

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Kavitasi pada pompa sentrifugal merupakan momok permasalahan utama yang sering kali terjadi pada permesinan yang dapat menyebabkan merosotnya kinerja hidrolis, kerusakan pada komponen, getaran dan menghasilkan kebisingan. Oleh karenanya, penanganan sedini mungkin perlu dilakukan dalam mendeteksi kavitasi yang terjadi pada pompa. Banyak metode yang telah berkembang dalam mendeteksi kavitasi pada pompa sentrifugal. Diantaranya adalah dengan menggunakan metode deteksi getaran. Dengan menganalisa karakteristik getaran yang dihasilkan permesinan, metode ini sudah tidak diragukan lagi merupakan metode yang sangat tepat untuk digunakan dalam menganalisis dan mendiagnosis kerusakan seperti halnya fenomena kavitasi yang terjadi pada pompa sentrifugal. Menurut Scheffer and Girdhar (2004) dalam bukunya membahas tentang bagaimana *predictive maintenance* dilakukan. Disebutkan bahwa salah satu teknik yang tidak diragukan lagi dalam mendeteksi cacat mekanik pada permesinan rotasional adalah dengan memonitoring getaran (*vibration monitoring*). Dalam menganalisa data getaran, disebutkan bahwa ada beberapa metode yang umum digunakan diantaranya adalah dengan mempresentasikannya menjadi domain frekuensi (*spectrum analaysis*) dan domain waktu (*time waveform analysis*).

Dalam mendeteksi kavitasi telah banyak penelitian yang merujuk dengan menggunakan kedua teknik analisis tersebut. Namun, penggunaan dengan menggunakan metode analisis domain frekuensi dikatakan kurang mampu menjelaskan hubungan yang terjadi antara fenomena kavitasi yang terjadi terhadap sistem permesinan (Al-Hashmi 2009). Oleh karenanya, analisis statistik digunakan untuk menganalisis secara lebih tepat bagaimana hubungan yang terjadi antara kavitasi yang terjadi terhadap kondisi operasi pompa. Dengan menggunakan analisis statistik domain waktu, indikator yang dihasilkan dapat di diagnosis lebih akurat dalam mendeteksi kavitasi pada pompa sentrifugal (McKee et al. 2015).

Birajdar *et al.* (2009) menerangkan tentang bagaimana mendeteksi kesalahan yang terjadi pada pompa sentrifugal dan metode diagnosis yang dapat digunakan. Disebutkan bahwa pada pompa sentrifugal, sumber getaran dan suara yang mengganggu mungkin dapat terjadi dikarenakan oleh aspek mekanik maupun hidrolis. Oleh karenanya sangat mudah dalam melacak kerusakan mekanik namun tidak dengan kerusakan hidrolis. Metode yang digunakan dalam mendiagnosis *noise* dan vibrasi pada pompa sentrifugal dibagi menjadi dua langkah, yaitu dengan pengukuran intensitas vibrasi dan *noise* yang dihasilkan kemudian menganalisis nilai level getaran. Dengan teknik tertentu, sinyal getaran dapat digunakan untuk mendeteksi dan meralat permasalahan pada pompa seperti *unbalance*, *misalignment*, turbulensi, kavitas, dan lainnya.

Luo *et al.* (2015) meneliti tentang karakteristik statistika getaran pada pompa sentrifugal. Dikatakan bahwa ketika pompa sentrifugal bekerja dalam keadaan aliran tidak stabil akan mengubah karakteristik dinamik pada pompa. Perubahan tersebut akan terlihat pada data statistik pada getaran. Dengan memvariasikan kecepatan aliran, analisis statistik yang digunakan adalah dengan menggunakan metode perhitungan *Peak Value*, *Root Mean Square (RMS)*, *Standard Deviation*, *Crest Factor*, *variance*, *kurtosis* dan *Probability Density Function (PDF)*. Dari hasil penelitian tersebut dengan membandingkan karakteristik yang dihasilkan dari tiap metode perhitungan menunjukkan hasil bahwa perubahan grafik mulai terjadi diantara kecepatan aliran 50-60l/m yang mengindikasikan telah dimulainya kavitas pada kecepatan aliran tersebut. Disebutkan bahwa nilai *Peak Value* memiliki sensitifitas yang lebih baik dibanding nilai RMS pada indikator aliran tidak stabil. Walaupun begitu, nilai RMS memiliki kemampuan untuk memprediksi kavitas serta kemampuan *anti-jamming* yang kuat. Pada nilai *Crest Factor*, dapat dengan sangat sensitif menghasilkan grafik pada ketidakstabilan data serta kurva yang dihasilkan sesuai dengan kondisi tertentu operasi mesin seperti, ketidakstabilan aliran, kavitas awal dan titik efisiensi maksimum yang dapat dihasilkan pompa. Seperti halnya pada nilai *Crest Factor*, nilai yang dihasilkan oleh PDF dan *Kurtosis* juga dapat digunakan sebagai indikator yang efektif dalam mendeteksi kavitas serta hubungannya dengan operasi mesin.

Al-Tobi and Al-Sabari (2016) meneliti tentang bagaimana mendeteksi kavitas menggunakan metode domain waktu. Tujuan dari penelitiannya yaitu untuk membuktikan bahwa metode domain waktu dapat digunakan dalam mendeteksi kavitas. Kondisi kavitas didapat dengan menyesuaikan bukaan katup pada sisi hisap sehingga kecepatan aliran dapat ditekan sedemikian mungkin dalam menghasilkan kavitas. Dengan membandingkan kondisi normal dan terkavitas, masing-masing data dianalisa menggunakan parameter statistik *Kurtosis*, *RMS*, *Mean and Peak*. Dari hasil penelitian tersebut telah membuktikan bahwa parameter statistik berbasis metode domain waktu dapat digunakan dalam mendeteksi kavitas dan khususnya pada *RMS* dan *Peak Value* terbukti menjadi parameter terbaik dalam mendeteksi kavitas berdasarkan domain waktu.

Al-Hashmi (2009) mengemukakan metode deteksi kesalahan yang terjadi pada pompa sentrifugal menggunakan analisis statistik. Dalam penelitiannya mengatakan bahwa sebagian besar publikasi tentang deteksi kavitas berdasarkan analisa getaran dalam domain frekuensi. Namun, karakteristik kavitas pada spectrum getaran yang memiliki pola spectrum broadband memiliki frekuensi tersembunyi yang dimiliki komponen lainnya. Oleh karena kompleksitas yang dimiliki permesinan tersebut, masih belum jelas bagaimana hubungan antara kavitas yang dihasilkan dengan operasi pompa pada kondisi natural. Dari permasalahan tersebut maka digunakanlah analisis statistik berdasarkan domain waktu untuk pendeteksian yang lebih optimal. Dalam penelitiannya ada beberapa metode analisis statistik yang digunakan, yaitu *Probability Density Function* (PDF), *Root Mean Square* (RMS) dan *Standart Deviation* (SD). Dengan memvariasikan kecepatan aliran dimulai dari 200l/m, 220 l/m, 240 l/m...380 l/m. Dari tiap metode yang digunakan berhasil mengindikasikan kavitas terhadap perubahan nilai dari tiap metode yang digunakan dimulai dari kecepatan aliran sebesar 340 l/m. Indikasi kavitas terhadap perubahan nilai parameter statistik ditandai dengan kenaikan nilai yang signifikan pada grafik RMS dan SD, sedangkan penurunan puncak pada PDF.

Berdasarkan dari rujukan penelitian terdahulu tersebut maka dasar penelitian ini dilakukan yaitu dengan menggunakan analisis getaran berbasis parameter

statistik domain waktu sebagai metode yang dapat digunakan dalam mengetahui kerusakan/kesalahan yang terjadi pada simulasi kerusakan pompa sentrifugal.

2.2 Pompa Sentrifugal

Pada sub-bab ini menjelaskan tentang pengertian pompa sentrifugal, konstruksi mekanik termasuk *impeller*, *casing* pompa dan sistem perpipaannya. Kemudian menjabarkan tentang karakteristik dari pompa sentrifugal dan sistem pengoperasiannya, termasuk kondisi-kondisi awal mulanya terjadi kavitasi pada pompa sentrifugal serta permasalahan yang dihasilkan.

2.2.1 Pompa Sentrifugal

Pada tahun 1689, ahli fisika Denis Papin menemukan pompa sentrifugal dan sekarang merupakan pompa yang paling banyak digunakan diseluruh dunia (Olesen dan Bech 2004:8). Volume penjualan yang dihasilkan mencapai US\$32.18 juta pada akhir tahun 2016 diseluruh dunia. Pompa sentrifugal merupakan mesin rotasional dimana aliran dan tekanan dihasilkan secara dinamis (Cooper, 2008:2.3). Fungsi dari pompa sentrifugal adalah untuk digunakan dalam mengalirkan cairan dengan menaikkan volume aliran tertentu ke tingkat tekanan tertentu. Kinerja pompa dihasilkan oleh kecepatan motor yang digambarkan dengan laju aliran yang dialirkan, kenaikan tekanan yang dicapai, penyerapan daya pada kopling, efisiensi dan NPSH. Dapat dilihat pada Gambar 2.1, pompa sentrifugal pada umumnya memiliki 2 bagian utama yaitu rumah pompa dan motor listrik.

