

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam aplikasi industri, satu unit pompa sering kali tidak mampu memenuhi kebutuhan sistem dari sisi debit maupun tekanan. Penelitian dari Kunarto (2025) membahas tentang eksperimen konfigurasi pompa untuk mengatasi keterbatasan tersebut, digunakan konfigurasi pompa ganda yang disusun secara seri atau paralel. Konfigurasi paralel umumnya diterapkan untuk meningkatkan kapasitas aliran, sedangkan konfigurasi seri digunakan untuk meningkatkan tekanan atau *head*. Pemilihan konfigurasi pompa yang tepat menjadi faktor penting dalam mencapai kinerja sistem pemompaan yang efisien dan optimal, khususnya pada sistem dengan keterbatasan energi. (Kunarto dkk., 2025)

Penelitian oleh Mousmoulis dkk. (2025) meneliti efektivitas indikator berbasis getaran yang diekstraksi dari spektrum *envelope* untuk diagnosis kavitasi pada mesin fluida berputar seperti pompa dan *turbomachine*. Metode analisis sinyal menggunakan *Hilbert Transform* dan algoritma seperti *Spectral Kurtosis* dan *Cyclic Spectral Correlation* untuk menghasilkan spektrum *envelope* yang dapat menangkap resonansi frekuensi tinggi yang dihasilkan dari implosi gelembung kavitasi. Studi ini menunjukkan bahwa selama kavitasi berkembang, komponen resonansi yang dimodulasi pada frekuensi tertentu, termasuk *Blade Passing Frequency* (BPF), muncul secara konsisten dalam spektrum *envelope* dan dapat digunakan sebagai indikator yang sensitif untuk mendeteksi kavitasi sejak tahap awal sepanjang rentang laju aliran dan tekanan isap yang diuji. Analisis ini dilakukan pada berbagai kondisi *flow rate* dan tekanan isap (yang berkaitan erat dengan operasi di luar *Best Efficiency Point*), serta pada dua geometris *impeller* berbeda, menunjukkan bahwa analisis *envelope* yang ditingkatkan secara efektif mengidentifikasi modifikasi sinyal akibat *bubble implosive* dan

resonansi BPF yang terkait dengan fenomena kavitasi. (Mousmolis dkk., 2025)

Pada penelitian Yuwejiang Han (2024) mengatakan bahwa operasi pompa di luar BEP menyebabkan gangguan torsi hidrolis tambahan serta ketidakstabilan aliran internal akibat peningkatan turbulensi. Kondisi *recirculation* pada debit rendah (di bawah BEP) dan *flow separation* pada debit tinggi (di atas BEP) meningkatkan risiko kerusakan apabila pompa dioperasikan secara kontinu. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada identifikasi gangguan mekanis atau elektrik melalui komponen frekuensi karakteristik menggunakan FFT atau analisis waktu–frekuensi, yang sering kali kurang sensitif terhadap kondisi *off-design*. Oleh karena itu, diperlukan metode diagnosis yang lebih andal untuk mendeteksi operasi di luar BEP secara akurat pada aplikasi industri nyata. (Han dkk., 2024)

Penelitian yang dilakukan Andrean Verdinand (2024) yang juga membahas kendala pompa sentrifugal yang mengalami kendala vibrasi tinggi dengan indikasi *blade pass frequency* (BPF) pada spektrum vibrasi nya dikarenakan *throttling discharge* atau jepitan di sisi *discharge* untuk mengurangi *flow* operasional, sehingga dilakukan *re-rate impeller* dengan cara *trimming impeller* atau mengurangi diameter *impeller* menjadi lebih kecil untuk menyesuaikan dengan kebutuhan *flow* operasional nya dan hasilnya nilai vibrasi pompa turun dari 5,17 mm/s menjadi 2.24 mm/s. (Verdinand dkk., 2024)

