

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Angin merupakan massa udara yang bergerak secara horizontal maupun vertikal dengan kecepatan yang bervariasi serta dapat berfluktuasi secara dinamis. Faktor yang menyebabkan massa udara bergerak adalah adanya perbedaan tekanan udara, udara akan bergerak dari suatu daerah yang bertekanan tinggi menuju daerah yang bertekanan rendah. Sinar matahari merupakan faktor penyebab perbedaan tekanan udara, daerah yang cenderung terkena sinar matahari tentu akan bertemperatur lebih tinggi dibandingkan daerah yang minim terkena sinar matahari secara langsung.

Energi angin merupakan salah satu energi yang baik dan ramah lingkungan untuk dikonversikan menjadi energi listrik. Energi angin dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin. Namun dalam pemanfaatannya turbin angin memerlukan perawatan pada masing – masing elemennya, salah satu elemen terpenting yang memerlukan perawatan adalah bagian bantalan. Di dalam bantalan terdapat elemen-elemen yang berfungsi untuk menahan beban horizontal atau vertikal dari poros kincir angin. Selain menahan beban poros bantalan juga berfungsi untuk mengurangi gaya gesek akibat putaran poros sehingga poros dapat berputar dengan baik.

Bantalan memerlukan strategi monitoring yang tepat sehingga kerusakan yang terjadi dapat diidentifikasi secara cepat dan tepat, karena sebuah bantalan pada turbin angin mempunyai fungsi yang vital untuk mengurangi gesekan putaran poros sehingga energi listrik yang dihasilkan lebih maksimal. Salah satu metode yang sering diterapkan adalah *monitoring* menggunakan sinyal getaran *Principal Component Analysis*. Beberapa pengujian dengan menggunakan metode PCA pernah diterapkan untuk mendeteksi kerusakan pada bantalan .

Dong. S, dkk (2013), melakukan penelitian untuk mendeteksi kerusakan bantalan bola. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kerusakan bantalan bola menggunakan analisis getaran PCA. Data akuisisi getaran dilakukan pada bantalan bola SKF 6205-2 RS JEM dengan kecepatan putar motor 1797 rpm yang digerakan oleh 2 motor disetiap ujung porosnya. Terdapat 20 grup data untuk training dan 30 grup data untuk testing. Hasilnya dari penelitian yaitu sinyal getaran yang dilakukan menggunakan PCA akan muncul, sehingga lokasi relatif dari bantalan bola yang terdapat cacat akan diketahui.

Fathurrohman (2017) melakukan penelitian diagnosa kerusakan bantalan bola. Penelitian dilakukan pada rig uji bantalan dengan empat variasi kondisi bantalan bola, yaitu: cacat lintasan dalam, cacat pada bola, cacat lintasan luar, serta bantalan normal. Data sinyal didapatkan dari pengukuran sinyal getaran dengan frekuensi *sampling* 20 kHz pada putaran konstan 1400 rpm. Ekstraksi fitur dilakukan pada sinyal getaran domain waktu menggunakan beberapa fitur statistik, yaitu: *RMS*, *variance*, standar deviasi, *crest factor*, *shape factor*, *skewness*, dan *kurtosis*. Transformasi *PCA* diterapkan untuk memanfaatkan hasil ekstraksi dari parameter statistik tersebut. Klasifikasi *PCA* diselesaikan menggunakan perangkat lunak MATLAB 2016a akurasi model pelatihan didapatkan 97,5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode klasifikasi *PCA* mampu digunakan untuk diagnosis kerusakan pada bantalan bola.

Guifeng Jia, S. Y. a. C. T., (2011), melakukan penelitian tentang diagnosa kerusakan bantalan bola dengan *PCA* dan *MSVM*. Penelitian ini dilakukan pada bantalan bola seri 6205-2RS JEM SKF dengan kondisi normal dan cacat pada inner race. Ekstraksi fitur dilakukan dalam domain waktu dan domain frekuensi menggunakan beberapa fitur statistik, yaitu : *peak value*, *mean*, *standard deviation*, *sample variance*, *kurtosis*, *skewness*, *frekuensi*. *PCA* diterapkan untuk mereduksi data hasil ekstraksi fitur dan klasifikasi dilakukan dengan *MSVM*. Dari hasil pengujian didapat bahwa *PCA* dapat mereduksi data yang didapat tanpa

mengurangi informasi parameter aslinya sehingga PCA dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan bantalan bola.

Wang, F. dkk. (2015), melakukan penelitian klasifikasi kerusakan bantalan bola. Penelitian dilakukan pada bantalan bola dengan frekuensi sampling 24 kHz dengan variasi putaran poros pada *bearing* normal (1000, 2500, 4500 rpm) dan *bearing* cacat pada lintasan luar (2000, 3000, 4500 rpm). Ekstraksi dilakukan dalam domain waktu dan PCA dilakukan untuk mereduksi dan mengklarifikasi. Dari hasil pengujian PCA sangat efektif dalam mengklasifikasikan cacat pada bantalan bola dan analisis data. Klasifikasi lebih efektif jika pada putaran yang tinggi.

Pirra, M. dkk. (2011), melakukan penelitian mengenai deteksi kerusakan bantalan *gearbox*. Penelitian ini dilakukan pada bantalan cacat pada lintasan dalam dengan variasi putaran 18000, 24000, 30000 rpm. Metode PCA diterapkan untuk mereduksi dan mengklasifikasi dengan menggunakan beberapa fitur ekstraksi statistik. Hasilnya, PCA dapat mendeteksi bantalan yang cacat dengan benar sesuai dengan kerusakan bantalan yang telah ditetapkan. Metode ini mampu mendeteksi dan mengklarifikasi tingkat kesalahan yang berbeda secara benar dan melokalisirnya.

Dari beberapa penelitian tersebut maka dapat disimpulkan bahwa analisis deteksi dini bantalan bola menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) dapat mereduksi dan mengklasifikasi kerusakan bantalan bola. Pada umumnya input yang digunakan oleh PCA adalah parameter statistik. Banyak penelitian yang memilih variasi parameter statistik tersebut. Beberapa diantaranya ditunjukkan pada tabel 2. 1.

Tabel 2. 1 Parameter Fitur ekstraksi Statistik

Referensi	Objek	Tipe Kerusakan	Teknik	Fitur	Ekstraksi
Malhi, A. dan R.X. Gao, (2004)	Bantalan bola	Deteksi pada <i>inner race</i> , <i>outer race</i>	Domain waktu, domain	Minimal, <i>RMS</i> , <i>standard deviation</i> ,	<i>PCA</i> , <i>neural network</i>

Referensi	Objek	Tipe Kerusakan	Teknik	Fitur	Ekstraksi
			frekuensi, <i>wavelet</i>	CRF, IMF, <i>kurtosis</i>	
Shuang dan Meng (2007)	<i>Rolling bearing</i>	Cacat bantalan pada <i>inner race</i> , <i>outer race</i>	Domain waktu	<i>Peak value</i> , <i>mean</i> , <i>standard deviation</i> , <i>sample variance</i> , <i>kurtosis</i> , <i>skewness</i>	<i>PCA</i> , <i>SVM</i>
Sakthivel, N.R., dkk. (2010),	Pompa sentrifugal	Cacat bantalan, <i>impeller</i> , cacat <i>seal</i> , dan kavitasi	Analisis domain waktu	<i>Standard deviation</i> , <i>standard error</i> , <i>mean</i> , <i>median</i> , <i>variance</i> , <i>skewness</i> , <i>kurtosis</i> , <i>range</i> , <i>minimum</i> , <i>maximum</i> , <i>sum</i>	<i>PCA</i> , <i>C4.5 decision tree</i> , <i>bayes net</i> dan <i>naive bayes</i>
Guifeng Jia, S. Y. a. C. T., (2011).)	Bantalan bola	Deteksi <i>inner race</i> , <i>outer race</i> , dan elemen bola	Analisis domain time-frekuensi	<i>Peak value</i> , <i>mean</i> , <i>standard deviation</i> , <i>sample variance</i> , <i>kurtosis</i> , <i>skewness</i> , <i>frequency 1</i>	<i>PCA</i> , <i>multi-class SVM</i> , <i>FFT</i>
Pirra, M. dkk. (2011)	<i>Roll bearing</i>	Kerusakan <i>inner race</i> , <i>elemen roll</i>	Domain waktu	<i>Absolute mean</i> , <i>RMS</i> , <i>maksimum peak value</i>	<i>PCA</i>

Referensi	Objek	Tipe Kerusakan	Teknik	Fitur	Ekstraksi
Xi, J., dkk. (2013)	Bantalan bola	Deteksi pada elemen bola, <i>inner race</i> , <i>outer race</i>	Domain waktu dan domain waktu-frekuensi	<i>Mean value</i> , <i>kurtosis</i> , <i>wavelet packet energy spectrum</i>	<i>PCA</i> , <i>neural network</i>
Pudyastuti, dkk (2016)	bantalan bola	Deteksi cacat <i>inner race</i> , <i>outer race</i> , dan elemen bola	Domain waktu	<i>Mean</i> , <i>Root Mean Square (RMS)</i> , <i>Shape Factor (SP)</i> , <i>Skewness (c3)</i> , <i>Curtosis (c4)</i> , <i>Crest Factor</i> , <i>Estimation</i> , <i>Error</i> , <i>Histogram Upper</i> , <i>Histogram Lower</i> , <i>Root Mean Square Frequency (RMSF)</i> , <i>Frequency Center (FC)</i> , <i>Root Variance Frequency (RVF)</i> , <i>Auto Regression (Ar) 2</i> , <i>Ar 3</i> , <i>Ar 4</i> , <i>Ar 5</i> , <i>Ar 6</i> , <i>Ar 7</i> , <i>Ar 8</i> , <i>Ar 9</i>	<i>PCA</i> , <i>wavelet</i> , <i>naive bayes</i>
Yao, X. dkk. (2017).	Cacat pada bantalan	<i>Inner race</i> , <i>outer race</i>	Domain waktu dan	<i>Variance</i> , <i>kurtosis</i> , <i>mean</i> , <i>standard</i>	<i>PCA</i> , <i>wavelet tranform</i> , <i>FFT</i> ,

Referensi	Objek	Tipe Kerusakan	Teknik	Fitur	Ekstraksi
			domain frekuensi	<i>deviation, skewness, peak, median, RMS, crest faktor, K factor</i>	<i>neural network</i>

Dari tabel 2.1 dapat terdapat banyak fitur ekstraksi statistik yang dapat diterapkan dalam metode *principal component analysis* (PCA). Dari penelitian sebelumnya fitur ekstraksi statistik yang sering digunakan dan terbukti dapat digunakan secara efektif yaitu : *Standard Deviation, Root Mean Square (RMS), kurtosis, skewness, Peak Value, Variance, Crest Factor*.

