

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang menerapkan analisa sinyal *vibrasi* dalam mendiagnosa kerusakan pompa sentrifugal khususnya kavitasi telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Berikut beberapa tinjauan hasil penelitian yang telah dilakukan.

Al – Hasymi (2009) menguji penggunaan parameter statistik domain waktu dalam mendeteksi kerusakan pada pompa sentrifugal. Parameter statistik yang digunakan diantaranya *Probability Density Function (PDF)*, *Root Mean Square (RMS)*, dan standar deviasi. Ketiga parameter statistik ini direkomendasikan karena dapat dengan jelas memberikan informasi kerusakan pompa sentrifugal terutama kavitasi.

Sakhtivel dkk. (2010) mencoba menggunakan metode baru berbasis *machine learning* yaitu *decision tree*. Penerapan algoritma *decision tree* dalam mendeteksi kerusakan pompa sentrifugal dengan input data menggunakan parameter domain waktu (*standard error* dan *minimum value*). Hasil menunjukkan tingkat akurasi dari ekstraksi dan klasifikasi data menggunakan algoritma *decision tree* sebesar 99,66 %.

Saberi dkk. (2011) melakukan pengujian terhadap performa klasifikasi *SVM* dan *ANN*. Kedua metode ini kemudian digunakan untuk mendeteksi kerusakan pompa dalam dua kondisi, yaitu normal dan *noise* tinggi. Lingkup penelitian ini adalah menemukan pendekatan yang efektif dan kuat untuk mengendalikan kondisi pompa sentrifugal untuk mendeteksi kesalahan. Metode *SVM* ternyata memiliki keunggulan dengan *kernel function* nya yang dapat membedakan kondisi normal dan *noise* tinggi pada pompa sentrifugal.

Sakhtivel dkk. (2012) membandingkan performa dari keempat *machine learning* yaitu *SVM*, *PSVM*, *GEP*, dan *wavelet GEP*. Pada penerapannya keempat metode diuji dengan mengidentifikasikan kasus kerusakan yang sama pada satu pompa sentrifugal. Persentase tingkat keberhasilan klasifikasi *SVM* dan *GEP*

sebesar 99,93%, sementara *PSVM* dan *wavelet GEP* hanya 96,66%. Dalam hal ini menunjukkan bahwa *SVM* lebih unggul dalam hal mendiagnosa kerusakan menggunakan parameter statistik domain waktu (*standar error* dan *minimum value*) dibanding dengan ketiga metode lainnya.

Rapur & Tiwari (2016) melakukan pengujian terhadap parameter statistik domain waktu yang efektif digunakan dalam mengklasifikasikan data sinyal *vibrasi* pompa sentrifugal menggunakan *SVM*. Beberapa parameter domain waktu seperti *maximum value*, *mean*, *media*, *peak to peak*, *RMS*, *skewness*, *kurtosis*, *variance*, *entropy* dan standar deviasi masing – masing diuji penggunaannya dengan mengklasifikasikan *multi distinct* dan *multi coexisting fault* pada pompa sentrifugal. Hasilnya *mean*, *entropy*, dan standar deviasi memberikan hasil klasifikasi terbaik pada *SVM*, terutama pada *entropy* yang lebih sensitif dalam membedakan kondisi pompa yang baik dan rusak.

Sakhtivel dkk. (2016) menyatakan bahwa penentuan tingkat keakuratan dalam klasifikasi menggunakan *SVM* bergantung pada *kernel function* nya. Pada penelitiannya membandingkan dua parameter *classifier SVM* (*C-SVC* dan *γ-SVC*) dengan empat *kernel function* yang berbeda. Keempat *kernel function* yang digunakan diantaranya *RBF*, *Linear*, *Polynomial*, dan *Sigmoid Function*. Hasil klasifikasi menunjukkan semua jenis *kernel function* memberikan hasil yang baik, namun pada *RBF* mempunyai tingkat akurasi yang lebih tinggi dari yang lain yaitu sebesar 99,93 %.

Tabar dkk. (2017) mengklasifikasikan level kavitasi dengan *SVM* menggunakan parameter domain waktu yang berbeda dari sebelumnya. Pada pompa sentrifugal yang diuji dipasangkan 3 buah sensor. Kemudian data sinyal *vibrasi* dari ketiganya dikonversikan ke dalam beberapa parameter dalam domain waktu. Hasil deteksi menggunakan data *vibrasi* dari ketiga sensor berbeda, salah satunya pada sensor 3 memperlihatkan bahwa kavitasi pada level 1 sudah dapat dilihat. Parameter domain waktu yang disarankan yaitu *RMS* dan standar deviasi karena untuk kerusakan pompa jenis kavitasi kedua parameter tersebut lah yang mempunyai sensitifitas tinggi.

Bordoloi dan Tiwari (2017) membandingkan performa *SVM* dengan masing-masing menggunakan optimalisasi *Grid Search Method (GSM)*, *Genetic Algorithms (GA)*, dan *Artificial Bee Colony Algorithms (ABCA)*. Perekaman data sinyal *vibrasi* dilakukan pada dua tempat yaitu pada *casing* dan *bearing housing* dan dengan memvariasikan kecepatan putar dan hambatan tutupan katupnya. Hasil pendeteksian kavitasi yang paling akurat adalah dengan menggunakan algoritma optimalisasi *ABCA* dan menggunakan data sinyal *vibrasi* pada *casing*.

Untuk menentukan penggunaan parameter statistik domain waktu yang efektif akan dipaparkan berdasarkan beberapa tinjauan penelitian sebelumnya, khususnya pada pompa sentrifugal. Pada tabel 2.1 ditunjukkan beberapa penelitian yang menggunakan parameter statistik domain waktu pada pompa sentrifugal.

Tabel 2.1 Penggunaan parameter statistik domain waktu

Tahun	Author (s)	Objek	Metode	Parameter Statistik
2009	Al-Hasymi	Pompa Sentrifugal	Analisis Statistik	<i>PDF, RMS, SD</i>
2011	Ahmed, dkk.	Pompa Sentrifugal	PNN GA	<i>RMS, Variance, Kurtosis</i>
2012	Sakhtivel, dkk.	Pompa Sentrifugal	SVM PSVM GEP Wavelet-GEP	<i>Standar Error, Minimum Value</i>
2015	Luo, dkk.	Pompa Sentrifugal	Analisis Statistik	<i>RMS, Crest Factor, Peak, PDF</i>
2016	Al-Tobi & Al-Sabari	Pompa Sentrifugal	Analisis Statistik	<i>RMS & Peak</i>
2016	Rapur & Tiwari	Pompa Sentrifugal	SVM	<i>Mean, SD, Entrophy</i>
2017	Azizi, dkk.	Pompa Sentrifugal	GRNN	<i>RMS,SD, Variance</i>
2017	Kamiel & Ramadhan	Pompa Sentrifugal	Analisis Statistik	<i>PDF, Variance, SD, RMS</i>
2017	Tabar, dkk.	Pompa Sentrifugal	SVM	<i>RMS & SD</i>

Penggunaan *kernel function* dan algoritma optimalisasi pada *SVM* juga telah banyak diterapkan oleh beberapa peneliti. Berikut Tabel 2.2 memaparkan pemakaian *kernel function* dan algoritma optimalisasi pada *SVM*.

Tabel 2.2 Penggunaan *kernel function* dan optimalisasi pada SVM

Tahun	Author (s)	Objek	Kernel Function	Algoritma Optimalisasi
2007	Widodo & Yang	Motor Induksi	<i>Linear Function</i> <i>Polynomial Function</i> <i>Gaussian RBF</i>	γ SVC d SVC C SVC
2011	Elangovan, dkk.	Pompa Sentrifugal	<i>Linear Function</i> <i>Polynomial Function</i> <i>Sigmoid Function</i> <i>Gaussian RBF</i>	ν SVC C SVC
2016	Syarif, dkk.	Medikal	<i>Linear Function</i> <i>Polynomial Function</i> <i>Sigmoid Function</i> <i>Gaussian RBF</i>	$(C \ \& \ \gamma)$ SVC - GA $(C \ \& \ \gamma)$ SVC - GSM
2016	Alshamlan, dkk.	Medikal	<i>Linear Function</i> <i>Polynomial Function</i> <i>Sigmoid Function</i> <i>Gaussian RBF</i>	GA PSO ABCA
2016	Sakhtivel, dkk.	Pompa Sentrifugal	<i>Linear Function</i> <i>Polynomial Function</i> <i>Sigmoid Function</i> <i>Gaussian RBF</i>	γ SVC C SVC
2017	Kumar, dkk.	Pompa Sentrifugal	<i>Gaussian RBF</i>	C SVC - GA γ SVC - GA
2017	Bordoloi & Tiwari	Pompa Sentrifugal	<i>Gaussian RBF</i>	$(C \ \& \ \nu)$ SVC - GA $(C \ \& \ \nu)$ SVC - ABCA $(C \ \& \ \nu)$ SVC - GSM

Berdasarkan beberapa tinjauan penelitian terdahulu, metode deteksi kerusakan pompa sentrifugal berbasis SVM dapat mengungguli beberapa metode lainnya dalam hal akurasi klasifikasi. Tingkat akurasi klasifikasi SVM ditentukan berdasarkan pemilihan parameter statistik, *kernel function*, dan algoritma optimalisasi yang tepat.

