

BAB 2

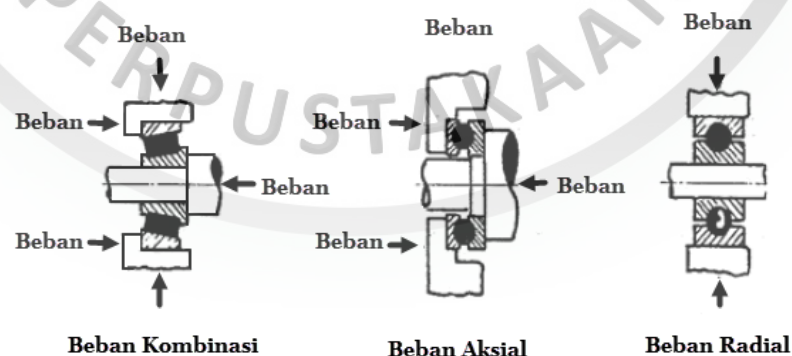
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Bearing* (Bantalan)

Bearing adalah suatu elemen mesin yang menumpu poros berbeban, sehingga putaran atau gerakan bolak-baliknya dapat berlangsung secara halus, aman dan berumur panjang (Negara, 2018). Dalam ilmu mekanika, *bearing* adalah sebuah elemen yang memiliki fungsi untuk membatasi gerak relatif antara dua ataupun lebih komponen mesin agar selalu bergerak pada arah yang diinginkan.

Negara (2018) mengemukakan klasifikasi *bearing* secara umum, yaitu dapat diklasifikasikan berdasarkan arah beban dan berdasarkan konstruksi atau mekanisme mengatasi gesekan. Berdasarkan arah bebannya terdiri atas:

1. *Journal bearing* (bantalan radial): *bearing* yang bebannya ditahan dalam arah radial tegak lurus dengan poros.
2. *Thrust bearing* (bantalan aksial): *bearing* yang menahan beban dalam arah aksial.
3. Bantalan kombinasi: bantalan yang mampu menahan kombinasi beban dalam arah radial dan arah aksial.



Gambar 2.1 *Bearing* Berdasarkan Arah Beban

(Sumber: <http://www.mikirbae.com/2016/09/jenis-dan-spesifikasi-bearing.html>)

Berdasarkan konstruksi atau mekanisme mengatasi gesekan terdiri atas:

1. *Slider bearing* (bantalan luncur): nama lain dari *slider bearing* (bantalan luncur) yaitu *plain bearing*, dimana *bearing* ini menggunakan mekanisme *sliding*. Yaitu mekanisme yang dimana dua permukaan komponen mesin saling bergerak relatif, kemudian diantara kedua permukaannya terdapat pelumas yang berfungsi untuk mengurangi gesekan antara kedua permukaan.



Gambar 2.2 *Slider Bearing*

(Sumber: <https://pitstopusa.com/i-23945118-afco-racing-products-roller-springslider-bearing-steel-afco-leaf-spring-slider.html>)

2. Bantalan gelinding: bantalan gelinding menggunakan elemen *rolling* untuk mengatasi gesekan antara dua komponen yang bergerak. Elemen gelinding diantaranya bola, rol taper dan lain-lain. Kontak gelinding terjadi antara elemen ini dengan komponen lain berarti pada permukaan kontak tidak ada gerakan relatif. Bantalan gelinding, berdasarkan bentuk elemen gelindingnya dapat dibagi menjadi dua yaitu: *ball bearing* (bantalan bola) dan *roll bearing* (bantalan rol). Kelebihan yang dimiliki bantalan gelinding dengan klasifikasi bola dan rol adalah gesekan yang ditimbulkan oleh kedua bantalan ini relatif kecil jika dibandingkan dengan bantalan lainnya.