2.2 Turbin Angin

2.2.1 Angin

Angin merupakan udara yang bergerak karena adanya perbedaan tekanan antara satu tempat dengan tempat lain. Angin akan bergerak dari daerah yang mempunyai tekanan tinggi ke daerah yang mempunyai tekanan yang lebih rendah. Perbedaan tekanan di tiap daerah bisa diakibatkan karena adanya perbedaan penerimaan sinar radiasi dari matahari. Adanya perbedaan suhu tersebut menyebabkan perbedaan tekanan, akhirnya menimbulkan gerakan udara (Habibie, M. N., dkk, 2011). Kecepatan angin juga dipengaruhi oleh ketinggian dan letak suatu tempat. Apabila letak suatu tempat berada dekat dengan garis katulistiwa, maka kecepatan angin akan lebih cepat dibandingkan dengan tempat yang berada lebih jauh dari garis khatulistiwa. Begitu juga dengan ketinggiannya, semakin tinggi suatu tempat, maka angin yang berhembus juga akan semakin cepat. Hal tersebut disebabkan oleh semakin tinggi suatu tempat, maka gaya gesekan yang dipengaruhi oleh permukaan bumi yang tidak datar akan semakin kecil.

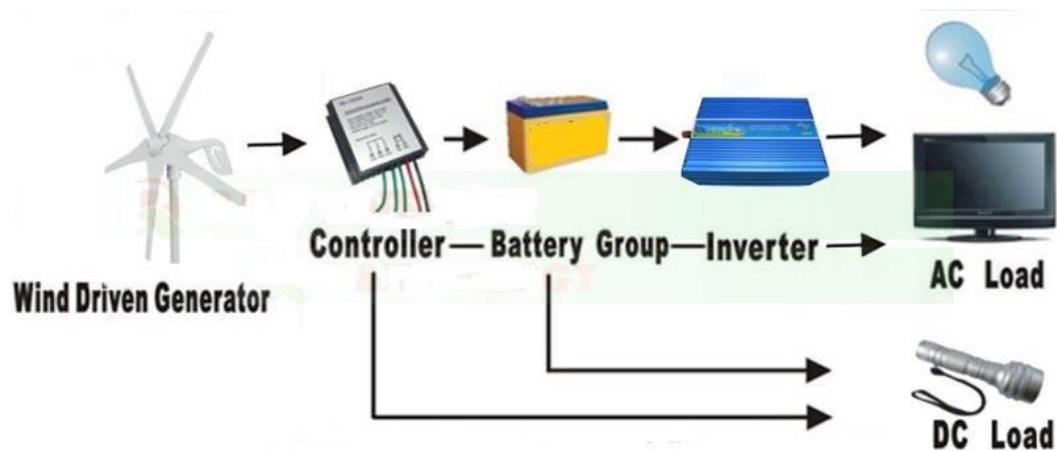
2.2.2 Turbin Angin Tipe Horizontal

Turbin angin pada awalnya dibuat untuk memenuhi kebutuhan para petani dalam melakukan kegiatan seperti irigasi, penggilingan gandum dan lain-lain. Turbin angin dahulu banyak dibangun di negara-negara eropa yang lebih dikenal dengan *windmill*. Pada saat ini kincir angin lebih banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Kincir angin merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi gerak yang disebabkan oleh tiupan angin. Energi gerak yang berupa putaran selanjutnya akan diteruskan oleh poros untuk menggerakkan generator sehingga energi gerak berubah menjadi energi listrik.

Cara kerja pembangkit listrik tenaga angin ini terjadi dikarenakan tiupan angin yang memutar baling-baling turbin angin. Prinsip kerja turbin angin merupakan kebalikan dari kipas angin. Kipas angin memanfaatkan energi listrik untuk menghasilkan angin, sedangkan turbin angin digunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Tiupan angin akan memutar sudu turbin, lalu diteruskan untuk memutar generator di bagian belakang kincir angin. Generator berfungsi untuk mengubah energi gerak menjadi energi listrik dengan teori medan elektromagnetik, poros pada generator di pasang dengan material ferromagnetik permanen. Pada sekeliling poros terdapat stator yang berupa kumparan-kumparan kawat tembaga yang membentuk *loop*. Ketika poros generator berputar maka akan terjadi perubahan tegangan pada stator yang menghasilkan tegangan dan arus listrik.

2.2.3 Prinsip Kerja Turbin Angin Tipe Horizontal

Pada dasarnya turbin digunakan untuk mengubah energi potensial dari angin untuk dijadikan energi mekanik poros, yang berasal dari rotor dan diteruskan menuju generator untuk diubah menjadi energi listrik. Dalam prinsip kerjanya suatu turbin angin bergantung pada kecepatan angin yang berhembus serta bergantung pada komponen yang ada pada turbin tersebut, seperti ; bentuk dan ukuran *blade*, daya putar generator, roda gigi dll.

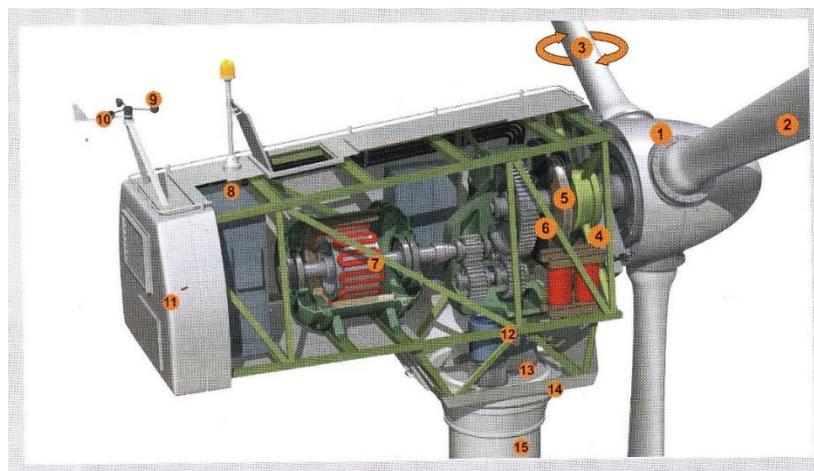


Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Turbin Angin Horizontal Axis (Nawawi I, 2016)

Prinsip kerja kincir angin berdasarkan Gambar 2. 1 angin yang berhembus menuju baling-baling turbin sehingga akan menggerakkan poros yang menuju ke generator, selanjutnya generator yang bergerak akan menghasilkan energi listrik yang siap dimanfaatkan tau disimpan kedalam baterai.

2.2.4 Komponen Turbin Angin Tipe Horizontal

Kincir angin/turbin angin sumbu horizontal mempunyai beberapa komponen sehingga dapat bekerja secara maksimal dan menghasilkan energi listrik. Komponen tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. 2 :



Gambar 2. 2 Komponen Turbin Angin Sumbu Horizontal (Burton, 2001)

1. Rotor

Rotor merupakan bagian utama dari turbin angin yang nampak dari luar. Bagian rotor ini mencakup beberapa komponen lain, yaitu baling-baling dan juga pengatur sudut baling-baling.

2. Baling-baling

Komponen ini bagian terlihat paling jelas dalam turbin angin. fungsi utama baling-baling adalah menangkap energi angin yang melewatinya, dan mentransfer energi gerak ini menjadi gerak putaran melalui poros.

3. Pengatur sudut baling-baling (*Pitch control*)

Turbin angin didesain untuk bekerja secara optimal pada kecepatan angin tertentu. Bila angin bertiup pada kecepatan rendah maka kincir angin tidak akan bekerja dengan rendah, begitu sebaliknya pada saat angin berhembus dengan kecepatan terlalu tinggi maka akan merusak konstruksi pada turbin angin. Oleh karena itu kecepatan putar baling-baling perlu dikontrol dengan menggunakan *pitch control*. *Pitch control* sendiri didesain untuk memenuhi tugas tersebut. Apabila angin yang berhembus dengan kecepatan rendah maka baling-baling akan diputar sehingga berada pada sudut tegak lurus terhadap arah datangnya angin. sebaliknya, jika angin yang berhembus dengan kecepatan tinggi maka baling-baling akan diputar dengan sudut lebih kecil dari 90^0 sehingga tenaga angin sebagian akan berkurang.

4. Rem/*break*

Rem dalam turbin angin ini berfungsi untuk menghentikan putaran turbin. Biasanya penghentian kinerja turbin dilakukan pada saat perawatan dan pada saat penggantian komponen yang rusak. Selain fungsi diatas rem juga digunakan untuk mengurangi kekuatan putaran apabila *pitch control* tidak lagi mengontrol putaran baling-baling sehingga perlu adanya bantuan dari rem.

5. Poros

Poros merupakan komponen penting yang berfungsi untuk mentransfer tenaga dari baling-baling menuju generator. Poros pertama yang berhubungan dengan baling-baling berputar dengan kecepatan rendah. Hal ini didesain agar baling-baling tidak mudah rusak. Meskipun demikian, untuk membangkitkan listrik perlu adanya putaran yang tinggi agar dapat menggerakkan generator sehingga dihubungkan menggunakan roda gigi untuk mengubah kecepatan putaran.

6. Roda gigi

Roda gigi merupakan perangkat yang bekerja untuk mengubah kecepatan rotasi dari kecepatan rendah menjadi kecepatan tinggi, atau sebaliknya sesuai dengan yang diperlukan. Perubahan kecepatan ini terjadi berdasarkan perbedaan ukuran diameter dari roda gigi yang berputar.

7. Dinamo generator

Tenaga rotasi dari baling-baling yang ditiup oleh angin akan ditransfer menuju ke sebuah alat yang dapat mengkonversi energi gerak menjadi energi listrik. Konversi listrik ini merupakan fungsi dari generator listrik atau dinamo yang dipasang dalam turbin angin.

8. Kontrol elektronik

Kontrol elektronik ini merupakan salah satu bagian yang penting untuk menghindari turbin angin dari kerusakan. Alat kontrol ini akan mulai mengizinkan sistem untuk bekerja apabila angin yang bertiup pada kecepatan sesuai dengan keinginan yang telah ditetapkan.

9. *Anemometer*

Anemometer merupakan alat yang mampu mengukur kecepatan angin. *Anemometer* ini akan memberikan sinyal ke sistem kontrol apabila ada kondisi yang perlu diperhatikan, terutama apabila angin bertiup terlalu kencang dan mulai membahayakan turbin angin.

