens* (sambungan pipa) yang bocor.
- d. Tarikan udara melalui pusaran cairan (*vortexing fluid*).
- e. Terlalu dekatnya '*bypass line*' dengan sisi isap, yang mengakibatkan menambahnya suhu udara pada sisi isap.
- f. Zat cair pada sisi isap berkurang, hal ini dapat terjadi jika level cairan terlalu rendah.

Penguapan maupun masuknya udara ke dalam sistem memberikan pengaruh yang besar terhadap kinerja pompa yaitu pada saat gelembung-gelembung udara pecah ketika melewati '*eye impeller*' sampai pada sisi keluar (sisi dengan tekanan yang lebih tinggi). Pengaruh terbesar dari adanya jebakan udara ini adalah berkurangnya kapasitas pompa. Terkadang, dalam beberapa kasus dapat merusak impeler atau *casing* bagian dalam pompa.

3. Sirkulasi Balik di dalam Sistem (*Internal Recirculation*)

Kondisi dimana biasanya terjadi di sudut terluar (*leading edge*) impeler dekat dengan diameter luar yang berbalik menuju bagian tengah impeler. Dapat terjadi pada sisi awal isap pompa. Efek dari putaran balik ini dapat menyebabkan menambahnya kecepatan aliran sampai ia menguap dan pecah ketika melalui tekanan yang lebih tinggi. Biasanya terjadi pada pompa yang memiliki head tekan tersedianya rendah. Kavitasasi akan timbul bila tekanan isap terlalu rendah. Gelembung uap yang terbentuk dalam proses ini mempunyai siklus yang sangat singkat. Gelembung akan terbawa aliran fluida sampai akhirnya berada pada daerah yang mempunyai tekanan cairan lebih besar daripada tekanan uap jenuh cairan. Pada daerah tersebut gelembung ini akan pecah dan akan menyebabkan kerusakan pada dinding di dekatnya. Cairan akan masuk secara tiba-tiba ke ruangan yang terbentuk akibat pecahnya gelembung uap tadi sehingga mengakibatkan tumbukan yang terus-menerus.

4. Pergolakan Air (*Turbulence*)

Aliran fluida diinginkan pada kecepatan yang konstan. Korosi dan hambatan yang ada pada sistem perpipaan dapat merubah kecepatan fluida dan setiap ada perubahan kecepatan, tekanannya juga berubah. Untuk menghambat hal tersebut, perlu dilakukan perancangan sistem perpipaan yang baik. Antara lain memenuhi kondisi jarak minimum antara *suction* pompa dengan *elbow* yang pertama minimal sepuluh kali diameter pipa.

5. *Vane Passing Syndrome*

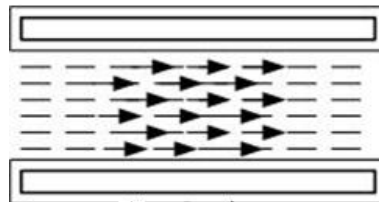
Kerusakan akibat kavitasasi jenis ini terjadi karena diameter luar impeler terlalu dekat dengan *cutwater* pompa. Kecepatan aliran fluida bertambah ketika alirannya melalui lintasan sempit tersebut, tekanan berkurang dan menyebabkan penguapan lokal. Gelembung udara yang terbentuk kemudian pecah pada tempat yang memiliki tekanan yang lebih tinggi, sedikit diluar alur *cutwater*. Hal inilah yang menyebabkan kerusakan pada *volute* (rumah keong) pompa.

2.2.7 Aliran Fluida

Kavitasi terjadi pada saat laju aliran yang turun sangat cepat. Aliran bisa menjadi indikator yang baik pada saat terjadinya kavitasi. Aliran fluida dibedakan menjadi 3 tipe yaitu aliran laminar, aliran transisi, dan aliran turbulen. Tipe aliran ini didapat dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh Osborne Reynold tahun 1883 yang mengklasifikasikan aliran menjadi 3 tipe. Berikut klasifikasinya (Olson Dkk, 1990) :

a) Aliran Laminer

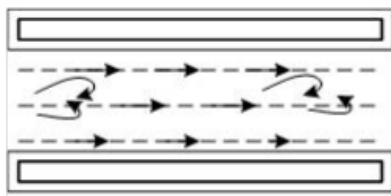
Aliran laminar adalah aliran dengan fluida yang bergerak dalam lamina-lamina atau lapisan-lapisan dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Aliran laminar ini mempunyai nilai bilangan Reynoldsnnya kurang dari 2300 ($Re < 2300$).



Gambar 2.4 Aliran Laminer
(Olson, 1990)

b) Aliran Transisi

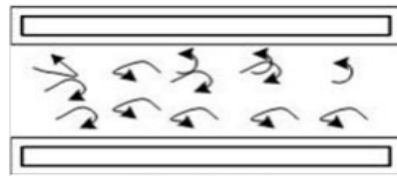
Aliran transisi adalah aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen. Kondisi peralihan ini tergantung pada suatu viskositas fluida, kecepatan dan lain-lain yang menyangkut geometri aliran dimana nilai bilangan Reynoldsnnya antara 2300 sampai dengan 4000 ($2300 < Re < 4000$).