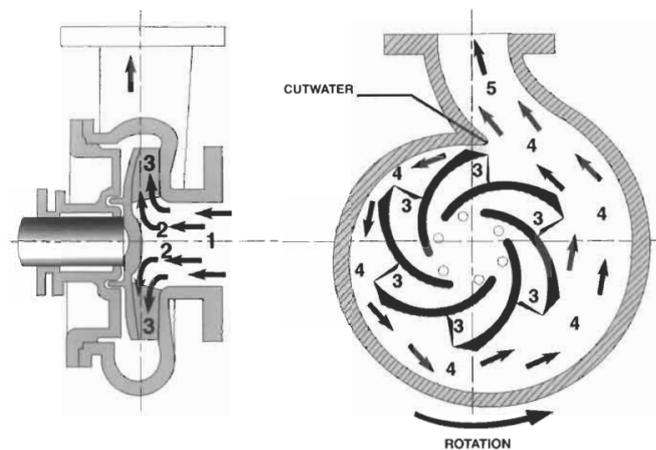


Gambar 2. 1 Pompa Sentrifugal (www.grundfos.com)

Bergantung pada aplikasi, pompa sentrifugal mempunyai banyak jenis yang tersedia dipasaran. Semua jenis tersebut setidaknya mempunyai satu *impeller* dan sebuah kolektor dimana sebagian besar energi kinetik pada *impeller* diubah menjadi tekanan statis.

2.2.2 Dasar Prinsip Kerja Pompa Sentrifugal

Walaupun pompa sentrifugal mempunyai banyak jenis tergantung pada aplikasi penggunaannya, pada dasarnya mempunyai prinsip kerja yang sama. Pompa sentrifugal menerapkan prinsip kerja yang simpel dimana cairan dibawa menuju mata *impeller* dan kemudian dengan gaya sentrifugal, cairan dilemparkan ke arah pinggiran *impeller*. Berdasarkan Gambar 2.2 menunjukkan bagaimana bentuk dari rumah *impeller* yang berpola spiral; mengerucut atau biasa disebut *diffuser* yang mana mengkonversi energi kinetik pada cairan menjadi cairan bertekanan.



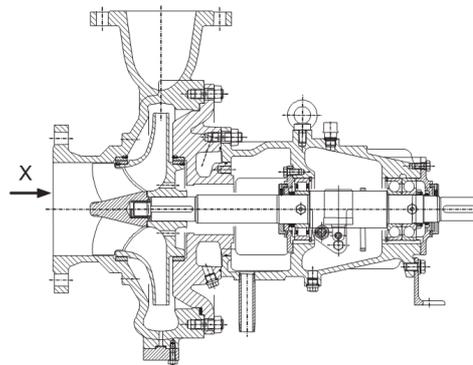
Gambar 2. 2 Skema aliran pada pompa sentrifugal (Bachus dan Custodio 2003)

Putaran dari *impeller* menghasilkan gaya sentrifugal yang mendorong fluida untuk menempati ruang pada bilah *impeller*. Dapat dilihat pada Gambar 2.2, pergerakan fluida ke arah luar *impeller* disebabkan oleh terjadinya penurunan tekanan pada mata *impeller*, sehingga cairan dari pipa arah masuk bisa terdorong menuju sisi hisap pompa. Penurunan tekanan tersebut bisa terjadi karena perbedaan

dari luas penampang bilah impeler (*blades*) yang meluas dan melengkung dari mata impeler menghasilkan gaya dorong pada fluida secara radial keluar dan secara tangensial.

2.2.3 Konstruksi Mekanik pada Pompa Sentrifugal

Dikarenakan banyaknya desain dari pompa yang tersedia sesuai dengan kebutuhan pada lapangan, berikut merupakan deskripsi tentang komponen mekanik pompa sentrifugal pada umumnya. Selain dari penjelasan tersebut, maksud dari penelitian ini juga untuk mengetahui pengaruh-pengaruh kavitasi pada pompa sentrifugal termasuk kerusakan yang terjadi pada komponen pompa. Oleh karenanya penting untuk diketahui bagaimana konstruksi yang dimiliki oleh pompa sentrifugal. Sebuah pompa sentrifugal berdasarkan Gambar 2.3 mempunyai kompleksitas akan komponen pembangunnya.

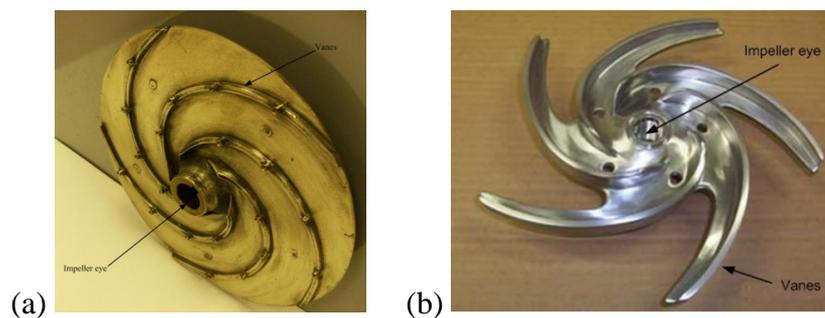


Gambar 2. 3 Konstruksi mekanik pompa sentrifugal (Gulich 2013)

Dari Gambar diatas dapat dilihat bahwa secara umum pompa sentrifugal mempunyai banyak komponen mekanik yaitu: *impeller*, rumah pompa, poros, bantalan, *wear rings* dan sistem perpipaan tambahan. Berikut merupakan penjelasan dari komponen-komponen tersebut:

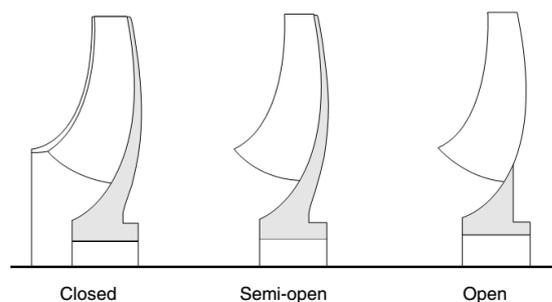
a. *Impeller*

Merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengubah tenaga motor menjadi tekanan dan energi kinetic pada cairan yang dipompakan. Bentuk, ukuran dan kecepatan pada *impeller* seperti pada Gambar 2.4 akan menentukan kapasitas yang dimiliki oleh pompa sentrifugal.



Gambar 2. 4 (a) *semi-open impeller*; (b) *open impeller* (Thobiani *et al.* 2011)

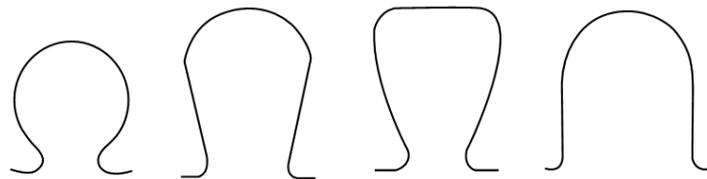
Seperti yang terlihat pada Gambar diatas, pada *impeller* terdapat hub yang berguna untuk menghubungkan *impeller* pada poros pompa. Dibagian lebih luar dari hub terdapat beberapa lengan kaku melengkung yang disebut dengan baling-baling (*vanes*). Guna dari *vanes* tersebut untuk melemparkan cairan kearah luar menuju *volute casing* serta menghasilkan gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh energi mekanik pompa. Adapun tipe *impeller* pada Gambar 2.5 dapat dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan dari penutup *impeller*, bentuk dan lengkung bilah *impeller* (Girdhar, Moniz dan Mackay 2005) yaitu: *Closed-impeller*; *Semi-open impeller* dan *open impeller*.



Gambar 2. 5 Tipe-tipe *impeller* (Girdhar *et al.* 2005)

b. Rumah Pompa (Pump Casing)

Pada saat cairan memasuki *inlet impeller*, kecepatan dari fluida dapat mencapai 30-40 m/s. Kecepatan ini harus diturunkan dengan kisaran 3-7 m/s saat memasuki sisi *discharge* pompa. Penurunan kecepatan ini dilakukan oleh bentuk spiral rumah pompa seperti pada Gambar 2.2 yang mengerucut atau biasa disebut dengan *diffuser* sehingga tekanan dari cairan meningkat dan memungkinkan cairan untuk mengalir keluar. Adapun Gambar 2.6 merupakan pola potongan samping dari rumah pompa yang umumnya ada dipasaran.