2.2 Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal adalah alat yang digunakan untuk memindahkan fluida cair dari tempat yang bertekanan rendah ke tempat yang bertekanan tinggi. Pompa sentrifugal memiliki prinsip kerja memindahkan fluida cair menggunakan putaran *impeller* (baling-baling) yang bergerak karena diberi masukan daya, putaran tersebut menyebabkan tingginya tekanan pada saluran *suction* (masuk) sehingga fluida cair akan masuk melalui saluran *suction* ke dalam *impeller*. Sudu-sudu pada *impeller* kemudian memberikan dorongan yang menimbulkan gaya sentrifugal

terhadap fluida cair dan mengakibatkan fluida cair terlempar dari mata *impeller* melalui ruang antara sudu-sudu menuju saluran *discharge* (keluar) dengan kecepatan tinggi. Penampang pompa sentrifugal seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Pompa sentrifugal
(Syafutra, 2017)

2.2.1 Klasifikasi Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal dapat diklasifikasikan dalam beberapa kriteria, antara lain :

a. Kapasitas aliran:

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. *Discharge Pressure* :

1. Rendah: $< 5 \text{ kg} / \text{cm}^2$
2. Menengah: $5 - 50 \text{ kg} / \text{cm}^2$
3. Tinggi: $> 50 \text{ kg} / \text{cm}^2$

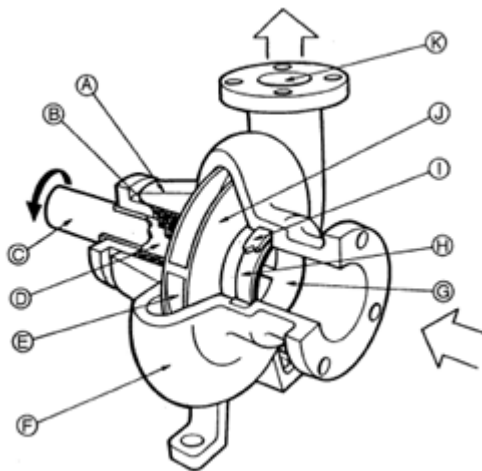
c. Jumlah / Susunan *Impeller* :

1. *Single stage* : Terdiri dari satu *impeller* dalam satu *casing*
2. *Multi stage* : Terdiri dari beberapa *impeller* dalam satu *casing* disusun seri.

- d. Posisi *Shaft* :
 1. *Shaft* tegak
 2. *Shaft* mendatar
- e. Jumlah *Suction* :
 1. *Single suction*
 2. *Double suction*
- f. Arah aliran keluar :
 1. *Radial flow*
 2. *Axial flow*
 3. *Mixed flow*

2.2.2 Komponen Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal tersusun atas beberapa komponen yang masing-masing memiliki peranan penting dalam pengoperasiannya. Komponen-komponen tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Komponen pompa sentrifugal
(Halley, 2009)

- a. *Stuffing Box*
Berfungsi sebagai bagian yang mencegah terjadinya kebocoran antara *shaft* dengan *casing* pompa.

- b. *Packing*
Digunakan untuk mencegah kebocoran fluida dari *casing* melalui *shaft*.
- c. *Shaft*
Berfungsi meneruskan puntiran dari penggerak pompa selama beroperasi.
- d. *Shaft sleeve*
Berfungsi untuk melindungi *shaft* dari erosi, korosi dan keausan pada *stuffing box*.
- e. *Vane*
Tempat berlalunya cairan pada *impeller* (sudu pada *impeller*).
- f. *Casing*
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 *impeller* dan mengkonversikan energi kecepatan cairan menjadi energi dinamis.
- g. *Eye of Impeller*
Bagian sisi masuk pada arah isap *impeller*.
- h. *Impeller*
Impeller berfungsi untuk mengubah energi mekanis dari pompa menjadi energi kecepatan pada fluida yang dipompakan secara kontinyu, sehingga fluida pada sisi *suction* secara terus menerus akan masuk mengisi kekosongan akibat perpindahan dari fluida yang masuk sebelumnya.
- i. *Casing Wearing Ring*
Bagian yang mencegah atau memperkecil kebocoran fluida yang keluar dari *impeller* dengan memberikan sekat yang memperkecil celah antara *impeller* dengan *casing*.
- j. *Bearing*
Berfungsi sebagai tumpuan yang menahan beban radial dan aksial dari

shaft agar dapat berputar dengan lancar.

k. *Discharge Nozzle*

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

2.3 Kavitasi

Kavitasi adalah gejala menguapnya zat cair yang sedang mengalir, karena tekanannya berkurang sampai dibawah tekanan uap jenuhnya. Pada pompa sentrifugal fenomena kavitasi terjadi akibat menurunnya tekanan fluida cair pada sisi *suction* sehingga menguap dan menciptakan *bubble* (gelembung air), kemudian dikarenakan adanya tekanan yang lebih besar *bubble* ini pecah. Fenomena ini dapat terjadi pada fluida cair yang terdapat pada *impeller* pompa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pompa sentrifugal dalam kondisi kavitasi akan menimbulkan *vibrasi* dan *noise* pada saat dioperasikan karena *bubble* yang pecah secara kontinyu akibat tingginya tekanan disekitarnya (Syah dkk., 2000).



Gambar 2.3 Kavitasi pada *impeller* pompa

2.3.1 Jenis – Jenis Kavitasi

Fenomena kavitasi yang terjadi dapat digolongkan berdasarkan level/ tahap pembentukan, diantaranya :

a. *Incipient* Kavitasi

Kavitasi pada level awal/ dini dimana baru dapat terdeteksi. Gejala awal yang ditimbulkan adalah adanya turbulensi kecil pada *impeller*, sehingga

terjadinya terjadinya perubahan tekanan lokal berada dibawah tekanan uap fluidanya.

b. *Travelling* Kavitasi

Kavitasi pada level menengah dimana indikasi pembentukan *bubble* terjadi dan mulai bergerak bersamaan yang kemudian pecah. Umumnya terjadi pada batas titik terendah pada aliran turbulensi.

c. *Vortex* Kavitasi

Kavitasi level lanjut yang terjadi pada daerah dengan tingkat geseran tinggi atau pada titik pusat terjadinya turbulensi.

2.3.2 Penyebab Kavitasi

Pengoperasian pompa dengan baik dan benar harus dilakukan agar menghasilkan performa operasi yang baik. Meskipun demikian, fenomena kavitasi tetap menjadi salah satu hal yang mengganggu pengoperasian pompa. Berikut hal yang menyebabkan terjadinya kavitasi pada pompa sentrifugal (Bachus & Custodio, 2003):

1. *Vaporation*

Vaporation (penguapan) terhadap fluida cair terjadi akibat adanya perbedaan tekanan serta temperatur. Untuk mencegahnya terjadi, setiap pompa sentrifugal memiliki *head* pada sisi *suction* nya.

2. *Internal Re-Circulation*

Internal Re-Circulation (siklus aliran balik) mengakibatkan kecepatan aliran bertambah hingga terjadinya penguapan dan membentuk *bubble*, ketika melalui daerah yang bertekanan lebih tinggi kemudian *bubble* ini pecah. Pecahan *bubble* secara kontinyu ini dapat membentuk lubang – lubang kecil pada dinding sekitarnya, kemudian aliran fluida pada akhirnya terus masuk dan memberikan tumbukan terhadap rongga lubang tersebut.

3. *Vane Passing Syndrome*

Vane passing syndrome mengakibatkan turunnya kecepatan aliran fluida yang dipompa, sehingga terjadinya proses penguapan dan membentuk *bubble*. Hal ini disebabkan karena jarak dari diameter luar *impeller* terhadap *cutwater*

pompa kurang dari batas amannya (4% dari diameter *impeller*). *Bubble* yang telah terbentuk kemudian pecah dan dapat merusak *volute*.

4. *Air Aspiration*

Air aspiration (udara luar yang masuk ke dalam) mengakibatkan adanya *bubble* yang masuk melewati *eye of impeller* dan pecah sampai pada sisi *discharge*. Pada permasalahan ini kapasitas pompa akan berkurang dari kapasitas awalnya. Dalam kondisi tertentu dengan tingkat keparahan yang tinggi, kasus ini juga dapat merusak *impeller* dan *casing* pompa.

5. *Turbulence*

Perubahan tekanan pada fluida terjadi akibat adanya indikasi naik atau turunnya kecepatan fluida tersebut. Perubahan kecepatan ini biasanya terjadi dikarenakan hambatan pada sistem perpipaan, sehingga terbentuklah *turbulence* (pergolakan arah aliran). *Turbulence* dapat dihindari salah satunya dengan menerapkan perancangan sistem perpipaan yang baik.