Gambar 2.3 *Ball Bearing*

(Sumber: <https://www.indiamart.com/proddetail/ss-ball-bearings-12722949591.html>)



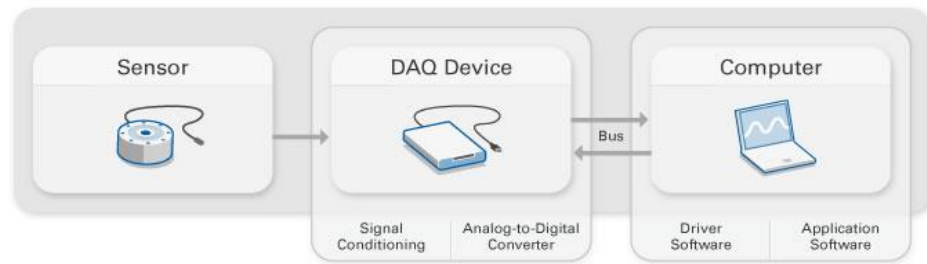
Gambar 2.4 *Roll Bearing*

(Sumber: <https://www.indiamart.com/proddetail/taper-roller-bearing-20110003091.html>)

2.2 Proses Pengumpulan Data Sinyal Vibrasi *Bearing*

Proses pengumpulan data sinyal vibrasi lebih dikenal dengan nama data *acquisition* atau akuisisi data. Negara (2018) mengemukakan bahwa akuisisi data merupakan proses untuk mengumpulkan data dan menyimpan data atau informasi yang berguna sesuai dengan yang dibutuhkan untuk keperluan. Atau data akuisisi merupakan proses sampling dari sinyal-sinyal yang berasal dari kondisi fisik suatu objek yang akan mengubah sampel-sampel tadi kedalam bentuk digital yang akan diolah lebih lanjut oleh komputer. Proses akuisisi data pada umumnya membutuhkan bantuan beberapa komponen sebagai berikut :

1. Sensor
2. DAQ *Device*
3. Komputer



Gambar 2.5 Ilustrasi Pengumpulan Data Vibrasi *Bearing*
(Sumber: <https://dataloggerindonesia.com/mengenal-data-acquisition-system-26>)

2.2.1 Sensor *Accelerometer*



Gambar 2.6 Sensor *Accelerometer*
(Sumber: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/ams-a0643tx-ex>)

Negara (2018) mengemukakan bahwa *accelerometer* merupakan perangkat yang mengukur getaran, atau percepatan gerak struktur. Sensor *accelerometer* mengubah parameter fisis ke dalam sinyal elektrik. Prinsip kerja dari sensor ini berdasarkan hukum fisika bahwa apabila suatu konduktor digerakkan melalui suatu medan magnet, atau jika suatu medan magnet digerakkan melalui suatu konduktor, maka akan timbul suatu tegangan induksi pada konduktor tersebut. Saat ini hampir semua sensor/transduser *accelerometer* sudah dalam bentuk digital (bukan dengan sistem mekanik) sehingga cara kerjanya hanya berdasarkan temperatur yang diolah secara digital dalam satu chip. Kelebihan yang dimiliki oleh sensor ini adalah:

1. Respon sinyal yang baik antara 900 sampai 6000 cpm (15.>10.000 Hz).
2. Respon fase datar sepanjang rentang operasi transducer.
3. Elektronik *solid state* dengan konstruksi yang kokoh dan andal.
4. Beroperasi dibawah mount frekuensi resonansi alami.

5. Tersedia unit khusus untuk aplikasi suhu tinggi.

Kekurangan yang dimiliki oleh sensor ini adalah:

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

2.2.2 DAQ Device

1. *Signal Conditioning Circuitry*

Signal conditioning circuitry berfungsi mengubah sinyal yang berasal dari sensor kedalam bentuk sinyal digital. Karena sinyal yang didapat dari sensor masih kotor dan berbahaya untuk diukur secara langsung maka pengkondisian sinyal perlu dilakukan dari sensor sehingga sesuai sebagai input ke *analog to digital converter*.

2. *Analog to digital converter*

Analog to digital converters menghasilkan sinyal digital yang sebelumnya sudah dikondisikan terlebih dahulu.

2.2.3 Komputer

DAQ device dengan komputer dapat terhubung melalui USB, PCI, PCI Express, Ethernet, Wi-Fi serta komunikasi nirkabel. Komponen ini digunakan untuk memproses, menampilkan dan menyimpan hasil pengukuran. Terdapat dua macam perangkat lunak didalam komputer yang digunakan pada sistem DAQ yaitu, *driver*

software dan *application software*. Driver software digunakan untuk bereaksi dengan DAQ *device* sedangkan *application software* digunakan untuk mengambil, analisa, dan menampilkan data pengukuran.