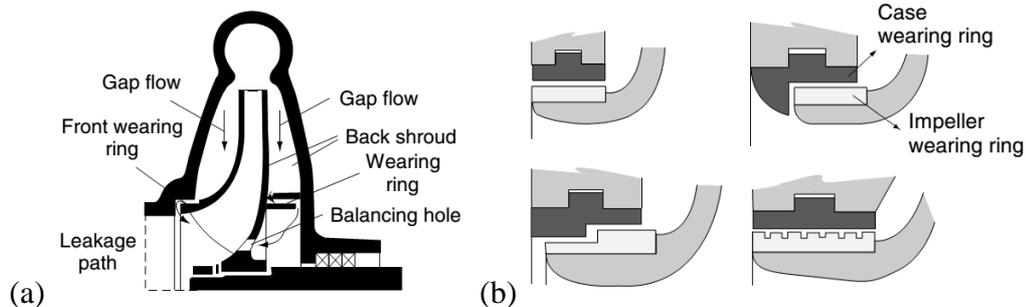


Gambar 2. 6 Bentuk potongan dari rumah pompa (Girdhar *et al.* 2005)

Pada dua profil pertama pada urutan disebut dengan pola *circular*, yang ketiga disebut dengan pola *trapezoidal* yang biasanya ditemukan pada pompa *single-stage* dan yang terakhir disebut dengan pola *rectangular* yang biasanya digunakan pada pompa *single-stage* dan *multistage* berukuran kecil.

c. Wear Rings

Impeller merupakan komponen berputar yang ditempatkan didalam *casing* pompa. Untuk mencegah kontak gesek maka celah antara komponen sangat penting. Namun, seperti pada Gambar 2.7 (a) celah ini dapat membuat perbedaan tekanan karena adanya perbedaan resirkulasi pada cairan yang dipompa.

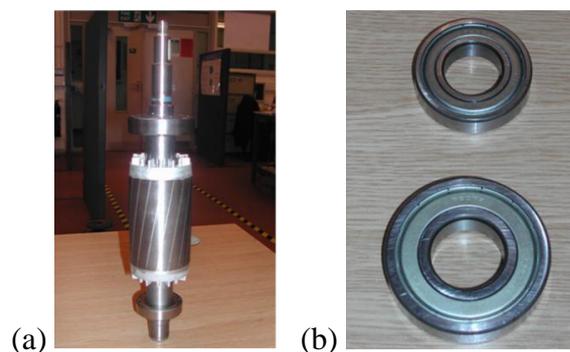


Gambar 2. 7 (a) lokasi dari wearing; (b) jenis dari wearing (Girdhar *et al.* 2005)

Dari hal tersebut maka digunakan *wearing ring* yang berfungsi untuk mengurangi erosi akibat resirkulasi hisap dan juga memberikan stabilitas rotor yang lebih baik pada pompa. Hasilnya getaran pompa yang beroperasi menjadi lebih rendah. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.7(b), *wearing ring* mempunyai banyak jenis dan ketika dipasangkan pada *casing* pompa maka disebut dengan *case wearing ring* dan *impeller wearing ring* pada impeler.

d. Poros dan Bantalan

Poros pada pompa sentrifugal seperti pada Gambar 2.8 merupakan alat yang digunakan untuk mentransmisikan torsi yang diperlukan untuk memutar *impeller* sambil menopang bagian *impeller* dan bagian berputar lainnya serta digunakan sepaket dengan bearing. Bentuk dan material poros dibuat sedemikian rupa sehingga lendutan yang terjadi saat beroperasi dapat diminimalisir sekecil mungkin (Thobiani *et al.* 2011)



Gambar 2. 8 (a) Poros; (b) *Bearing* (Thobiani *et al.* 2011)

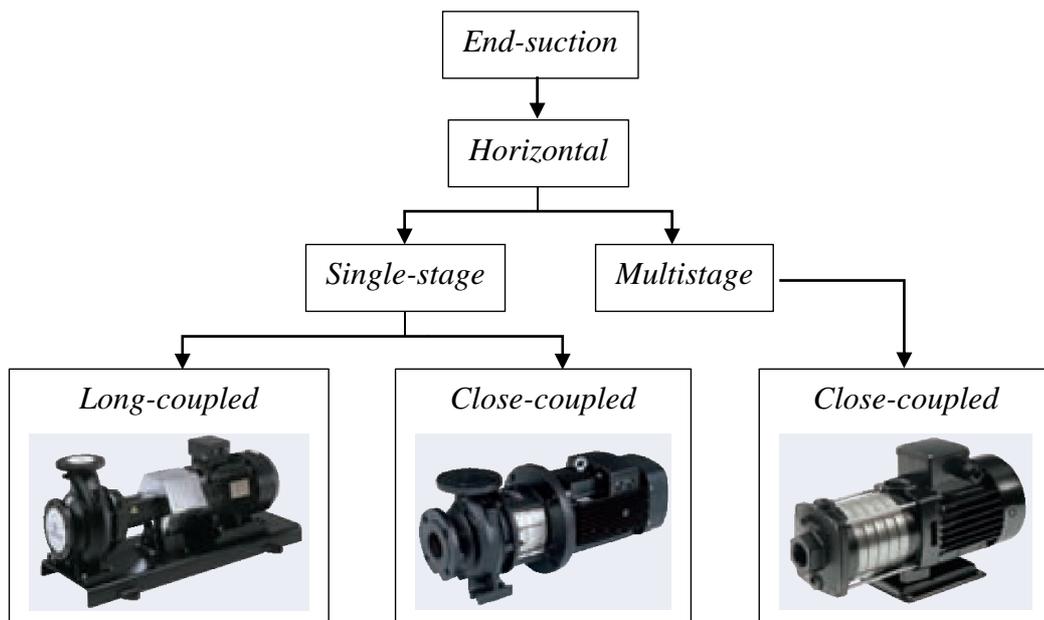
Bantalan pada poros memungkinkan gesekan yang terjadi antara permukaan poros dan badan pompa dapat diminimalisir sekecil mungkin sehingga poros dapat berputar dengan bebas.

2.2.4 Karakteristik Pompa Sentrifugal dan Sistem Pompa

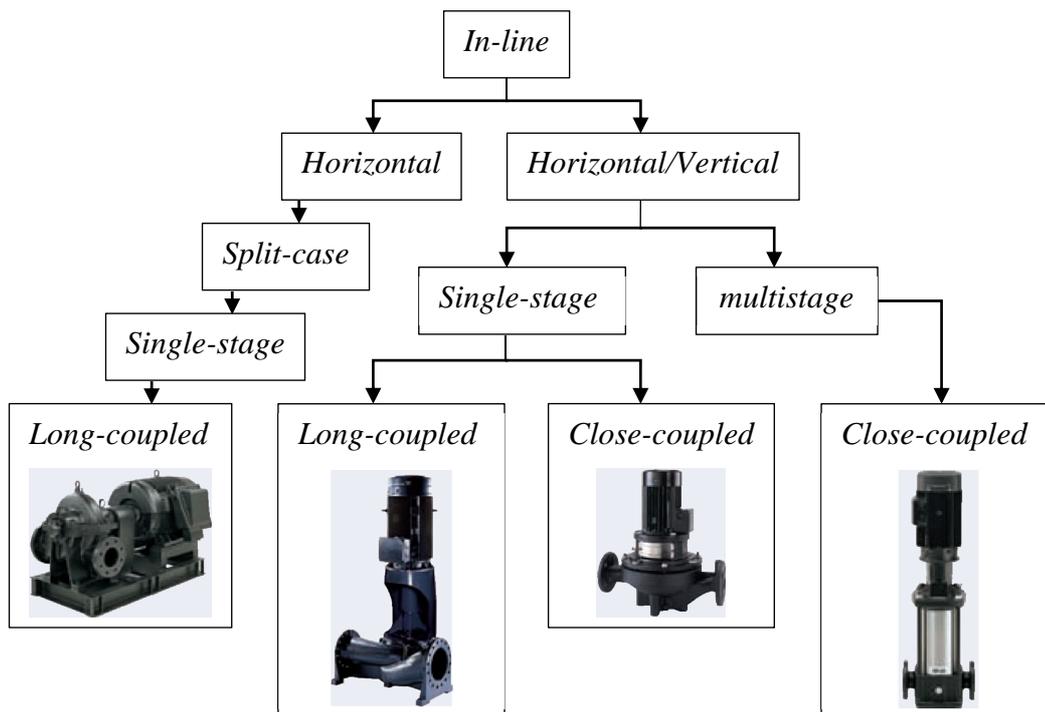
Operasi pada pompa sentrifugal untuk mencapai nilai efisiensi maksimumnya terletak pada desain yang benar dan sesuai dengan sirkuit pompa.