2.4 *Net Positive Suction Head (NPSH)*

Untuk mengendalikan kavitasi dibutuhkan dua macam tekanan yang memegang peran penting, yaitu tekanan yang ditentukan oleh kondisi lingkungan dimana pompa dipasang dan tekanan yang ditentukan oleh keadaan aliran didalam pompa (Bachus & Custodio, 2003). Berdasarkan hal tersebut maka *NPSH* dipakai sebagai ukuran keamanan pompa terhadap kavitasi. Ada dua macam *NPSH*, yaitu *NPSH* yang tersedia pada sistem (*available*), dan *NPSH* yang diperlukan oleh pompa (*required*). Fenomena kavitasi akan dapat dihindari apabila *NPSH available* lebih besar daripada *NPSH required* pada pompa.

2.4.1 *NPSH available (NPSHa)*

NPSHa dapat didefinisikan sebagai *NPSH* yang tersedia pada sistem pompa, yang berarti selisih antara tekanan *head* fluida pada *suction* seperti yang dijabarkan pada persamaan (2.1).

$$NPSHa = \left(\frac{P_a - P_v}{\gamma g} \right) \pm h_s - h_{LS} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana,

- P_a = tekanan atmosfer
- P_v = tekanan uap jenuh
- h_s = *head* isap statis
- h_{LS} = *head loss*
- γ = berat jenis fluida
- g = percepatan gravitasi

2.4.2 *NPSH required (NPSHr)*

NPSHr merupakan *NPSH* pompa yang nilai sesuai dengan standar produksinya. Nilai *NPSHr* pada suatu pompa harus lebih kecil dari nilai *NPSHa* nya agar dapat menghindari pembentukan kavitasi. Penentuan *NPSHr* dapat dihitung menggunakan persamaan (2.2).

$$NPSHr = \sigma H_N \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana,

- σ = angka *thoma*
- H_N = *head* total

2.5 *Maintenance*

Maintenance (perawatan) merupakan pekerjaan yang dilakukan agar kondisi suatu mesin dapat sesuai seperti yang telah ditentukan. Kebutuhan akan perawatan sangat penting bagi setiap mesin, karena jika terjadi kerusakan maka akan mengakibatkan kerugian. Kategori pendekatan *maintenance* berdasarkan pengertiannya sebagai berikut (Alsalaet, 2012) :

1. *Breakdown* atau *run to failure maintenance*.
2. *Preventive* atau *time based maintenance*.
3. *Predictive* atau *condition based maintenance*.
4. *Proactive* atau *prevention maintenance*.

2.6 *Condition Based Maintenance (CBM)*

CBM atau *predictive maintenance* didasarkan pada pengawasan kondisi terhadap gangguan yang dialami oleh suatu mesin ketika pengoperasiannya. Pemantauan kondisi pada pendekatan ini dilakukan secara berkala. Apabila ditemukan indikasi kerusakan, maka bagian – bagian dari mesin tersebut diidentifikasi dan dijadwalkan untuk kegiatan perawatan selanjutnya. Kerusakan pada suatu komponen mesin tentunya terjadi umumnya dimulai dengan adanya gejala kerusakan ringan, sehingga pendekatan ini merupakan langkah awal dalam proses perawatan untuk menghindari terjadinya tingkat kerusakan yang semakin tinggi.

Secara umum terdapat beberapa teknik pemantauan kondisi yang menerapkan sistem *CBM*, diantaranya (Scheffer dan Ghirdar, 2004) :

1. *Acoustic Emission*

Analisa yang dilakukan dengan menemukan kerusakan berupa *crack* pada komponen mesin dan saluran sistem perpipaan. Pendekatan ini dapat mendeteksi, menemukan titik kerusakan, serta memantau kondisi secara kontinyu.

2. *Oil Analysis*

Analisa kerusakan yang dilakukan terhadap komponen mesin seperti *bearing* dan *gear*. Analisa ini dilakukan berdasarkan partikel – partikel mikroskopik yang terdapat pada minyak pelumas.

3. *Particle Analysis*

Pada umumnya komponen mesin yang bergerak akan menghasilkan partikel atau serpihan. Analisa ini dilakukan dengan mengumpulkan informasi terhadap partikel tersebut dan membandingkannya dengan performa mesin.

4. *Corrosion Monitoring*

Pemantauan yang dilakukan dengan menggunakan gelombang ultrasonik. Umumnya pendekatan ini digunakan untuk mengecek tingkat korosi yang dialami pada komponen mesin, terutama pada sistem perpipaan.

5. *Thermography*

Pemantauan terhadap temperatur suatu komponen dengan menggunakan *infra red*. Pendekatan ini biasa dilakukan untuk kerusakan pada alat – alat elektrikal pendukung kegiatan mekanik.

6. *Performance Monitoring*

Salah satu pendekatan yang paling efektif dalam melakukan pemantauan terhadap kondisi mesin. Analisa ini berbasis terhadap hubungan antara kondisi mekanik dengan performa yang dihasilkan.

7. *Vibration Analysis*

Vibration analysis (analisa sinyal *vibrasi*) merupakan teknik pemantauan kondisi berdasarkan nilai *vibrasi* yang dihasilkan. Tinggi atau rendahnya nilai *vibrasi* yang dihasilkan oleh suatu mesin akan berpengaruh terhadap kondisi mekanisnya.

Keuntungan yang didapatkan dengan penerapan jenis perawatan ini salah satunya dapat menjadwalkan seluruh kegiatan perawatan secara teratur. Semakin teratur kegiatan perawatan suatu mesin, maka akan dapat memperpanjang usia pemakaiannya. Hal ini tentunya akan sangat menguntungkan, serta dapat menghemat pemakaian biaya. Pada dunia industri, penerapannya dapat mengakibatkan peningkatan dalam kapasitas produksi. Dengan menerapkan pendekatan *CBM*, setiap industri tentunya dapat menggunakan hasil diagnosa untuk menyediakan komponen sebelum terjadinya kerusakan serta menghemat biaya perawatan mesin.

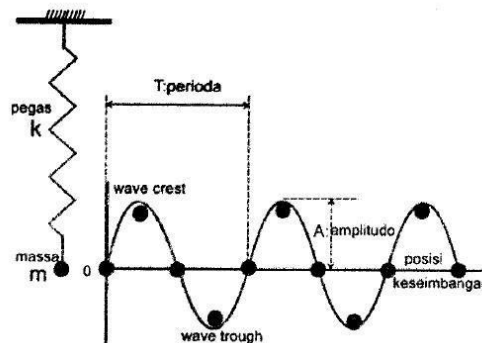
2.7 *Vibrasi*

Vibrasi (getaran) diartikan sebagai gerak bolak balik yang dihasilkan dalam rentang periode tertentu. Setiap benda dapat menghasilkan *vibrasi* sehingga dalam merancang suatu mesin harus selalu memiliki pertimbangan berdasarkan sifat osilasinya. Gambar 2.4 menunjukkan gerak osilasi suatu sistem pegas massa.

Terdapat dua parameter penting yang menjadi tolak ukur nilai *vibrasi*, diantaranya (Hamid, 2012) :

1. Amplitudo

Tinggi rendahnya nilai *vibrasi* pada suatu mesin ditentukan oleh nilai amplitudo nya. Indikasi kerusakan pada suatu mesin ditandai dengan adanya *vibrasi* yang tinggi, dalam hal ini nilai amplitudo lah yang menentukan tingkatan kerusakannya. Dapat dikatakan bahwa semakin tinggi nilai amplitudo yang dihasilkan maka akan semakin besar pula tingkat kerusakan yang dialami oleh suatu mesin.



Gambar 2.4 Gerak osilasi suatu sistem pegas massa
(Hamid, 2012)

2. Frekuensi

Frekuensi merupakan plot sejumlah periode yang dihasilkan dalam satu putaran waktu. Nilai *vibrasi* suatu mesin umumnya memiliki plot frekuensi tertentu. Pada analisa yang berbasis domain frekuensi, jenis kerusakan biasanya ditandai dengan karakteristik frekuensi yang dihasilkan.

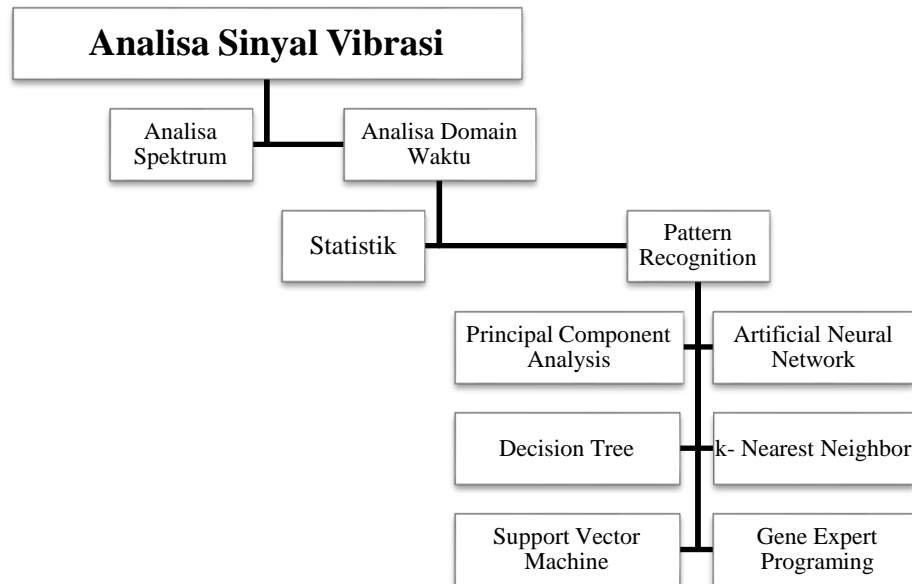
Dapat diketahui bahwa nilai *vibrasi* dari suatu mesin merupakan nilai amplitudo pada batas – batas frekuensi yang dinyatakan dalam *displacement*, *velocity*, atau *acceleration*. Ketiga parameter tersebut merupakan parameter dasar dalam pengukuran sinyal vibrasi.

