

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian tentang kavitasi dan kerusakan yang terjadi pada pompa menggunakan metode sinyal getaran telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Berikut ini adalah tinjauan beberapa hasil penelitian yang sudah dilakukan.

Avellan (2004) meneliti kavitasi yang terjadi di dalam proses pemompaan dengan menggunakan fluida cair. Ia menyatakan ketika air masuk ke suatu pompa, terjadi kenaikan kecepatan yang menyebabkan penurunan tekanan di dalam pompa tersebut. Jika tekanan ini terlalu rendah di bawah tekanan uap jenuhnya, air akan berubah menjadi kabut/menguap, kemudian membentuk gelembung dalam cairan. Gelembung ini pecah dengan keras ketika bergerak ke daerah dengan tekanan yang lebih tinggi. Apabila fenomena kavitasi yang terjadi secara kontinyu ini dibiarkan akan merusak komponen pompa bagian dalam.

Jarrell (2003) menyatakan bahwa terlihat adanya perbedaan dalam spektrum getaran *Fast Fourier Transform* (FFT) sebelum dan setelah munculnya kavitasi pada pompa sentrifugal. Analisis getaran frekuensi komponen menunjukkan bahwa kenaikan getaran akibat kavitasi muncul pada frekuensi tinggi (lebih dari 1000 Hz). Penelitian dalam percobaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan yang paling nyata terlihat akan terjadi di frekuensi tinggi. *Broadband frequency* pada spektrum getaran terkait dengan peningkatan getaran yang disebabkan oleh fenomena kavitasi.

Menurut Farokhzad dkk (2012) metode statistik telah banyak digunakan untuk memberikan informasi karakteristik kavitasi pada pompa. Analisis statistik sinyal getaran menghasilkan parameter statistik deskriptif yang berbeda. Suatu parameter statistik dapat membantu dalam mengamati terjadinya fenomena kavitasi. Parameter yang dapat digunakan untuk mendeteksi kavitasi antara lain *standard deviation*, *variance*, *kurtosis*, *skewness* dan *root mean square*.

Parameter ini diekstraksi dari sinyal getaran. Statistik tersebut valid untuk digunakan dalam mendeteksi kavitasi pada pompa sentrifugal.

Menurut Zainal dkk (2013) dengan menggunakan analisis spektrum getaran kavitasi yang terjadi pada pompa sentrifugal dapat dideteksi tanpa harus melakukan pembongkaran. Indikasi kavitasi yang menyebabkan rusak pada impeler pompa sentrifugal dapat diamati dari peningkatan nilai amplitudo frekuensi poros pompa dan penurunan nilai amplitudo frekuensi sudu. Peningkatan amplitudo frekuensi poros pompa disebabkan oleh bertambahnya massa *unbalance* pada impeler pompa yang rusak. Sedangkan penurunan amplitudo frekuensi sudu disebabkan bertambahnya *gap* atau jarak sisi luar impeler terhadap *volute*.

Al-Hashmi (2004) dengan menggunakan metode spektrum getaran dalam mendeteksi kavitasi pada pompa sentrifugal berhasil dilakukan. Metode tersebut memiliki kesesuaian yang benar antara bentang frekuensi rendah dan bentang frekuensi tinggi dalam mendeteksi awal terbentuknya kavitasi. Perbandingan pada amplitudo getaran yang dihasilkan pompa dengan laju aliran fluida juga dapat mengidentifikasi level kavitasi yang muncul pada bentang frekuensi tertentu.

Farokhzad (2013) mengidentifikasi kavitasi pada pompa sentrifugal menggunakan metode FFT *fast fourier transform* dan ANFIS *adaptive network fuzzy inference system*. Dengan menggunakan kedua metode ini kavitasi yang terjadi pada pompa dapat dideteksi dengan lebih akurat dan efektif. Kemudian klasifikasi yang digunakan dalam metode ANFIS dapat mencapai total 90,67%. Hasilnya menunjukkan penerapan dan efektivitas dalam mendeteksi kavitasi dapat diukur dengan lebih baik.

Rao (2000) mengemukakan hasil dari penelitiannya bahwa meningkatnya getaran yang terjadi pada pompa adalah indikator awal kemungkinan munculnya fenomena kavitasi. Hal ini dapat diamati dengan mudah melalui analisis getaran yang cukup populer digunakan. Akan tetapi mendiagnostik kavitasi memerlukan teknik yang harus tepat. Dengan menggunakan analisis envelope, menurutnya kavitasi yang terjadi pada pompa sentrifugal dapat diamati dengan lebih akurat dan mudah.

Menurut Chek dan Salman (2005) dengan analisis envelope yang digunakan sebagai deteksi kavitas pada pompa sentrifugal mampu untuk mengidentifikasi terjadinya kavitas. Bentang *band-pass* frekuensi pada spektrum envelope menunjukkan pada kisaran 5 kHz – 40 kHz. Bentang frekuensi tersebut menunjukkan bahwa kavitas dapat terjadi dalam waktu yang sangat singkat kurang dari 0.003 detik dan menghasilkan getaran juga *noise* dengan frekuensi yang tinggi.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, menunjukkan bahwa spektrum getaran dan spektrum envelope dapat digunakan untuk mendeteksi fenomena kavitas pada pompa sentrifugal. Hasilnya didapatkan peningkatan nilai amplitudo dan nilai frekuensi pada bentang tertentu dapat mengindikasikan fenomena kavitas yang terjadi.