Sesuai dengan prasyarat kinerja dan aplikasi, terdapat banyak jenis pompa tersedia dipasaran yang dapat diklasifikasikan menurut aspek yang berbeda. Oleh sebab itu, menurut Olesen dan Bech (2004), seperti pada Gambar 2.9: 2.10 pompa sentrifugal dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa karakteristik berikut:

- a. Jumlah tingkat *impeller*. Berdasarkan jumlah *impeller* pada pompa, sebuah pompa sentrifugal bisa berupa pompa *single-stage* atau *multistage*. (Gambar 2.9)
- b. Posisi dari poros pompa. Pompa *single-stage* atau *multistage* bisa tersedia dengan posisi poros secara vertikal maupun horizontal. (Gambar 2.10)
- c. *Single-suction* atau *double-suction impellers*. Berdasarkan dari konstruksi dari *impeller*, sisi hisap pompa sentrifugal dapat dilengkapi dengan *impeller* tunggal atau *impeller* ganda
- d. Tingkatan *coupling*. Tahap pompa dapat diatur dengan dua cara yaitu: secara seri dan paralel.
- e. Konstruksi dari rumah pompa. Dapat dibedakan menjadi 2 tipe rumah pompa, yaitu: *Volute Casing* dan *return channel casing* dengan bilah pengarah.



Gambar 2. 9 Pompa sentrifugal berdasarkan jumlah *coupling* dan *impeller* (Olesen dan Bech 2004)



Gambar 2. 10 Pompa Sentrifugal berdasarkan posisi poros dan arah *suction nozzle* (Olesen dan Bech 2004)

Keterangan:

End-suction pump = biasa disebut dengan pompa radial dengan ciri arah cairan masuk *impeller* dan mempunyai arah outlet nozzle 90° terhadap *impeller*.

In-line pump = biasa disebut dengan pompa axial dengan ciri arah cairan masuk bersebrangan disisi yang berlawanan dengan sisi *outlet nozzle*.

Split-case pump = pompa axial dengan rumah pompa yang terpisah

Horizontal pump = pompa dengan posisi poros horizontal

Vertical pump = pompa dengan posisi poros vertikal

Single-stage pump = pompa dengan *impeller* tunggal

Multistage pump = pompa dengan beberapa *impeller* bergandeng

Long-coupled pump = pompa yang terhubung terpisah pada motor dengan tujuan untuk fleksibilitas pergerakan kopling. Motor dan pompa mempunyai konstruksi bantalan yang terpisah

Close-coupled pump = sebuah pompa yang mempunyai satu poros yang sama dengan motor penggerakannya.

2.3 Kavitasi

Dari sekian permasalahan yang terdapat pada pompa sentrifugal, kavitasi merupakan sebuah momok besar yang telah menjadi perhatian utama pada sistem perpipaan. Hal ini dikarenakan kavitasi yang terjadi pada sistem dapat menyebabkan turunnya efisiensi mekanik, mendegradasi dan merusak permukaan dari *impeller* pompa serta meningkatkan getaran yang tidak diinginkan yang menghasilkan emisi suara (Yan *et al.* 2015). Oleh karenanya, untuk memahami bagaimana kavitasi dapat terjadi pada pompa maka pada sub-bab ini akan menjelaskan tentang definisi dari kavitasi, penyebab, kerugian yang diakibatkan dan cara pencegahan kavitasi.

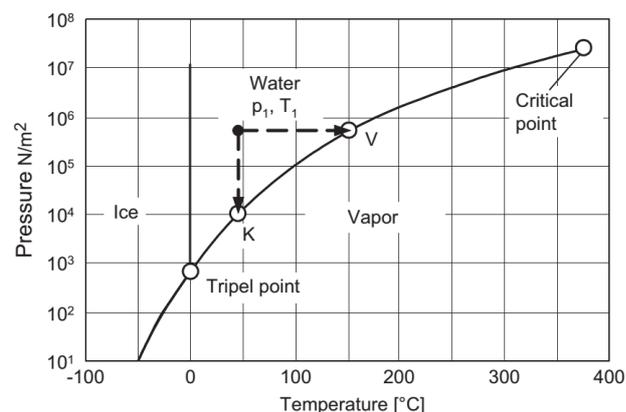
2.3.1 Definisi Kavitasi

Terdapat banyak cara dalam mengartikan kavitasi tergantung dari objek yang sedang dibahas. Menurut Brennen (1977:15) kavitasi merupakan suatu fenomena yang dihasilkan fluida cair dimana tekanannya turun dibawah tekanan uap jenuhnya. Namun, secara definisi istilah, kavitasi berarti penguapan parsial dari cairan dalam sistem aliran. Sebuah rongga (*cavity*) uap yang terciptakan ketika tekanan statis dalam aliran lokal turun ke tekanan uap cairan disebabkan oleh kecepatan berlebih, sehingga beberapa bagian cairan menguap dan menghasilkan dua fase aliran tercipta dengan jumlah kecil dari cairan. Fase uap yang dihasilkan akan seketika meletup/meledak disaat mengalir pada zona tekanan statik kembali melebihi tekanan uap jenuhnya (Gulich 2013:287). Kondisi kavitasi yang seperti inilah merupakan fenomena yang dapat terjadi pada pompa sentrifugal dan harus dicegah karena dapat menyebabkan kerusakan serta dapat mengganggu sistem kerja produksi.

2.3.2 Penyebab Kavitasasi Pada Pompa

Secara natural kavitasasi dapat dihasilkan dan dipengaruhi oleh banyak faktor terutama pada fase cairan yang digunakan. Oleh karenanya penting untuk mengetahui fase dari perubahan cairan (*liquid state*) pada diagram fase dalam memahami terjadinya kavitasasi. Menurut Brennen (1977), menggunakan diagram fase mempunyai ciri khas yang ideal serta relevan untuk digunakan dari banyak zat. Dapat dilihat pada Gambar 2.11 menunjukkan diagram fase p, T dari air yang umum digunakan sebagai standar penelitian.

Setiap substansi bisa ada dalam setiap fase padat, cair, maupun gas. Transisi dari tiap fase tersebut dapat dijelaskan pada diagram fase p-T (*equilibrium diagram*). Dengan demikian, kurva tekanan uap $p_v(T)$ mencirikan status saturasi (*equilibrium*) dari cairan dan uap dari tiga titik kritis.

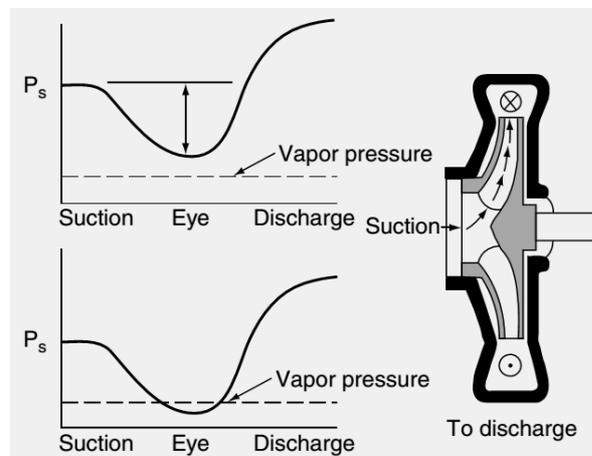


Gambar 2. 11 Diagram *Equilibrium* (Gulich 2013:288)

Suatu cairan dalam kondisi p_1, T_1 dengan $p_1 > p_v(T_1)$ dapat menguap apabila dipanaskan pada tekanan konstant ke suhu jenuhnya. disaat perubahan fase dari cair ke uap terjadi, entalpi penguapan harus ditambahkan. Namun, disebutkan bahwa kavitasasi dapat menjadi bergelembung (*cavitation bubbles*) jika hanya ketika pada cairan mengandung molekul gas (*nuclei*) dengan kisaran dari 10^{-3} - 10^{-1} mm (Gulich 2013). Pada saat sistem pompa berjalan, perubahan tekanan dan temperatur dapat memungkinkan terjadi karena faktor dari rangkaian perpipaan dan lingkungan yang

dalam keadaan natural dipengaruhi oleh berbagai hal seperti keadaan lingkungan dan pengaruh dari komponen rangkaian perpipaan.