2.8 Analisis Sinyal Vibrasi

Dalam proses analisis menggunakan sinyal *vibrasi*, umumnya terdapat dua metode yang digunakan yaitu dengan menggunakan domain waktu dan analisis spektrum (Al-Hasymi, 2009).

2.8.1 Analisa Domain Waktu (*Time Domain*)

Beberapa metode analisa sinyal *vibrasi* berbasis domain waktu yang diterapkan, diantaranya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Metode analisa sinyal *vibrasi* berbasis domain waktu

Pada dasarnya data sinyal *vibrasi* yang direkam akan menghasilkan kelompok data yang berbasis domain waktu, seperti *displacement*, *velocity*, dan *acceleration*. Fitur data sinyal vibrasi ini kemudian dapat diekstraksi ke dalam parameter statistik seperti *PDF*, *RMS*, standar deviasi, *mean*, dan lainnya.

2.8.2 Analisa Spektrum (*Frequency Domain*)

Analisis spektrum dilakukan dengan mentransformasikan sinyal *vibrasi* domain waktu ke dalam domain frekuensi. Umumnya transformasi dilakukan dengan menggunakan metode *fast fourier transform (FFT)*. Pada metode ini spektrum akan memunculkan frekuensi fundamental (frekuensi dasar) dan frekuensi harmoniknya. Analisis yang dilakukan adalah dengan melihat indikasi kerusakan berdasarkan karakteristik spektrum yang sinyal frekuensi komponen seperti frekuensi *impeller*, *shaft*, *bearing* serta komponen lainnya.

2.9 Pencocokan Pola (*Pattern Recognition*)

Pattern recognition merupakan suatu metode yang bekerja mengklasifikasikan data kedalam sejumlah kelompok atau kelas (Theodoritis, 2003). Metode ini dapat digolongkan sebagai bagian dari sistem kecerdasan buatan yang dibangun untuk pengambilan keputusan. Input data yang digunakan bermacam – macam, seperti angka, gambar, suara, maupun suatu gelombang sinyal. Metode ini sangat populer digunakan pada bidang statistik.

Namun seiring perkembangan teknologi, penggunaan metode berbasis *pattern recognition* semakin banyak diterapkan pada beberapa bidang. Lingkup penerapan yang menggunakan metode ini diantaranya seperti pada bidang medikal, industri, elektronik, bahkan penelitian yang mencakup analisa kerusakan berbasis sinyal *vibrasi*. Dalam hal ini, terdapat beberapa metode berbasis *pattern recognition* yang biasa digunakan untuk mengklasifikasikan sinyal *vibrasi*. Metode – metode tersebut diantaranya seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 2.5.

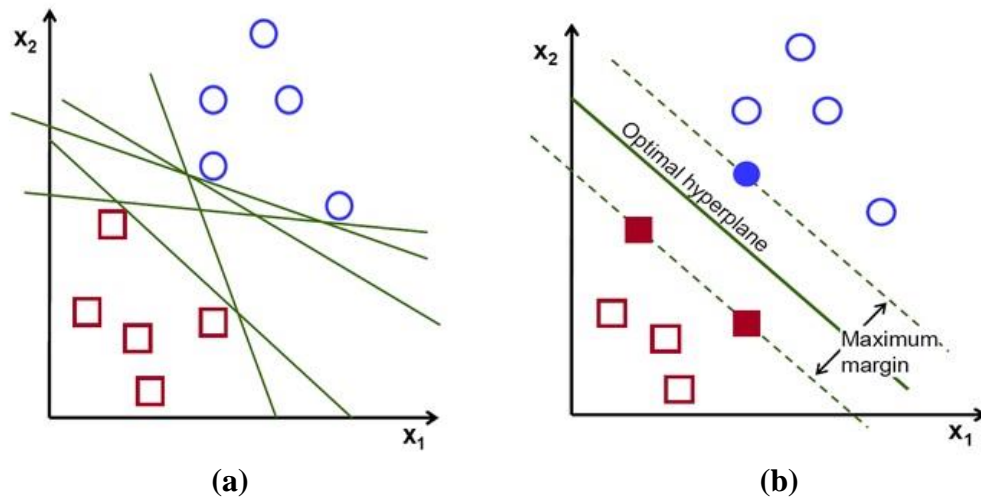
Hingga saat ini penerapan metode analisa sinyal *vibrasi* berbasis *pattern recognition* terus mengalami perkembangan. Hal ini mengakibatkan semakin bertambahnya metode baru yang berbasis *pattern recognition*. Kemunculan metode baru ini menandakan bahwa tingkat popularitasnya di masa mendatang akan semakin baik.

2.10 *Support Vector Machine (SVM)*

SVM merupakan metode yang digunakan untuk klasifikasi biner. Pertama kali *SVM* dikemukakan oleh Vapnik pada tahun 1992 dengan menggabungkan beberapa rangkaian konsep di bidang *pattern recognition*. Pada dasarnya, metode ini bekerja dengan menemukan *hyperplane* terbaik yang memisahkan kelompok data pada suatu dimensi dengan sempurna ke dalam dua kelas (Gunn, 1998).

Pada Gambar 2.6 (a) menunjukkan beberapa *pattern* dari dua kelas (*pattern* dalam kelas *a* ditandai dengan simbol kotak merah dan *pattern* dalam kelas *b* ditandai dengan simbol lingkaran biru) yang selanjutnya akan diproses pencarian *hyperplane* terbaiknya dengan memunculkan beberapa *discrimination*

boundaries (alternatif garis pisah). Dalam menentukan *hyperplane* terbaik dilakukan dengan mencari titik maksimal dan mengukur *margin* nya. Gambar 2.6 (b) memperlihatkan *hyperplane* terbaik yang terletak ditengah antara kedua kelas, dan *pattern* yang berada di dekat *hyperplane* merupakan *Support Vector*.



Gambar 2.6 Penentuan hyperplane terbaik yang memisahkan kedua kelas (Gunn, 1998)

Pattern dari kedua kelas tersebut diasumsikan telah terpisah sempurna oleh *hyperplane* dalam suatu dimensi yang didefinisikan dengan persamaan (2.3).

$$\vec{w} \cdot \vec{x} + b = 0 \dots\dots\dots(2.3)$$

jika \vec{x}_i pada kelas -1, maka seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.4).

$$\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b \leq -1 \dots\dots\dots(2.4)$$

Sedangkan nilai \vec{x}_i pada kelas +1, ditunjukkan pada persamaan (2.5).

$$\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b \geq +1 \dots\dots\dots(2.5)$$

Quadratic Programming (QP) problem merupakan usaha dalam memaksimalkan nilai jarak antara *hyperplane* dan titik terdekatnya dengan mencari titik minimalnya seperti persamaan (2.6).

$$\min_{\vec{w}} \tau(w) = \frac{1}{2} \|\vec{w}\|^2 \dots\dots\dots (2.6)$$

$$y_i (\vec{x}_i \cdot \vec{w} + b) - 1 \geq 0, \forall_i \dots\dots\dots (2.7)$$

Permasalahan pada persamaan (2.6) dan (2.7) dapat diselesaikan dengan teknik *Lagrange Multiplier* (α_i), seperti pada persamaan berikut (2.8).

$$L(\vec{w}, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|\vec{w}\|^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i (y_i (\vec{x}_i \cdot \vec{w} + b) - 1); (i = 1, 2, \dots, l) \dots (2.8)$$

Selanjutnya persamaan (2.6) dioptimalisasi dengan memaksimalkan *problem* yang hanya mengandung nilai (α_i), seperti pada persamaan berikut (2.9).

$$\sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i x_j \dots\dots\dots (2.9)$$

Sehingga, didapat persamaan (2.10) :

$$\alpha_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, l) \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0 \dots\dots\dots (2.10)$$

Dari persamaan (2.8) menunjukkan bahwa nilai (α_i) kebanyakan positif, dan *support vector* berkorelasi dengan nilai (α_i) yang bernilai positif ini.