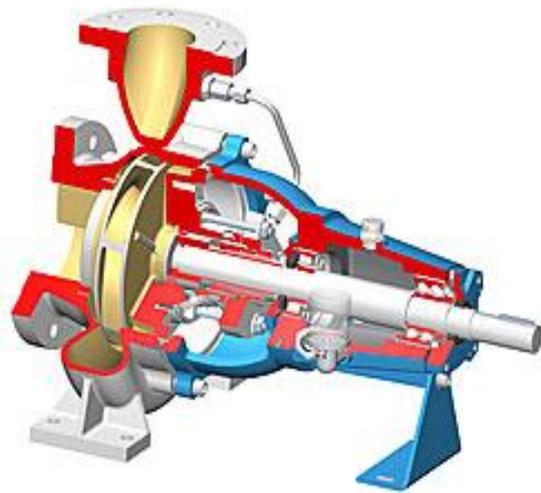
## **2.2 Dasar Teori**

### **2.2.1 Pompa Sentrifugal**

Pompa sentrifugal merupakan elemen pemindah fluida. Prinsip kerja yang digunakan pada pompa sentrifugal dengan putaran impeler yang dihubungkan dengan poros pada pengerak mula sebagai pemutar utama. Fluida yang berada di dalam pompa sentrifugal akan berputar yang diakibatkan oleh dorongan perputaran sudu-sudu *impeller*. Sehingga menimbulkan gaya sentrifugal yang menyebabkan fluida mengalir dari tengah *impeller* keluar melalui saluran di antara sudu-sudu dan meninggalkan *impeller* dengan kecepatan tinggi. Fluida dengan kecepatan tinggi ini dialirkan melalui saluran dengan penampang yang membesar (*diffuser*). Kemudian terjadilah perubahan *head* (tinggi tekan) dari *head* kecepatan menjadi *head* tekanan. Setelah fluida meninggalkan impeler, terjadi kekosongan fluida pada ruang di antara sudu-sudu impeler yang mengakibatkan ruangan diantara sudu-sudu impeler menjadi vakum dan menyebabkan fluida akan terhisap masuk (Endra, 2016).

Dalam pengoperasian pompa sentrifugal tekanan atau energi yang dihasilkan berdasarkan prinsip gaya sentrifugal (*Centrifugal Force*). Impeler pada

pompa yang berputar akan membuat fluida terdorong ke luar sudu impeler, sehingga arah sentrifugal akan menghasilkan tekanan pada *casing* yang kemudian memberikan energi pada fluida. Gambar 2.1 menunjukkan komponen utama pompa sentrifugal secara umum.



Gambar 2.1 Pompa Sentrifugal  
(Sumber : <http://www.axflow.com>)

### 2.2.2 Klasifikasi Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal dibedakan atas beberapa kategori, diantaranya :

a. Kapasitas

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

b. Tekanan *Discharge* :

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

c. Jumlah/Susunan *Impeller* :

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

d. Posisi Poros :

1. Poros vertikal
2. Poros horizontal

e. Jumlah *Suction* :

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

e. Arah Aliran Keluaran Impeler :

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

### 2.2.3 Bagian-Bagian Pompa Sentrifugal

Secara umum pompa sentrifugal dibagi atas beberapa bagian komponen penting ditunjukkan pada Gambar 2.2, diantaranya (Dietzel, 2010) :

a. *Stuffing Box*

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

b. *Packing*

*Packing* digunakan untuk mencegah dan mengurangi kebocoran cairan dari casing pompa melalui poros.

c. *Shaft (Poros)*

Poros berfungsi untuk meneruskan momen puntir dari penggerak utama ke bagian-bagian komponen pompa yang berputar 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 *inter stage* atau *distance sleeve*.

e. *Vane*

*Vane* adalah sudu dari *impeller* sebagai tempat berlalunya cairan pada *impeller*

f. *Casing*

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

g. *Eye of Impeller*

Bagian sisi masuk pada arah isap impeler

h. *Impeller*

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

i. *Wearing Ring*

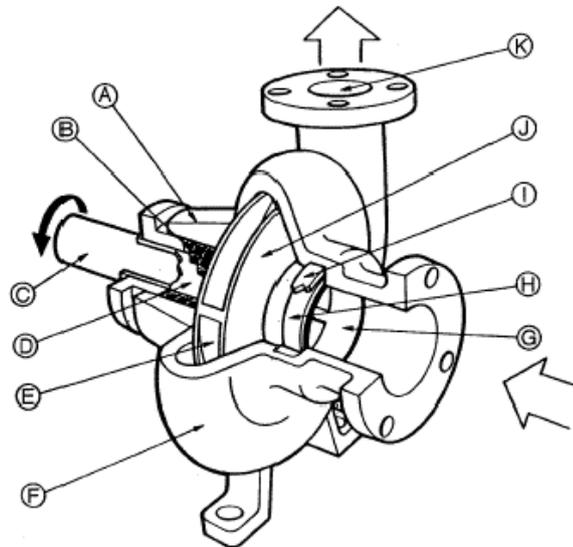
*Wearing Ring* berfungsi untuk memperkecil kebocoran cairan yang melewati bagian depan *impeller* maupun bagian belakang *impeller*, dengan cara memperkecil celah antara *casing* dengan *impeller*.

j. *Bearing* (Bantalan)

*Bearing* berfungsi untuk menumpu dan menahan beban dari poros agar dapat berputar baik berupa beban radial maupun beban aksial. *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.

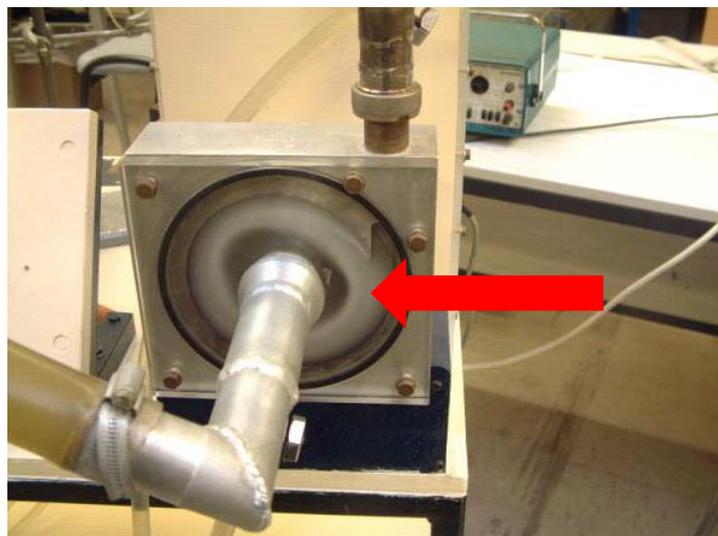


Gambar 2.2 Bagian – Bagian Pompa Sentrifugal  
(Dietzel, 2010)

#### 2.2.4 Kavitasasi

Kavitasi merupakan pembentukan rongga kosong dalam suatu cairan dan kemudian pecah secara tiba-tiba. Kavitasasi terjadi ketika fluida cair berada pada daerah yang mengalami perubahan tekanan dengan cepat. Fenomena ini sangat berbahaya dan diketahui sebagai fenomena yang bersifat merusak pada bagian-bagian penting komponen pompa dan dapat menurunkan performansi pompa. Dalam hal kavitasasi, bagian pompa yang sering mengalami kavitasasi adalah sisi isap pompa. Hal ini terjadi karena tekanan isap pompa terlalu rendah hingga dibawah tekanan uap jenuh (Rahman dan Ikhwanasyah, 2012). Proses terbentuknya kavitasasi ditunjukkan pada Gambar 2.3, kavitasasi sendiri dapat terjadi pada fluida cair yang sedang mengalir di dalam pompa maupun di luar pompa dengan kecepatan tinggi (Sularso, 2000).