Penelitian oleh Stephen, dkk (2024) mengusulkan pendekatan berbasis analisis domain waktu dari sinyal getaran untuk mendeteksi kavitasi pada unit *Pump-as-Turbine* (PAT), jenis pompa yang beroperasi sebagai turbin dalam aplikasi *micro-hidropower*. Dalam studi ini, fungsi distribusi probabilitas sinyal getaran dikembangkan untuk berbagai kondisi operasi termasuk keadaan kavitasi, dan dibandingkan menggunakan teknik *Deviation from Normal Distribution* (DND). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa

selama kavitasi terjadi, penyimpangan statistik sinyal getaran meningkat secara signifikan, yang dapat diinterpretasikan sebagai manifestasi aktivitas kavitasi dan menghadirkan batas alarm yang jelas untuk pemantauan kondisi. Meskipun fokus utama penelitian ini adalah analisis statistik domain waktu daripada spektrum frekuensi seperti BPF atau *PeakVue*, temuan ini mendukung premis bahwa komponen getaran non-linier dan perubahan distribusi sinyal berkaitan erat dengan kondisi kavitasi, sehingga memperkuat peran teknik sinyal getaran lanjutan dalam deteksi awal kavitasi pada mesin fluida berputar.

Penelitian yang dilakukan Chu T, 2024 menunjukkan bahwa analisis getaran efektif untuk mengidentifikasi degradasi kondisi pompa secara akurat, baik pada pengujian laboratorium maupun lapangan. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa seiring penurunan performa pompa, tingkat vibrasi meningkat signifikan, terutama pada kondisi fluida dengan kandungan padatan tinggi. Metode *PeakVue* terbukti lebih sensitif dibandingkan *overall velocity*, ditunjukkan oleh peningkatan amplitudo hingga  $\pm 30$  g pada konsentrasi pasir tinggi, yang berujung pada kegagalan pompa dalam waktu singkat. Temuan ini mengindikasikan bahwa getaran berdomain frekuensi tinggi dan respons impulsif, yang umum dianalisis melalui *PeakVue* atau *envelope*, dapat digunakan sebagai indikator awal terjadinya kondisi abnormal pada pompa, termasuk fenomena kavitasi dan degradasi hidraulik. (Chu, 2024)

Penelitian yang dilakukan Liwen Zhang (2023) menunjukkan bahwa optimasi geometri *impeller* pada pompa sentrifugal mampu meningkatkan efisiensi hidrolis sekaligus menurunkan getaran yang dipicu oleh karakteristik aliran internal. Melalui modifikasi distribusi sudut dan ketebalan sudu *impeller*, penelitian ini membuktikan bahwa ketidakstabilan aliran dan *pressure pulsation* pada frekuensi *blade passing frequency* (BPF) dapat dikurangi secara signifikan, yang tercermin dari penurunan percepatan getaran hingga lebih dari 60% serta peningkatan efisiensi hidrolis. Dengan demikian,

penelitian ini menegaskan bahwa karakteristik hidrolis yang lebih stabil melalui penyesuaian *impeller* berperan penting dalam menekan vibrasi dan meningkatkan keandalan operasi pompa. (Zhang dkk., 2023)

Penelitian oleh Liu H (2023) ini mengembangkan *Self-Tuning Variational Mode Decomposition (SVMD)* sebagai metode pemrosesan sinyal getaran untuk diagnosis kavitasi pada mesin fluida berputar, khususnya pada kondisi *noise* tinggi dan rasio sinyal-*noise* rendah. Dengan kemampuan meningkatkan *denoising* dan mengekstraksi frekuensi karakteristik kavitasi (CCFs) secara lebih akurat dibanding VMD konvensional, metode ini menunjukkan bahwa kenaikan dan modulasi getaran frekuensi tinggi akibat kavitasi dapat diisolasi secara efektif, sehingga memperkuat peran teknik dekomposisi sinyal lanjutan sebagai pendukung metode *envelope* atau *PeakVue* dalam deteksi dini kavitasi. (Liu dkk., 2023)

Penelitian Hsieh dkk (2022) ini mengkaji karakteristik aliran pompa *multistage* dengan konfigurasi seri dan paralel menggunakan simulasi CFD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi paralel secara signifikan meningkatkan laju aliran (*flow rate*), kecepatan aliran *outlet*, dan respons aliran sistem dibandingkan konfigurasi seri pada jumlah *stage* yang sama. Temuan ini menegaskan bahwa operasi pompa paralel efektif digunakan untuk memenuhi kebutuhan debit yang lebih besar dalam sistem pemompaan. (Hsieh dkk., 2022)