Gambar 2.5 Aliran Transisi
(Olson, 1990)

c) Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah aliran yang pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Dimana nilai bilangan Reynoldsnya lebih besar dari 4000 ($Re > 4000$).



Gambar 2.6 Aliran Turbulen
(Olson, 1990)

2.2.8 Maintenance

Maintenance (pemeliharaan) dapat diartikan sebagai serangkaian bentuk kegiatan atau pekerjaan yang dilakukan untuk mengembalikan suatu peralatan ke kondisi dimana ia dapat menjalankan fungsi sesuai dengan yang ditentukan (Ahmad & Kamarudin, 2012). Kegagalan sistem sering sekali mengakibatkan kerugian. Dibutuhkan sebuah pemeliharaan yang menjaga suatu komponen/peralatan dan sistem dapat berjalan dengan lancar. Kebutuhan pemeliharaan idealnya dilakukan demi menjaga suatu aktivitas dari suatu sistem kerja agar tetap aman dan handal sesuai fungsinya.

2.2.9 Condition Based Maintenance (CBM)

CBM adalah sistem perawatan berdasarkan pada pengawasan kondisi dengan usaha perawatan berdasarkan adanya tanda-tanda ketidaknormalan pada komponen yang diawasi. Metode ini dilakukan dengan cara memantau sistem dengan melakukan pengukuran yang mendeteksi degradasi (penurunan) dari kinerja sistem, sehingga dapat memungkinkan melakukan pengendalian atau

memprediksi penyebab terjadinya kegagalan sebelum terjadi kegagalan sistem yang lebih besar. Metode pemeliharaan dengan CBM merekomendasikan tindakan pemeliharaan atau pengambilan keputusan didasarkan pada informasi yang dikumpulkan melalui proses pemantauan kondisi yang dapat dilihat dari kondisi data getaran, suhu, lingkungan dan data akuisisi suatu mesin. Pemeliharaan dengan metode ini hanya harus dilakukan ketika indikator tertentu menunjukkan tanda-tanda menurunnya kinerja atau kegagalan yang akan datang. Memeriksa suatu mesin untuk indikator ini dapat mencakup pengukuran non-invasif, pemeriksaan visual, dan data kinerja. Jika diterapkan dengan benar, CBM dapat dengan signifikan mengurangi biaya perawatan karena hal ini mencegah perawatan preventif terencana yang tidak diperlukan.

Penerapan pada CBM yang efektif terdiri dari tiga tahapan (Jardine dkk, 2006):

1. Perolehan data; mengumpulkan dan menyimpan data kondisi kesehatan dari sistem yang diawasi.
2. Pengolahan data; termasuk dalam sebelum pengolahan, penyaringan dan ekstraksi ciri-ciri pada data yang terkumpul di tahap pertama.
3. Pengambilan keputusan teknik perawatan; menyediakan rekomendasi perawatan yang efisien berdasarkan pada hasil kondisi kesehatan mesin.

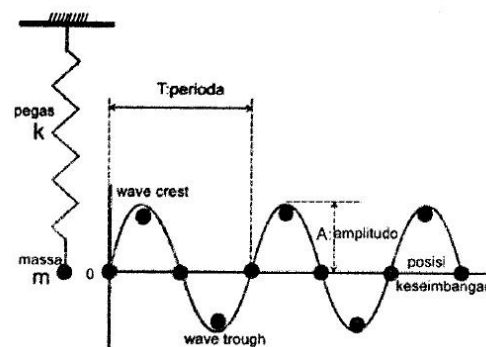
Dari tahapan tersebut dalam hal pengambilan keputusan perawatan ini aspek diagnosa dan prediksi adalah dua kategori utama dalam keputusan perawatan. Dengan sistem pemeliharaan ini kerusakan yang ada dapat disesuaikan, mengetahui kerusakan yang akan datang dan sisa komponen yang masih berguna serta tidak perlu melakukan perawatan yang tidak diperlukan sehingga kepastian biaya operasional dapat terkendali.

Menurut Deng dan Zhao (2013), metode berdasarkan getaran merupakan teknik yang paling umum digunakan dalam pemantauan kondisi (CBM). Pemantauan getaran berhubungan dengan pengukuran getaran suatu komponen untuk mendeteksi perubahan sinyal getaran yang dapat menunjukkan kerusakan

komponen. Pengukuran getaran umumnya digunakan karena efektivitas dan fleksibilitasnya. Feng dkk (2011) beranggapan bahwa tingkat keparahan getaran komponen dan polanya memiliki hubungan yang kuat dengan kondisi kesehatan mesin. Banyak peneliti telah menyelidiki hubungan antara sinyal getaran dan kondisi kesehatan mesin serta telah mengemukakan berbagai analisis sinyal getaran tertentu. Pada umumnya, sinyal getaran dikumpulkan menggunakan transduser seperti *accelerometer*, yang dipasang pada komponen. Informasi fisik seperti getaran mekanik dikumpulkan dan disimpan di interval waktu tertentu yang membentuk gelombang (*times series*) yang kemudian data dianalisis lebih jauh yang bertujuan untuk diagnosis dan diprognosis (diprediksi) pada *condition monitoring*.