10. Pendeteksi arah angin/*wind vane*

Alat yang terpasang pada bagian turbin angin ini adalah untuk mengirimkan sinyal data kepada sistem kontrol untuk memberikan data berkaitan dengan arah tiupan angin pada saat tersebut. Sesuai data dari *wind vane* sistem pengontrol selanjutnya mengirim perintah kepada *yaw drive* untuk memutar arah rotor baling-baling agar bergerak mengikuti arah angin yang tertiup guna memaksimalkan tenaga angin yang ditangkap oleh baling-baling.

11. Pengungkung sistem/*nacelle*

Nacelle merupakan komponen yang berfungsi untuk melindungi komponen lain yang berada di dalamnya. *Nacelle* ini biasanya terbuat dari komposit sebagai bahan utamanya. Bahan ini dipilih karena kekuatannya serta bobotnya yang ringan. Selain itu bahan ini tahan terhadap serangan kimiawi karena kondisi cuaca seperti panas, hujan, dan salju.

12. Poros pemutar dinamo

Putaran rotasi rotor yang berkecepatan rendah dikonversikan menjadi putaran dengan RPM tinggi dengan memanfaatkan roda gigi. Putaran tinggi ini ditransfer ke generator melalui sebuah poros yang berputar dengan kecepatan yang sudah diatur hingga kecepatan ideal untuk generator yang digunakan.

13. Pemutar arah rotor/*yaw drive*

Turbin angin bekerja dengan maksimal apabila dapat menangkap angin secara maksimal. Untuk menangkap kecepatan angin secara maksimal maka bagian depan dari sebuah baling-baling harus menghadap tegak lurus dengan arah angin, oleh karena itu diperlukan adanya *yaw drive* yang berfungsi untuk hal tersebut. *Yaw drive* bekerja dengan memanfaatkan sinyal yang didapat dari *wind vane* yang dikontrol oleh perangkat elektronik.

14. Motor penggerak *yaw drive*

Turbin angin kapasitas besar dalam memutar *nacelle* dan rotor cukup berat sehingga *yaw drive* ini dioperasikan dengan bantuan motor penggerak listrik atau dengan hidrolik.

15. Struktur penyangga turbin

Menara penyangga dari sebuah turbin angin merupakan struktur yang akan menyangga seluruh berat dari komponen turbin angin. komponen ini dibuat dengan material yang kuat tetapi ringan karena untuk menahan tekanan angin bahkan dari faktor alam yang kemungkinan akan terjadi, seperti gempa bumi, badai, atau terjadi kebakaran pada komponen yang lainnya.

2.2.5 Turbin Angin Tipe Vertikal

Turbin angin vertikal memiliki bilah yang memanjang dari atas ke bawah. Turbin angin vertikal rata-rata memiliki ketinggian 100 meter dengan lebar 50 kaki, Dengan sumbu vertikal. generator dan komponen lainnya dapat diletakkan pada permukaan tanah, sehingga *maintenance* lebih mudah. Dibandingkan dengan turbin angin poros horizontal, turbin angin jenis ini memiliki kecepatan yang lambat, sehingga energi angin yang dibutuhkan pun lebih rendah. Contoh turbin angin tipe vertikal dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Turbin angin tipe vertikal

<http://dwitaariyanti.blogspot.co.id>

Kekurangan turbin angin poros vertikal

- a. Memiliki penurunan efisiensi. Jika di bandingkan dengan turbin angin poros horizontal, turbin angin poros vertikal memiliki penurunan efisiensi. Hal ini di sebabkan adanya hambatan tambahan yang dimiliki sebagai pisau memutar ke arah angin.
- b. Memiliki kecepatan angin yang rendah, dikarenakan turbin angin poros vertikal memiliki rotor yang terletak pada permukaan tanah.

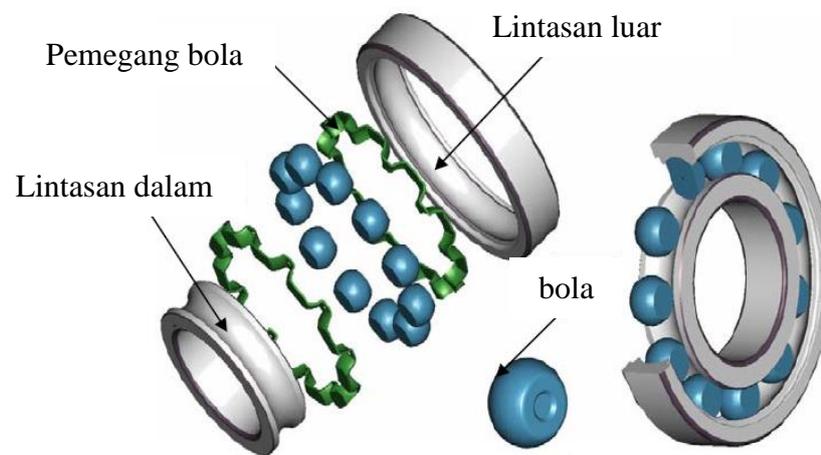
Kelebihan turbin angin poros vertikal

- a. Turbin angin vertikal tidak banyak memerlukan perawatan, sehingga akan lebih menghemat biaya.
- b. Turbin angin vertikal membutuhkan kecepatan angin yang rendah sehingga dapat digunakan pada daerah yang memiliki tekanan angin rendah.
- c. Turbin angin vertikal tidak perlu di arahkan ke arah angin.

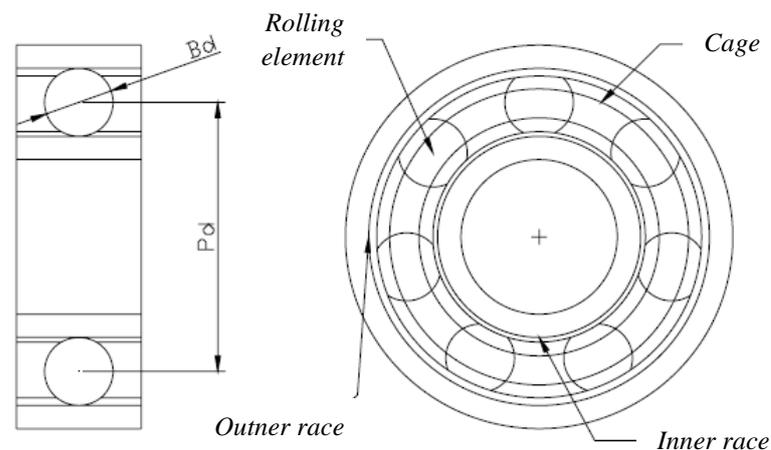
2.3 Kerusakan Bantalan

2.3.1 Dfinisi Bantalan Bola

Bantalan sebagai pendukung gerakan poros sangat besar perannya dalam operasi kerja suatu mesin. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa setiap desain kincir angin mempunyai spesifikasi dalam bentuk dan posisi masing-masing komponen. Demikian juga dengan bantalan, yang banyak sekali jenis kincir angin meletakkan bantalan pada berbagai posisi yal ini disesuaikan dengan fungsi utama bantalan yaitu untuk mendukung gerakan relatif poros. Bantalan digunakan untuk mendukung gerakan relatif diantara komponen mesin dan memungkinkan berbagai posisi pada masing-masing komponen tersebut. *Rolling bearing* atau bantalan gelinding adalah salah satu jenis bantalan yang memungkinkan gerakan relatif secara radial pada sumbu geraknya. Elemennya terdiri dari bola, pemisah atau pemegang bola, lintasan dalam, lintasan luar seperti Gambar 2. 3 dan Gambar 2. 4.

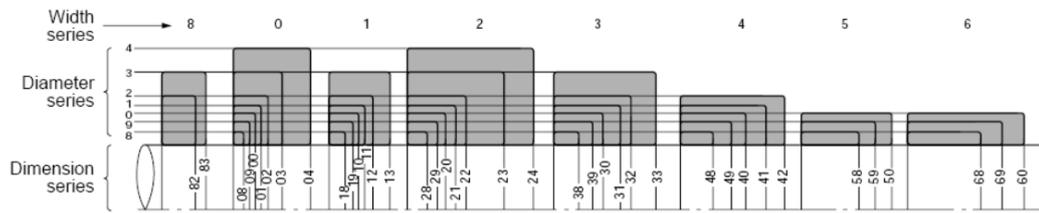


Gambar 2. 4 Elemen Bantalan Gelinding (Aji K, 2007).



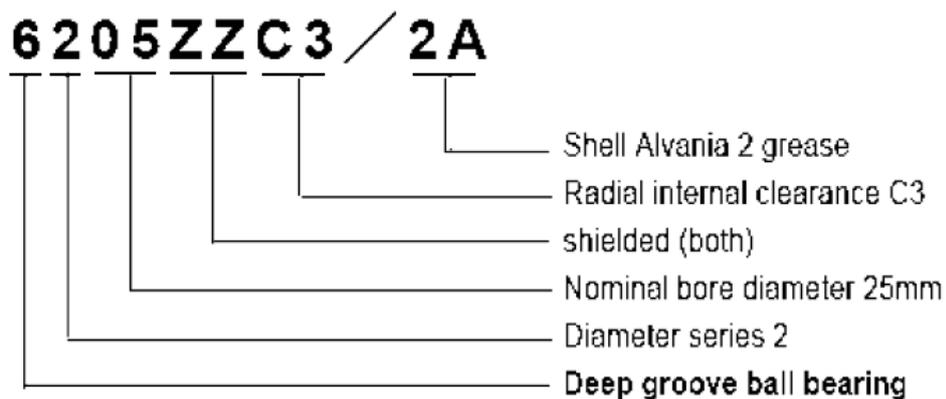
Gambar 2. 5 Sket Bantalan Bola Gelinding (Suhardjono. 2005).

Material bola pada umumnya menggunakan material paduan kromium dengan baja karbon tinggi dengan perlakuan proses pengerasan baja. Untuk pemisah digunakan material jenis baja karbon rendah dengan proses *stamping*. Bantalan gelinding dibuat dengan berbagai jenis dan ukuran. Bantalan satu baris radial misalnya, dibuat dengan 4 seri, yaitu *extra light*, *light*, *medium light* dan *heavy*. Seri *heavy* ditunjukkan dengan angka 400.



Gambar 2. 6 Seri Bantalan Gelinding NTN (Aji K, 2007).

Sebagian pabrik manufaktur menggunakan penomoran dan melakukan penentuan bahwa 2 digit terakhir dikali 5 menunjukkan ukuran *bore* atau diameter dalam dalam satuan mm. Digit ketiga dari kanan menunjukkan nomor seri bantalan.