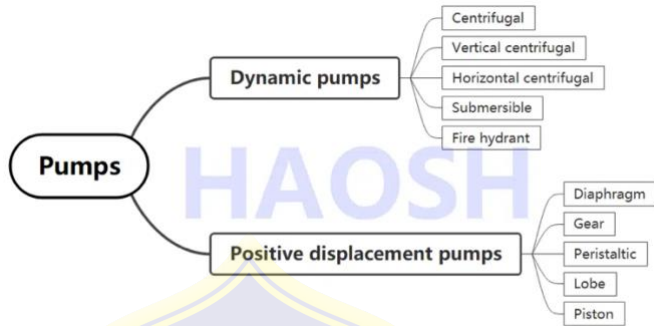
Penelitian yang dilakukan Joko Waluyo (2021) tentang analisis kinerja pompa sentrifugal setelah dilakukan *trimming impeller (re-rate)* mengatakan bahwa *pressure pulsation* di sisi *discharge* pompa sangat dipengaruhi oleh debit aliran (*flow*) pompa pada sisi *suction*. (Waluyo dkk., 2021)

## 2.2 Pengertian Pompa

Pompa adalah salah satu mesin yang memiliki tugas untuk menggerakkan fluida cair, lebih tepatnya memindahkan fluida cair dari tempat bertekanan rendah ke tempat bertekanan tinggi. Hal tersebut dapat dilakukan karena pompa memberikan perbedaan tekanan antara sisi hisap (*suction*) dengan sisi buang (*discharge*). Pompa memberikan perbedaan tekanan tersebut menggunakan komponen utama pompa, yaitu *impeller* atau sudu yang berputar pada pompa sentrifugal, maupun torak yang bergerak bolak-balik.

Prinsip dasar kerja pompa untuk menjalankan fungsinya dalam memindahkan fluida dimulai dari gerakan memutar yang diberikan oleh motor listrik, yang mana porosnya dihubungkan oleh sebuah *coupling* terhadap poros pompa. Gerakan putar yang diberikan oleh motor listrik akan memutar sudu putar atau *impeller* dari sebuah pompa ataupun menggerakkan torak bolak-balik sehingga pompa dapat memberikan perbedaan tekanan dan memindahkan fluida dari satu tempat ke tempat lain.

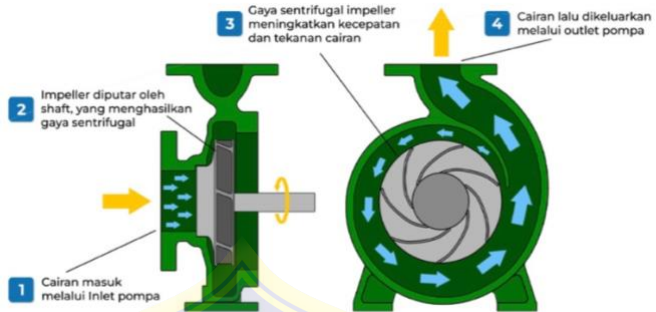
Secara garis besar, pompa dibagi menjadi 2 bagian besar, yaitu Pompa Dinamik dan Pompa *Positive Displacement*. Perbedaan paling mendasar di antara 2 jenis pompa ini adalah pada pompa dinamik penambahan energi fluida dalam bentuk tekanan terjadi secara tidak langsung, yaitu dengan mengubah energi kinetik menjadi energi tekanan dengan bantuan komponen pompa yang disebut *diffuser*. Sedangkan pada pompa *positive displacement*, penambahan tekanan pada fluida terjadi secara langsung dimana fluida dimampatkan langsung secara fisik. (Borremans, 2019)



Gambar 2. 1 Jenis-jenis pompa  
 Sumber: [www.haoshpumps.com](http://www.haoshpumps.com)

### 2.3 Pompa Sentrifugal

Pada gambar 2.2, dapat dilihat bahwa pompa sentrifugal merupakan salah satu jenis pompa dinamik. Ciri khas dari pompa sentrifugal adalah penggunaan *impeller* yang berputar sebagai komponen utama dalam mekanisme untuk memberikan perbedaan tekanan antara sisi *suction* dan sisi *discharge*. Dikarenakan kemampuan pompa sentrifugal untuk menaikkan *head* pompa dengan debit yang berkelanjutan, pompa ini sangat banyak digunakan dalam aplikasi industri maupun kehidupan sehari-hari. (Borremans, 2019)