2.11 Kernel Function

Kernel function merupakan metode yang digunakan untuk membuat pemetaan ke dalam ruang fitur berdimensi tinggi. Pendekatan ini bekerja dengan mengoperasikan data pada ruang input seperti pada fitur yang berdimensi tinggi. Hal ini mengakibatkan output data yang dihasilkan tidak perlu dievaluasi ke dalam fitur yang berdimensi tinggi, sehingga mengatasi masalah keterbatasan dimensi. Output data pada fitur berdimensi tinggi ekuivalen dengan data pada ruang input dengan menggunakan pendekatan *kernel function*, seperti di tunjukkan pada persamaan (2.11).

$$K(x, x') = \langle \phi(x), \phi(x') \rangle \dots\dots\dots (2.11)$$

Jika nilai K merupakan fungsi definitif positif yang simetris dapat dijelaskan seperti pada persamaan (2.12).

$$K(x, x') = \sum_m^{\infty} a_m \phi_m(x) \phi_m(x'); a_m \geq 0 \dots\dots\dots (2.12)$$

Berdasarkan bentuk garis pemisahya, *kernel function* yang digunakan dalam pengklasifikasian *SVM* umumnya terdapat delapan diantaranya :

1. *Polynomial Function*

Pemetaan data menggunakan *polynomial function* biasanya dilakukan terhadap kelompok data non linear. *Polynomial function* dapat dijabarkan pada persamaan (2.13).

$$K(x, x') = (x, x')^d \dots\dots\dots (2.13)$$

2. *Multi Layer Perception*

Multi Layer Perception (MLP) merupakan salah satu representasi *kernel* yang valid. Pada fungsi ini menunjukkan beberapa *layer*, dengan adanya satu *layer* yang tersembunyi. Penjabaran fungsinya dapat dilihat pada persamaan (2.14).

$$K(x, x') = \tanh(\rho(x, x') + \vartheta) \dots\dots\dots (2.14)$$

3. *Fourier Series*

Deret *fourier* dapat dianggap sebagai perluasan di dalam suatu dimensi. Kernel pada deret *fourier* ini dapat didefinisikan seperti pada persamaan (2.15).

$$K(x, x') = \frac{\sin\left(N + \frac{1}{2}\right)(x - x')}{\sin\left(\frac{1}{2}(x - x')\right)} \dots\dots\dots (2.15)$$

4. *Splines*

Splines merupakan salah satu metode populer untuk suatu permodelan karena sistem pemetaannya yang fleksibel. Fleksibilitas *kernel function* ini dapat dijabarkan melalui persamaan (2.16).

$$K(x, x') = \sum_{r=0}^K x^r x'^r + \sum_{s=1}^N (x - \tau_s)^K + (x' - \tau_s)^K \dots\dots\dots (2.16)$$

5. *B-Splines*

B-Splines merupakan salah satu terapan dari metode *splines* yang memiliki bentuk tertutup. Secara matematis dapat dijabarkan pada persamaan (2.17).

$$K(x, x') = B_{2N+1}(x - x') \dots\dots\dots (2.17)$$

6. *Additive Kernel*

Kernel function ini merupakan fungsi yang lebih rumit dengan melakukan serangkaian penjumlahan *kernel*. Penjumlahan dari serangkaian *kernel* ini bersifat definitif positif, sehingga perhitungan matematisnya seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.18).

$$K(x, x') = \sum_i K_i(x_i, x'_i) \dots\dots\dots (2.18)$$

7. *Tensor Product*

Fungsi ini merupakan serangkaian tensor produk dari beberapa *kernel function* untuk menciptakan fungsi yang multi dimensional. Hal ini dapat ditunjukkan seperti pada persamaan (2.19).

$$K(x, x') = \prod_i K_i(x_i, x'_i) \dots\dots\dots (2.19)$$

8. *Sigmoid Function*

Sigmoid function merupakan salah satu fungsi yang memiliki batasan. Fungsi ini didefinisikan untuk kelompok data yang memiliki turunan non negatif, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.20).

$$K(x, x') = \frac{2}{\pi} \frac{1}{e^u + e^{-u}} \dots\dots\dots (2.20)$$

9. *Gaussian Radial Basis Function (RBF)*

RBF merupakan *kernel function* yang paling banyak diterapkan dalam mengklasifikasi kelompok data non linear. Penerapan fungsi *Gaussian* pada *kernel function* ini seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.21).

$$K(x, x') = \exp\left(-\frac{\|x-x'\|^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (2.21)$$

2.12 Parameter Statistik Domain Waktu

1. *Probability Density Function (PDF)*

PDF menunjukkan nilai peluang akan terjadinya suatu hal, seperti yang dijabarkan pada persamaan (2.22).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (2.22)$$

Dalam pengaplikasiannya mendeteksi kerusakan berbasis sinyal *vibrasi*, kelompok data akan digolongkan menjadi dua kemungkinan. Apabila data tersebut menunjukkan adanya indikasi kerusakan, maka akan menghasilkan nilai 1. Namun jika dalam kondisi baik, maka akan menunjukkan nilai 0 (Al – Hasymi, 2009).

2. *Root Mean Square (RMS)*

Seperti yang telah disebutkan pada bagian sebelumnya, *RMS* merupakan salah satu parameter statistik domain waktu yang dapat digunakan dalam analisa kerusakan berbasis sinyal *vibrasi*. Nilai *RMS* dapat dihitung seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.23).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots (2.23)$$

Menurut Kamiel dan Ramadhan (2017), parameter ini sangat sensitif dalam menunjukkan indikasi awal terjadinya fenomena kavitasi pada pompa sentrifugal. Besar nilai *RMS* menunjukkan intensitas energi pada nilai *vibrasi* yang dihasilkan.

3. *Standar Deviasi*

Parameter standar deviasi (SD) digunakan untuk mengukur hubungan laju aliran fluida dan kecepatan operasi pada pompa terhadap histogramnya. Perhitungan nilai standar deviasi dapat dilihat pada persamaan (2.24).

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \dots\dots\dots (2.24)$$

Menurut Al – Hasyimi (2009) nilai parameter SD dapat menunjukkan penyebaran data terhadap nilai rata – rata nya. Dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai parameter SD, maka susunan datanya akan semakin mendekati nilai rata – ratanya begitu pula sebaliknya.

4. *Variance*

Parameter *variance* merupakan nilai kuadrat dari nilai standar deviasi nya. Nilai *variance* menunjukkan banyaknya variasi kelompok data. Perhitungannya dapat ditunjukkan pada persamaan (2.25).

$$Variance = \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1} \dots\dots\dots (2.25)$$

Pada analisa kerusakan berbasis sinyal *vibrasi*, parameter ini memberikan hasil yang akurat dalam mengklasifikasikan kondisi mesin baik dan rusak (Kamiel dan Ramadhan, 2017).

5. *Kurtosis*

Secara matematis, perhitungan nilai kurtosis dijabarkan pada persamaan (2.26).

$$Kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(N-1) \sigma^4} \dots\dots\dots (2.26)$$

Kurtosis menyerupai *variance* yang mana nilai yang didapat merupakan pangkat empat dari *variance* dari pada pangkat dua pada *variance* sehingga akan membuat semua nilai menjadi positif (Ahmed dkk, 2011). Dibandingkan dengan *variance* nilai *kurtosis* menekankan nilai besar dan menekan nilai kecil pada sinyal x .

6. *Standar Error*

Standar Error (SE) adalah ukuran dari jumlah kesalahan (*error*) dalam prediksi nilai y untuk setiap nilai x , dimana x dan y adalah *mean* sampel dan n

adalah ukuran sampel (Sakhtivel dkk., 2010). Nilai SE dapat dihitung menggunakan persamaan (2.27).

$$SE = \sqrt{\frac{1}{(n-2)} - \left[\frac{\sum(y - \bar{y})^2}{(x-x^2)^2} - \frac{[\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})]^2}{(x-x^2)^2} \right]} \dots\dots\dots (2.27)$$

7. *Minimum Value*

Menurut Sakhtivel dkk. (2010) parameter *minimum value* dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada mesin. Nilai parameter ini menunjukkan titik minimum dari nilai *vibrasi* yang dihasilkan. Apabila kinerja pompa menurun yang disebabkan oleh kerusakan komponen seperti bearing, seal, atau impeller, maka nilai *vibrasi* yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini tentunya akan berdampak terhadap kenaikan nilai minimum yang dihasilkan.

8. *Crest Factor*

Crest factor (C_f) merupakan salah satu parameter berbasis domain waktu yang sangat umum digunakan dalam analisa kerusakan berbasis sinyal *vibrasi*. Perhitungan C_f seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.28).

$$C_f = \frac{\max(|x(n)|)}{\sigma} \dots\dots\dots (2.28)$$

Nilai C_f menunjukkan ukuran ketajaman dan jumlah *peak* yang ada di dalam sinyal. Semakin besar nilai C_f yang dihasilkan, maka semakin banyak terdapat impuls yang berulang di dalam sinyal yang dihasilkan (Luo dkk., 2015).

9. *Peak*

Nilai *peak* menunjukkan indeks intensitas energi pada sinyal *vibrasi*, tren parameter ini terhadap laju aliran bersifat konstan. Persamaan (2.29), merupakan perhitungan dalam menentukan nilai *peak*.

$$Peak = \max|x(N)| \dots\dots\dots (2.29)$$

Luo, dkk. (2015) menyatakan bahwa nilai *peak* jauh lebih sensitif daripada nilai *RMS* sebagai indikator ketidakstabilan aliran. Hal ini dibuktikan pada data tren nilai *peak* mengalami kenaikan yang lebih ekstrim dibanding *RMS*.