Pompa yang sedang beroperasi dalam kondisi kavitasi akan menimbulkan suara bising akibat dari getaran yang terjadi karena terbentuknya gelembung air yang kemudian pecah secara terus menerus. Kondisi ini apabila dibiarkan akan menyebabkan kerusakan mekanis pada komponen pompa. Kerusakan yang sering terjadi akibat kavitasi adalah terbentuknya lubang-lubang korosi pada impeler maupun *casing* pompa (Soyama, 1992).



Gambar 2.3 Pompa Sentrifugal dalam Kondisi Kavitasi  
(Al Hashmi, 2004)

### 2.2.5 Jenis-Jenis Kavitasi

Kavitasi merupakan fenomena yang sering terjadi pada pompa sentrifugal. Fenomena kavitasi yang muncul pada pompa bermacam-macam jenisnya, antara lain :

#### 1. *Incipient* Kavitasi

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

## 2. *Travelling* Kavitasi

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

## 3. *Vortex* Kavitasi

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

### 2.2.6 Penyebab Kavitasi

Terdapat beberapa penyebab terjadinya fenomena kavitasi pada pompa sentrifugal. Diantaranya (Bachus dan Custodio, 2003) :

#### 1. Penguapan (*Vaporation*)

Zat cair dapat menguap ketika 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 ketika 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 (*suction*), yang mengakibatkan menambahnya suhu udara pada sisi isap.
- f. Zat cair pada sisi isap berkurang, hal ini dapat terjadi jika level cairan terlalu rendah.

### 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. Biasa terjadi pada sisi awal isap pompa. Efek dari putaran balik ini dapat menyebabkan bertambahnya kecepatan aliran sampai fluida cair menguap dan pecah ketika melalui tekanan yang lebih tinggi. Kondisi ini biasa terjadi pada pompa yang memiliki *head* tekan yang rendah. Kavitasasi akan muncul apabila tekanan pada sisi isap terlalu rendah. Gelembung uap yang terbentuk dalam proses ini mempunyai siklus yang sangat singkat. Gelembung akan terbawa aliran fluida cair sampai akhirnya berada pada daerah yang mempunyai tekanan fluida lebih besar daripada tekanan uap jenuh cairan. Pada daerah tersebut gelembung ini akan pecah. Fenomena ini dapat berlangsung terus menerus dan akan menyebabkan kerusakan pada komponen bagian dalam pompa.

### 4. Pergolakan Air (*Turbulance*)

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

### 5. *Vane Passing Syndrome Cavitation*

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

### 2.2.7 NPSH (Net Positive Suction Head)

Kavitasi terjadi apabila tekanan statis suatu aliran fluida cair turun hingga di bawah tekanan uap jenuhnya. Proses kavitasi dapat dihindari dengan mengusahakan agar tidak ada satu bagian apapun dari aliran fluida dalam sistem yang tekanannya lebih rendah dibanding tekanan uap jenuh cairan pada temperatur yang berkaitan. Dalam hal ini perlu diperhatikan dua macam tekanan yang berpengaruh. Pertama, tekanan yang ditentukan dari kondisi lingkungan, dimana pompa tersebut dipasang. Kedua, tekanan yang ditentukan dari keadaan aliran di dalam pipa.

#### 2.2.7.1 NPSH tersedia (*available*)

NPSH tersedia atau *available* adalah tekanan yang dimiliki oleh fluida cair pada sisi hisap pompa dikurangi dengan tekanan uap cair jenuh di tempat tersebut. Jika permukaan air dalam tangki/*reservoir* berada lebih rendah daripada sumbu pompa, maka nilai NPSHa dirumuskan sebagai berikut :

$$h_{sv} = \frac{P_a - P_v}{\gamma} - h_s - h_{ls} \dots\dots\dots (2.1)$$

atau

Jika permukaan air dalam tangki/*reservoir* lebih tinggi daripada sumbu pompa, maka nilai NPSHa dirumuskan sebagai berikut :

$$h_{sv} = \frac{P_a - P_v}{\gamma} + h_s - h_{ls} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

$h_{sv}$  = Net Positive Suction Head Available (NPSHa)

$P_a$  = Tekanan atmosfer  $N/m^2$

$P_v$  = Tekanan uap jenuh fluida (saturation pressure) yang akan dipompa berdasarkan temperaturnya  $N/m^2$

$\gamma$  = Berat jenis fluida pada temperatur pemompaan  $N/m^3$

$h_s$  = Jarak tinggi vertikal dari sumbu pompa ke level air dalam *reservoir* (*head* statis), *m*

$h_{ls}$  = Total kerugian dari tangki dan sisi isap pompa (*suction*), *m*

### 2.2.7.2 NPSH yang diperlukan (*required*)

Tekanan terendah di dalam pompa biasanya terdapat di titik sisi masuk sudu impeler. Di tempat tersebut tekanannya lebih rendah daripada tekanan pada lubang isap pompa. Hal ini disebabkan oleh kerugian *head* di nosel isap, juga akibat kenaikan kecepatan aliran fluida karena tebal sudu impeler.

Maka agar tidak terjadi penguapan fluida cair, tekanan pada lubang masuk harus mengalami penurunan tekanan yang lebih tinggi daripada tekanan uap fluida cair. *Head* tekanan yang besarnya sama dengan penurunan tekanan ini disebut NPSH yang diperlukan (*required*). Besarnya NPSH yang diperlukan dapat berubah menurut kapasitas dan putarannya.