2.3 Proses Ekstraksi Fitur

Proses ekstraksi fitur akan dilakukan ke dalam *time domain analysis*. Menurut Jardine et. al (2005) *time domain analysis* yaitu analisis langsung berdasarkan bentuk gelombang itu sendiri. Tradisional *time domain analysis* adalah dengan menghitung karakteristik fitur dari sinyal gelombang sebagai deskriptif statistik. Nilai deskriptif statistik tersebut akan dihitung setiap satuan waktunya. Beberapa deskriptif statistik yang akan dihitung adalah root mean square, skewness dan kurtosis.

2.3.1 Root Mean Square (RMS)

Nilai dari RMS dari sinyal getaran dapat digunakan sebagai parameter dari *machine condition monitoring*. Nilai pada RMS merupakan, sebuah indikator dari level energi sinyal getaran (Rifasakin, 2018).

Dalam López-López et. al (2007) nilai RMS dirumuskan dengan persamaan:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i)^2}{N}} \quad (2.1)$$

dengan N merupakan jumlah titik sinyal setiap satuan waktunya, dan y_i merupakan data asli sinyal getaran.

2.3.2 Skewness

Skewness merupakan derajat ketidaksimetrisan suatu kurva. Jika kurva memiliki ekor yang lebih memanjang ke kanan (dilihat dari *mean* nya) maka dikatakan menceng kanan (positif) dan apabila sebaliknya maka dikatakan menceng kiri (negatif) (Rifasakin, 2018).

Dalam López-López et. al (2007) nilai skewness dirumuskan dengan persamaan:

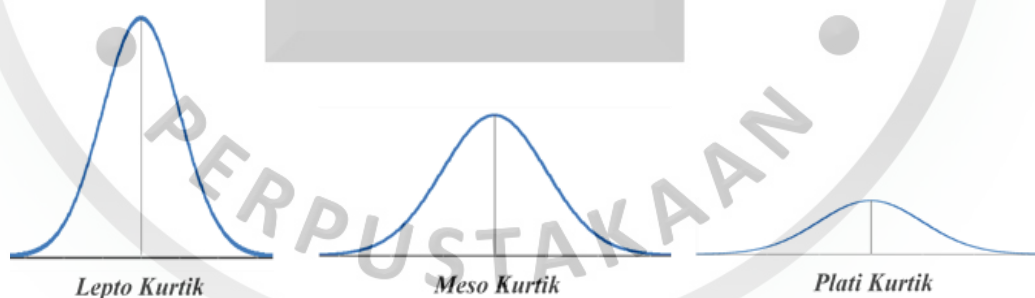
$$S = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^3}{(N - 1) \sigma^3} \quad (2.2)$$

dengan N merupakan jumlah titik sinyal, dan y_i merupakan data asli sinyal getaran, \bar{y} merupakan rata-rata dari data asli sinyal getaran, dan σ^3 merupakan simpangan baku dari data asli sinyal getaran yang dipangkatkan 3.

2.3.3 Kurtosis

Kurtosis adalah sebuah ukuran tingkat keruncingan suatu kurva. Menurut Supangat (2007) kurtosis merupakan besaran untuk menentukan jenis kurva (runcing, normal atau datar). Kriteria untuk menyatakan tingkat keruncingan kurva adalah sebagai berikut:

1. Suatu kurva dinyatakan runcing (Lepto Kurtik), jika nilai $K > 3$
2. Suatu kurva dinyatakan normal (Meso Kurtik), jika nilai $K = 3$
3. Suatu kurva dinyatakan datar (Plati Kurtik), jika nilai $K < 3$



Gambar 2.7 Kurva Lepto Kurtik, Meso Kurtik dan Plati Kurtik

Dalam López-López et. al (2007) nilai kurtosis dirumuskan dengan persamaan:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^4}{(N - 1) \sigma^4} \quad (2.3)$$

dengan N merupakan jumlah titik sinyal, dan y_i merupakan data asli sinyal getaran, \bar{y} merupakan rata-rata dari data asli sinyal getaran, dan σ^4 merupakan simpangan baku dari data asli sinyal getaran yang dipangkatkan 4.