Pada pompa sentrifugal, kavitasi umumnya terjadi saat cairan masuk pada sisi hisap pompa khususnya pada *impeller* dan *diffuser*. Menurut Girdhar *et al.* (2005), munculnya kavitasi diakibatkan oleh adanya penurunan tekanan secara tiba-tiba seperti halnya pada saat membuka botol minuman bersoda. Hal tersebut hampir menyerupai ketika kavitasi terjadi pada pompa sentrifugal, ketika cairan dihisap pada sisi *inlet* pompa akan membuat tekanan permukaan cairan turun. Kondisi kavitasi berdasarkan Gambar 2.12, disaat tekanan turun mendekati tekanan uap jenuhnya akan menyebabkan cairan untuk mengalami penguapan. Setelah gelembung uap tersebut mengalir lebih dalam pada bagian *impeller*, tekanan akan naik kembali menyebabkan gelembung uap untuk mengempis atau meledak menghasilkan efek kejut (*shockwave*).



Gambar 2. 12 Pembentukan kavitasi karena penurunan tekanan (Girdhar et al. 2005)

2.3.3 Kerugian dari Kavitasi

Dalam skala industri, pompa sentrifugal memegang peran penting dalam sistem pengairan dari sistem produksi seperti halnya pada sistem pendinginan, *boiler*, irigasi dan sebagainya. Oleh karenanya, apabila sistem perpipaan yang digunakan terkendala pada sistem pompanya dapat mengakibatkan proses produksi

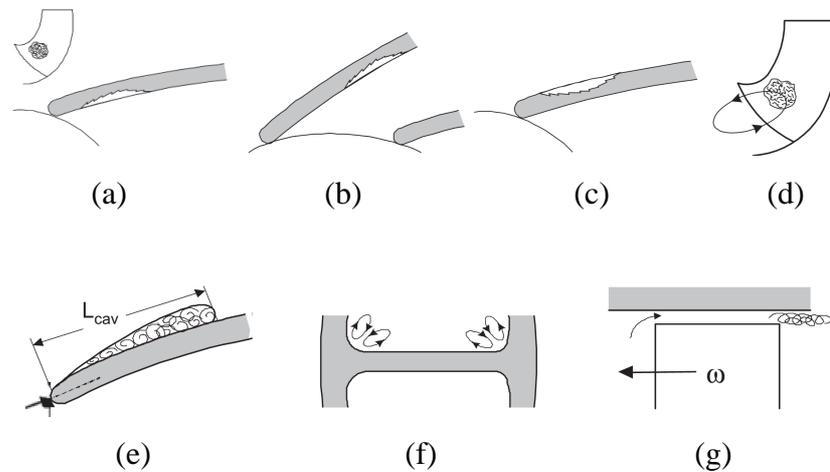
dapat terhenti hingga terjadinya pencemaran pada lingkungan apa bila terjadi kebocoran. Pada kondisi kavitasi, pengoperasian jangka panjang biasanya akan membuat kerusakan pradini pada peralatan pompa seperti merusak *impeller*, rumah pompa dan penutup pada pompa (Cunha, Strack, and Stricker 2008:38). Menurut riset ABB Service, *downtime* yang diakibatkan adanya kerusakan pada pompa sentrifugal menghabiskan waktu selama 21 jam produksi dengan kerugian mencapai USD\$531,090.- dengan biaya reparasi mencapai USD\$3,360.- pada kerusakan *mechanical seal*. Tentunya kerusakan yang terjadi pada pompa sentrifugal akan berbeda-beda tergantung dari material dan tegangan yang diterima. Semakin keras (*brittle*) material, maka lebih besar rusak yang akan dialami dikarenakan kavitasi, sebab material keras lebih rentah mengalami kelelahan (Thobiani *et al.* 2011:54).

2.3.4 Kerusakan Pompa Sentrifugal disebabkan Kavitasi

Kavitasi sering terjadi pada *impeller* blade sisi masuk, disaluran masuk *impeller*, pada sisi masuk *casing*, di kolektor dan *annular seal* atau pada alat penyeimbang *impeller*. Oleh karenanya, kerusakan yang terjadi akan berakibat pada komponen-komponen tersebut. Besarnya skala kerusakan akibat kavitasi yang terjadi akan dipengaruhi oleh parameter geometric dari *impeller*, sisi hisap dan kolektor, kecepatan aliran pompa dan tekanan hisapnya selama operasi pompa telah berlangsung. Adapun kerusakan yang terjadi akibat kavitasi dapat terjadi pada *inlet impeller*, *outlet impeller* atau di *inlet casing* dan pada *diffuser* atau *volute* pompa (Gülich 2013:359).

a. Kerusakan kavitasi pada *inlet impeller*

Pada komponen mekanik pompa sentrifugal, kavitasi lebih sering terjadi pada *impeller*. Zona kerusakan yang terjadi sering kali berada pada *blades* dan sekitarnya. Dapat dilihat Dapat dilihat pada Gambar 2.13 (a)-(g) merupakan tipikal dari pola kerusakan akibat kavitasi pada *blade impeller*.

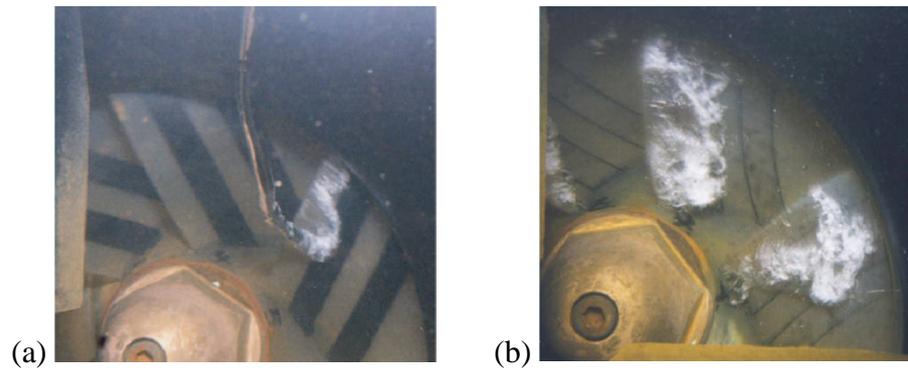


Gambar 2. 13 Tipikal kerusakan kavitasi pada *blade surface* (Gulich 2013)

Keterangan:

- (a) Kerusakan kavitasi pada permukaan dalam *impeller* dekat dengan *leading edge*.
- (b) Degradasi kavitasi pada permukaan daerah dalam *blade*
- (c) Degradasi pada luar *blade*, mendekati *leading edge*
- (d) Degradasi pada tengah *blade* mendekati *leading edge*
- (e) Kavitasi pada permukaan luar *blade*
- (f) Degradasi pada *fillet impeller* tertutup pada bagian luar.
- (g) Kavitasi pada celah luar *impeller* terbuka.

Kerusakan pada permukaan *blade* yang berbeda-beda pada *impeller* disebabkan oleh kebutuhan desain pompa pada *impeller* sehingga menyebabkan kavitasi yang terjadi mempunyai lokasi yang berbeda pada *impeller*. Berdasarkan pada Gambar 2.14 kavitasi dapat berupa tali pusaran (*rope vortex*) dan kavitasi yang menempel pada permukaan *blade*. Adapun Gambar 2.15 merupakan contoh dari tipikal kerusakan yang terjadi pada *fillet impeller* tertutup.



Gambar 2. 14 (a) kavitasi berupa pusaran; (b) kavitasi yang melekat pada permukaan *blade* (Gülich 2013)



Gambar 2. 15 Kerusakan pada *leading edge impeller* tertutup (Gülich 2013)

b. *Kerusakan kavitasi pada outlet impeller* atau *inlet casing*

Walaupun kavitasi sering kali terjadi pada bagian dalam *impeller*, kerusakan juga dapat terjadi pada bagian luar *blade impeller*. Seperti pada Gambar 2.16 merupakan kerusakan *impeller* pada bagian luar jenis *single-channel*.



Gambar 2. 16 kerusakan *impeller* pada pompa *single-channel* (Gülich 2013)

c. Kerusakan kavitasi pada *diffuser* atau *volute*s

Pada beberapa kasus, degradasi oleh kavitasi dapat terjadi pada *diffuser vanes* dan bagian *cutwaters* pada *volute*. Mekanisme yang berbeda (desain) pada pompa dapat menjadi penyebab dari kerusakan ini (Gülich 2013). Pada Gambar 2.17, merupakan kerusakan akibat kavitasi pada bagian *volutecutswater*.