Agar suatu pompa dapat bekerja tanpa mengalami kavitasi, maka harus dipenuhi syarat sebagai berikut:

### **NPSH yang tersedia > NPSH yang diperlukan**

Adapun persamaan lain yang digunakan untuk menghitung  $NPSH_R$  menurut kapasitas dan pompanya, yaitu :

$$NPSH_R = \sigma H_N \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana,

$NPSH_R$  = NPSH yang diperlukan

$\sigma$  = Koefisien kavitasi Thoma

$H_N$  = Head total pompa

Untuk mencari koefisien kavitasi Thoma, digunakan grafik koefisien kavitasi dengan cara interpolasi. Selain menggunakan koefisien thoma, juga sering dipergunakan bilangan kecepatan spesifik isap  $S$  sebagai pengganti perhitungan

dengan  $\sigma$  (Thoma). Harga  $S$  pada pompa yang umum digunakan adalah 1200. Harga ini tidak bergantung pada  $ns$ -nya. Maka persamaan  $NPSH_R$  menjadi :

$$NPSH_R = \left(\frac{n}{S}\right)^4 \times Qn^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana,

$NPSH_R$  = NPSH yang diperlukan

$n$  = Kecepatan spesifik pompa (rpm)

$Qn$  = Kapasitas pompa

$S$  = Bilangan kecepatan spesifik isap (1200)

Harga NPSH yang tersedia (*available*) dapat dihitung dari kondisi instalasi menurut persamaannya, sedangkan harga NPSH yang diperlukan (*required*) harus diperoleh dari pabrik pompa yang bersangkutan diproduksi (Sularso dan Tahara, 1996).

### 2.2.8 Maintenance

Saat ini perawatan yang dilakukan pada kondisi operasi mesin dianggap sebagai salah satu metode yang paling efisien sebagai penilaian kondisi mesin. Sistem ini banyak digunakan di perusahaan dan sekarang peminat untuk menggunakan teknologi ini semakin meningkat. Pada metode ini terjadi pengembangan yang signifikan yaitu mampu untuk menentukan cacat komponen yang dapat dideteksi pada tahap awal terjadinya kerusakan serta melakukan proses diagnostik. Sehingga dalam banyak kasus, permasalahan kerusakan komponen mesin dapat diselesaikan oleh program perangkat lunak diagnostik khusus (Alexei Barkov, 1997).

Secara ilmu pemesinan *maintenance* (perawatan) kondisi mesin dapat dibedakan menjadi 3 macam. Antara lain:

#### a. Breakdown Maintenance

*Breakdown Maintenance* adalah teknik perawatan yang dilakukan setelah terjadinya kerusakan pada mesin/peralatan. Dengan teknik ini, perawatan terjadwal seringkali akan terjadi dan dapat menyebabkan biaya perawatan tinggi. Penyebabnya dikarenakan kerusakan pada mesin tidak dapat diprediksi.

b. *Preventive Maintenance*

Konsep perawatan preventif terdiri dari kegiatan pemeliharaan sebelum kegagalan komponen. Pemeliharaan preventif adalah perawatan berbasis waktu dimana interval waktu periodik digunakan untuk melakukan perawatan terlepas dari kondisi komponen yang dipantau. Inspeksi dan perawatan mesin secara periodik dapat mencakup penggantian oli, pelumasan, penggantian komponen pada interval waktu reguler, dan kalibrasi, tanpa mempertimbangkan status kesehatan mesin

c. *Predictive Maintenance*

Teknik ini dilakukan untuk menghindari tindakan pemeliharaan yang tidak perlu. *Predictive maintenance* hanya akan melakukan pekerjaan pemeliharaan jika ada indikasi kerusakan pada komponen mesin yang dipantau.

### **2.2.9 Condition Based Monitoring**

Condition Based Monitoring (CBM) telah banyak diaplikasikan di berbagai perusahaan industri untuk melakukan pemantauan terhadap mesin produksi sebelum terjadi kegagalan. Teknik ini dipilih berdasarkan pada perolehan, pengolahan dan analisis parameter mesin yang berbeda-beda. Parameter ini meliputi getaran, data akustik, kecepatan dan suhu yang dapat memberikan informasi tentang kondisi mesin dan membantu perencanaan jadwal pemeliharaan.

CBM atau pemantauan kondisi adalah salah satu jenis pemantauan berbasis *maintenance*, berdasarkan pengumpulan, pengolahan dan analisis data dari mesin yang akan dipantau untuk mengetahui kondisi operasi aktual suatu sistem atau komponen mesin pada saat kondisi apapun. Keputusan dalam penggantian atau perbaikan mesin kemudian diambil berdasarkan analisis data. Metode ini juga

memungkinkan karena kemajuan teknologi dari sensor, akuisisi data, teknik pemrosesan sinyal dan perangkat lunak yang sesuai untuk digunakan (Saif dkk, 2004).

Penerapan *condition based monitoring* dapat memberikan keuntungan, berikut beberapa keuntungannya (Higgs dkk, 2004) :

- a. Meningkatkan pendapatan sebesar 30%.
- b. Mengurangi biaya perawatan sebesar 50 sampai 80%.
- c. Penurunan persediaan suku cadang sampai 30%.
- d. Meningkatkan keuntungan 20 – 60%.

Manfaat lain yang dapat dicapai dari penerapan sistem *condition based monitoring* ini, antara lain :

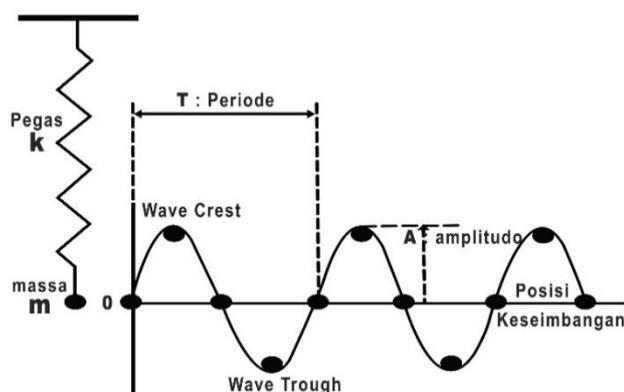
- a. Mengurangi dalam mematikan operasi mesin.
- b. Mengurangi durasi mematikan mesin.
- c. Meningkatkan keandalan dan kesiapan mesin dalam beroperasi.
- d. Meningkatkan waktu operasi mesin,
- e. Meningkatkan performansi mesin dan kualitas *output*.