10. *Entropy*

Nilai *entropy* (S) dalam klasifikasi kerusakan menandakan adanya indikasi kerusakan serta turbulensi aliran dalam rentang kecepatan tertentu. Dengan tingginya kondisi kerusakan pada suatu mesin, maka klasifikasi menggunakan parameter ini akan menunjukkan perbedaan yang semakin besar juga. Untuk menghitung nilai *entropy*, dapat digunakan persamaan (2.30).

$$S = \sum_{i=1}^N p(x_i) \log_{10} p(x_i) \dots\dots\dots (2.30)$$

Jenis kerusakan yang terdapat pada mesin dapat diklasifikasi dengan baik, terutama dengan penggunaan parameter *entropy* yang dapat mengklasifikasikan dengan jelas terhadap kondisi baik dan rusak (Rapur dan Tiwari, 2016).

11. *Mean*

Nilai *mean* merupakan rata – rata dari besaran nilai terhadap objek. Dapat diartikan bahwa nilai mean umumnya dijadikan sebagai ukuran data yang mendominasi keseluruhan data. Nilai parameter ini memiliki perhitungan dengan cara membagi jumlah nilai data dengan banyaknya data seperti pada persamaan (2.31).

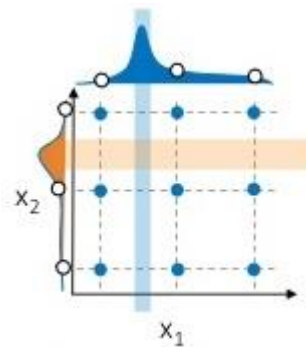
$$Mean = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x(k) \dots\dots\dots (2.31)$$

Sama halnya seperti SD dan *entropy*, parameter ini merupakan salah satu parameter yang dapat memberikan hasil klasifikasi yang baik terhadap perbedaan kondisi pada suatu mesin (Rapur dan Tiwari, 2016).

2.13 *Grid Search Method (GSM)*

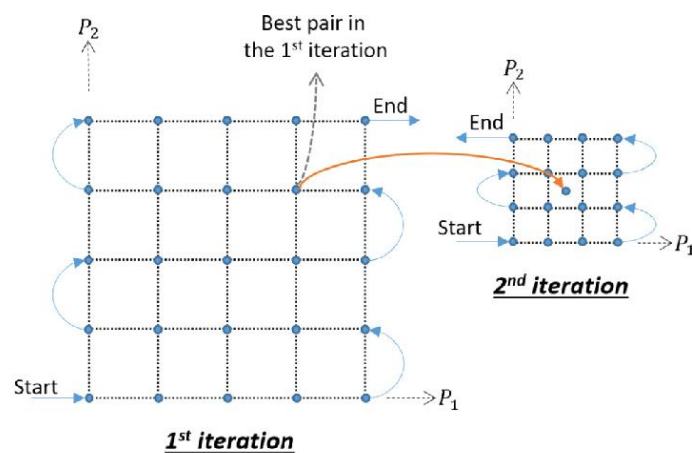
GSM merupakan metode berbasis pada pencarian *grid* dalam sebuah pemetaan. Umumnya suatu fungsi pemetaan bekerja dengan membentuk garis

pemisah imajiner terhadap kelompok data. Garis pemisah tersebut diciptakan berdasarkan nilai setiap parameter klasifikasi. Algoritma *GSM* berupaya menciptakan *grid* dari setiap titik pemetaan, kemudian *grid* tersebut mengevaluasi nilai parameter klasifikasi yang dihasilkan (Wenwen, 2014). Pada setiap hasil evaluasi, algoritma *GSM* mengurutkan nilai parameter terbaik dan menggunakannya kembali sebagai hasil yang telah dioptimalisasi. Proses ini dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Optimalisasi pemetaan berdasarkan *grid*
(Ma dan Cheng, 2016)

Setiap perulangan yang dilakukan pada proses optimalisasi menghasilkan satu parameter yang optimal. Perulangan pada proses optimalisasi ini sejumlah dengan jumlah *sample* yang akan dipetakan. Hal ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Korelasi antara *grid* pada setiap perulangan
(Ma dan Cheng, 2016)

Posisi *grid* terhadap hasil optimalisasi pada satu perulangan akan menjadi tolak ukur yang digunakan pada proses perulangan selanjutnya. Dengan kata lain setiap *grid* yang dibentuk pada keseluruhan proses optimalisasi memiliki korelasi satu dengan lainnya. Hal ini mengakibatkan fungsi pemetaan yang telah dioptimalisasikan akan menunjukkan hasil pemetaan yang berbeda dengan sebelumnya.

Agar dapat memperoleh hasil yang optimal, metode ini harus mengevaluasi seluruh titik pemetaan yang ada. Oleh sebab itu, jumlah *grid* yang dihasilkan juga akan sesuai dengan jumlah *sample* yang dipetakan. Hal ini mengakibatkan algoritma *GSM* sulit untuk diterapkan pada pemetaan dalam dimensi tinggi, karena akan memberikan hasil optimalisasi yang tidak konsisten.

2.14 Bayesian Optimization (BO)

Prinsip dasar yang digunakan pada algoritma *BO* adalah mengevaluasi suatu fungsi objektif dimana nilai-nilai minimum yang dimiliki pada fungsi tersebut dievaluasi dan dikembalikan dalam bentuk yang optimal. Metode ini memiliki dua fungsi utama, yaitu fungsi akuisisi dan fungsi optimalisasi (Mockus dkk, 1994).

Fungsi akuisisi algoritma *BO* dapat didefinisikan sebagai fungsi pencarian. Fungsi ini berupaya untuk menemukan fungsi objektif yang kurang optimal. Menurut Snoek dkk. (2012) suatu fungsi objektif dikategorikan tidak optimal apabila memiliki nilai parameter yang berada dibawah standar yang ditetapkan fungsi akuisisi. Dengan begitu fungsi akuisisi akan mencari pada sejumlah fungsi objektif yang masuk dalam kategori dibawah standar. Setiap fungsi objektif yang dievaluasi kemudian dioptimalisasikan menggunakan fungsi optimalisasi dengan membangun sampling buatan berdasarkan probabilitas terbaik.

2.14.1 Implementasi Algoritma BO terhadap SVM

BO merupakan salah satu metode optimalisasi yang dapat digunakan untuk mengoptimalisasikan hasil klasifikasi *SVM*. Fungsi objektif yang dioptimalkan oleh algoritma *BO* merupakan fungsi pemetaan oleh *kernel function*. Setiap *kernel function* yang digunakan memiliki parameter klasifikasi dasar seperti *box*

constrain, *kernel scale*, dan *coding* pemetaan. Ketiga parameter ini memiliki nilai yang berbeda sesuai dengan bentuk dan jumlah data yang dipetakan.

Pengoptimalisasian fungsi pemetaan *SVM* ini dilakukan dengan melakukan pencarian terhadap titik pemetaan yang melakukan kesalahan. Parameter klasifikasi yang dihasilkan oleh fungsi pemetaan yang salah kemudian dievaluasi oleh algoritma *BO*. Hasil evaluasi nantinya dikembalikan pada proses pembentukan model klasifikasi sebagai parameter yang optimal.

Tahapan optimalisasi *SVM* menggunakan *BO* menghasilkan nilai pemetaan optimal secara kontinyu. Dengan kata lain, fungsi yang dioptimalisasikan akan dijadikan sebagai output apabila telah memiliki nilai yang lebih optimal dari hasil sebelumnya. Maka dari itu, jumlah data yang diklasifikasikan pada *SVM* tidak menjadi pengaruh pada performa algoritma *BO* dan kesalahan dalam pengoptimalisasian dapat minimalisir.

2.15 Akuisisi Data Sinyal Vibrasi

Proses akuisisi data merupakan kegiatan yang dilakukan untuk mengukur sinyal *vibrasi* yang dihasilkan oleh suatu komponen mesin. Dalam prosesnya terdapat empat tahapan utama yang dilakukan, diantaranya (Scheffer dan Ghirdar, 2004) :

1. Merekam sinyal *vibrasi* yang berasal dari sumber terjadinya.
2. Mengubah sinyal *vibrasi* yang bersifat mekanis ke sinyal elektrik.
3. Mentransformasikan sinyal elektrik ke tiap bagian komponennya.
4. Menganalisa informasi yang dihasilkan berdasarkan sinyal *vibrasi* yang direkam.

Keempat tahapan diatas tentunya dapat dilakukan dengan bantuan berapa perangkat keras seperti sensor *vibrasi* dan juga perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisa output dalam bentuk digital.

2.15.1 Sensor Vibrasi

Sensor *vibrasi* atau yang biasa disebut transduser merupakan sebuah perangkat yang berfungsi untuk menangkap sinyal getaran dari sumbernya dan mentransformasikannya ke dalam sinyal elektrik (Rao, 2000). Terdapat beberapa

jenis sensor yang biasa digunakan. Untuk setiap jenisnya memiliki kelebihan yang spesifik pada aplikasi tertentu, tetapi semua jenisnya memiliki keterbatasan. Pertimbangan yang paling penting adalah untuk dapat memilih sensor *vibrasi* yang tepat dalam pekerjaan tertentu. Berdasarkan jenis dan penerapannya sensor *vibrasi* terbagi tiga, diantaranya :

1. *Sensor Displacement*

Sensor ini bekerja dengan mentransformasikan sinyal yang bersifat mekanis menjadi sinyal elektrik yang ekuivalen dengan nilai perpindahannya. Dengan kata lain sensor ini mengukur berdasarkan penyimpangan sinyal *vibrasi*. Pada Gambar 2.9 menunjukkan penampang sensor *displacement*.