Gambar 2. 2 Ilustrasi pompa sentrifugal Sumber: [www.haoshpumps.com](http://www.haoshpumps.com)

Prinsip kerja dari pompa sentrifugal dimulai dari gerakan putar yang diberikan oleh motor listrik sebagai penggerak. Poros dari motor listrik ini akan disambungkan dengan poros dari pompa sentrifugal oleh komponen yang disebut *coupling*. Begitu motor listrik mulai berputar, *impeller* dari pompa sentrifugal pun juga ikut berputar. Ketika *impeller* mulai berputar, fenomena gaya sentrifugal akan membuat fluida mengalami percepatan dan peningkatan energi kinetik. Berdasarkan hukum bernoulli, ketika kecepatan fluida meningkat, maka tekanan pada area tersebut menjadi turun dan menghisap fluida untuk masuk ke dalam pompa. Kemudian fluida akan masuk ke dalam *diffuser*, dalam pompa sentrifugal biasanya dalam bentuk rumah *volutee*, sehingga alirannya melambat. Karena kecepatan menurun, energi kinetik yang dimiliki fluida akan berubah menjadi energi tekanan yang juga sesuai dengan pernyataan hukum bernoulli. Fluida lalu pada akhirnya akan dialirkan ke saluran buang atau *discharge*. (Borremans, 2019)

## 2.4 Komponen Pompa Sentrifugal dan Isinya

Pada pompa sentrifugal umumnya terdapat dua jenis komponen, yaitu komponen *stationary* dan komponen *rotating*. Pompa sentrifugal sendiri juga terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan bentuk dan cara mengalirnya aliran fluida dalam pompa, yaitu: (Ticaret, 2000)

- Pompa tipe *volutee*

Merupakan pompa sentrifugal yang bekerja dengan memutar *impeller* untuk memberikan perbedaan tekanan antara *suction* dan *discharge* dengan mengkonversi energi kinetik aliran fluida menjadi tekanan. *Volutee* adalah bagian komponen *stationary* yang juga berfungsi sebagai rumah untuk *impeller*.

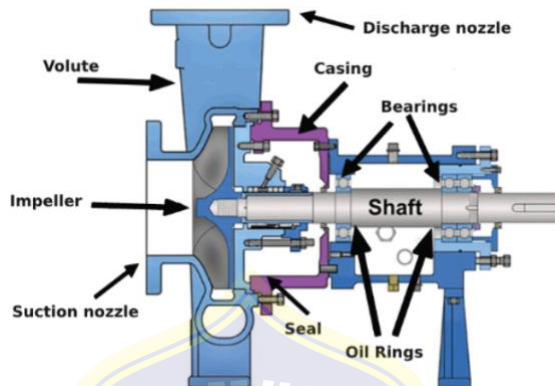
- Pompa sentrifugal bertingkat

Merupakan pompa sentrifugal yang dilengkapi dengan *diffuser* yang berfungsi mengarahkan aliran fluida ke tingkat selanjutnya.

- Pompa sentrifugal tipe *mix flow*

Merupakan transisi pompa sentrifugal ke pompa *axial*.

Pada gambar 2.3 di bawah ini, dapat dilihat komponen-komponen pada pompa sentrifugal tipe *volutee*, yang mana jenis yang akan dibahas lebih lanjut di bab selanjutnya. (Winston Engineering, 2025)



Gambar 2. 3 Komponen-komponen pompa sentrifugal  
 Sumber: [www.winstonengineering.com](http://www.winstonengineering.com)

#### 4. *Volutee Casing* (Rumah Pompa)

Berfungsi untuk mengarahkan aliran keluar dari *impeller*. Selain itu, *casing* membantu dalam meningkatkan tekanan fluida sebelum cairan keluar dari pompa dengan bentuknya.

#### 5. *Impeller*

Komponen utama yang paling krusial dalam pompa sentrifugal. *Impeller* berfungsi meningkatkan kecepatan fluida sehingga energi kinetik fluida bertambah. Fluida dengan energi kinetik yang besar kemudian akan diubah menjadi tekanan di dalam *volutee casing*.