Gambar 2. 7 Nomor Seri Bantalan Bola (Aji K, 2007)

Cara membaca seri bantalan bola yang terdapat pada Gambar 2.7 misal bantalan dengan seri 6305 berarti bantalan tersebut adalah jenis bantalan untuk beban medium 3 dengan ukuran diameter dalam 25 mm , diameter luar 60 mm dan merupakan jenis *deep groove ballbearing*. Digit lainnya merupakan tambahan dari masing-masing manufaktur untuk nomor katalog. Bantalan bola juga mempunyai beberapa jenis, diantaranya yaitu : *single row groove ball bearing*, *double row self ball bearing*, *single row angular contact ball bearings*, *double row contact ball bearings*, *double row barrel roller bearing*, dll.

2.3.2 *Double Row Self Aligning Ball Bearings*

Bantalan ini termasuk ke dalam bantalan bola gelinding. Pada bantalan gelinding terjadi gesekan gelinding antara bagian yang berputar dengan yang diam melalui elemen gelinding seperti bola, rol atau rol jarum, dan rol bulat. Bantalan gelinding menggunakan *rolling* untuk mengurangi gesekan antara dua buah komponen yang bergerak. Perbedaan *Double Row Aligning Self Ball Bearings* dengan bantalan bola jenis lainnya yaitu, pada *Double Row Aligning Self Ball Bearings* mempunyai duabaris bola. Bola yang terdapat pada bantalan mempunyai alur sendiri-sendiri pada cincin bagian dalamnya. Pada umumnya mempunyai cincin pada bagian luarnya. Cincin bagian bantalan ini mampu bergerak sendiri menyesuaikan posisinya. Inilah kelebihan bantalan *Double Row Self Ball Bearings* digunakan untuk mengatasi masalah poros yang tidak sebaris.



Gambar 2. 8 *Double row self aligning ball bearings*

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

2.3.3 Jenis Kerusakan Bantalan Bola

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

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

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

$$\text{BPFI} = \frac{Nb}{2} \times fr \times \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

Nb : Jumlah bola

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

Bd : Diameter bola (mm)

Pd : Diameter *pitch*

A : sudut kontak (derajat)

b. Kerusakan Lokal pada Lintasan Luar (*Outer Race*)

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

$$\text{BPFO} = \frac{Nb}{2} \times fr \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \dots\dots\dots (2.2)$$

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

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

$$\text{BSF} = \frac{Nb}{2Bd} \times fr \times \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right)^2\right) \dots\dots\dots (2.3)$$

2.3.4 Penyebab Kerusakan Bantalan Bola

Penggunaan bantalan yang tidak sesuai dengan perancangan akan mempercepat pemakaian umur bearing bahkan mengakibatkan kerusakan. Beberapa penyebab kerusakan bantalan diantaranya adalah keretakan bantalan, keausan, pemasangan yang tidak sesuai, pelumasan yang tidak cocok, kerusakan dalam pembuatan komponen, diameter bola yang tidak sama. Pada bantalan ideal, besarnya gaya kontak sama pada setiap bola dan pada setiap posisi bola. Bila pada setiap bola terdapat kerusakan maka besarnya gaya kontak tidak lagi seragam hal ini akan mengakibatkan kerusakan. Pada kincir angin bantalan sering rusak diakibatkan karena keadaan kecepatan angin yang sering berubah-ubah. Di Indonesia sendiri kincir dirancang dengan kecepatan angin rendah sehingga pada saat angin berhembus dengan kecepatan tinggi akan menambah beban yang diterima bantalan sehingga bantalan akan cepat rusak.

2.3.5 Kerugian dari Kerusakan Bantalan

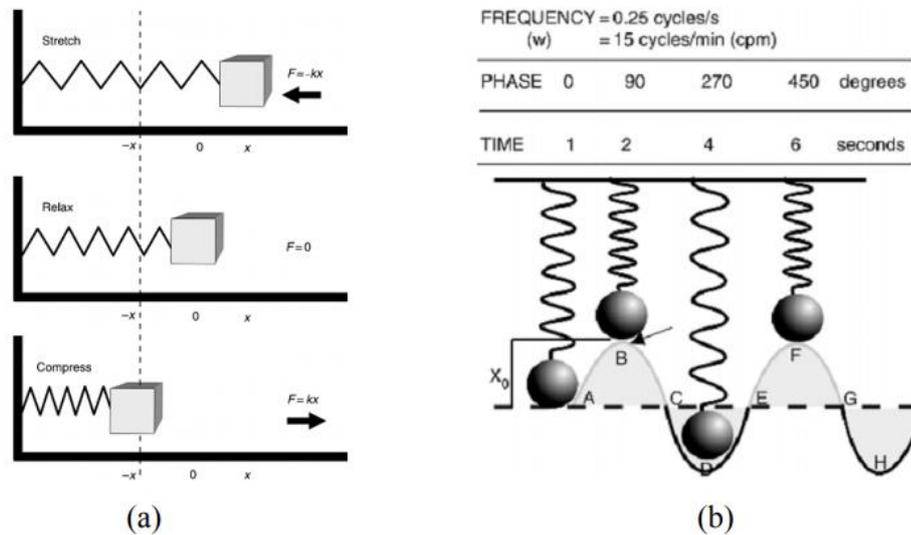
Bantalan merupakan komponen penting dalam pemesinan terutama pemesinan yang menggunakan gerak rotasi. Bantalan yang rusak akan mengakibatkan menurunnya kinerja dari suatu pemesinan bahkan dapat mengakibatkan suatu mesin berhenti total. Hal ini dapat mengakibatkan pembengkakkan biaya perawatan serta pengurangan jumlah produksi. Di dalam turbin angin sendiri bantalan yang rusak akan mengurangi jumlah energi listrik yang diproduksi karena kurang lancarnya energi yang ditransfer dari baling-baling melalui poros. Selain berkurangnya jumlah energi listrik yang dihasilkan, kerusakan bantalan juga menghasilkan getaran yang besar sehingga dapat memperparah kerusakan bantalan bola itu sendiri. Kerusakan bantalan yang parah dapat berpengaruh pada poros yang nanti menjadi *unbalance*, poros yang *unbalance* bisa berpengaruh ke transmisi dan juga baling-baling turbin angin.

2.4 Deteksi Kerusakan Bantalan dengan Sinyal Getaran

Dasar dari diadakannya pemeliharaan (*maintenance*) dalam segala jenis bidang usaha adalah untuk menyediakan kapasitas yang dibutuhkan untuk produksi pada pengeluaran terendah. Hal ini dapat dianggap sebagai fungsi realibilitas, bukan sebagai fungsi perbaikan (Beebe 2004:1). Dari hal tersebut maka pada bab ini akan menjelaskan tentang bagaimana deteksi cacat bantalan dilakukan dengan menjelaskan bagaimana dasar getaran, penanganan dan alat yang digunakan.

2.4.1 Dasar Getaran

Secara natural pada setiap benda yang bergerak akan menghasilkan getaran. Menurut Scheffer and Girdhar (2004), getaran merupakan hasil dari pergerakan suatu mesin atau komponen-komponennya yang bergerak mundur dan maju dari posisi mulanya. Pada setiap permesinan terdapat tiga sifat mendasar; massa (M), kekakuan (k) dan redaman (C) yang saling terkait untuk menentukan bagaimana mesin akan beraksi terhadap kekuatan yang menyebabkan getaran. Seperti halnya pada Gambar 2.9 dengan menerapkan gaya F ke massa, massa bergerak ke kiri, menekan pegas. Ketika massa dilepaskan, massa akan bergerak kembali ke posisi netralnya dan kemudian bergerak lebih jauh ke kanan sampai ketegangan k pegas menghentikan massa. Massa kemudian berbalik dan mulai bergerak ke kiri lagi. Gerakan ini secara teoritis dapat terus berlanjut tanpa henti jika tidak ada redaman C dalam sistem dan tidak ada efek eksternal seperti gesekan.



Gambar 2. 9 (a) Dasar Getaran; (b) plotting getaran terhadap gelombang (Scheffer dan Girdhar 2004)

Berdasarkan pada dasar dari getaran, dengan membandingkan getaran terhadap waktu maka karakteristik dari getaran dapat diketahui. Pada Gambar 2.9 (b) merupakan penggambaran gelombang getaran dari pergerakan bandul, seperti halnya pada Gambar 2.9 (a) gerak masa dari posisi netralnya disebabkan oleh adanya gaya dan pembebanan massa mengakibatkan pergerakan naik dan turun bandul mencapai batas atas dan batas bawahnya menghasilkan sebuah bentuk gelombang. Ketika bandul kembali pada posisi mulanya maka dapat dikatakan sebagai satu periode getaran/gelombang. Ketika pergerakan kembali berulang maka akan menghasilkan gerak harmonik. Hubungan antara perpindahan massa terhadap waktu dapat dirumuskan pada persamaan berikut

$$X = X_0 \sin \omega t \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan: X = perpindahan terhadap waktu t ; Xo = perpindahan maksimum ; $\omega = 2 \pi f$; dimana f = frekuensi (radian/detik – hertz – Hz) ; t = waktu (detik).

Pada saat massa bergerak naik dan turun menghasilkan kecepatan dan percepatan. Kecepatan yang dihasilkan berubah dari nol sampai dengan nilai

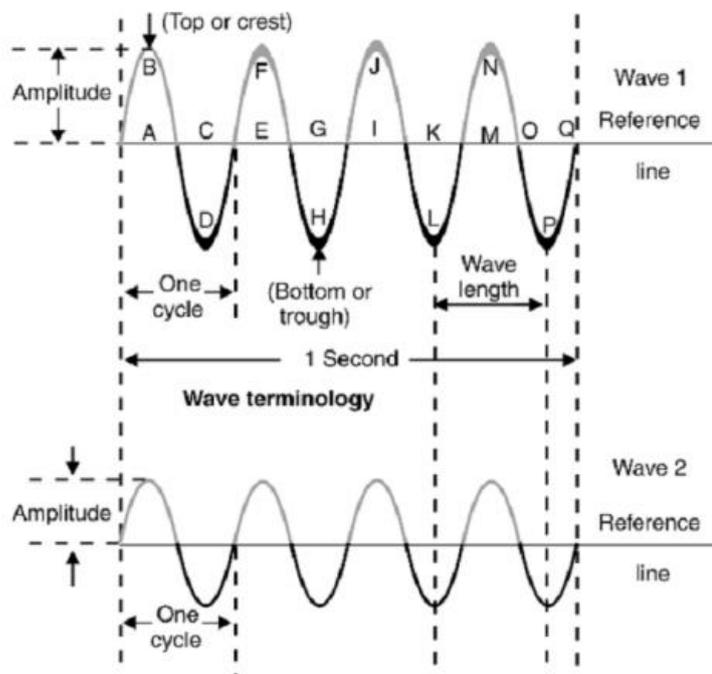
puncaknya. Kecepatan didapat dengan deferensi waktu terhadap perpindahan yang dapat dirumuskan dengan persamaan

$$kecepatan = \frac{dx}{dt} = X_0 \cdot \omega \cos \omega t \dots\dots\dots (2.5)$$

Percepatan didapat dari mendiferensikan persamaan dari kecepatan

$$percepatan = \frac{d(kecepatan)}{dt} = X_0 \cdot \omega \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots (2.6)$$

Adapun perambatan gelombang yang dihasilkan oleh komponen mesin mempunyai ciri yang berbeda-beda. Dari beberapa ciri tersebut terdapat beberapa parameter untuk digunakan dalam menganalisis kerusakan. Adapun parameter tersebut seperti Gambar 2. 10 berupa banyak gelombang, frekuensi, panjang gelombang dan tinggi gelombang.