2.4 Monotonicity

Monotonicity merupakan salah satu alat yang bisa dipakai untuk menilai atau meranking fitur, sehingga bisa digunakan untuk memilih fitur yang sesuai dengan data. Menurut Saidi et. al (2017) *monotonicity* menggambarkan tren indikator positif atau negatif. Indikator *monotonicity* diasumsikan oleh perbedaan rata-rata antara jumlah pertumbuhan positif dan negatif untuk setiap fitur ekstraksi. Nilai *monotonicity* akan berkisar dari 0 sampai dengan 1. Nilai 0 menunjukkan bahwa fitur tersebut tidak sesuai, dan nilai 1 menunjukkan skor yang paling tinggi dan sesuai (Coble, 2010).

Karena pada skripsi ini hanya akan menggunakan fitur sebanyak 3 fitur, sehingga $i = 1,2,3$ dimana fitur ke 1 adalah fitur RMS, fitur ke 2 adalah fitur skewness dan fitur ke 3 adalah fitur kurtosis maka gambaran dari struktur datanya adalah sebagai berikut pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Struktur Data untuk Menghitung *Monotonicity*

No	Fitur RMS				Fitur Skewness				Fitur Kurtosis			
	1	2	...	m	1	2	...	m	1	2	...	m
1	$x_{1(1)}^1$	$x_{1(1)}^2$	...	$x_{1(1)}^m$	$x_{2(1)}^1$	$x_{2(1)}^2$	...	$x_{2(1)}^m$	$x_{3(1)}^1$	$x_{3(1)}^2$	...	$x_{3(1)}^m$
2	$x_{1(2)}^1$	$x_{1(2)}^2$	...	$x_{1(2)}^m$	$x_{2(2)}^1$	$x_{2(2)}^2$	...	$x_{2(2)}^m$	$x_{3(2)}^1$	$x_{3(2)}^2$	...	$x_{3(2)}^m$
3	$x_{1(3)}^1$	$x_{1(3)}^2$	...	$x_{1(3)}^m$	$x_{2(3)}^1$	$x_{2(3)}^2$	...	$x_{2(3)}^m$	$x_{3(3)}^1$	$x_{3(3)}^2$	...	$x_{3(3)}^m$
4	$x_{1(3)}^1$	$x_{1(4)}^2$	...	$x_{1(4)}^m$	$x_{2(4)}^1$	$x_{2(4)}^2$	...	$x_{2(4)}^m$	$x_{3(4)}^1$	$x_{3(4)}^2$	...	$x_{3(4)}^m$
5	$x_{1(5)}^1$	$x_{1(5)}^2$	...	$x_{1(4)}^m$	$x_{2(5)}^1$	$x_{2(5)}^2$	...	$x_{2(5)}^m$	$x_{3(5)}^1$	$x_{3(5)}^2$	...	$x_{3(5)}^m$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	$x_{1(n)}^1$	$x_{1(n)}^2$	...	$x_{1(n)}^m$	$x_{2(n)}^1$	$x_{2(n)}^2$	...	$x_{2(n)}^m$	$x_{3(n)}^1$	$x_{3(5)}^2$	...	$x_{3(n)}^m$

Dengan nilai $j = 1, 2, \dots, m$ menunjukkan banyaknya *bearing* yang diukur/diamati dan n menunjukkan banyaknya pengamatan. Sehingga $x_{i(t)}^j$ menunjukkan pengukuran fitur ke i dari mesin ke j pada waktu ke t , dimana $t = 1, 2, \dots, n$.

Monotonicity dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$M = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|jumlah\ diff(x_i^j)\ positive - jumlah\ diff(x_i^j)\ negative|}{n-1} \quad (2.4)$$

Dengan $diff(x_{i(t-1)}^j)$ dirumuskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$diff(x_{i(t-1)}^j) = x_{i(t)}^j - x_{i(t-1)}^j \quad (2.5)$$

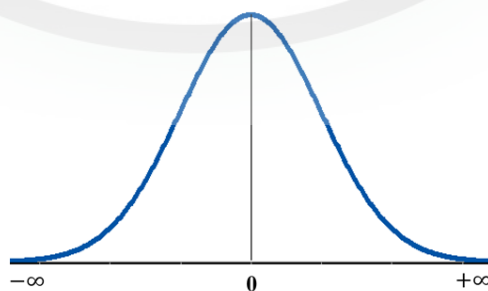
2.5 Distribusi Normal

Peubah acak x berdistribusi normal dengan rata-rata μ dan varians σ^2 , atau dalam bentuk notasi $x \sim N(\mu, \sigma^2)$, jika fungsi densitas dari peubah acak x berbentuk:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (2.6)$$

Dengan μ ($-\infty < \mu < +\infty$) dan $\sigma > 0$.