#### 6. *Wear ring*

Berfungsi untuk mengurangi keausan pada titik temu *impeller* dengan *casing* akibat gesekan yang terjadi selama pompa beroperasi. Selain itu, *wear ring* juga memiliki peran penting untuk mengurangi kebocoran internal pompa antara fluida bertekanan tinggi di sisi *discharge* dengan fluida bertekanan rendah di sisi *suction*, yang mana akan mempengaruhi efisiensi dari pompa.

#### 7. Shaft (Poros Penggerak *Impeller*)

Berfungsi untuk meneruskan putaran dari motor ke *impeller*, sehingga memungkinkan pergerakan fluida dalam sistem.

#### 8. *Coupling*

Berfungsi sebagai penyambung antara *shaft* motor ke shaft pompa, sehingga ketika motor listrik berputar, pompa juga ikut berputar.

#### 9. *Mechanical seal*

Berfungsi sebagai komponen penyegel untuk mencegah kebocoran fluida dari dalam pompa ke atmosfer melalui *shaft*. *Mechanical seal* terdiri dari 2 komponen *sealing* utama, yaitu *stationary face* dan *rotating face*.

#### 10. *Bearing*

Komponen krusial pada pompa yang berfungsi sebagai bantalan untuk menyangga *shaft* pada posisinya, menahan beban arah *radial* dan *axial* dari pompa, serta memungkinkan rotasi *shaft* yang stabil.

#### 11. *Bearing housing*

Berfungsi sebagai rumah *bearing* yang diisi oleh cairan pelumasan untuk *bearing* yang berfungsi menjaga gesekan secara langsung antara *bearing* dengan komponen sekitarnya yang mana dapat memperpendek umur *bearing*.

#### 12. *Oil shield*

Berfungsi sebagai komponen penyegel dari *bearing housing* untuk mencegah kebocoran oli pelumasan dari dalam *bearing housing* ke luar atmosfer melalui *shaft*.

#### 13. *Suction* dan *Discharge Nozzle*

Berfungsi sebagai jalur hisap masuknya fluida (*suction*) sebelum masuk ke *impeller* dan jalur buang fluida (*discharge*) setelah dari *impeller*.

### 2.4.1 Impeller

Seperti yang dibahas singkat di poin sebelumnya, *impeller* merupakan komponen paling penting yang mempengaruhi performa pompa sentrifugal. *Impeller* adalah sebuah komponen berputar yang mempunyai sudu dan dipasang pada poros pompa. *Impeller* memiliki peranan untuk mengubah energi dari putaran motor menjadi pergerakan fluida. *Impeller* dibagi menjadi beberapa jenis klasifikasi: (Karassik, 2001)

a) Berdasarkan konstruksi

*Impeller* dibagi menjadi 3 tipe berdasarkan konstruksi, yaitu *impeller* tertutup (*closed impeller*), *impeller* terbuka (*open impeller*) dan *impeller* setengah tertutup (*semi open impeller*).

b) Berdasarkan jumlah hisapan

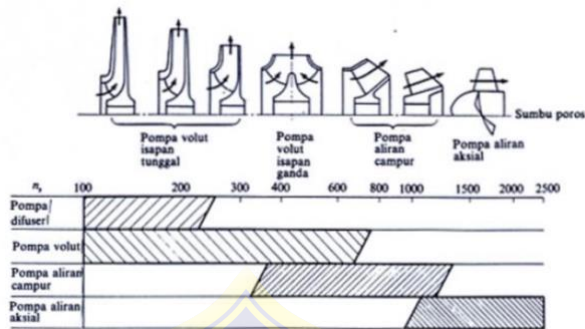
Jenis *impeller* berdasarkan jumlah hisapan dibagi menjadi 2, yaitu hisapan tunggal dan hisapan ganda.

c) Berdasarkan tingkat

*Impeller* dapat dibedakan menjadi 2 tipe apabila dibedakan berdasarkan tingkat nya, yaitu *Single Stage Impeller* dan *Multi Stage Impeller*, dimana terdapat lebih dari satu jumlah *impeller* dalam suatu poros pompa sentrifugal.

d) Berdasarkan arah aliran

Berdasarkan arah alirannya, *impeller* pada pompa sentrifugal dapat dibagi menjadi tiga yaitu *impeller* aksial, *impeller* radial dan *impeller* aliran campuran. Pembagian jenis pompa ini tidak terlepas dari pengaruh kecepatan spesifik pompa.