2.2.10 Getaran

Getaran merupakan gerakan bolak-balik dalam suatu interval waktu tertentu. Getaran berhubungan dengan gerak osilasi (bolak-balik) benda dan gaya yang berhubungan dengan gerak tersebut. Semua benda yang mempunyai massa dan elastisitas mampu bergetar, jadi kebanyakan mesin dan struktur rekayasa (*engineering*) mengalami getaran sampai derajat tertentu dan rancangannya biasanya memerlukan pertimbangan sifat osilasinya. Seperti pada gambar 2.7 gerak osilasi dari suatu sistem pegas massa.



Gambar 2.7 Gerak Osilasi Suatu Sistem Pegas Massa
(Hamid, 2012)

Vibrasi atau getaran mempunyai tiga parameter penting yang dapat dijadikan sebagai tolak ukur, yaitu :

1. Amplitudo

Amplitudo adalah ukuran atau besarnya sinyal getaran yang dihasilkan. Amplitudo dari sinyal getaran mengidentifikasikan besarnya gangguan yang terjadi. Makin tinggi amplitudo yang ditunjukkan, menandakan makin besar gangguan yang terjadi, besarnya amplitudonya bergantung pada tipe mesin yang ada. Pada mesin yang masih bagus dan baru, tingkat getarannya biasanya bersifat relatif.

2. Frekuensi

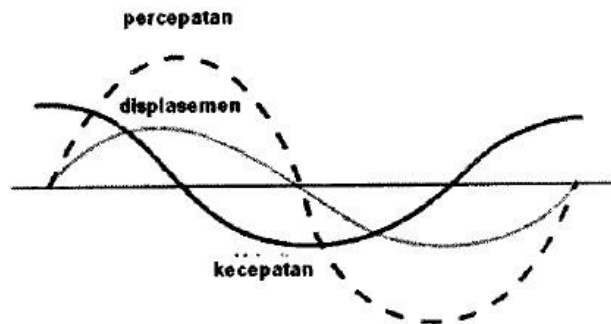
Frekuensi adalah banyaknya periode getaran yang terjadi dalam satu putaran waktu (berapa kali permenit atau perdetik). Besarnya frekuensi yang timbul pada saat terjadinya getaran dapat mengidentifikasikan jenis-jenis gangguan yang terjadi. Gangguan yang terjadi pada mesin sering menghasilkan frekuensi yang jelas atau menghasilkan contoh frekuensi yang dapat dijadikan sebagai bahan pengamatan. Dengan diketahuinya frekuensi pada saat mesin mengalami getaran, maka penelitian secara akurat dapat dilakukan untuk mengetahui penyebab atau sumber dari permasalahan.

3. Fase

Fase adalah penggambaran akhir dari pada karakteristik suatu getaran atau vibrasi yang terjadi pada suatu mesin. Fase adalah perpindahan atau perubahan posisi dari pada bagian-bagian yang bergetar secara relatif untuk menentukan titik referensi atau titik awal pada bagian yang lain yang bergetar.

Keseluruhan tingkat getaran mesin adalah ukuran total amplitudo getaran pada berbagai batas frekuensi dan dapat dinyatakan dalam percepatan, kecepatan, atau displasemen (perpindahan) yang merupakan dasar parameter melakukan

pengukuran getaran. Dapat dilihat pada gambar 2.8 kurva-kurva percepatan, kecepatan, dan displasemen.



Gambar 2.8 Kurva-Kurva Percepatan, Kecepatan, Displasemen
(Hamid, 2012)

2.2.11 Sinyal Getaran

Sensor getaran memegang peranan penting dalam kegiatan pemantauan sinyal getaran karena terletak di sisi depan (*front end*) dari suatu proses pemantauan getaran mesin. Secara konseptual, sensor getaran berfungsi untuk mengubah besar sinyal getaran fisik menjadi sinyal getaran analog dalam besaran listrik dan pada umumnya berbentuk tegangan listrik. Pemakaian sensor getaran ini memungkinkan sinyal getaran tersebut diolah secara elektrik sehingga memudahkan dalam proses manipulasi sinyal.

Indikator yang baik untuk menentukan apakah suatu peralatan yang berputar dalam kondisi baik adalah getaran (vibrasi), semakin kecil nilai suatu vibrasi semakin baik peralatan tersebut, sebaliknya apabila suatu peralatan yang berputar mempunyai getaran (vibrasi) yang besar atau tinggi maka kondisi peralatan tersebut cukup rawan. Oleh karena itu, suatu peralatan yang berputar sebaiknya memiliki suatu nilai getaran standar dan batasan getaran yang diperbolehkan (dibuat oleh pabrik pembuatan peralatan tersebut), sehingga apabila nilai getaran yang terjadi diluar batasan yang diizinkan maka peralatan tersebut harus menjalani tindakan perawatan (perbaikan).