Gambar 2. 17 Erosi kavitasi pada *cutswater double volute* (Gülich 2013)

2.3.5 Pencegahan Kavitasi

Telah disebutkan sebelumnya bahwa kavitasi dapat terjadi karena dipengaruhi berbagai macam faktor pada rangkaian salah satunya adalah terjadinya penurunan tekanan secara tiba-tiba pada rangkaian. Banyak langkah yang dapat dilakukan dalam mencegah kavitasi seperti memantau naik-turunnya nilai $NPSH_A \leq NPSH_R$ pada pompa sentrifugal. Namun, dalam prakteknya pada lapangan seperti halnya pada industri petrokimia, pompa sentrifugal memungkinkan untuk digunakan pada rangkaian yang mempunyai kompleksitas yang tinggi akan peralatan lainnya sehingga fenomena kavitasi yang terjadi pada pompa sentrifugal mungkin tidak terdeteksi. Oleh karenanya, salah satu langkah yang dapat diambil dalam mencegah kavitasi adalah dengan memantau secara langsung keadaan pompa yang umumnya metode yang paling banyak digunakan yaitu dengan menggunakan analisis pemantauan getaran (*vibration monitoring*). Dengan memantau secara langsung keadaan pompa, hasil yang didapat dari hasil

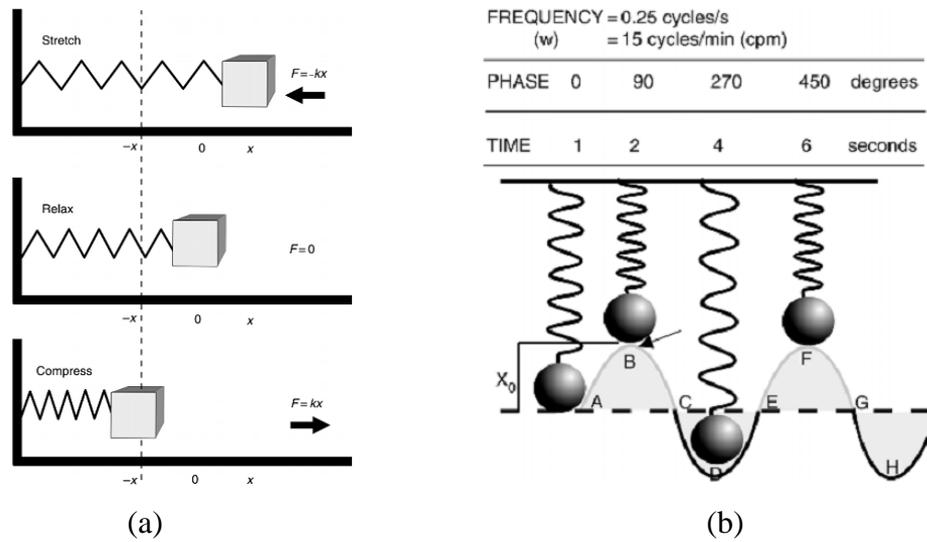
analisa dapat digunakan dalam langkah untuk menentukan pencegahan yang tepat dalam menghindari kavitasi pada rangkaian atau pompa sentrifugal sendiri.

2.4 Deteksi Kavitasi Dengan Pengukuran 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 kavitasi 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 2.18(a) dengan menerapkan gaya F ke massa, massa bergerak ke kiri, menekan pegas. Ketika massa dilepaskan, ia 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. 18 (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 2.18(b) merupakan penggambaran gelombang getaran dari pergerakan bandul, seperti halnya pada Gambar 2.18 (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 2.1.

$$X = X_0 \sin \omega t \dots\dots\dots(2. 1)$$

Keterangan:

X = perpindahan terhadap waktu t; X₀ = perpindahan maksimum; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$; 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

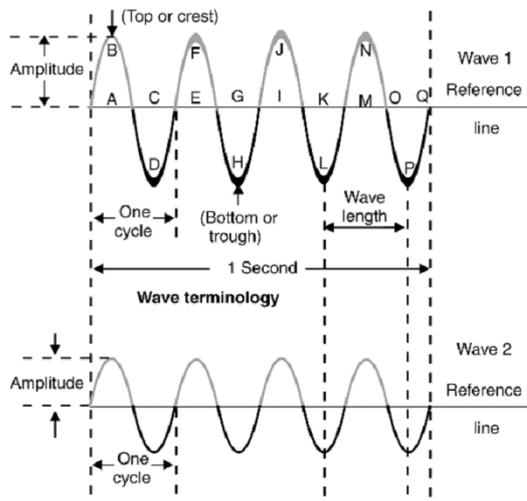
puncaknya. Kecepatan didapat dengan deferensi waktu terhadap perpindahan yang dapat dirumuskan dengan persamaan 2.2.

$$kecepatan = \frac{dX}{dt} = X_o \cdot \omega \cdot \cos \omega t \dots\dots\dots(2. 2)$$

Percepatan didapat dengan mendefereasikan kecepatan yang dapat dirumuskan pada persamaan 2.3.

$$percepatan = \frac{d(kecepatan)}{dt} = X_o \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots(2. 3)$$

Adapun getaran yang dihasilkan oleh suatu benda akan menghasilkan perambatan gelombang. Perambatan gelombang ini akan mencirikan dari setiap komponen yang ada pada mesin. Dalam perambatan gelombang tersebut terdapat beberapa parameter yang dapat digunakan dalam diagnosis kerusakan. Adapun parameter tersebut berdasarkan Gambar 2.19 berupa banyaknya gelombang (*cycle*), frekuensi, panjang gelombang dan tinggi gelombang (*amplitude*)



Gambar 2. 19 perbandingan gelombang pada amplitudo yang berbeda (Scheffer dan Girdhar 2004)

Getaran dinyatakan mempunyai satu gelombang ketika massa bergerak dari titik A posisi diam ke posisi mulanya titik E kembali. Banyaknya gelombang atau getaran yang terjadi pada selang satu detik (titik A – Q) disebut dengan frekuensi.

Panjang gelombang merupakan jarak yang dimiliki oleh sebuah gelombang atau dapat dikatakan sebagai jarak antara titik mulainya suatu gelombang sampai dengan titik mulainya gelombang kedua atau sama dengan jarak antara puncak gelombang (titik L) ke puncak gelombang selanjutnya (titik P). Amplitudo merupakan tinggi dari gelombang, atau dapat dikatakan sebagai besarnya perpindahan dari suatu untuk bergetar dari titik diamnya.

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 2004:1). 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 2004:7). Oleh karenanya dalam penelitian ini menggunakan dasar analisis pemantauan getaran dalam mendeteksi kavitasi pada pompa sentrifugal yang mana juga telah banyak publikasi penelitian telah melakukan metode yang sama (lihat sub-bab 2.1).

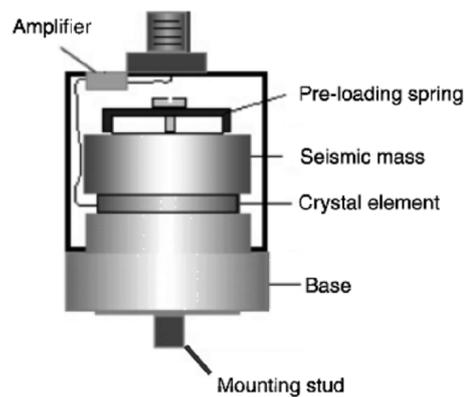
2.4.3 Sensor Getaran

Dalam mengukur getaran pada permesinan atau struktural, sebuah *transducer* digunakan untuk dapat mengambil getaran dan sebagai input dari pengolahan data getaran. Transduser merupakan sebuah perangkat yang mengkonversi sebuah jenis energi seperti getaran kedalam jenis energi yang berbeda yang biasanya kedalam bentuk arus listrik atau voltase. Transduser memiliki banyak jenis sesuai dengan kebutuhan yang digunakan, salah satu yang paling banyak digunakan dalam mengukur getaran ialah jenis *accelerometer transducer*. Dari hal tersebut maka pada bab ini akan menjelaskan tentang alat yang digunakan dalam mengukur getaran, serta karakteristik yang dihasilkannya.

a. *Accelerometer*

Accelerometer merupakan jenis transduser yang paling banyak digunakan dalam aplikasi permesinan rotasional karena penggunaannya yang mudah, kompak dan ringan dengan jangkauan frekuensi yang lebar (Scheffer and Girdhar 2004:32).

Berdasarkan pada Gambar 2.20, 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 2006:1).



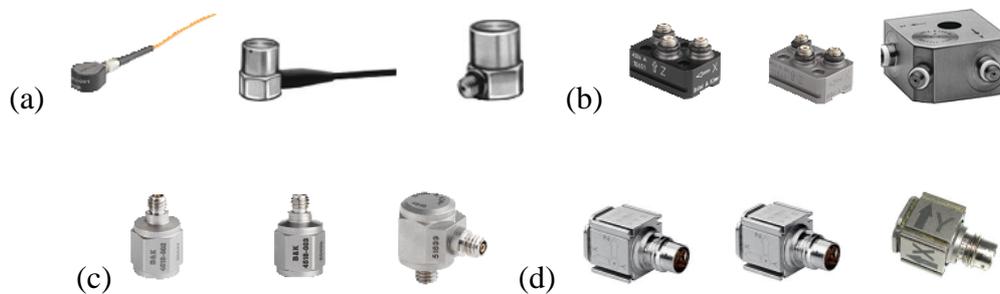
Gambar 2. 20 *Accelerometer* (Scheffer dan Girdhar 2004)

Elemen kristal yang digunakan pada *accelerometer* biasanya menggunakan jenis *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*

Seperti yang telah disebutkan pada sub-bab sebelumnya, *Piezoelectric accelerometer* merupakan jenis yang 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 (Cowmech dan Rande, 1990). Selain itu, untuk memaksimalkan pengukuran maka sudah ada beberapa jenis *accelerometer* yang digunakan untuk aplikasi khusus, yaitu seperti

pada Gambar 2.21 merupakan tipikal dari jenis sensor yang ada di pasaran untuk keperluan khusus.