Distribusi normal memiliki nilai mean, median dan modus yang berhimpit atau sama serta memiliki kurva yang simetris. Gambaran kurva dari distribusi normal adalah sebagai berikut:



Gambar 2.8 Kurva Distribusi Normal

Misalkan x_1, x_2, \dots, x_n merupakan sampel acak dari distribusi $N(\mu, \sigma^2)$, maka penaksir kemungkinan maksimum bagi $\hat{\mu}$ dan $\hat{\sigma}^2$ tersebut adalah sebagai berikut:

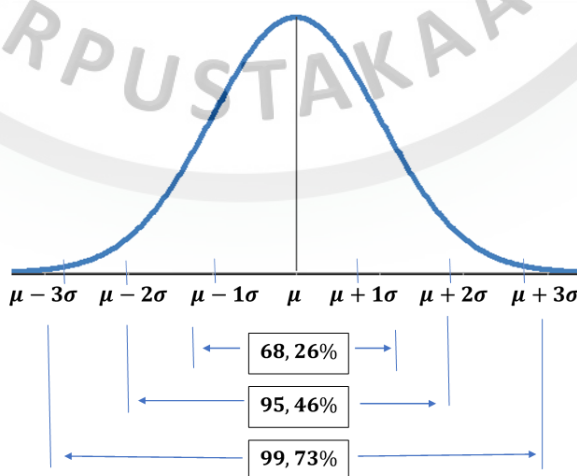
$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.7)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (2.8)$$

Sehingga $\hat{\sigma}$ adalah sebagai berikut:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.9)$$

Interpretasi dari standar deviasi menurut Montgomery (2013) dari distribusi normal diilustrasikan pada gambar 2.9. Kaitannya dengan SPC untuk data sinyal vibrasi yaitu, jika menginginkan peluang sinyal getaran berada dalam batas kontrol sebesar 68,26% maka $\hat{\mu} \pm 1\hat{\sigma}$ harus dipilih. Jika menginginkan peluang sinyal getaran berada dalam batas kontrol sebesar 95,46% maka $\hat{\mu} \pm 2\hat{\sigma}$ harus dipilih. Dan jika menginginkan peluang sinyal getaran berada dalam batas kontrol sebesar 99,73% maka $\hat{\mu} \pm 3\hat{\sigma}$ harus dipilih.



Gambar 2.9 Interpretasi dari standar deviasi menurut Montgomery

2.6 Uji Kecocokan Kolmogorov-Smirnov

Uji kecocokan adalah suatu pengujian hipotesis statistik yang digunakan untuk mengetahui apakah pengamatan x_1, x_2, \dots, x_n adalah realisasi dari suatu sampel acak yang berdistribusi teoritis tertentu dibawah hipotesis null (H_0) atau bukan. Salah satu uji kecocokan distribusi yang ada adalah uji Kolmogorov-Smirnov.

Menurut Siegel (1986), uji Kolmogorov-Smirnov adalah suatu uji *goodness-of-fit*. Artinya, yang diperhatikan adalah tingkat kesesuaian antara distribusi serangkaian harga sampel (skor yang diobservasi) dengan suatu distribusi teoritis tertentu. Tes ini menetapkan apakah skor-skor dalam sampel dapat secara masuk akal dianggap berasal dari suatu populasi dengan distribusi teoritis tertentu.

Singkatnya, tes ini mencakup perhitungan distribusi frekuensi kumulatif yang akan terjadi dibawah distribusi teoritisnya, serta membandingkan distribusi frekuensi itu dengan distribusi frekuensi kumulatif hasil observasi. Tes ini menetapkan suatu titik dimana kedua distribusi itu, yakni yang teoritis dan yang terobservasi memiliki perbedaan terbesar.

Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut:

H_0 : Data berasal dari suatu populasi yang berdistribusi teoritis tertentu.