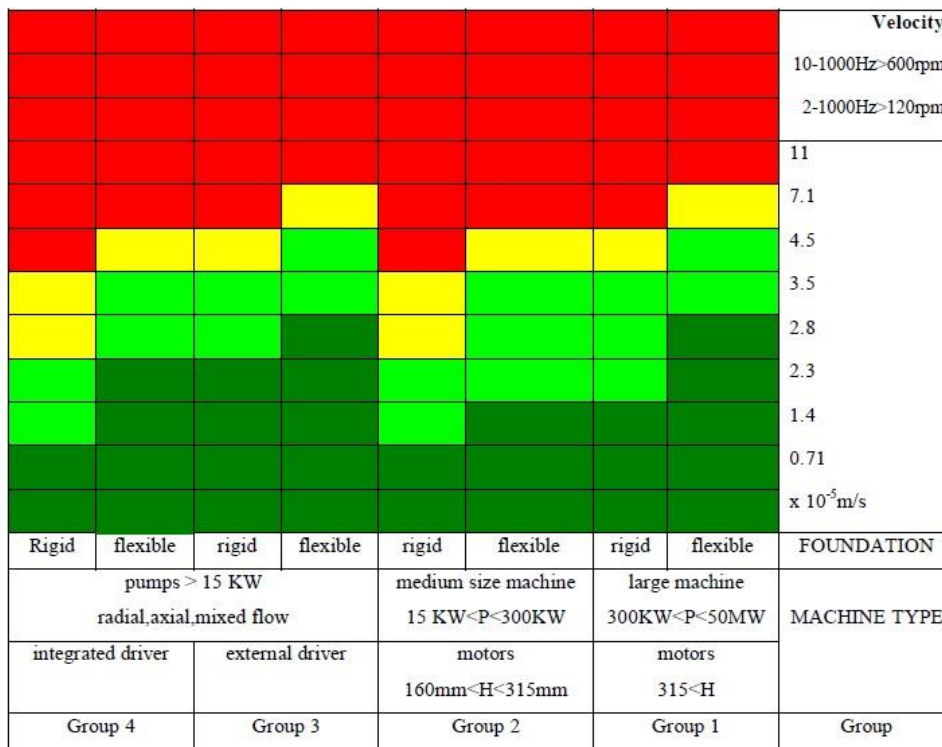
Salah satu mesin yang menimbulkan getaran adalah pompa, khususnya pada pompa sentrifugal yang banyak sekali digunakan yang melibatkan lebih dari 70% pasar pompa menurut sebuah survey di Inggris yang dilakukan oleh Sulzer Pump (dalam Anta, 2013). Namun saat ini sangat sulit untuk mendapatkan standar getaran (vibrasi) untuk pompa sentrifugal. Suatu pabrik pembuatan pompa saja belum tentu dapat memberikan standar getaran pada pompanya, sama halnya getaran yang timbul akibat kesalahan perencanaan dan pengoperasiannya. Menurut Beebe (2004) pompa sentrifugal menghasilkan beberapa sinyal getaran diantaranya *unbalance*, *misalignment*, kelonggaran mekanik, dan perputaran kavitasi seperti ditunjukkan tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sinyal Getaran pada Pompa Sentrifugal

Frekuensi (Kecepatan Putar =1x)	Penyebab
1x	<i>Unbalance</i> (ketidakseimbangan)
0.05x – 0.25x	Aliran terganggu
2x	Misalignment (ketidaklurusan) atau kelonggaran bagian dalam pompa
2x, 3x, 4x, dst	Kelonggaran mekanik
1.1x – 1.2x	Perputaran Kavitasi
5x – 50x	Elemen bantalan berputar
1 kHz – 20 kHz	<i>Noise</i> Kavitasi
Zx (Z = jumlah sudu impeler)	Terlalu dekat jalur impeler dengan tepi difuser dan <i>misalignment</i> pada impeler

Akan tetapi parameter yang paling umum bagi analisis getaran kerusakan peralatan mesin-mesin ialah timbulnya getaran dalam rentang frekuensi dari 10 Hz (600 rpm) sampai 1 KHz (60000 rpm) (Hamid, 2012). Menurut ISO 10816-3 untuk standar getaran diberikan batasan-batasan berdasarkan kecepatan (*velocity*)

yang dikategorikan dalam beberapa zona dan warna yang ditunjukkan seperti gambar 2.8.



Gambar 2.9 Standar Getaran menurut *ISO 10861-3*

(Sitorus, 2010)

Dari gambar 2.9 menunjukkan bahwa sesuai dengan standar getaran *ISO 10816-3* dikategorikan kepada 4 zona yaitu:

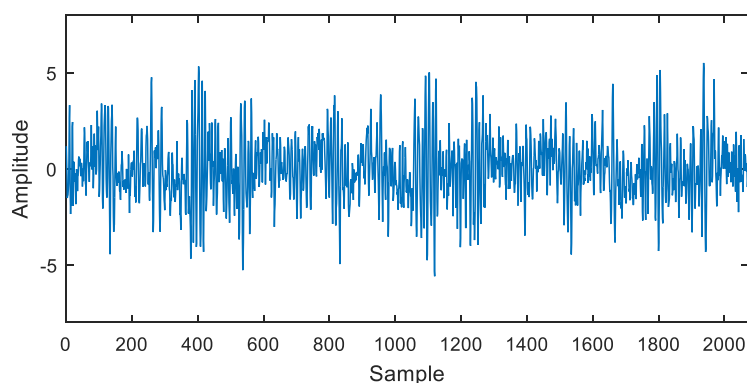
- a. Zona A berwarna hijau, getaran dari mesin sangat baik dan dibawah getaran yang diizinkan.
- b. Zona B berwarna hijau muda, getaran dari mesin baik dan dapat dioperasikan karena masih dalam batas yang diizinkan.
- c. Zona C berwarna kuning, getaran dari mesin dalam batas toleransi dan hanya dioperasikan dalam waktu terbatas.
- d. Zona D berwarna merah, getaran dari mesin dalam batas berbahaya dan dapat terjadi kerusakan sewaktu-waktu.