Adapun parameter yang dapat digunakan untuk memonitor kondisi suatu mesin seperti temperatur, tekanan, suara, kondisi oli dan getaran. Melalui teknik monitoring untuk mendiagnostik kerusakan pada komponen mesin dapat dilakukan dengan memilih parameter getaran sebagai pemantauan kondisi mesin. Dengan parameter getaran dekteksi kerusakan yang terjadi dapat dianalisis tanpa harus melakukan pembongkaran. Sehingga keuntungan dalam penerapan teknik *condition based monitoring* menggunakan parameter getaran dapat menurunkan biaya perawatan dan menaikkan performansi dan kualitas produksi.

Menurut Koo, I.S. dan W.W. Kim (2000), penggunaan parameter getaran untuk memantau kondisi mesin telah lama digunakan selama beberapa dekade terakhir. Banyak peneliti yang sudah menunjukkan hasil positif dari penggunaan parameter getaran untuk memantau kondisi mesin. Salah satu contohnya adalah mesin *rotary* seperti pompa sentrifugal.

### 2.2.10 Getaran

Getaran merupakan gerakan bolak - balik yang terjadi dalam suatu interval waktu tertentu. Getaran selalu berhubungan dengan gerak osilasi (bolak-balik) benda dan gaya yang berhubungan dengan gerakan tersebut. Pada Gambar 2.4 menunjukkan sistem gerak osilasi dari suatu pegas massa. Semua benda yang mempunyai massa dan elastisitas mampu bergetar, sehingga kebanyakan mesin dan struktur rekayasa (*engineering*) mengalami getaran sampai derajat tertentu dan rancangannya biasanya memerlukan pertimbangan sifat osilasi.



Gambar 2.4 Gerak Osilasi Suatu Sistem Pegas Massa  
(Hamid, 2012)

Vibrasi atau getaran mempunyai tiga parameter penting yang dapat dijadikan sebagai acuan, diantaranya :

#### 1. Amplitudo

Amplitudo adalah ukuran atau besarnya sinyal getaran yang dihasilkan. Amplitudo dari sinyal getaran mengidentifikasi besarnya gangguan yang terjadi. Amplitudo juga merupakan besarnya pengukuran skalar pada osilasi suatu gelombang. Amplitudo juga dapat didefinisikan sebagai jarak/simpangan terjauh dari titik kesetimbangan dalam gelombang sinus.

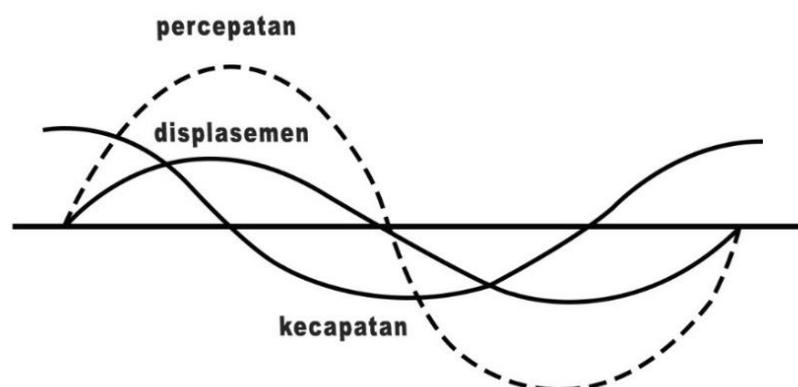
#### 2. Frekuensi

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 mengidentifikasi 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 *displacement* (perpindahan) yang merupakan dasar parameter melakukan pengukuran getaran. Dapat dilihat pada Gambar 2.5 kurva percepatan, kecepatan, dan *displacement*.



Gambar 2.5 Kurva Percepatan, Kecepatan, *Displacement*

#### 2.2.11 Sensor Getaran

Sensor getaran memegang peranan penting dalam kegiatan pemantauan sinyal getaran. Hal tersebut dikarenakan sensor getaran terletak di sisi depan (*front*

*end*) dari suatu proses pemantauan getaran mesin. Secara konseptual, sensor getaran berfungsi untuk mengubah besarnya sinyal getaran fisik menjadi sinyal getaran analog dalam besaran listrik dan pada umumnya berbentuk tegangan listrik. Pemakaian sensor getaran ini memungkinkan sinyal getaran dapat diolah secara elektrik sehingga memudahkan dalam proses manipulasi sinyal.

Indikator yang efektif untuk menentukan apakah suatu peralatan yang berputar dalam kondisi baik adalah getaran, semakin kecil nilai suatu getaran semakin baik peralatan tersebut. Sebaliknya apabila suatu peralatan yang berputar mempunyai getaran yang besar atau tinggi maka kondisi peralatan tersebut dalam keadaan rawan atau bahaya. Oleh karena itu, suatu peralatan yang berputar seharusnya memiliki nilai getaran standar dan batasan getaran yang diperbolehkan (standar pabrikan). Pada Tabel 2.1 menunjukkan sinyal getaran yang dihasilkan dari kerusakan pompa sentrifugal. Sehingga dapat diamati dari tabel tersebut apabila nilai getaran yang terjadi di luar batasan yang diizinkan maka peralatan tersebut harus menjalani tindakan perawatan atau perbaikan.

Tabel 2.1 Sinyal Getaran pada Pompa Sentifugal

Frekuensi (Kecepatan Putar =1x)	Penyebab
0.05x - 0.25x	Unbalance (ketidakseimbangan)
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	Noise kavitasi
Zx (Z = jumlah sudu impeler)	Terlalu dekat jalur impeler dengan tepi difuser dan misalignment

Pada pompa sentrifugal telah banyak kasus munculnya getaran yang terjadi akibat berbagai macam faktor. Menurut sebuah survey di Inggris yang dilakukan oleh Sulzer Pump (Anta, 2013) penggunaan pompa sentrifugal telah banyak digunakan hingga mencapai interval 70% dari penjualan pompa jenis ini. Namun berkaitan dengan hal ini sangat sulit untuk mendapatkan standar getaran (vibrasi) untuk pompa sentrifugal. Suatu pabrikan pembuatan pompa misalnya belum tentu dapat memberikan standar getaran pada pompa yang diproduksi. Sama halnya dengan 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.