Gambar 2.9 Sensor *displacement*
(Syafutra, 2017)

2. *Sensor Velocity*

Sensor *velocity* merupakan sensor yang mengukur data sinyal *vibrasi* berdasarkan kecepatannya. Pada sensor ini terdapat koil magnet yang mentransformasikan sinyal mekanis kedalam elektrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Sensor *velocity*
(Syafutra, 2017)

3. *Accelerometer*

Berbeda dengan kedua sensor sebelumnya, jenis ini menangkap sinyal *vibrasi* dan mengubahnya ke dalam sinyal elektrik yang berbasis nilai percepatan. Pada umumnya sensor ini digunakan dalam pengukuran terhadap mesin, bangunan, kendaraan, serta *vibrasi* yang terjadi dalam bumi. *Accelerometer* ditunjukkan seperti pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Sensor *accelerometer*

(Syafutra, 2017)

2.16 Sensor *Accelerometer*

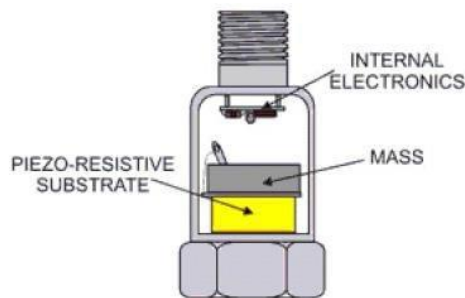
Seperti yang telah diketahui, *accelerometer* merupakan sensor yang dapat digunakan dalam mengukur nilai *vibrasi* suatu objek yang diakibatkan oleh percepatan gravitasi bumi. Pada umumnya *accelerometer* dibuat dengan menggunakan bahan piezoelektrik, yaitu kristal *quartz* dan keramik. Bahan piezoelektrik mentransformasikan sinyal dengan cara memindahkan elektron dan mendorong atom di dalamnya sehingga membentuk tegangan listrik yang ekuivalen dengan energi mekanis. *Output* yang dihasilkan pada *accelerometer* dapat didiferensialkan menjadi output *velocity* dan *displacement*, sehingga sensor ini dapat digunakan untuk mengukur sinyal *vibrasi* yang berbasis pada perpindahan dan kecepatan.

2.16.1 Jenis – Jenis *Accelerometer*

Dalam pengaplikasiannya sensor *accelerometer* disesuaikan terhadap sumber sinyal *vibrasi* dan objek yang diukur. Jenis – jenis *accelerometer* yang digunakan berdasarkan pengaplikasiannya, yaitu (Crawford, 1992) :

1. *Accelerometer Tipe Compression*

Jenis *accelerometer* ini umumnya digunakan pada suatu objek yang menghasilkan nilai *vibrasi* yang tinggi, sehingga hasil transformasi tegangannya bernilai tinggi. *Accelerometer tipe compression* dapat dilihat pada Gambar 2.12.

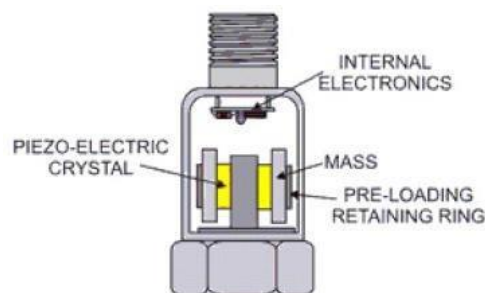


Gambar 2.12 *Accelerometer tipe compression*

(Aji, 2007)

2. *Accelerometer Tipe Shear*

Accelerometer jenis ini dapat dilihat seperti pada Gambar 2.13. Karena ukurannya yang kecil, maka jenis ini digunakan untuk mengukur sinyal *vibrasi* pada objek yang memiliki struktur dan celah yang kecil. Pada umumnya objek yang direkam menggunakan *accelerometer* ini mempunyai struktur yang fleksibel.



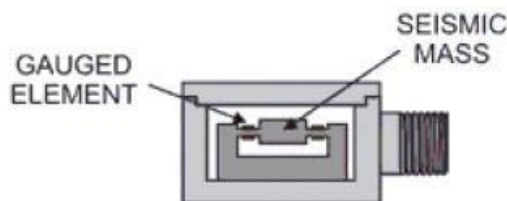
Gambar 2.13 *Accelerometer tipe shear*

(Aji, 2007)

3. *Accelerometer Tipe Strain Gauge*

Accelerometer ini merekam sinyal *vibrasi* dengan menggunakan bahan berupa *foil strain gauge* atau silikon. Umumnya deteksi yang dilakukan berupa

fenomena defleksi dari sebuah massa *seismic*. Jenis ini dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 *Accelerometer tipe strain gauge*
(Aji, 2007)

2.16.2 Sensitifitas *Accelerometer*

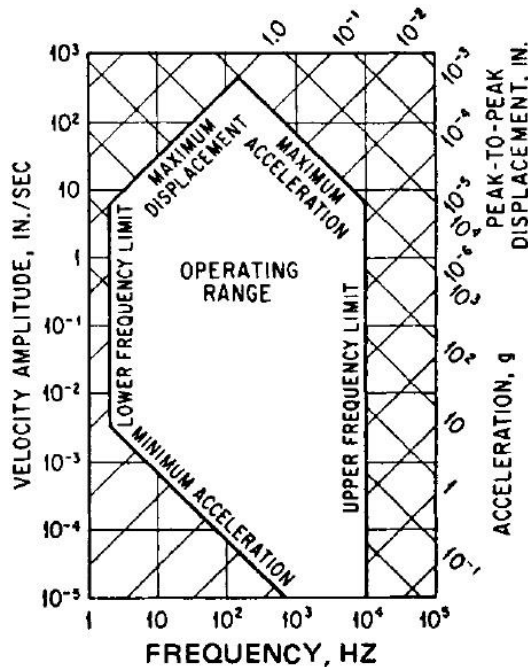
Sensitifitas *accelerometer* didefinisikan sebagai rasio *output* sinyal elektirk dengan *input* nilai energi mekanisnya (Chu, 2002). Sensor *accelerometer* dapat menghasilkan *output* yang tidak akurat ketika mengalami tegangan berlebih dan terdistorsi. Fenomena ini terjadi ketika pemasangan sensor yang tidak tepat dan tidak baik terhadap permukaan objek. Hal ini kemudian sering juga disebutkan sebagai fenomena penyimpangan dasar atau sensitifitas regangan. Selain itu, penggunaan kabel penghubung yang panjang juga mengurangi sensitifitas karena banyaknya hambatan yang terjadi.

Sensitifitas regangan biasanya bernilai ekuivalen dengan istilah *microstrain*. Pada umumnya nilai sensitifitas regangan yang direkomendasikan adalah sebesar 250 *microstrain*. *Accelerometer* dengan elemen penginderaan yang kuat biasanya cenderung menunjukkan sensitifitas regangan besar. Kesalahan yang paling sering terjadi adalah ketika sensor terletak pada bagian yang lentur pada objek. Untuk mengatasi permasalahan terhadap sensitifitas disarankan agar memilih penggunaan *accelerometer* yang memiliki sensitifitas regangan rendah.

2.16.3 Rentang Frekuensi Operasi (*Frequency Range*)

Frequency range merupakan rentang yang mendefinisikasn sensitifitas sensor dimana tidak melebihi persentase yang dinyatakan pada dari sensitifitas tersebut. Rentang ini dapat dibatasi oleh karakteristik output dan input data pada sensor atau perangkat akuisisi lainnya. Kemudian batasan ini dapat ditambahkan

ke batas linearitas amplitudonya, sehingga rentang operasi instrumen sepenuhnya dapat ditentukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Linearitas *range* frekuensi
(Chu, 2002)

Adapun batasan – batasan rentang operasi frekuensi ini, diantaranya (Chu, 2002) :

1. Batasan Frekuensi Rendah (*Low Frequency Limit*)

Dalam mengevaluasi *low frequency limit*, perlu mempertimbangkan karakteristik daya elektrik pada sensor. Secara umum elemen *accelerometer* yang menggunakan daya eksternal tidak memiliki *low frequency limit*, sedangkan elemen yang menggunakan daya internal tidak dapat beroperasi pada frekuensi nol. Dengan kata lain, penggunaan *accelerometer* yang memiliki perangkat penguat frekuensi dapat membatasi nilai *low frequency limit* nya.