2.2.11 Analisis Sinyal Getaran

Dalam proses analisis menggunakan sinyal getaran terdapat 2 kategori utama yaitu domain waktu (*time domain*) dan domain frekuensi (*frequency domain*).

2.2.11.1 Domain Waktu (*Time Domain*)

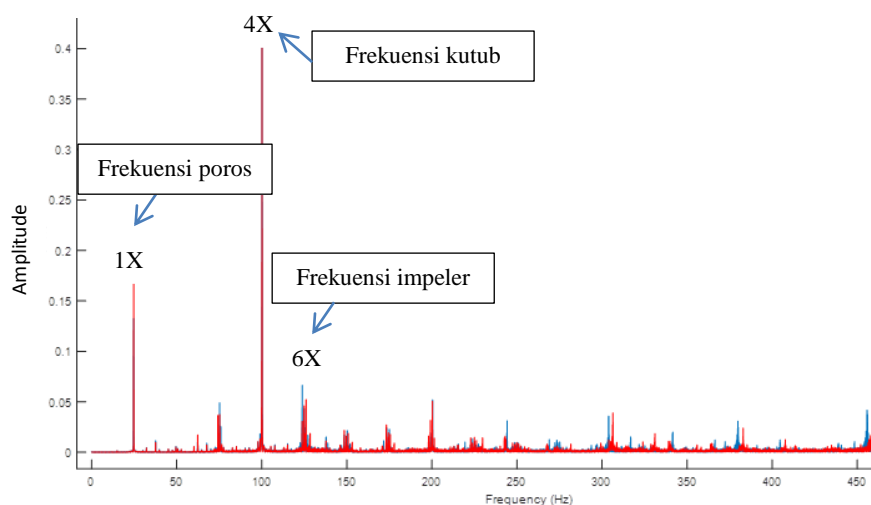
Secara umum, data getaran yang diperoleh dari domain waktu sebagai seri data yang menunjukkan percepatan, kecepatan, dan perpindahan. Biasanya sinyal getaran diperoleh menggunakan transduser tertentu seperti *accelerometer*. Fitur getaran domain waktu dapat diekstraksi menggunakan statistik deskriptif seperti standar deviasi, *kurtosis*, *root mean square* (RMS), *varians*, *skewness*, dan lain-lain. Plot getaran berdasarkan domain waktu ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Plot Getaran Domain Waktu

2.2.11.2 Domain Frekuensi (*Frequency Domain*)

Domain frekuensi dilakukan dengan mengubah sinyal gelombang domain waktu ke dalam domain frekuensi. Metode yang paling umum digunakan untuk konversi dari domain waktu ke domain frekuensi adalah dengan menggunakan *fast fourier transform* (FFT). Pada gambar 2.11 format plot getaran berdasarkan domain frekuensi menunjukkan frekuensi dasar (frekuensi *fundamental*) dan frekuensi-frekuensi kelipatan dari frekuensi dasar yang disebut sebagai harmonik. Kemunculan harmonik tersebut menunjukkan sinyal frekuensi komponen seperti frekuensi poros, frekuensi impeler, dan frekuensi kutub motor.



Gambar 2.11 Plot Getaran Domain Frekuensi

2.2.12 *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 (*time domain*) ke domain frekuensi (*frequency domain*) 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, koherensi, dan korelasi. FFT merupakan algoritma yang efisien untuk mempercepat konversi dari domain waktu menjadi domain frekuensi dari *Discrete Fourier Transform (DFT)*

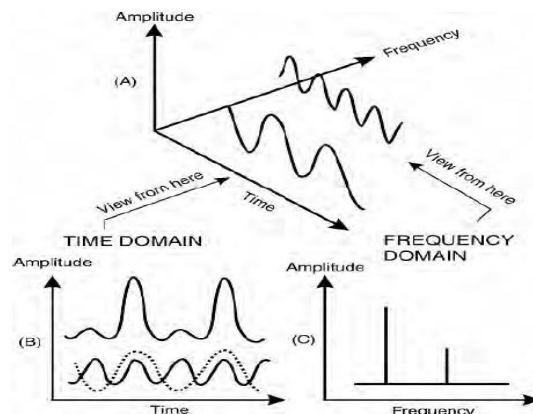
dan inversenya. Berikut formula DFT yang mengubah sinyal diskrit $g(i)$ menjadi domain frekuensi :

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{\frac{-2\pi ink}{N}} \quad k = 0, \dots, N - 1 \dots \dots \dots (2.1)$$

Atau dalam bentuk matriks

$$X_K = \frac{1}{N} W_{kn} x_k \quad X_k = [X_0, \dots, X_{N-1}] \text{ dan} \\ x_k = [x_0, \dots, x_{N-1}] \dots \dots \dots (2.2)$$

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 adanya kesalahan. Pada prinsipnya pengolahan data dilakukan dengan mengkonversi 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. Pada gambar 2.12 skema perubahan plot dalam FFT. Dasar teknik FFT untuk diagnosis kesalahan meliputi menyajikan dan menganalisis data getaran 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.