Menurut Hamid (2012), parameter yang umum digunakan untuk analisis getaran akibat dari terjadinya kerusakan pada peralatan mesin-mesin dikarenakan munculnya getaran dalam rentang frekuensi dari 10 Hz (600 rpm) sampai 1 KHz (60000 rpm).

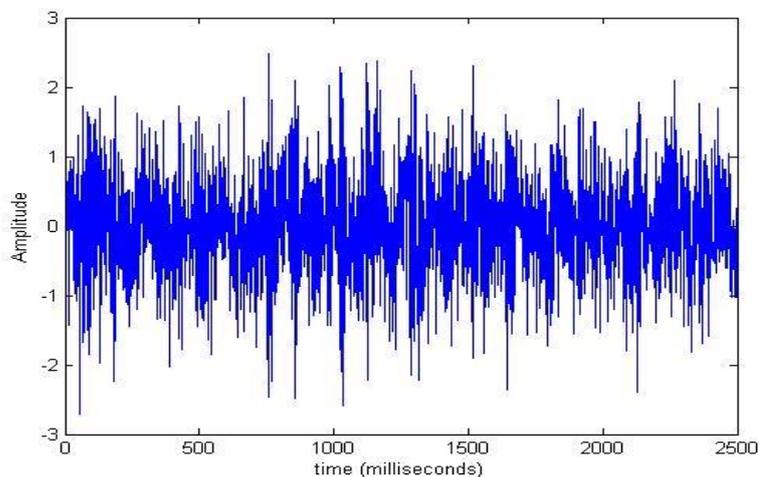
### **2.2.12 Domain Waktu, Spektrum Frekuensi dan Spektrum Envelope**

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan sebagai analisis sinyal getaran. Metode yang paling dasar untuk menganalisis sinyal getaran adalah domain waktu (*time domain*) dan domain frekuensi (*frequency domain*) atau sering disebut juga spektrum getaran. Dari spektrum getaran tersebut kemudian diolah menjadi spektrum envelope agar analisis kerusakan pada suatu mesin dapat diamati dengan lebih mudah.

#### **2.2.12.1 Domain Waktu (*time domain*)**

Spektrum getaran domain waktu dapat dilihat pada Gambar 2.6, secara umum sinyal getaran yang diperoleh dari domain waktu sebagai seri data yang menunjukkan percepatan, kecepatan, dan perpindahan. Biasanya sinyal getaran

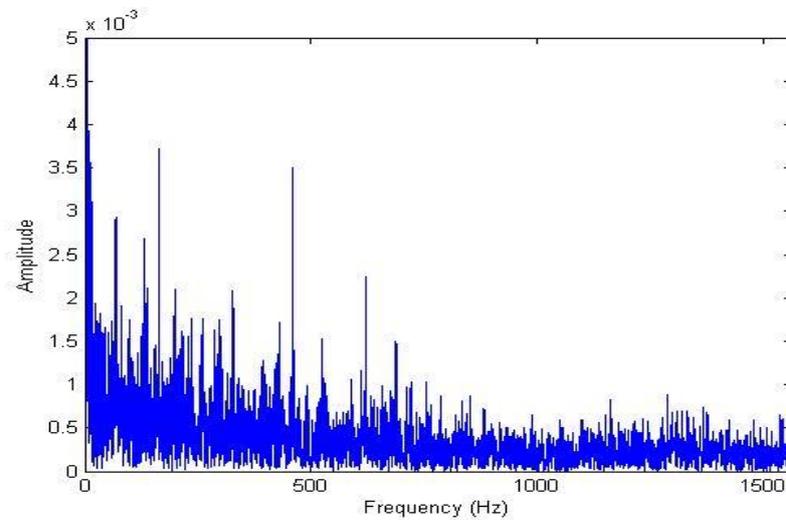
diperoleh menggunakan transduser tertentu seperti *accelerometer*. Fitur getaran domain waktu dapat diekstraksi menggunakan statistik deskriptif seperti standar deviasi, *root mean square (RMS)*, *kurtosis*, *skewness*, *varians*, dan lain sebagainya.



Gambar 2.6 Domain Waktu

#### 2.2.12.2 Spektrum Frekuensi (*frequency domain*)

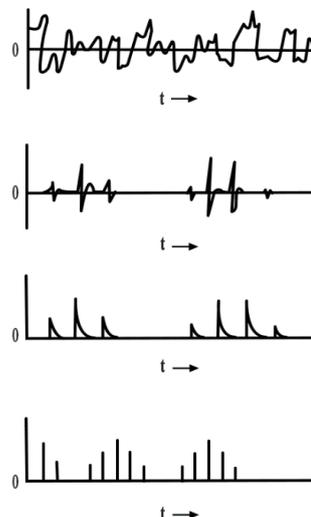
Domain frekuensi merupakan teknik mengubah sinyal gelombang domain waktu ke dalam domain frekuensi. Metode yang paling umum digunakan untuk konversi dari domain waktu ke domain frekuensi adalah dengan menggunakan *fast fourier transform (FFT)*. Pada Gambar 2.7 spektrum getaran berdasarkan domain frekuensi menunjukkan frekuensi dasar (*fundamental frequency*) dan frekuensi lain berupa kelipatan dari frekuensi dasar yang disebut sebagai frekuensi harmonik. Kemunculan frekuensi harmonik tersebut menunjukkan sinyal frekuensi berasal dari berbagai komponen pada pompa.



Gambar 2.7 Spektrum Frekuensi

### 2.2.12.3 Spektrum Envelope

Analisis spektrum envelope merupakan teknik yang terkenal untuk mengekstrak dampak periodik dari sinyal getaran mesin. Metode ini dapat mengekstrak dampak dengan energi yang rendah dan yang tersembunyi dari sinyal getaran lainnya. Oleh karena itu, metode ini adalah metode yang banyak digunakan dan paling populer dibandingkan dengan metode lainnya. Gambar 2.8 adalah sinyal envelope dan Gambar 2.9 menunjukkan proses analisis envelope.