Gambar 2. 21 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 2.21 (a); (b) diatas sering kali digunakan dalam untuk mengukur jenis frekuensi tinggi pada struktur dan benda. Sedangkan pada gambar (c) dan (d), jenis *accelerometer* yang di desain untuk pengukuran getaran yang dapat dilakukan dengan mudah. Bedanya *accelerometer* dengan nama *uniaxial* dan *triaxial* terletak pada jumlah arah (axis) pembacaan getaran pada satu waktu. *Uniaxial* mempunyai satu axis dan *triaxial* mempunyai tiga axis.

c. Pemasangan *accelerometer*

Menurut Scheffer dan Girdhar (2004), terdapat 4 metode utama yang digunakan dalam pemasangan sensor yaitu dengan menggunakan landasan (*stud*), perekat, penambahan magnet terpasang dan tidak terpasang. Berikut merupakan penjelasan masing-masing metode tersebut:

1. Metode *stud/bolt mounting* merupakan metode yang baik digunakan untuk pemasangan permanen. Metode ini digunakan dengan menyekrupkan sensor pada kancing (*stud*) atau pada blok mesin. Pada metode ini, memungkinkan penggunaan *transducer* untuk mengukur getaran pada kondisi idealnya dan dapat digunakan pada posisi mana saja yang memungkinkan.

2. Metode pemasangan perekat memberikan pemasangan yang aman tanpa adanya langkah yang terlalu intensif seperti penyekrupan. Kelemahan dari penggunaan metode ini yaitu menyebabkan respon frekuensi operasi atau akurasi dari pengukuran menjadi 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 mungkin secara tidak sengaja *transducer* berpindah sehingga menyebabkan akurasi dari pengukuran tidak akurat.
4. Metode pemasangan portable dengan magnet pada transduser.

Dalam pemasangan *accelerometer*, hal yang perlu diperhatikan adalah kebersihan dari permukaan objek pemasangan serta bebas dari pelapisan. Permukaan pemasangan harus pada kontak langsung pada permukaan mesin serta permukaan kontak harus lebih besar dibanding dengan diameter dari permukaan *transducer*.

d. Sensitifitas

Accelerometer yang digunakan dalam *condition monitoring* biasanya didesain dengan sensitifitas 100 mV/g. Tipe lainnya dari *accelerometer* dengan sensitifitas yang lebih besar digunakan untuk 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 untuk mengukur getaran pada rentang frekuensi tertentu. Pemilihan *accelerometer* biasanya digunakan setelah rentang frekuensi yang ada pada permesinan telah diketahui. Pada umumnya, *accelerometer* yang digunakan untuk mengukur getaran permesinan mempunyai jangkauan frekuensi dari 1 Hz atau 2 Hz sampai dengan 8 Hz atau 10 kHz, bahkan lebih tinggi.

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.

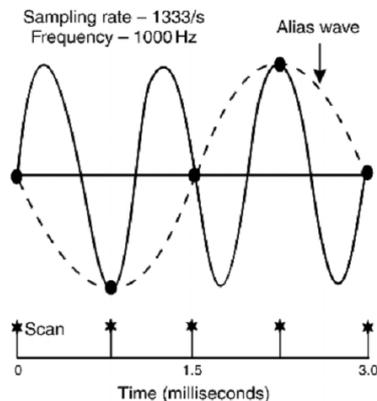
a. Data Akusisi

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 (*sampling theorem*) pertama kali diperkenalkan oleh Nyquist pada tahun 1982 dalam lembar 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 dilakukan. Hal ini 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 2.22 menunjukkan contoh dari rekonstruksi dari data getaran dimana kecepatan sampel kurang dari dua kali frekuensi gelombang.



Gambar 2. 22 Contoh gelombang dari rendahnya kecepatan sampel (Scheffer and Girdhar 2004)

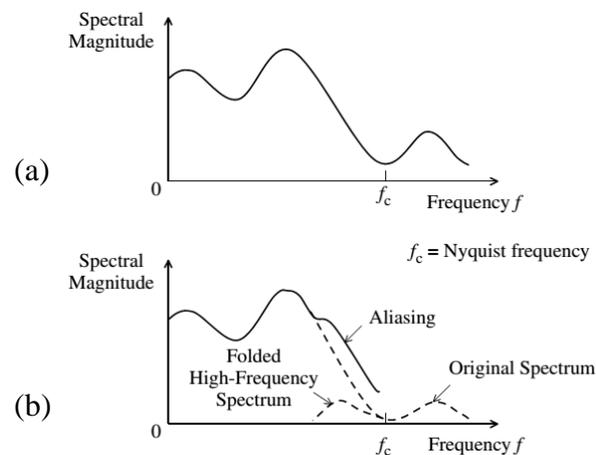
Terlihat bahwa empat interval yang dikumpulkan dalam waktu 3milidetik menghasilkan rekonstruksi gelombang (bertitik) pada gambar. Gelombang ini memiliki frekuensi yang lebih rendah dan tidak mempresentasikan gelombang yang sesungguhnya. Fenomena yang dihasilkan oleh rendahnya kecepatan *sampling* ini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

c. *Aliasing*

Pada saat aplikasi getaran dilakukan terkadang diperlukan untuk merekonstruksi sinyal kedalam bentuk spektrum Fourier. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.22 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 2.23, efek dari aliasing dapat menyebabkan tertutupnya (*folded*) informasi yang sebenarnya pada data. Dari gambar (a) menunjukkan contoh spektrum original yang didapat dengan frekuensi sampel dua kali lebih besar dari frekuensi Nyquist (f_c) sebesar 1000Hz. Sedangkan

pada gambar (b) merupakan spektrum yang didapat dengan frekuensi kurang dari f_c .

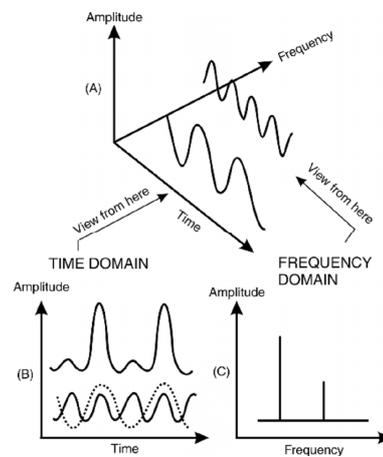


Gambar 2. 23 Aliasing pada spektrum (a) Spektrum original; (b) Distorsi spektrum karena *aliasing* (De Silva *et al.* 2005).

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*

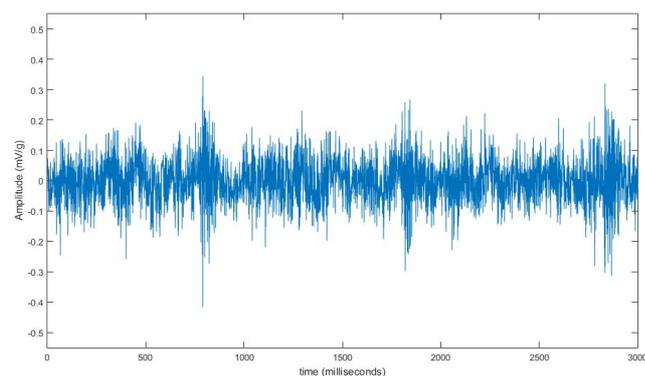
Condition Monitoring yang berguna pada permesinan dan mempunyai diagnosis kerusakan yang berguna sering kali bergantung pada metode pengolahan sinyal yang sesuai. Metode ini biasanya terbagi menjadi analisis berdasarkan domain waktu (*time domain*) dan domain frekuensi (*frequency domain*). Berdasarkan pada Gambar 2.24 *ploting* 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. 24 Hubungan antara domain waktu dan frekuensi (Scheffer and Girdhar 2004)

a. Domain Waktu

Domain waktu dari sinyal merupakan data rekaman energi yang terkandung dalam sinyal seperti halnya sinyal getaran dan cenderung didominasi oleh elemen-elemen yang paling berisik (Thobiani *et al.* 2011:70). Berdasarkan pada Gambar 2.25 merupakan tipikal plotting 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. 25 tipikal sinyal domain waktu