H_1 : Data tidak berasal dari suatu populasi yang berdistribusi teoritis tertentu.

Nilai statistik Uji Kolmogorov Smirnov adalah:

$$KS = \text{maksimum } |F_0(X) - S_N(X)| \quad (2.10)$$

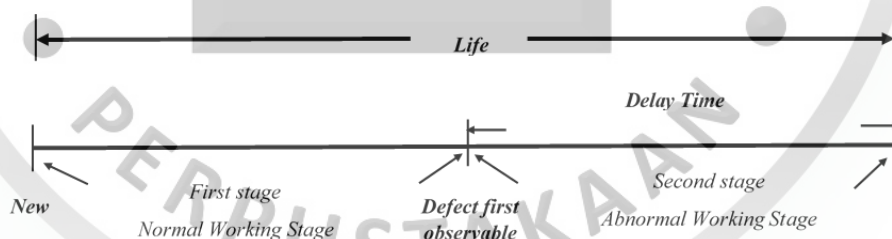
Dimana $F_0(X)$ adalah suatu fungsi distribusi frekuensi kumulatif teoritis dibawah H_0 dan $S_N(X)$ adalah distribusi kumulatif yang diobservasi dari suatu sampel *random* dengan N observasi.

Kriteria pengujian adalah tolak H_0 apabila nilai $KS >$ Nilai Tabel Kolmogorov-Smirnov. Dimana nilai tabel Kolmogorov-Smirnov terdapat pada lampiran 1.

2.7 SPC Untuk Data Vibrasi *Bearing*

2.7.1 Pendahuluan

Untuk mendeteksi *defect first observable* dengan menggunakan metode SPC yaitu digunakan konsep waktu tunda yang diperkenalkan oleh Christer dan Waller (1984) (dalam Wang dan Zang (2008)), bahwa menganggap proses kegagalan sebagai proses dua tahap. Dimana tahap pertama diawali sejak mulai beroperasi sampai ke titik deteksi *defect first observable* yang terdeteksi muncul. Dan tahap kedua (waktu tunda kegagalan) dari titik *defect first observable* yang terdeteksi muncul maju sampai kegagalan apabila tidak ada tindakan pemeliharaan yang diambil. Tahap pertama juga bisa disebut sebagai tahap kerja normal, dan tahap ke dua sebagai tahap kerja abnormal. Sehingga identifikasi *defect first observable* dari waktu tunda atau tahap kerja abnormal, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10, adalah penting karena dapat digunakan dalam model prediksi sisa umur untuk membantu pengambilan keputusan pemeliharaan, khususnya untuk pemantuan berbasis getaran (Wang, 2002 (dalam Wang dan Zang, 2008)).



Gambar 2.10 Konsep Waktu Tunda

2.7.2 *Shewhart Average Level Chart*

Menurut Wetherill dan Brown (1991) dalam Wang & Zhang (2008), data yang dianalisis untuk bagan kendali, harus bervariasi secara acak disekitar rata-rata yang ditetapkan. Kemudian untuk mendapatkan nilai batas-batas, pada *Shewhart average level chart* untuk diimplementasikan pada data *vibration bearing*, harus melibatkan data yang bekerja dalam tahap normal saja. Menurut Wang & Zhang (2008) ada dua

tahap metode untuk mengategorikan data dalam tahap normal. Satu adalah memilih bagian dari data sesuai dengan saran dari parah ahlinya dan yang kedua adalah memilihnya dengan mempelajari data itu sendiri.

Pada Wang & Zhang (2008) untuk menentukan data mana yang bekerja pada tahap normal, data tidak dipilih oleh ahli. Tetapi dengan menggunakan ambang batas sebagai acuan bahwa sinyal berada pada batas kontrol. Dimana ambang batas dipilih adalah angka 5. Karena tren pada umumnya diambil dengan cepat dari titik ini untuk semua kasus data dalam jurnal tersebut. Dimana batas ambang yang dipilih tersebut masih bersifat subyektif.