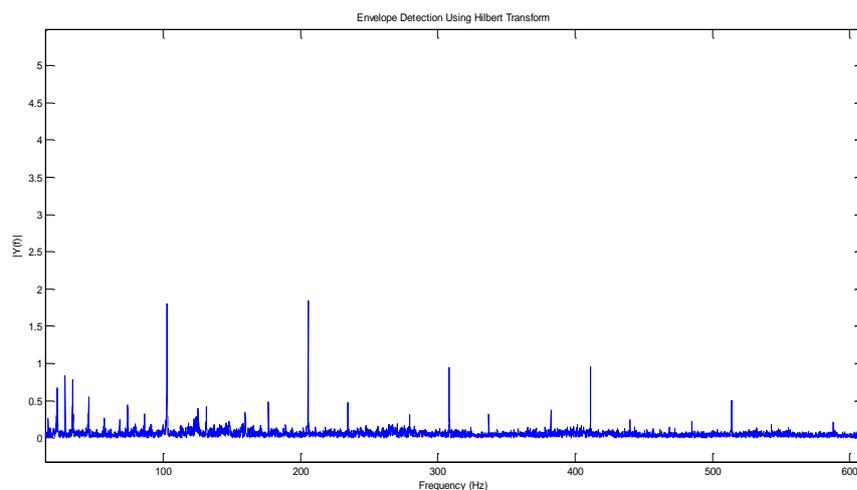
Gambar 2.8 Sinyal Envelope  
(Tendon, 1999)

Analisis envelope juga merupakan metode yang khusus digunakan pada analisis kavitasi yang terjadi pada operasional pompa sentrifugal. Dimana metode ini difokuskan pada wilayah spektrum yang memiliki frekuensi tinggi, dengan filter yang digunakan yaitu *band-pass filter*.



Gambar 2.9 Proses Analisis Envelope

*Band-pass filter* hanya menyaring frekuensi–frekuensi tinggi dan menghilangkan frekuensi rendah, juga menghilangkan amplitudo rendah terlebih dahulu. Hal ini bertujuan agar dalam pembacaan sinyal data frekuensi dapat terlihat lebih jelas. Karena pada umumnya data frekuensi yang tidak dilakukan proses penyaringan atau filtrasi, menunjukkan hasil spektrum yang menumpuk dan rumit untuk diamati. Dimana hal ini akan mempersulit proses analisis data (Girdhar, 2004). Gambar 2.10 menunjukkan spektrum envelope.



Gambar 2.10 Spektrum Envelope

### 2.2.13 Fast Fourier Transform (FFT)

Analisis *Fourier* adalah istilah lain yang digunakan untuk mengtransformasi gelombang yang semula sebagai fungsi terhadap waktu yang diubah menjadi indikator nilai 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 yang dilakukan dengan *fast fourier transform*.

FFT dianggap sebagai teknik analisis sinyal getaran yang paling populer dan umumnya diterapkan untuk mengamati frekuensi komponen yang diinginkan. Prinsip proses 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 dalam proses FFT dari teknik domain frekuensi 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 *inverse*-nya. Berikut adalah formula DFT yang mengubah sinyal diskrit  $g(i)$  menjadi spektrum getaran atau domain frekuensi.

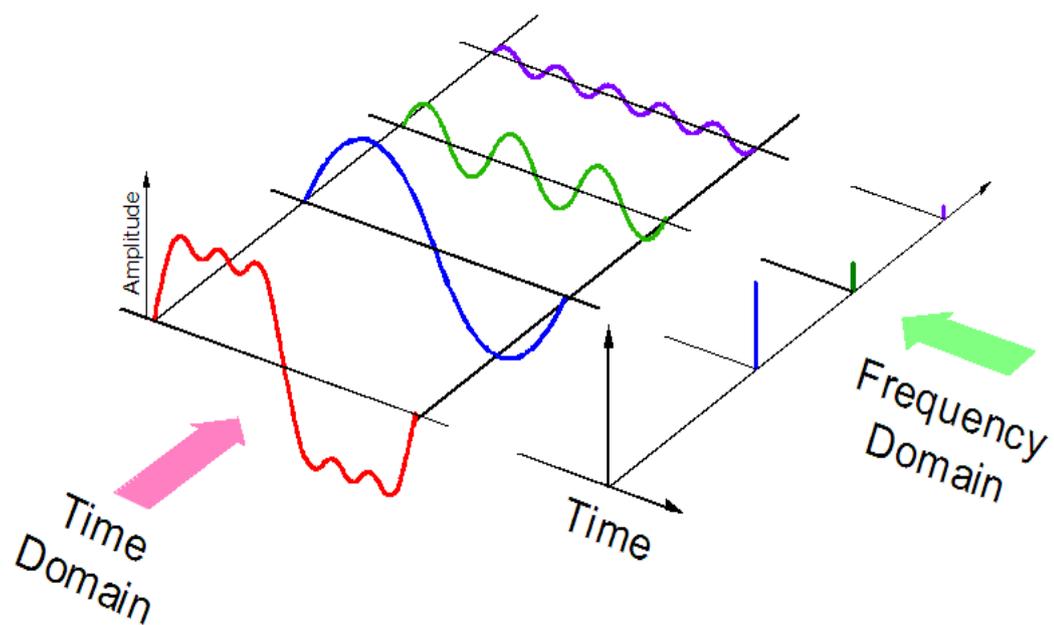
$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{\frac{-2\pi ink}{N}} \quad k = 0, \dots, N - 1 \dots\dots\dots (2.5)$$

Atau dalam formula matriks

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

$$x_k = [X_0, \dots, X_{N-1}] \dots\dots\dots (2.6)$$

Data hasil dari penguraian spektrum getaran atau domain frekuensi umumnya dapat menunjukkan kerusakan mesin lebih baik daripada penggunaan domain waktu secara langsung. Hal ini dikarenakan karakteristik komponen frekuensi seperti komponen frekuensi resonansi yang mudah diamati dan dipantau apabila ada kerusakan. Pada prinsipnya pengolahan data dilakukan dengan mengkonversi dari data waktu dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Pengolahan data menggunakan FFT ini dapat mempercepat dalam pengkonversian data domain waktu menjadi domain frekuensi dan mampu menyajikan banyak komponen frekuensi yang terdapat dalam sinyal. Pada Gambar 2.11 skema perubahan domain waktu ke domain frekuensi atau spektrum getaran dalam FFT. Dasar teknik FFT untuk diagnosis kerusakan mencakup data getaran hanya dari spektrum getaran. 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 dalam pengolahan data frekuensi ini dilakukan untuk memeriksa dan mendeteksi kondisi pada suatu komponen mesin apakah dalam keadaan normal atau terjadi kerusakan juga untuk mengetahui batas kinerja suatu komponen sesuai standarnya.