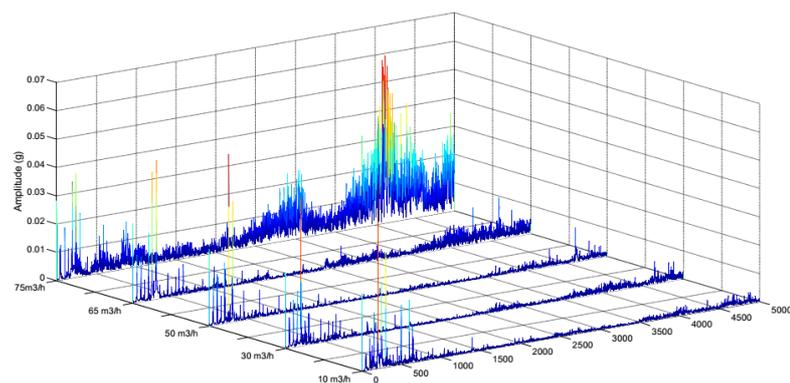
Dapat dilihat bahwa pola gelombang yang dihasilkan mempunyai kerapatan yang tinggi dan tidak teratur. Hal ini dikarenakan dalam keadaan natural, getaran yang dihasilkan oleh permesinan dihasilkan dan berkembang oleh tiap karakteristik

komponen permesinan. Sehingga dalam grafik gelombang yang dihasilkan akan mempunyai frekuensi yang beragam dari tiap komponen pada sinyal domain waktu (Gambar 2.17 bag.B).

b. Domain Frekuensi

Berbagai macam sinyal yang amplitudonya bervariasi akan berpengaruh pada domain frekuensi yang dimiliki. Seperti pada Gambar 2.24 bagian C dapat dilihat bahwa plotting sinyal getaran pada domain frekuensi berasal dari individual gelombang 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 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 et al. 2011). Terkecuali pada deteksi kavitas seperti pada Gambar 2.26 karakteristik yang dihasilkan berupa pola *broadband*.



Gambar 2. 26 Contoh analisis spektrum kavitas yang mengalami *noise* dengan *broadband* (Luo et al. 2015)

Menurut Beebe (2004), frekuensi yang dihasilkan oleh kavitas pada mesin rotasional dapat terdeteksi pada $1.1x - 1.2x$ terhadap frekuensi fundamental (f_p) kecepatan pompa dan kebisingan yang dihasilkan kavitas dapat di indentifikasi

pada kenaikan pola *broadband* pada domain frekuensi dengan rentang frekuensi antara $1kHz$ sampai dengan $20kHz$.

2.5 Analisis Sinyal Getaran Berbasis Domain Waktu

Getaran dan gangguan sering kali dihasilkan oleh sifat yang acak pada permesinan (Brandt 2010). Oleh karenanya, untuk lebih memahami dan dapat menganalisa getaran maka sangat penting untuk memahami bagaimana aplikasi statistik pada analisa domain waktu. Maka dari hal tersebut pada bab ini akan menjelaskan tentang dasar teori dari analisis statistik yang dapat digunakan dalam mendeteksi kavitas berdasarkan dari kajian pustaka yang telah ada.

2.6.1 Probability Density Function (PDF)

Menurut Al-Hashmi (2009), Sebagai bagian dari konsep matematika, Probabilitas menampilkan nilai dari terjadinya suatu peluang pada kejadian tertentu. Jika kejadian dianggap pasti terjadi, probabilitasnya adalah 1; jika tidak terjadi, probabilitasnya adalah 0. Dalam aplikasinya, metode kepadatan probabilitas ini mudah digunakan dalam mempelajari sinyal kontinu seperti pada sinyal getaran. Secara definisi, kepadatan probabilitas adalah nilai amplitudo sesaat dalam interval amplitudo Δx , terhadap lamanya waktu Δt pada getaran acak. Adapun fungsi kepadatan probabilitas dirumuskan pada persamaan 2.4.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (2.4)$$

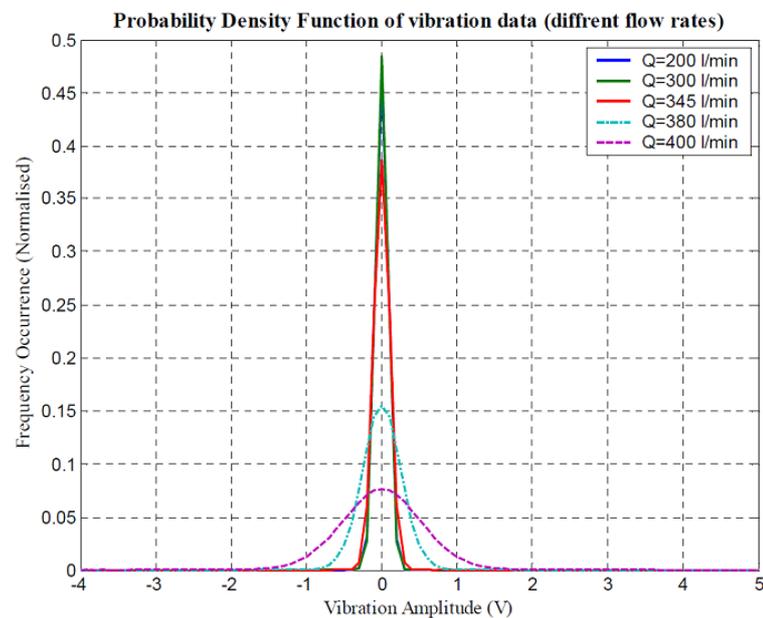
Dimana x menyatakan data yang digunakan, \bar{x} nilai rata-rata dari total data dan σ merupakan nilai standar deviasinya.

Estimasi kepadatan (*density estimation*) dengan pendekatan non-parametrik memungkinkan estimasi lebih mudah disesuaikan dengan data yang diamati karena tidak dibatasi untuk disesuaikan dengan pilihan parametrik lainnya. Disebutkan bahwa terdapat beberapa metode untuk memperkirakan estimasi kepadatan, salah

satu yang paling banyak digunakan seperti pada Gambar 2.27 merupakan histogram dari estimasi kepadatan data getaran pada beberapa kecepatan aliran yang dirumuskan dengan persamaan 2.5 (Al-Hashmi 2009).

$$f(x) = \frac{1}{M} \times \frac{(\text{number of } x_j \text{ in same bin as } x)}{(\text{width of bin containing } x)} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana $f(x)$ merepresentasikan estimasi kepadatan, M merupakan jumlah dari nilai observasi dan X merupakan variabel.



Gambar 2. 27 Histogram dari PDF (Thobiani et al. 2011)

2.6.2 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 (Luo et al. 2015). Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mendapatkan nilai puncak, salah satunya pada persamaan 2.6.

$$\text{peak value} = \frac{\max(x) - \min(x)}{2} \dots\dots\dots(2.6)$$

Diagnosis yang dilakukan pada nilai puncak yaitu dengan melihat perubahan amplitudo yang dihasilkan pada variasi statistik yang digunakan.

2.6.3 Standard Deviation (SD)

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 (SD). Adapun standar deviasi dirumuskan dengan persamaan 2.7.

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}{N-1}\right)} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana N merupakan jumlah dari titik sinyal data, \bar{x} adalah rata-rata dari nilai total sinyal dan x_j merupakan kolom data (Al-Hashmi 2009).

2.6.4 Variance

Dalam bidang statistika, *variance* merupakan nilai kuadrat dari standar deviasi (σ^2) yang dirumuskan pada persamaan 2.8.

$$Var(X) = \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (x - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana N merupakan jumlah dari titik sinyal data, \bar{x} adalah rata-rata dari nilai total sinyal dan 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 (Brandt 2010). Penggunaan metode ini dalam mendeteksi kavitasi telah dibuktikan dapat dilakukan oleh Luo *et al.* (2015).

2.6.5 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 2.9.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N x_j^2}{N}} \dots\dots\dots(2. 9)$$

Dimana N merupakan jumlah dari titik sinyal data, \bar{x} adalah rata-rata dari nilai total sinyal dan x_j merupakan kolom data (Brandt 2010). Banyak penelitian berbasis statistik menggunakan RMS telah dilakukan termasuk dalam mendeteksi kavitasi pada pompa seperti yang telah dilakukan oleh Al-Hashmi (2009); Al-Tobi dan Al-Sabari (2016).

2.6.6 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 2.9 berikut.

$$C_f = \frac{\max(|x(n)|)}{\sigma} \dots\dots\dots(2. 10)$$

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 (Brandt 2010:71).

2.6.7 Kurtosis

Parameter lainnya yang sering digunakan dalam analisis statistik salah satunya adalah *kurtosis* K , yang mana juga merupakan parameter dimensi yang dirumuskan dengan persamaan 2.11.

$$k = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^4}{(\sigma^2)^2} - 3 \dots \dots \dots (2.11)$$

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 .