2.12 Skema Plot dalam FFT
(Scheffer & Girdhar, 2004)

2.2.13 Akuisisi Data Sinyal Getaran

Dalam proses pemeliharaan prediktif yang digunakan sebagai indikator untuk mendiagnosa kondisi suatu mesin banyak macam teknik yang digunakan, diantaranya seperti analisis getaran, emisi akustik, analisis minyak, analisis partikel, dan pemantauan korosi. Namun teknik yang populer dalam analisis mesin atau peralatan berputar adalah analisis getaran. Analisis ini mempunyai keuntungan utama dapat mengidentifikasi perkembangan masalah sebelum masalah itu menjadi sangat serius dan menyebabkan *downtime* yang tidak terjadwal. Sistem analisis getaran pada umumnya terdiri dari 4 bagian utama (Hamid, 2012):

1. Sinyal *pickup*, juga disebut transduser.
2. Sinyal *analyzer*.
3. Software analisis.
4. Komputer untuk analisis dan penyimpanan data.

2.2.13.1 Transduser

Penggunaan sensor atau suatu transduser dalam proses penelitian banyak jenisnya. Transduser adalah peralatan yang merubah variabel fisik seperti gaya, tekanan, temperatur, kecepatan menjadi bentuk variabel yang

lain (Sumbodo, 2008). Pada analisis getaran transduser yang umum digunakan yaitu (Scheffer & Girdhar, 2004):

a. Transduser *Velocity*

Transduser *velocity* adalah sensor yang berfungsi mengukur berdasarkan kecepatan getaran. Dapat dilihat pada gambar 2.13 Transduser *velocity* menggunakan koil magnet yang mengubah energi mekanik menjadi sinyal analog yang sebanding dengan kecepatan getaran.



Gambar 2.13 Transduser *Velocity*
(www.vitec-inc.com)

b. Transduser *Displacement*

Transduser *displacement* (perpindahan) merupakan sensor yang mengukur berdasarkan penyimpangan getaran. Transduser ini mengubah energi mekanik menjadi sinyal analog listrik yang sebanding dengan perpindahan. Transduser displacement yang paling populer digunakan pada sekarang ini ialah *non-contact eddy current probe*. Dapat dilihat pada gambar 2.14 transduser *displacement non-contact eddy current probe*.



Gambar 2. 14 Transduser *Displacement Non-Contact Eddy Current Probe*
(www.lionprecision.com)

c. *Accelerometer*

Accelerometer pada gambar 2.15 adalah sebuah transduser yang berfungsi untuk mengukur percepatan, mendeteksi dan mengukur getaran, ataupun untuk mengukur percepatan akibat gravitasi bumi. *Accelerometer* juga dapat digunakan untuk mengukur getaran yang terjadi pada kendaraan, bangunan, mesin, dan juga bisa digunakan untuk mengukur getaran yang terjadi di dalam bumi, getaran mesin, jarak yang dinamis, dan kecepatan dengan ataupun tanpa pengaruh gravitasi bumi (Sukatentel, 2014). *Accelerometer* pada umumnya menggunakan material kristal piezoelektrik didalamnya yang dipolarisasikan muatan listrik pada permukaan terminalnya. Tegangan yang dihasilkan dikonversi menjadi percepatan.

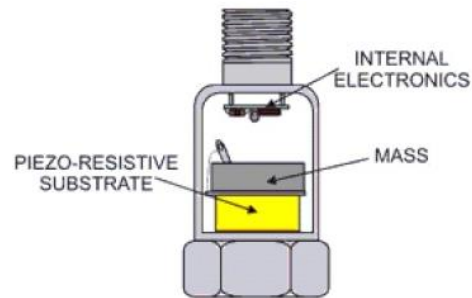


Gambar 2.15 *Accelerometer*

Pada saat ini bermacam tipe *accelerometer* yang telah dikembangkan untuk menganalisa getaran, adapun beberapa tipe *accelerometer* yang ada diantaranya:

1. *Accelerometer Tipe Compression*

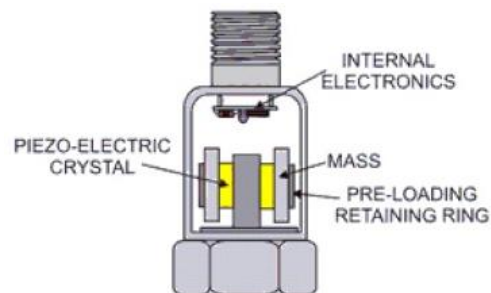
Accelerometer tipe ini, seperti yang ditunjukkan gambar 2.16 dirancang untuk mengukur tingkat tegangan yang sangat tinggi dan tujuan pengukuran khusus lainnya.