Kemudian pengimplementasian *Shewhart average level chart* untuk data sinyal vibrasi *bearing* dikontrol dengan garis *warning limit* dan *action limit*. Garis *warning limit* dan *action limit* dapat diperoleh dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Warning Limit} = \hat{\mu} \pm 2\hat{\sigma} \quad (2.11)$$

$$\text{Action Limit} = \hat{\mu} \pm 3\hat{\sigma} \quad (2.12)$$

Kriteria untuk mendeteksi *defect first observable* menurut Wang & Zhang (2008) yaitu jika; terdapat satu titik di luar garis *action limit* atau terdapat dua titik yang berturut-turut di luar garis *warning limit*.

2.7.3 Adaptive Shewhart Average Level Chart

Wang & Zhang (2008) melakukan pengembangan pada *Shewhart average level chart* untuk data sinyal vibrasi *bearing*. Karena menurut mereka kinerja yang dapat dicapai pada *Shewhart average level chart* terbatas. Karena asumsi bahwa proses kontinu dioperasikan dalam kondisi tertentu serta adanya asumsi data yang harus terdistribusi secara normal.

Berbeda dengan *Shewhart average level chart*, pada *adaptive Shewhart average level chart*, karena $\hat{\mu}$ dan $\hat{\sigma}$ dihitung pada setiap interval satuan waktunya, serta

warning limit dan *action limit* yang juga dihitung setiap interval satuan waktunya, maka kita akan mengetahui data mana yang berkerja didalam batas kontrol dan keluar dari batas kontrol. Sehingga tidak diperlukannya saran dari para ahli dan tidak perlu mempelajari terlebih dahulu data itu sendiri, atau menentukan batas ambang.

Gambaran dari struktur datanya adalah sebagai berikut pada tabel 2.2

Tabel 2.2 Struktur Data untuk Menghitung *Adaptive Shewhart Average Level Chart*

No.	Nomor <i>Bearing</i>				
	1	2	3	...	<i>m</i>
1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	x_{1m}
2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	x_{2m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<i>i</i>	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	...	x_{im}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<i>n</i>	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	...	x_{nm}

Dengan $h = 1, 2, \dots, i, \dots, n$ dimana h menunjukkan interval waktu dan $j = 1, 2, 3, \dots, m$ dimana m menunjukkan banyaknya *bearing*. Dan x_{hj} merupakan nilai ekstraksi fitur yang terbaca dari interval ke- h *bearing* ke- j .

Wang & Zhang (2008) menuliskan persamaan sebagai berikut, jika $\hat{\mu}_i$ merupakan rata-rata pada interval ke i untuk semua data sinyal vibrasi *bearing* yang bekerja pada tahap normal, maka $\hat{\mu}_i$ dapat didefinisikan sebagai:

$$\hat{\mu}_i = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^n x_{hj} \delta_{hj}}{\sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^n \delta_{hj}} \quad (2.13)$$

dengan:

$$\delta_{hj} = \begin{cases} 0 & \text{jika } \textit{bearing} \text{ ke } - j \text{ abnormal pada monitoring waktu ke } - h \\ 1 & \text{lainnya} \end{cases}$$

Dikatakan *abnormal* yaitu apabila nilai ekstraksi fitur *bearing* pada interval ke $i+1$ tidak tercakup pada *warning limit* dan *action limit* pada interval ke- i .

Dan jika $\hat{\sigma}_i$ merupakan simpangan baku pada interval ke i untuk semua data sinyal vibrasi *bearing* yang bekerja pada tahap normal, maka $\hat{\sigma}_i$ dapat didefinisikan sebagai:

$$\hat{\sigma}_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^n (x_{hj} - \hat{\mu}_i)^2 \delta_{hj}}{(\sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^n \delta_{hj}) - 1}} \quad (2.14)$$

dengan keterangan $\hat{\sigma}_i$ sama seperti $\hat{\mu}_i$ sebelumnya.

Kemudian *warning limit* dan *action limit* dapat diperoleh dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Warning Limit} = \hat{\mu}_i \pm 2\hat{\sigma}_i \quad (2.15)$$

$$\text{Action Limit} = \hat{\mu}_i \pm 3\hat{\sigma}_i \quad (2.16)$$

Perhitungan batas akan berhenti apabila ada salah satu kriteria yang terpenuhi diantara dua kriteria, dimana kriteria tersebut yaitu; terdapat satu titik di luar garis *action limit* atau terdapat dua titik yang berturut-turut di luar garis *warning limit*.