Gambar 2.11 Skema Spektrum Getaran  
Dalam FFT

#### 2.2.14 *Fourier Transform (Transformasi Fourier)*

Sinyal getaran yang terbatas dalam pengukuran getaran mesin  $f(t)$  dapat didekomposisi oleh transformasi fourier  $F(w)$ , dengan persamaan sebagai berikut.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(w)e^{iwt} dw \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-iwt} dt \dots\dots\dots (2.8)$$

$f(t)$  dan  $F(w)$  merupakan persamaan transformasi fourier,  $f(t)$  sinyal dapat didekomposisi menjadi satu kelompok dengan harmonik  $e^{iwt}$ . Koefisien pembeban merepresetasikan amplitudo harmonik pada  $F(w)$ .  $f(t)$  adalah domain waktu yang mewakili komposisi frekuensi dari proses yang acak, yang diasumsikan bahwa statistiknya tidak berubah seiring berjalannya waktu.

#### 2.2.15 *Akuisisi Sinyal Getaran*

Dalam proses pemeliharaan prediktif yang digunakan sebagai indikator untuk mendiagnosa kondisi suatu mesin banyak digunakan berbagai macam teknik, diantaranya seperti analisis getaran, emisi akustik, analisis partikel, analisis minyak, dan pemantauan korosi. Namun teknik yang populer untuk menganalisis mesin atau peralatan berputar adalah analisis getaran. Analisis ini mempunyai keuntungan utama yang mampu 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.

### 2.2.15.1 Transduser

Penggunaan sensor atau transduser dalam proses penelitian terdapat beberapa 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* (Kecepatan)

Transduser *velocity* adalah sensor yang berguna untuk mengukur kecepatan getaran. Dapat dilihat pada Gambar 2.12 Transduser *velocity* menggunakan koil magnet yang mengubah energi mekanik menjadi sinyal analog yang sebanding dengan kecepatan getaran.



Gambar 2.12 Transduser *Velocity*

#### b. Transduser *Displacement* (Perpindahan)

Gambar 2.13 menunjukkan transduser *displacement* yang populer digunakan saat ini.



### Gambar 2.13 Transduser *Displacement* (Perpindahan)

Transduser *displacemet non-contact eddy current probe*. Transduser *displacement* (perpindahan) adalah sensor yang mengukur berdasarkan penyimpangan getaran. Transduser ini mengubah energi mekanik menjadi sinyal analog listrik yang sebanding dengan perpindahannya.

#### c. *Accelerometer*

*Accelerometer* pada Gambar 2.14 adalah sebuah transduser yang berguna untuk mengukur percepatan, mendeteksi dan mengukur getaran, maupun untuk mengukur percepatan akibat gravitasi bumi. *Accelerometer* banyak digunakan sebagai alat untuk mengukur getaran pada kendaraan, bangunan, mesin, dan juga bisa digunakan untuk mengukur getaran yang terjadi di dalam bumi, getaran mesin, jarak dinamis, dan kecepatan dengan atau tanpa pengaruh gravitasi bumi (Sukatentel, 2014). *Accelerometer* pada umumnya menggunakan material kristal piezoelektrik didalamnya yang dipolarisasikan muatan listrik pada permukaan terminalnya. Kemudian tegangan yang dihasilkan dikonversi menjadi percepatan.



Gambar 2.14 Accelerometer

### 2.2.16 Software Matlab

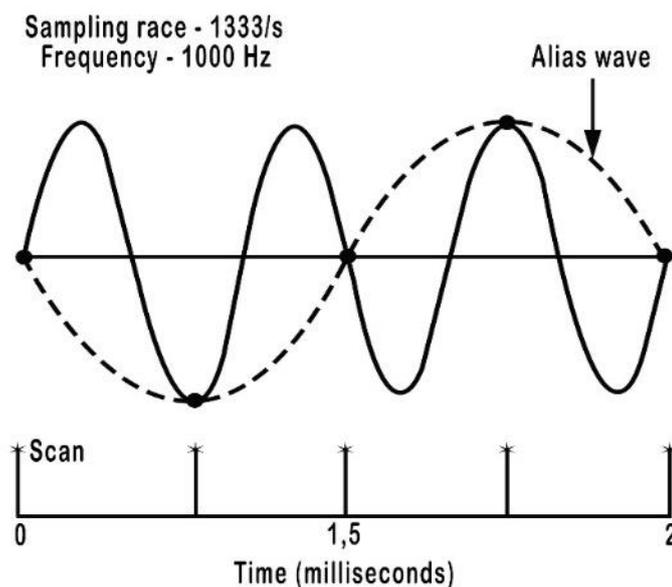
Data getaran yang telah direkam oleh transduser selanjutnya dianalisis menggunakan komputasi dengan *Software Matlab* dengan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT). *Matlab* adalah bahasa pemrograman level tinggi yang dikhususkan untuk komputasi teknis. Bahasa ini mengintegrasikan kemampuan

komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam suatu 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).

#### 2.2.16.1 *Sampilng Rate*

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 17066Hz (sampel) *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. Gambar 2.15 menunjukkan proses *sampling rate* yang terjadi efek *aliasing*.



Gambar 2.15 Sampling Rate dengan Aliasing (Scheffer & Girdhar, 2004)

Proses *sampling* menerapkan teorema *nyquist sampling* agar tidak terjadi *aliasing*. Teorema tersebut menyatakan bahwa untuk tidak kehilangan informasi yang terkandung dalam sampel sinyal getaran, maka proses *sampling* harus dilakukan setidaknya 2 kali frekuensi informasi (Scheffer & Girdhar, 2004). *Aliasing* adalah pembentukan gelombang frekuensi rendah. Oleh karena itu proses analisis harus dilengkapi dengan *anti-aliasing filter* yang merupakan elektronik *low-pass filter* yang memungkinkan untuk frekuensi rendah bisa terdeteksi dengan