Gambar 2. 10 Perbandingan gelombang pada amplitudo yang berbeda (Scheffer dan Girdhar 2004)

2.4.2 *Condition Based Monitoring*

Sebagai bagian dari teknik perawatan pada *preventif maintenance*, pemantauan berbasis kondisi (*condition based monitoring/CBM*) secara umum dapat diartikan sebagai tindakan yang dilakukan untuk mengambil keputusan dan aksi dengan tujuan untuk menghindari munculnya kerusakan atau dapat mengurangi kesempatan terjadinya kerusakan (Beebe 2004). Menurut Isermann (2011) *condition monitoring* atau juga biasa disebut *automatic supervision* digunakan untuk pemeriksaan batas (*limit checking*) dari beberapa variabel pada peralatan yang saat ini identifikasi dan metode estimasi telah terintegrasi dengan kecerdasan komputer dalam mengolah data. Oleh karenanya, disebutkan bahwa mungkin metode ini merupakan metode deteksi kesalahan dan diagnosis terdepan yang dapat digunakan dalam mendeteksi kerusakan yang kecil sejak awal munculnya dan mendiagnosa asal-usul mereka. Adapun keuntungan dari menggunakan metode ini sebagai berikut:

1. Meningkatkan reliabilitas dan ketersediaan dari mesin.
2. Perbaikan keamanan
3. Deteksi dan diagnosis kesalahan
4. Pengawasan dari proses
5. Proses pengawasan berdasarkan perawatan dan perbaikan
6. Kontrol kualitas dalam produk rakitan dibidang manufaktur
7. *Teleservices* seperti deteksi kerusakan dan diagnosis dari jarak jauh
8. Dasar pengelolaan kekayaan dan kerusakan
9. Dasar untuk sistem toleransi kesalahan dan pengaturan ulang.

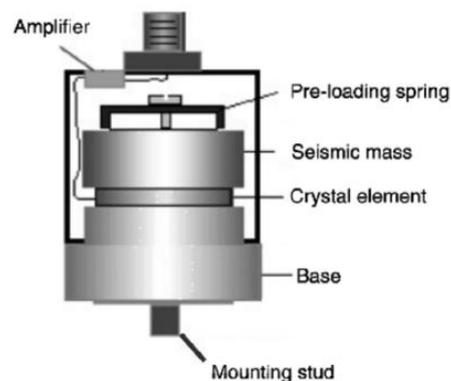
Terdapat banyak teknik yang tersedia dalam aplikasi dari CBM diantaranya yaitu: analisis pemantauan getaran, inspeksi visual dan *non-destructive test*, analisa pemantauan performansi dan lainnya. Dari sekian teknik tersebut, analisis pemantauan getaran merupakan teknik yang paling banyak diketahui dan paling banyak digunakan (Beebe 2004). Metode ini tidak diragukan lagi merupakan teknik yang paling efektif dalam mendeteksi kerusakan pada permesinan rotasional (Scheffer dan Girdhar 2004).

2.4.3 Sensor Getaran

Dalam mengukur suatu getaran sebuah pemersinan, sebuah *transducer* digunakan untuk mengambil data getaran dan sebagai *input* dari pengolahan data getaran. *Transducer* merupakan sebuah perangkat yang mengkonversi energi sebuah getaran kedalam jenis energi yang berbeda yang biasanya kedalam bentuk arus listrik. *Transducer* memiliki beberapa jenis sesuai dengan kebutuhan yang akan digunakan, salah satu yang paling sering digunakan adalah *accelerometer transducer*. Beberapa alat banyak yang digunakan untuk mengukur getaran adalah sebagai berikut.

a. Accelerometer

Accelerometer merupakan *transducer* yang paling sering digunakan karena mudah dalam penggunaan, kompak, dan ringan dengan jangkauan frekuensi yang lebar (Scheffer and Girdhar 2004). Berdasarkan gambar umumnya bagian dari *accelerometer* mempunyai elemen kristal (*crystal element*) yang berguna untuk menghasilkan arus listrik yang dihasilkan oleh adanya tekanan dari beban seismik terhadap getaran (Moheimani dan Fleming 2006).



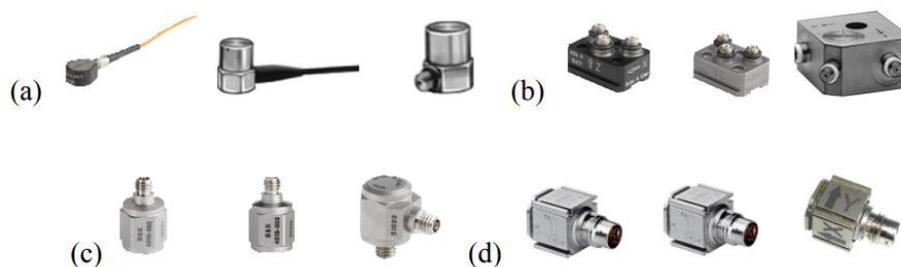
Gambar 2. 11 Accelerometer (Scheffer dan Girdhar 2004)

Elemen kristal yang digunakan *pada accelerometer* biasanya menggunakan piezoelectric (terbuat dari material *ferroelectric* seperti *zirkonat*, *titanat* dan *barium titanat*). Pada saat *accelerometer* digunakan pada getaran, massa (seismic mass) akan memberikan gaya yang beragam pada kristal *piezoelectric* yang sebanding dengan percepatan getaran. Dari percepatan getaran tersebut

kemudian diukur kedalam satuan *Pico-coulumb* per *g* (pC/g) dimana *g* merupakan percepatan gravitasi.

b. *Piezoelectric accelerometer*

Piezoelectric accelerometer merupakan jenis yang paling umum digunakan dalam mengukur getaran. Hal ini dikarenakan *transduser* ini mempunyai keunggulan dimana mempunyai jangkauan yang sangat besar, jangkauan frekuensi yang luas, tanpa *input* daya, stabilitas tinggi, ringan dan dapat di pasang pada segala orientasi. Untuk memaksimalkan kerja dari *accelerometer* maka dikembangkan *accelerometer* untuk pengukuran khusus, yaitu seperti pada gambar merupakan beberapa tipe sensor yang ada dipasaran.



Gambar 2. 12 Accelerometer jenis (a) *Uniaxial charge*, (b) *Triaxial charge*, (c) *uniaxial* (d) *Triaxial* (Brüel & Kjær, 2009)

Accelerometer jenis *uniaxial charge* dan *triaxial charge* seperti pada Gambar 2. 12 (a) dan (b) di atas sering kali digunakan untuk mengukur jenis frekuensi tinggi pada struktur dan benda. Sedangkan pada Gambar 2. 12 (c) dan (d), jenis *accelerometer* yang didesain untuk pengukuran getaran yang dapat dilakukan dengan mudah. Bedanya *accelerometer* jenis *uniaxial* dan *triaxial* terletak pada jumlah arah (*axis*) pembacaan getaran pada satu waktu. *Uniaxial* mempunyai satu *axis* sedangkan *triaxial* mempunyai tiga *axis*.

c. Pemasangan *accelerometer*

Pemasangan *accelerometer* mempunyai beberapa metode, ada 4 metode utama yang dapat digunakan dalam pemasangan sensor (Scheffer dan Girdhar 2004). Metode tersebut yaitu :

1. Metode *stud/bolt mounting* merupakan metode yang baik digunakan untuk pemasangan permanen. Metode ini, memungkinkan pengguna transducer untuk mengukur suatu getaran dalam idealnya dan dari posisi mana saja yang memungkinkan.
2. Metode pemasangan perekat memberikan pemasangan yang aman tanpa adanya langkah yang terlalu intensif seperti penyekrupan/baut. Kelemahan dari penggunaan metode ini yaitu menyebabkan respon frekuensi operasi atau akurasi dari pengukuran menjadi sedikit berkurang.
3. Metode pemasangan dengan magnet, biasanya digunakan untuk pengukuran berjangka dengan alat pengolahan data *portable*. Metode ini tidak disarankan untuk pengukuran data permanen karena kemungkinan besar *transducer* berpindah atau bergeser sehingga menyebabkan akurasi dari pengukuran tidak akurat.
4. Metode pemasangan *portable* dengan magnet pada transducer

Dalam pemasangan sebuah sensor, hal yang harus diperhatikan adalah kebersihan dari suatu objek yang akan dipasang serta bebas dari pelapisan. Permukaan sensor harus kontak langsung pada permukaan mesin atau objek serta permukaan kontak atau objek harus lebih besar dibanding permukaan sensor.

d. Sensitivitas

Accelerometer yang digunakan dalam condition monitoring biasanya didesain dengan sensitivitas 100 mV/g. Tipe lainnya dari *accelerometer* dengan sensitivitas yang lebih besar digunakan dalam aplikasi khusus seperti analisis *structural* dan pengukuran *geophysical*. *Accelerometer* untuk penggunaan frekuensi yang sangat tinggi maupun untuk permesinan dengan kecepatan rendah juga tersedia.

e. Jangkauan frekuensi

Accelerometer dirancang guna mengukur getaran pada rentang frekuensi tertentu. Pemilihan *accelerometer* biasanya digunakan setelah rentang frekuensi yang ada pada permesinan telah diketahui. Pada umumnya, *accelerometer* yang

digunakan dalam mengukur getaran permesinan yang mempunyai jangkauan frekuensi dari 1 atau 2 Hz sampai dengan 8 atau 10 kHz.