Gambar 2.16 *Accelerometer Tipe Compression*
(Aji, 2007)

2. *Accelerometer Tipe Shear*

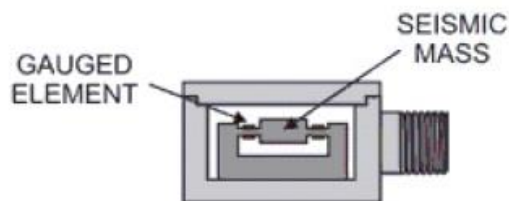
Accelerometer dengan ukuran yang sangat kecil. Keuntungan dari *accelerometer* ini gambar 2.17 dapat mengukur getaran pada struktur dan tempat yang sangat kecil. Biasanya digunakan untuk pengukuran getaran perangkat elektronik ataupun struktur yang fleksibel.



Gambar 2.17 *Accelerometer Tipe Shear*
(Aji, 2007)

3. *Accelerometer Tipe Strain Gauge*

Accelerometer ini digunakan untuk mendeteksi defleksi dari sebuah massa *seismic* dengan menggunakan silikon atau elemen *foil strain gauged* seperti gambar 2.18.



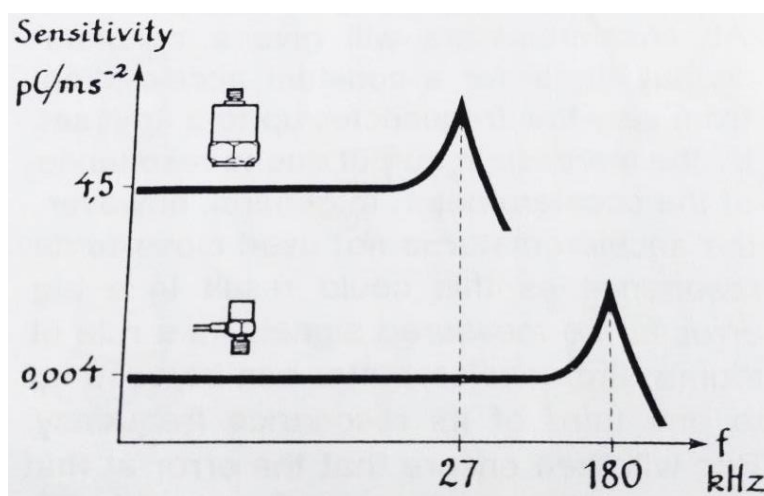
Gambar 2.18 *Accelerometer Tipe Strain Gauge*
(Aji, 2007)

2.2.13.2 Batas Frekuensi (*Frequency Range*)

Accelerometer memberikan output elektrik yang berbanding lurus dengan percepatan yang mempunyai rentang dinamis yang luas (sampai $1:10^8$). Untuk rentang dinamis terendahnya hanya tergantung dari gangguan pada kabel ataupun kontrol amplifiernya.

Saat *accelerometer* dipasang pada suatu permukaan konstan maka akan menangkap sinyal output konstan yang sangat luas jangkauannya mendekati frekuensi resonansi. Sensitivitas dan batas frekuensi tergantung jenis *accelerometer* seperti gambar 2.19, pada umumnya semakin besar *accelerometer* maka semakin besar tingkat sensitivitasnya, sedangkan *accelerometer* yang semakin kecil maka rentang frekuensi yang dapat ditangkap semakin tinggi.

Semua *accelerometer* sinyal output yang konstan untuk percepatan tetap dari frekuensi sangat rendah sampai batas yang ditetapkan dari peningkatan *output* resonansi *accelerometer*. Secara umum, *accelerometer* yang digunakan tidak mendekati resonansi maka dapat menyebabkan kesalahan besar dalam pengukuran sinyal. Mengikuti aturannya, *accelerometer* dapat digunakan paling tidak sepertiga dari frekuensi resonansinya. Hal tersebut dilakukan agar ketidakpastian kesalahan tidak sampai 12%. Dalam praktiknya, *filter* digunakan untuk membatasi respon jauh dibawah frekuensi resonansi *accelerometer* (Courrech, 1990).



Gambar 2.19 Batas Frekuensi pada *Accelerometer*
(Courrech, 1990)

2.2.13.3 Metode Pemasangan *Accelerometer*

Accelerometer pada saat pengukuran sinyal getaran harus dipasangkan atau ditempelkan tepat pada suatu objek (komponen) yang ingin direkam frekuensinya. Pemasangan harus langsung pada sumbu sensitivitasnya sehingga frekuensi yang didapatkan merupakan frekuensi yang diinginkan. Ketika pengukuran suatu objek, *accelerometer* yang dipasangkan dapat menambah massa dan mempengaruhi sifat mekanik serta sistem getaran objeknya. Oleh karena itu, secara umum berat massa *accelerometer* yang dipasangkan tidak boleh lebih dari objek bergetar yang akan diukur.