Gambar 2. 4 Jenis arah aliran *impeller* pompa  
 Sumber: Sularso & Tahara, 1996

## 2.5 Karakteristik Operasi Pompa Sentrifugal

### 2.5.1 Persamaan Bernoulli

Hukum Bernoulli merupakan hukum yang digunakan untuk menjelaskan gejala yang berhubungan dengan gerakan zat alir yang melalui suatu penampang pipa seperti pada gambar 2.1 dibawah. Persamaan bernoulli menjelaskan hubungan antara kecepatan aliran dengan tinggi permukaan air serta tekanannya. Adapun persamaan bernoulli dapat dituliskan sebagai berikut: (Jiwandono, 2024)

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + gh_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + gh_2 \quad 2.1$$

Keterangan:

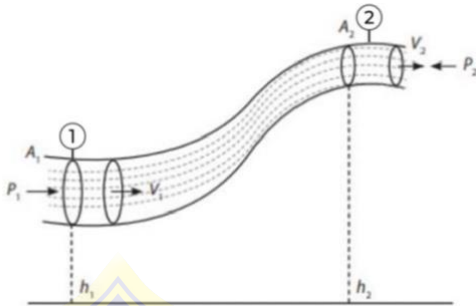
P = Tekanan (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = *Density* (kg/m<sup>3</sup>)

V = Kecepatan Aliran (m/s)

g = Percepatan Gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

h = Ketinggian (m)



Gambar 2. 5 Gerak fluida dalam persamaan Bernoulli  
 Sumber: Jiwandono, 2024

### 2.5.2 Head Pompa

*Head* dikembangkan dari prinsip konservasi energi untuk aliran fluida yang tidak kompresibel. Persamaan Bernoulli menyatakan bahwa energi total per satuan berat fluida adalah konstan sepanjang garis aliran tanpa penambahan atau pengurangan energi eksternal.

Pompa memberi energi ke fluida sehingga tekanan dan/atau elevasi fluida meningkat setelah melewati *impeller*. Jika kita menghitung perbedaan energi fluida antara titik masuk (*suction*) dan keluar (*discharge*) pompa, total *head* yang dikembangkan pompa dirumuskan sebagai: (Frank M. White, 1998)

$$\left( \frac{P_s}{\rho} + \frac{V_s^2}{2g} + gh_s \right) + H_{\text{Pompa}} = \left( \frac{P_d}{\rho} + \frac{V_d^2}{2g} + gh_d \right) + H_{\text{loss}} \quad 2.2$$

$$H_{\text{Pompa}} = \left( \frac{P_d}{\rho} + \frac{V_d^2}{2g} + gh_d \right) - \left( \frac{P_s}{\rho} + \frac{V_s^2}{2g} + gh_s \right) + H_{\text{loss}} \quad 2.3$$

Keterangan:

P = Tekanan (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = *Density* (kg/m<sup>3</sup>)

V = Kecepatan Aliran (m/s)

g = Percepatan Gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

$h$  = Ketinggian (m)  
 $d$  = *Discharge* (sisi buang pompa)  
 $s$  = *Suction* (sisi isap pompa)  
 $H_{\text{pompa}}$  = *Head* pompa (m)  
 $H_{\text{loss}}$  = *Head loss* (*head* yang hilang akibat friksi)  
 (m)

Adanya *variable head loss* pada persamaan diatas disebabkan karena *loss* yang disebabkan oleh gesekan dan shock pada sistem pompa aktual. Maka dari itu, persamaan *Head* pompa menyertakan *Head loss*. (Borremans, 2019)

### 2.5.3 Debit Aliran

Debit aliran massa, yaitu jumlah massa yang mengalir melalui suatu penampang dalam setiap satuan waktu, juga mengalir melalui penampang 2 (gambar 2.6) sesuai dengan hukum kekekalan massa. (Borremans, 2019)



Gambar 2. 6 Debit aliran pada penampang  
 Sumber: Borremans, 2019

Persamaan debit aliran massa ( $Q$ ) adalah sebagai berikut ini:

$$Q = \rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \text{ [kg/s]} \quad 2.4$$

Pada fluida tak termampatkan (cairan), rapat massa ( $\rho$ ) bernilai konstan. Oleh karena itu, laju aliran volumetrik  $Q_V$  dapat digunakan, yaitu jumlah volume fluida yang mengalir melalui suatu

penampang dalam setiap satuan waktu. (Borremans, 2019)

$$Q = c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2 \text{ [m}^3\text{/s]} \quad 2.5$$

Pada penerapannya di pompa sentrifugal, satuan yang lebih umum dipakai untuk debit aliran adalah m<sup>3</sup>/h.