2.4.4 Teknik Akusisi Data

Pada sub-bab sebelumnya dijelaskan tentang bagaimana dasar dari getaran serta aplikasi yang dapat digunakan dalam melakukan pemantauan keadaan dengan menggunakan getaran. Dari hal tersebut maka pada sub-bab ini menjelaskan tentang bagaimana langkah yang dapat digunakan dalam melakukan pengambilan data getaran serta penjelasan tentang teori sampling dalam pengambilan data.

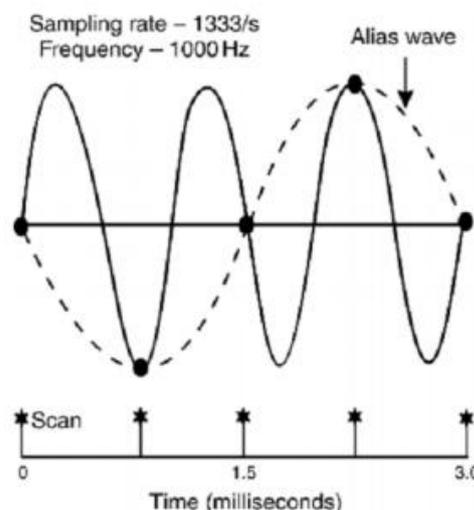
a. Data Akusisi

Dalam menggunakan perangkat sensor getaran, diperlukan sebuah perangkat yang digunakan untuk menangani kinerja dari sensor tersebut. Perangkat ini disebut dengan akusisi data (*data acquisition/DAQ*). Pada saat sensor bekerja, *impuls* listrik dihasilkan yang kemudian diterima oleh akusisi data untuk diteruskan ke media penyimpanan berupa perangkat komputer. Selain sensor getaran, akusisi data juga dapat digunakan untuk jenis sensor-sensor lainnya untuk mendukung analisis.

b. Dalil Sampling

Dalil sampling dalam pengambilan data pertama kali diperkenalkan oleh Nyquist pada tahun 1928 dalam penelitiannya. Sampling merupakan proses dari perekaman amplitudo getaran yang didapat secara instan yang menghasilkan kurva dari poin atau titik perekaman. Data perekaman digunakan untuk merekonstruksi ulang gelombang yang awalnya dari bentuk analog menjadi data digital agar dapat diolah melalui perangkat pemrograman. Bentuk dari rekonstruksi data digital ini mempunyai bentuk yang sama dari generasi gelombang yang sesungguhnya. Dalam mendapatkan hasil rekonstruksi gelombang yang sesungguhnya maka perlu untuk mengetahui seberapa cepat perekaman data yang dilakukan. Hal tersebut dapat dilakukan dengan memahami dalil sampling yang dikemukakan oleh Nyquist dimana dalilnya menyatakan 'Agar kita tidak kehilangan informasi yang terkandung dalam sinyal sampel, maka kita harus melakukan sampel pada frekuensi paling tidak

dua kali lebih besar dari frekuensi tertinggi dari komponen' (Scheffer and Girdhar 2004). Pada Gambar menunjukkan contoh dari rekonstruksi dari data getaran dimana kecepatan sampel kurang dari dua kali frekuensi gelombang.



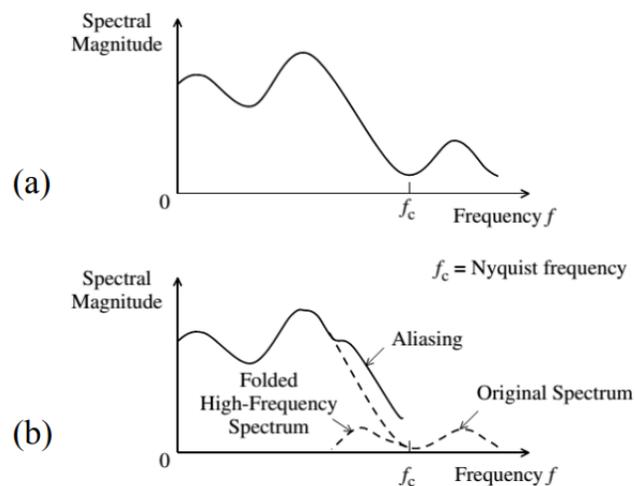
Gambar 2. 13 Gelombang dari rendahnya kecepatan sampel (Scheffer and Girdhar 2004)

Berdasarkan Gambar 2. 13 terlihat bahwa empat interval yang dikumpulkan dalam waktu 3 mili detik menghasilkan rekonstruksi gelombang (bertitik) pada gambar. Gelombang ini memiliki frekuensi yang lebih rendah dan tidak mempresentasikan gelombang yang sesungguhnya. Fenomena yang dihasilkan oleh rendahnya kecepatan sampling ini disebut dengan distorsi benda (*aliasing*).

c. *Aliasing*

Pada saat aplikasi getaran dilakukan terkadang diperlukan untuk merekonstruksi sinyal ke dalam bentuk spektrum *Fourier*. Seperti yang terlihat pada Gambar 2. 14 bahwa rendahnya kecepatan *sampling* kurang dari dua kali *frekuensi Nyquist* dapat menyebabkan tidak lengkapnya informasi yang ingin didapat. Walaupun sebenarnya dari perangkat pengambilan dan pengolahan data dapat secara otomatis dapat menentukan kecepatan perekaman untuk menghindari aliasing. Namun, dalam keadaan nyata hal ini tidak dapat dipastikan dalam praktiknya. Pada spektrum analisis seperti pada Gambar 2. 14

, efek dari *aliasing* dapat menyebabkan tertutupnya (*folded*) informasi yang sebenarnya pada data. Dari Gambar 2. 14 (a) menunjukkan contoh spektrum original yang didapat dengan frekuensi sampel dua kali lebih besar dari *frekuensi Nyquist* (f_c) sebesar 1000Hz. Sedangkan pada Gambar 2. 14 (b) merupakan spektrum yang didapat dengan frekuensi kurang dari f_c .

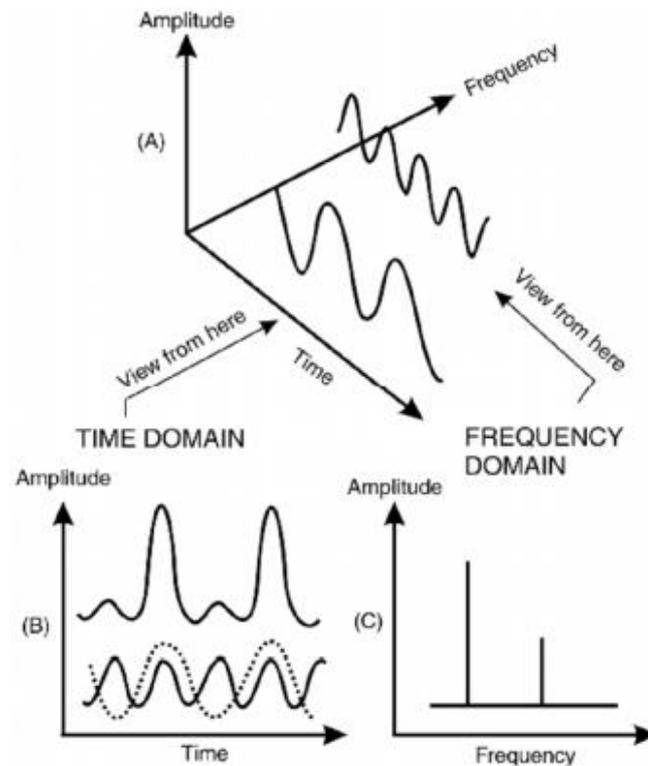


Gambar 2. 14 Aliasing pada spektrum (a) Spektrum original, (b) Distorsi spektrum karena aliasing (De Silva dkk. 2005).

Agar data yang dihasilkan tidak terpotong karena adanya aliasing maka sebaiknya nilai $2 \cdot f_c$ lebih besar dari pada yang ditentukan. Lebihnya nilai dari pada f_c tidak akan menghasilkan informasi baru pada sinyal.

2.4.5 Pengolahan Sinyal Getaran dalam *Condition Monitoring*

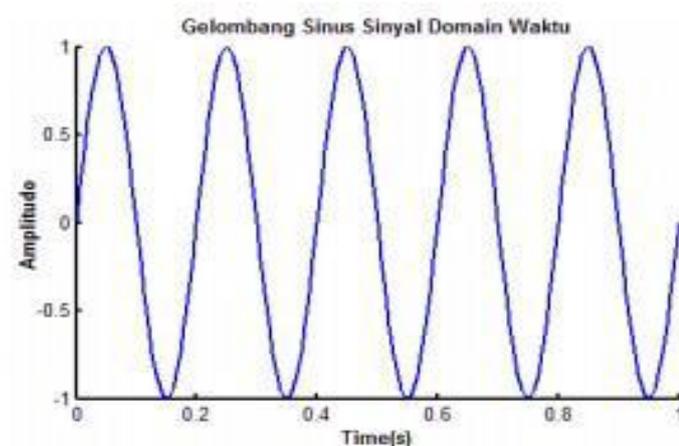
Condition Monitoring yang berguna pada permesinan dan mempunyai diagnosis kerusakan yang berguna sering kali bergantung pada metode pengolahan sinyal yang sesuai. Metode ini biasanya terbagi menjadi analisis berdasarkan domain waktu (*time domain*) dan domain frekuensi (*frequency domain*). Berdasarkan pada Gambar 2. 15 plotting sinyal getaran terhadap domain waktu mempunyai hubungan dengan domain frekuensi dimana tinggi yang dimiliki oleh gelombang pada getaran akan diplot berdasarkan tiap frekuensi yang dimiliki gelombang.



Gambar 2. 15 Hubungan antara domain waktu dan frekuensi (Scheffer and Girdhar 2004)

a. Domai Waktu

Domain waktu dari sinyal merupakan data rekaman energi yang terkandung dalam sinyal seperti halnya sinyal getaran dan cenderung didominasi oleh elemenelemen yang paling berisik (Thobiani et al. 2011). Berdasarkan pada Gambar 2. 16 merupakan tipikal *ploting* data getaran pada domain waktu yang biasanya berupa nilai dari ketinggian gelombang (*amplitudo*) terhadap waktu atau kadang juga disebut nilai puncak (*peak*) terhadap waktu.