Kesalahan dalam memasang atau menempelkan *accelerometer* dapat merusak data getaran yang akan direkam yang disebabkan berkurangnya jarak frekuensi yang didapat. Maka syarat utama dalam pemasangan ialah terdapat kontak mekanis antara permukaan dengan *accelerometer* sehingga terpasangan dengan baik. Berikut metode pemasangan *accelerometer* yang ada, diantaranya:

a. Pemasangan dengan Tiang (*Stud Mounting*)

Pemasangan *accelerometer* dengan tiang baja (seperti baut atau kancing) merupakan metode pemasangan yang baik yang mungkin dilakukan pada objek apapun. Namun yang tidak dapat dihindari dari resonansi *accelerometer* pada metode ini ialah dapat menyebabkan kekeliruan pada sinyal dan output dari *accelerometer* yang terjadi di frekuensi tinggi.

b. Pemasangan dengan Kancing yang Dilem (*Cementing studs*)

Pemasangan dengan metode ini dilakukan dimana tidak adanya celah atau lubang untuk dipasangnya maupun dibuat lubang pemasangan. Pemasangan kancing ditambahkan dengan penggunaan lem pengeras (*epoxy*) ataupun lem *cyanoacrylate*.

c. Pemasangan dengan Lilin Lebah (*Beeswax*)

Metode pemasangan yang sederhana dan cepat bisa dilakukan dengan menggunakan lem lilin lebah (*beeswax*). Akan tetapi penggunaan *wax* ini terbatas, tidak dapat digunakan pada pengukuran sinyal getaran dalam lingkungan dengan suhu yang melebihi 40°C karena dapat menyebabkan *wax* mencair dan tidak lengket.

d. Pemasangan dengan Magnet

Pemasangan dengan magnet merupakan salah satu metode yang mudah dan cepat. Penggunaan magnet permanen dapat memudahkan menggeser dan memindahkan *accelerometer* dalam pengukuran. Namun metode ini hanya dapat digunakan pada batas frekuensi sampai 2,5 kHz. Metode ini digunakan pada permukaan terbatas seperti permukaan ferromagnetik dan rentang dinamis yang terbatas gaya magnet.

2.2.13.4 *Matlab*

Data getaran yang telah direkam oleh transduser selanjutnya dianalisis menggunakan komputasi dengan *Software Matlab* dengan algoritma Fast Fourier Transform (FFT).

Matlab adalah bahasa pemrograman level tinggi (ingat dalam dunia pemrograman semakin tinggi level semakin mudah cara menggunakannya) yang dikhususkan untuk komputasi teknis. Bahasa ini mengintegrasikan kemampuan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam sebuah lingkungan yang tunggal dan mudah digunakan. *Matlab* memberikan sistem interaktif yang menggunakan konsep *array*/matrik sebagai standar variabel elemennya tanpa membutuhkan pendeklarasian *array* seperti pada bahasa lainnya (Away, 2010).

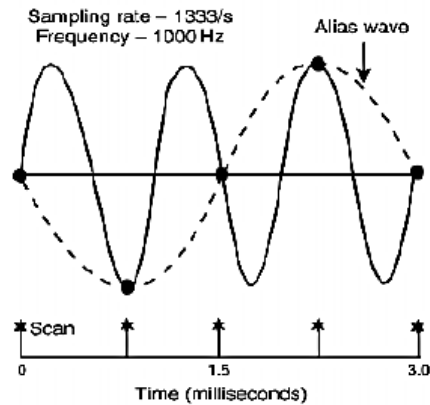
2.2.13.5 *Sampling*

Algoritma FFT yang diproses dengan *Software Matlab* akan direkam dalam bentuk Amplitudo. Amplitudo dari getaran yang ditunjukkan dalam perpindahan, kecepatan, dan percepatan, akan direkam pada kisaran 17066 *sampling rate* untuk melihat indikasi terjadinya kavitasi.

Sampling adalah proses perekaman amplitudo gelombang secara otomatis, dan kemudian menghasilkan kurva dari titik yang sudah direkam. Proses dimana data sampel yang direkam atau dikumpulkan *discrete poin* (digital) merekonstruksi gelombang yang pada awalnya dalam bentuk sinyal analog. Rekonstruksi gelombang digital harus terlihat mirip dengan gelombang asli, seberapa cepat harus direkam amplitudonya, atau mengambil sampel sehingga gelombang digitalisasi merupakan bagian dari sinyal analog.

Proses *sampling* menerapkan teorema *Nyquist sampling* agar tidak terjadi *aliasing*. Teorema tersebut menyatakan bahwa untuk tidak kehilangan informasi yang terkandung dalam sampel sinyal, maka proses *sampling* harus dilakukan setidaknya 2 kali frekuensi informasi (Scheffer

& Girdhar, 2004). *Aliasing* adalah pembentukan gelombang frekuensi rendah. Pada proses *sampling* seperti gambar 2.20 terjadi efek *aliasing*. Oleh karena itu analisis dilengkapi dengan *anti-aliasing filter* yang merupakan elektronik *low-pass filter* yang memungkinkan untuk frekuensi rendah bisa terdeteksi dengan frekuensi yang lebih tinggi (Anta, 2013).



Gambar 2.20 *Sampling Rate* dengan *Aliasing*
(Scheffer & Girdhar, 2004)