2. Batasan Frekuensi Tinggi (*High Frequency Limit*)

Sebuah *accelerometer* dapat memiliki kesalahan pengukuran karena frekuensi yang direspon lebih kecil dari frekuensi pada sensor. Dalam hal ini sensor pada umumnya memberikan kenaikan terhadap nilai vibrasi agar dapat

terdeteksi. Pada kasus ini *high frequency limit* merupakan hal penting pada pengukuran *vibrasi* karena dapat mencegah terjadinya distorsi sinyal. Batasan ini juga dapat berguna apabila frekuensi operasi berada dalam jangkauan operasi instrumen. Pada hasilnya, sensor akan meredam frekuensi tinggi yang telah melewati batasannya sehingga frekuensi operasi pada objek tidak mengalami distorsi.

2.15.4 Metode Pemasangan *Accelerometer*

Pemasangan *accelerometer* (*mounting*) pada saat perekaman sinyal *vibrasi* pada suatu objek harus tepat. Agar dapat menghindari kegagalan perekaman, peletakan sensor juga harus sesuai dengan sumbu sensitifitasnya. Sensor *accelerometer* yang dipasang ketika pengukuran dapat menambah massa objek, hal ini mengakibatkan adanya dampak terhadap sistem *vibrasi* yang dihasilkan dan sifat mekanik pada objek.

Permasalahan yang umumnya sering terjadi pada pemasangan *accelerometer*. Akibatnya, struktur data sinyal *vibrasi* yang dihasilkan akan mengalami kerusakan. Hal ini tentunya akan mempengaruhi rentang frekuensi yang dihasilkan. Oleh karena itu, metode pemasangan *accelerometer* pada pengukuran sinyal *vibrasi* harus dilakukan dengan tepat agar memperoleh hasil yang akurat.

Terdapat beberapa metode yang digunakan dalam pemasangan *accelerometer* pada objek, diantaranya (Harris, 2002) :

1. Pemasangan Tiang (*Stud Mounting*)

Teknik pemasangan ini merupakan salah satu metode yang baik dan dapat digunakan untuk setiap jenis objek pengamatan, yaitu dengan menggunakan tiang baja. Namun apabila perekaman dilakukan pada rentang frekuensi yang tinggi, *output* data yang dihasilkan akan mengalami kekeliruan.

2. Pemasangan dengan Pengerat (*Cement Mountings*)

Metode pemasangan ini dilakukan apabila pada objek pengamatan tidak terdapat celah ataupun rongga yang memungkinkan untuk dilakukan proses

penyambungan. Sehingga *accelerometer* harus dipasang dengan menggunakan pengerat. Biasanya pengerat yang digunakan berupa *cyanoacrylate* atau *epoxy*.

3. Pemasangan dengan *Beeswax* (*Beeswax Mounting*)

Metode *Beeswax* hampir sama seperti *cementing stud*, hanya saja jenis pengeratnya berupa lem *beeswax*. Metode ini tergolong sederhana, sehingga dapat diterapkan untuk penelitian atau pengujian dengan skala kecil. Namun kekurangan dari metode ini adalah tidak dapat digunakan pada temperatur diatas 40 °C, karena temperatur yang panas akan mengakibatkan lem meleleh sehingga tidak melekat secara sempurna.

4. Pemasangan dengan Magnet (*Magnetic Mounting*)

Penggunaan metode ini tergolong cepat dan praktis seperti halnya meletakkan sensor pada objek. Dikarenakan adanya magnet pada sensor, maka tanpa bantuan lem pengerat sensor sudah bisa melekat pada objek. Selain itu penggunaan metode ini juga dapat mempermudah pengguna dalam memindahkan sensor dari satu bagian ke bagian lainnya. Namun keterbatasan metode ini tidak dapat digunakan pada objek yang memiliki material *non-magnetik*.

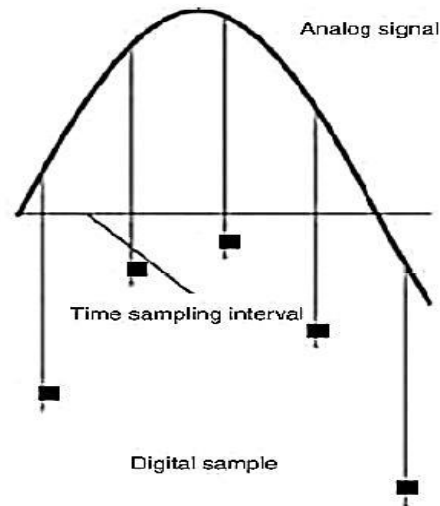
5. Pengguna Memegang dengan Tangan (*Hand-Held Mounting*)

Metode ini merupakan teknik dengan kinerja terburuk dari seluruh teknik yang telah dijelaskan. Tanpa diberikan bantuan alat pengerat atau penopang, sensor hanya disambungkan ke sebuah *probe* dan dipegang selama proses perekaman sinyal *vibrasi* berlangsung. Namun metode ini tetap dapat digunakan, biasanya lebih berguna untuk perekaman sesaat karena dapat memindahkan sensor dalam waktu cepat dibanding metode lainnya.

2.16 *Sampling*

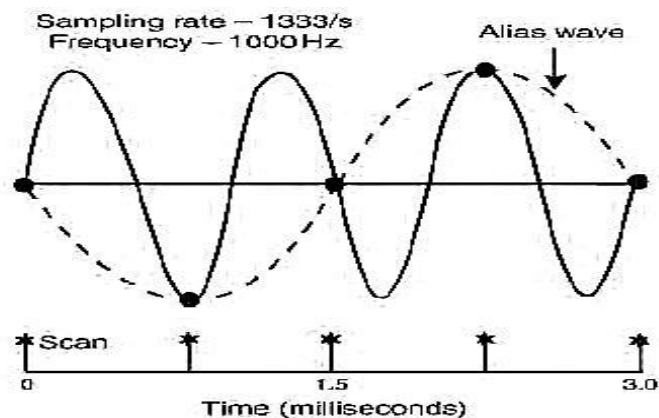
Sampling merupakan proses perekaman secara otomatis yang kemudian menghasilkan kurva dari titik – titik yang direkam. Gelombang sinyal yang awalnya berbentuk analog, diubah dengan menggunakan titik – titik data dalam bentuk digital ini. Proses pembentukan sinyal digital yang dihasilkan harus serupa dengan gelombang sinyal aslinya. Oleh karena itu, dibutuhkan proses *sampling*

agar gelombang sinyal digital merupakan bagian dari gelombang analog. Proses ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Proses *sampling* sinyal analog ke digital
(Scheffer dan Ghirdar, 2004)

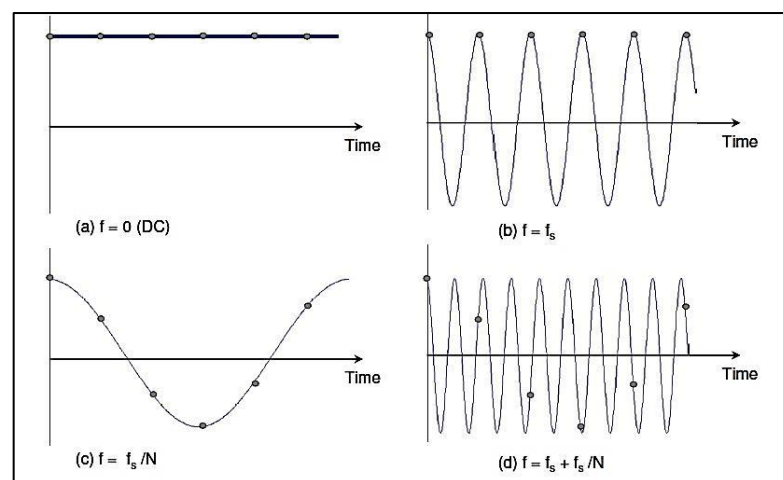
Dalam penerapan teori *sampling* agar tidak terjadi kehilangan informasi yang terkandung dalam sampel sinyal, setidaknya sampel data yang diambil pada tingkat frekuensi harus dua kali frekuensi tertinggi informasi. Teori ini kemudian dikenal dengan *Nyquist Sampling*. Gambar 2.17 menunjukkan kasus laju sampling yang kurang dari dua kali frekuensi informasi.



Gambar 2.17 Fenomena *undersampling*
(Scheffer dan Ghirdar, 2004)

2.17 Aliasing

Fenomena pembentukan gelombang frekuensi rendah karena adanya *undersampling* disebut *aliasing*. Secara teoritis seharusnya tidak ada nilai *vibrasi* dengan frekuensi lebih dari setengah tingkat *sampling*. Namun dalam pengaplikasiannya hal ini dapat terjadi. Fenomena *aliasing* dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Fenomena *aliasing*

(Alsalaet, 2012)

Hal ini merupakan suatu kesalahan yang harus dihindari ketika melakukan perekaman data secara kontinyu. Metode yang digunakan agar dapat menghindari terjadinya *aliasing* adalah dengan filter *anti-aliasing*. Filter ini bekerja dengan menghilangkan plot frekuensi tinggi yang mungkin ada pada laju *sampling*. Untuk mengatasi masalah perubahan amplitudo dekat frekuensi *cut-off*, maka rentang frekuensi hanya digunakan kurang 80% frekuensi *Nyquist*. Agar dapat berjalan dengan lancar, maka metode ini harus dilakukan sebelum proses perubahan analog ke digital dimulai.