Gambar 2. 16 Tipikal domain waktu (Lyons, 1997)

Dapat dilihat bahwa pola gelombang yang dihasilkan mempunyai kerapatan yang tinggi dan tidak teratur. Hal ini dikarenakan dalam keadaan natural, getaran yang dihasilkan oleh permesinan dihasilkan dan berkembang oleh tiap karakteristik komponen permesinan. Sehingga dalam grafik gelombang yang dihasilkan akan mempunyai frekuensi yang beragam dari tiap komponen pada sinyal domain waktu.

b. Domain Frekuensi

Berbagai macam sinyal yang amplitudonya bervariasi akan berpengaruh pada domain frekuensi yang dimiliki. Seperti pada Gambar dapat dilihat bahwa plotting sinyal getaran pada domain frekuensi berasal dari individual gelombang yang ada pada domain waktu. Terdapat banyak metode yang dapat digunakan dalam *ploting* data deret waktu getaran menjadi domain frekuensi diantaranya yang paling umum dan banyak direkomendasikan adalah dengan menggunakan perhitungan *fourier transform*. Pada *fourier transform*, sebuah sinyal domain waktu dapat diubah menjadi domain frekuensi dengan menjabarkan energi yang terkandung pada sinyal sebagai fungsi dari frekuensi. Keuntungan dari domain frekuensi adalah sinyal yang yang dihasilkan dapat menganalisa kerusakan komponen secara individual (Thobiani dkk. 2011).

2.5 Analisis Sinyal Getaran dengan Metode PCA (*principal component analysis*)

2.5.1 Definisi PCA (*Principal Component Analysis*)

Diagnosis akurat untuk mesin yang kompleks membutuhkan multi sensor untuk memperoleh informasi kondisi terperinci, sehingga menghasilkan data hasil pengukuran dalam jumlah yang besar. Banyaknya pengukuran dan fitur yang dihitung dapat berimbas pada masalah kecepatan dalam proses mengolah data dan kapasitas penyimpanannya (Pudyastuti, D., dkk. 2016).

Salah satu metode untuk mereduksi fitur adalah dengan menggunakan PCA atau *Principal Components Analysis* yang bertujuan mengurangi dimensi data dengan mempertahankan sebanyak mungkin informasi dari dataset yang asli sehingga semakin sedikit data algoritma data mining akan semakin cepat dan akurasi menjadi lebih tinggi. PCA merupakan salah satu teknik statistik yang secara linier mentransformasikan sekelompok variabel data asli menjadi sekelompok variabel data substansial yang tidak berkorelasi.

PCA bisa dipandang sebagai metode klasik dari metode-metode analisis statistik multi variabel untuk memperoleh matrik yang tereduksi dimensinya. Karena adanya fakta bahwa sekumpulan data variabel yang tidak berkorelasi dengan dimensi yang lebih kecil lebih mudah dipahami dan digunakan untuk analisa lebih jauh lagi dibandingkan data yang berdimensi lebih besar, maka teknik kompresi data ini banyak dipakai untuk analisa klaster, visualisasi dari data dimensi tinggi, regresi, kompresi data, dan pengenalan pola.

2.5.2 Perhitungan *Principal Component Analysis (PCA)*

Penyelesaian dengan *PCA* seringkali cukup hanya dengan beberapa *principal component (PC)* untuk menjelaskan struktur data asli. Jika data dalam dimensi asli sulit untuk direpresentasikan melalui grafik, maka dengan dua *PC* atau satu *PC* bisa dicitrakan melalui grafik (Santosa 2007). Misalkan terdapat data dengan susunan sebagai berikut:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \dots\dots\dots 2.7$$

atau dalam bentuk kolom seperti berikut,

$$\mathbf{X} = (\mathbf{w}_1 \mathbf{w}_2 \cdots \mathbf{w}_j \cdots \mathbf{w}_n)$$

Row vector \mathbf{x}_i mewakili semua pengukuran variabel pada waktu tertentu, sementara vektor kolom \mathbf{w}_j merepresentasikan satu pengukuran variabel selama waktu eksperimen.

Secara umum, karena besaran dan skala yang berbeda dari variabel, matriks \mathbf{X} perlu diskalakan sebelum diproses lebih lanjut. Salah satu teknik penskalaan adalah penskalaan otomatis yang menskalakan kembali data asli untuk memiliki rata-rata 0 dan varians 1 dengan mengubah *column vector* \mathbf{w}_j seperti berikut,

$$\mu_{w_j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}, \dots\dots\dots 2.8$$

$$\sigma_{w_j} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \mu_{w_j})^2}, \dots\dots\dots 2.9$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_{w_j}}{\sigma_{w_j}}, \dots\dots\dots 2.10$$

Di mana μ_{w_j} mewakili mean dan σ_{w_j} menunjukkan standar deviasi dari variabel w_j sedangkan x_{ij} adalah titik data yang diubah ke $\mu_{w_j} = 0$ dan $\sigma_{w_j} = 1$.

Matriks *covariance* \mathbf{X} kemudian didefinisikan sebagai berikut,

$$\mathbf{C}_x = \frac{1}{m-1} \mathbf{X}^T \mathbf{X}$$

yang dapat ditulis sebagai berikut,

$$C_x = \frac{1}{m-1} \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1^T \mathbf{w}_1 & \mathbf{w}_1^T \mathbf{w}_2 & \cdots & \mathbf{w}_1^T \mathbf{w}_j & \cdots & \mathbf{w}_1^T \mathbf{w}_n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{w}_j^T \mathbf{w}_1 & \mathbf{w}_j^T \mathbf{w}_2 & \cdots & \mathbf{w}_j^T \mathbf{w}_j & \cdots & \mathbf{w}_j^T \mathbf{w}_n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{w}_n^T \mathbf{w}_1 & \mathbf{w}_n^T \mathbf{w}_2 & \cdots & \mathbf{w}_n^T \mathbf{w}_j & \cdots & \mathbf{w}_n^T \mathbf{w}_n \end{pmatrix} \dots\dots\dots 2.11$$

Matriks *covariance* \mathbf{X} adalah matriks persegi dan simetris dengan ukuran $n \times n$. Matriks ini mengkuantifikasi jumlah hubungan linear antara semua kombinasi dari dua variabel dalam kumpulan data. Istilah-istilah dalam diagonal utama matriks \mathbf{X} adalah varians dari variabel-variabel yang terkait, sementara itu *covariance* antara semua kombinasi dua variabel berada dalam istilah di luar-diagonal. Varians nya didefinisikan sebagai berikut,

$$\sigma_{\mathbf{w}_j}^2 = \frac{1}{m-1} \mathbf{w}_j^T \mathbf{w}_j, \dots\dots\dots 2.12$$

yang dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\sigma_{\mathbf{w}_j}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m x_{ij}^2$$

sedangkan *covariance* dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\sigma_{\mathbf{w}_j, \mathbf{w}_k}^2 = \frac{1}{m-1} \mathbf{w}_j^T \mathbf{w}_k, \quad j \neq k, \dots\dots\dots 2.13$$

dapat ditulis sebagai berikut,

$$\sigma_{\mathbf{w}_j, \mathbf{w}_k}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m X_{ij} X_{ik}$$

Secara umum, nilai varians yang lebih besar menunjukkan informasi yang lebih penting yang terkandung dalam variabel, sementara nilai-nilai kovarian besar

mewakili redundansi tinggi antara dua variabel dalam kumpulan data (Kamiel, 2015). Matriks \mathbf{X} terdiri dari n dimensi ruang dengan n basis basis ortonormal. *PCA* berusaha mengubah vektor x_1 menjadi basis ortonormal yang berbeda yang dapat mengungkapkan fitur tersembunyi.

PCA mendekomposisi matriks \mathbf{X} ke dalam matriks skor \mathbf{T} dan matriks pemuatan \mathbf{P} melalui dekomposisi nilai singular (SVD) sebagai berikut,

$$\mathbf{X} = \mathbf{t}_1\mathbf{p}_1^T + \mathbf{t}_2\mathbf{p}_2^T + \dots + \mathbf{t}_n\mathbf{p}_n^T, \dots\dots\dots 2.14$$

dapat ditulis sebagai berikut,

$$\mathbf{X} = \mathbf{TP}^T,$$

dimana $\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ mewakili vektor eigen dari matriks \mathbf{c}_x dan \mathbf{P} menunjukkan matriks *PC*. Vektor $\mathbf{t}_i \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ adalah proyeksi dari data asli ke vektor \mathbf{p}_i dan \mathbf{T} mewakili matriks skor dari *principal component*. Setiap vektor eigen \mathbf{p}_i sesuai dengan nilai eigen λ_i yang mewakili varian dari vektor \mathbf{t}_i .

Matriks \mathbf{P} adalah matriks transformasi yang memiliki vektor eigen di kolomnya, yaitu,

$$\mathbf{P} = (\mathbf{p}_1 \dots \mathbf{p}_2 \mathbf{p}_j \dots \mathbf{p}_n), \dots\dots\dots 2.15$$

dan memenuhi properti eigenvalue-eigenvector,

$$\mathbf{C}_x\mathbf{P} = \mathbf{P}\Lambda \dots\dots\dots 2.16$$

$$\text{dimana } \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix} (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0)$$

adalah matriks diagonal yang memiliki eigenvalues yang positif dari yang terbesar hingga yang terkecil.

Matriks transformasi dapat digunakan untuk mengubah data asli menjadi ruang baru yang secara matematis didefinisikan sebagai berikut,

$$\mathbf{T} = \mathbf{XP} \dots\dots\dots 2.17$$

Lebih detailnya sebagai berikut,

$$(\mathbf{t}_1 \mathbf{t}_2 \dots \mathbf{t}_j \dots \mathbf{t}_n) = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} \times (\mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2 \dots \mathbf{p}_j \dots \mathbf{p}_n) \quad 2.18$$

Setiap kolom matriks \mathbf{T} kemudian dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\mathbf{t}_j = \mathbf{Xp}_j, \dots\dots\dots 2.19$$

dan varians dari vektor \mathbf{t}_j dapat dihitung sebagai berikut,

$$\sigma_{\mathbf{t}_j}^2 = \frac{1}{m-1} \mathbf{t}_j^T \mathbf{t}_j = \frac{1}{m-1} (\mathbf{Xp}_j)^T (\mathbf{Xp}_j), \dots\dots\dots 2.20$$

atau bisa ditulis sebagai berikut,

$$\sigma_{\mathbf{t}_j}^2 = \mathbf{p}_j^T \mathbf{C}_X \mathbf{p}_j = \lambda_j \dots\dots\dots 2.21$$

sementara kovariannya nol, karenanya,

$$\sigma_{\mathbf{t}_j \mathbf{t}_k}^2 = \frac{1}{m-1} \mathbf{t}_j^T \mathbf{t}_k = \frac{1}{m-1} (\mathbf{Xp}_j)^T (\mathbf{Xp}_k), \dots\dots\dots 2.22$$

dan menjadi,

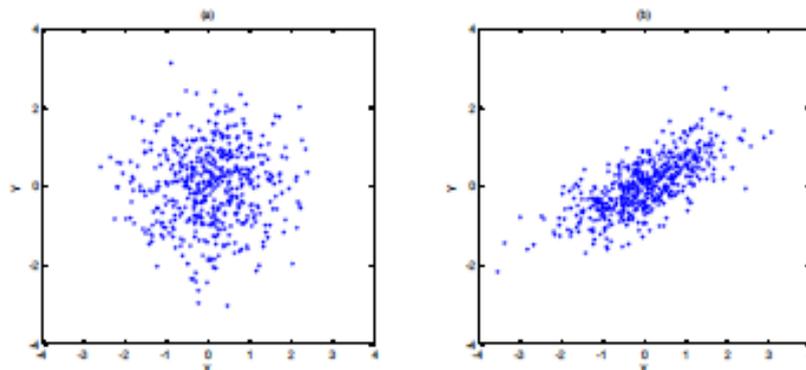
$$\sigma_{t_j t_k}^2 = \mathbf{p}_j^T \mathbf{C}_X \mathbf{p}_k = \lambda_j \mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_k = 0 \dots \dots \dots 2.23$$

Proyeksi data asli ke PC menghasilkan skormatriks \mathbf{T} yang memiliki vektor kolom tidak berkorelasi. Setiap vektor kolom menjelaskan variabel dalam satu set orientasi baru yang variasinya sesuai dengan nilai eigen dari matriks \mathbf{C}_X .

Vektor kolom \mathbf{p}_j dalam pemuatan matriks \mathbf{P} berhubungan dengan vektor eigen dari matriks \mathbf{C}_X yang disortir dalam urutan terendah berdasarkan nilai eigennya. Vektor \mathbf{p}_j dengan nilai eigen tertinggi menyampaikan jumlah informasi terbesar dalam dataset. Secara geometris, matriks data \mathbf{X} diproyeksikan melalui eigenvector \mathbf{p}_j dan menghasilkanvektor \mathbf{t}_j dari matriks skor \mathbf{T} .

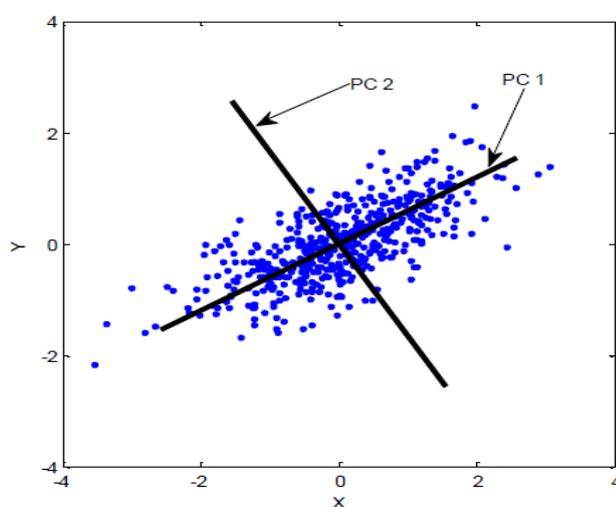
Matriks data yang diubah \mathbf{T} mewakili representasi baru dari dokumen data asli dalam orientasi set baru. Beberapa PC yang tidak berkorelasi memiliki variasi paling penting dengan demikian menyimpan informasi paling penting dalam data.

Contoh aplikasi PCA dijelaskan di sini menggunakan data buatan yang memiliki korelasi signifikan. Plot dua dimensi (X dan Y axis) buatan ditunjukkan pada Gambar 2.17. Pada Gambar 2.17 (a), kumpulan data tidak berkorelasi, tetapi pada gambar kedua (b), secara signifikan berkorelasi.

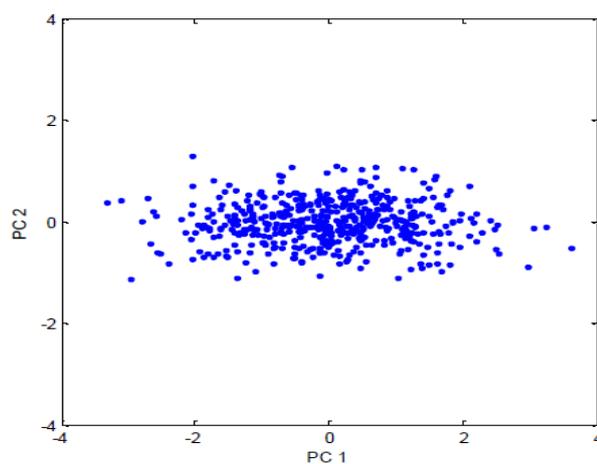


Gambar 2. 17 Dua dimensi data buatan, (a) tidak berkorelasi, (b) berkorelasi (Kamiel, 2015)

Hasil yang diharapkan dari langkah di atas adalah terciptanya koordinat baru atau yang disebut dengan *principal component*. Sumbu-sumbu koordinat baru ini nantinya harus orthogonal (saling tegak lurus) karena mengandung informasi variabel yang tidak saling berkorelasi. Dapat dilihat pada gambar 2.18 *plotting principal component*, PC1 dan PC2. Dari kedua principal komponen yang terpilih, kemudian dilakukan transformasi dengan PC1 dan PC2 sebagai sumbu koordinat baru yang ditunjukkan pada gambar 2.18.



Gambar 2. 18 Plot principal component, PC1 dan PC2 (Kamiel, 2015)



Gambar 2. 19 Data yang ditransformasikan pada 2 *principal component* (Kamiel, 2015)

2.5.2 Parameter Statistik

Ekstraksi fitur statistik biasanya dilakukan karena merupakan bagian dari analisis data. Analisis data merupakan salah satu metode yang penting dalam memonitor dan mendiagnosis suatu kerusakan, dimana tujuan dari analisis data adalah menemukan perubahan yang paling sederhana dan efektif dari data sinyal yang masih asli.

Ekstraksi fitur melibatkan transformasi linier atau non linier dari ruang fitur asli ke dalam dimensi baru yang lebih kecil. Ekstraksi fitur juga tidak mengurangi dimensi dari vektor yang diumpankan ke sistem klasifikasi, sedangkan seleksi fitur biasanya mengurangi jumlah fitur asli dengan memilih subset dari fitur tersebut, sehingga seleksi fitur masih mempertahankan cukup informasi untuk proses klasifikasi (Niu dkk., 2005).

Transformasi data menjadi fitur memegang peran yang sangat penting karena akan mempengaruhi performansi keseluruhan sistem klasifikasi secara langsung. Sehingga, semakin tepat fitur yang digunakan, maka akan menggambarkan hasil yang tepat pula. Untuk tetap mempertahankan data informasi pada tingkat yang tertinggi, beberapa fitur statisitik yang dapat digunakan untuk mendeteksi cacat pada bantalan dengan domain waktu dan frekuensi yaitu *Root mean square (RMS)*, *variance*, standar deviasi, *crest factor*, *shape factor*, *skewness*, kurtosis. Persamaan yang digunakan dalam menghitung parameter statistik sebagai berikut :

1. *Root mean square (RMS)*

Seperti yang telah disebutkan pada kajian pustaka, nilai dari Root Mean Square (RMS) dari sinyal getaran dapat digunakan sebagai parameter dari machine condition monitoring. Nilai pada RMS merupakan sebuah indikator dari level energi dari sinyal getaran yang dirumuskan pada persamaan.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N x_j^2}{N}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana N merupakan dari jumlah titik sinyal data, x_j merupakan sinyal data yang.

2. *Variance*

Dalam bidang statistika, *variance* merupakan nilai kuadrat dari standar deviasi yang dirumuskan pada persamaan

$$Var(X) = \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (x - \bar{x})^2 \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana N merupakan jumlah dari titik sinyal data, \bar{x} adalah rata-rata dari nilai total sinyal x_j merupakan kolom data. Penggunaan $N - 1$ sebagai penyebut berguna untuk membuat pengukuran tidak menyimpang (bias) dan membuat sedikit perbedaan dibandingkan dengan menggunakan N sebagai penyebut.

3. Standar deviasi

Ketika pengukuran data getaran dilakukan, hubungan antara variasi kecepatan aliran maupun kecepatan operasi terhadap histogram dapat dihasilkan lebih akurat dengan menggunakan kenaikan parameter standar deviasi. Adapun standar deviasi dirumuskan persamaan

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x-\bar{x})^2}{N-1}} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana N merupakan jumlah dari titik sinyal data, \bar{x} adalah rata-rata dari nilai total sinyal dan x_j merupakan kolom data

4. *Crest factor*

Crest factor merupakan pengukuran statistika yang cukup banyak digunakan dalam analisis sinyal. Parameter ini didefinisikan sebagai rasio nilai absolut maksimum dari nilai RMS sinyal. Jika sebuah sinyal $x(n)$ dengan rata-rata nol maka fungsi *crest factor* dapat didefinisikan sebagai persamaan.

$$C_f = \frac{\max(|x(n)|)}{\sigma} \dots\dots\dots(2.14)$$

Nilai dari crest factor sering kali digunakan sebagai parameter penting karena nilai yang didapat mengindikasikan seberapa memuncak (*peaky*) data yang dihasilkan. Nilai *crest factor* yang tinggi menyiratkan bahwa ada setidaknya satu puncak bernilai tinggi positif maupun negative pada sinyal.

5. *Skewness*

Skewness merupakan derajat ketidaksimetrisan suatu distribusi. Jika kurva frekuensi suatu distribusi memiliki ekor yang lebih memanjang ke kanan (dilihat dari *mean* nya) maka dikatakan menceng kanan (positif) dan jika sebaliknya maka menceng kiri (negatif). *Skewness* dirumuskan dengan persamaan.

$$Skewness(S) = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{j=1}^N (x - \bar{x})^3 \dots\dots\dots (2.15)$$

6. Kurtosis

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. Dibandingkan dengan *variance* nilai kurtosis menekankan nilai besar dan menekan nilai kecil pada sinyal x

$$K = \frac{\sum_{j=1}^N (x - \bar{x})^4}{(\sigma^2)^2} - 3 \dots\dots\dots (2.16)$$

7. *Peak Value*

Analisis nilai puncak (*peak value*) merupakan analisis yang dilakukan dengan melihat intensitas energi yang dihasilkan oleh getaran pada puncak-puncak data domain waktu maupun domain frekuensi. Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mendapatkan nilai puncak, salah satunya pada persamaan 2.17.

$$peak\ value = \frac{\max(x) - \min(x)}{2} \quad (2.17)$$