#### 2.5.4 Efisiensi Pompa

Daya poros yang diperlukan untuk menggerakkan pompa adalah sama dengan daya hidraulik ditambah dengan kerugian daya dalam pompa. Daya ini dapat dinyatakan sebagai berikut. (Sularso & Tahara, 1996)

$$P_{\text{poros}} = \frac{P_{\text{hidraulik}}}{\eta_{\text{pompa}}} \quad 2.6$$

Keterangan:

$P_{\text{poros}}$  = Daya poros (watt)

$P_{\text{hidraulik}}$  = Daya hidraulik (watt)

$\eta_{\text{pompa}}$  = Efisiensi pompa

## 2.6 Kurva Karakteristik Pompa dan Sistem

### 2.6.1 Kurva Pompa-Sistem

Kurva *head*–kapasitas pompa menunjukkan kemampuan pompa dalam menghasilkan *head H*, yang besarnya bergantung pada kapasitas atau laju aliran *Q*. Dalam pengoperasiannya, pompa harus mampu memenuhi *head* yang dibutuhkan oleh sistem perpipaan. Oleh karena itu, selain kurva *head*–kapasitas pompa, perlu pula diketahui kurva *head*–kapasitas dari sistem.

*Head* sistem merupakan *head* yang diperlukan untuk mengalirkan fluida melalui sistem perpipaan. *Head* ini terdiri atas *head* statis sistem dan *head* kerugian gesek. *Head* statis merupakan

*head* potensial yang berasal dari perbedaan ketinggian permukaan fluida serta perbedaan tekanan statis antara sisi isap dan sisi keluar sistem. Sementara itu, kerugian gesek timbul akibat aliran fluida melalui pipa, *fitting*, dan peralatan lain dalam sistem.

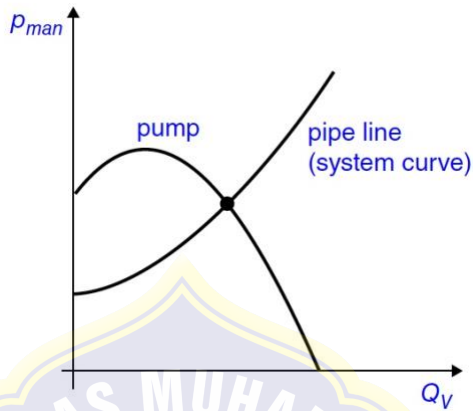
Apabila kurva *head* sistem digambarkan pada diagram hubungan antara *head* dan laju aliran, maka bentuknya akan menyerupai kurva parabola yang meningkat seiring dengan bertambahnya laju aliran.

Titik potong antara kurva *head*-kapasitas pompa dan kurva *head*-kapasitas sistem merupakan titik kerja pompa dan sistem. Pada titik ini, *head* yang dihasilkan oleh pompa sama dengan *head* yang dibutuhkan oleh sistem pada laju aliran yang sama.

Kurva *head*-kapasitas sistem dapat berubah, misalnya akibat perubahan *head* statis atau perubahan tahanan sistem perpipaan. Apabila *head* statis meningkat, maka kurva sistem akan bergeser ke atas, sehingga titik kerja pompa-sistem berpindah dan laju aliran berubah. Sebaliknya, apabila tahanan sistem meningkat, misalnya akibat katup pengatur aliran diperkecil pembukaannya, maka kurva sistem menjadi lebih curam dan titik kerja bergeser ke laju aliran yang lebih kecil. (Sularso & Tahara, 1996)

### **2.6.2 Best efficiency point (BEP) dan *Preffered operating region* (POR)**

*Operating point* adalah titik pertemuan antara kurva sistem dan kurva pompa seperti digambarkan pada gambar 2.7. Nama lain dari titik ini adalah *Best efficiency point* atau *Duty Point*. (Borremans, 2019)



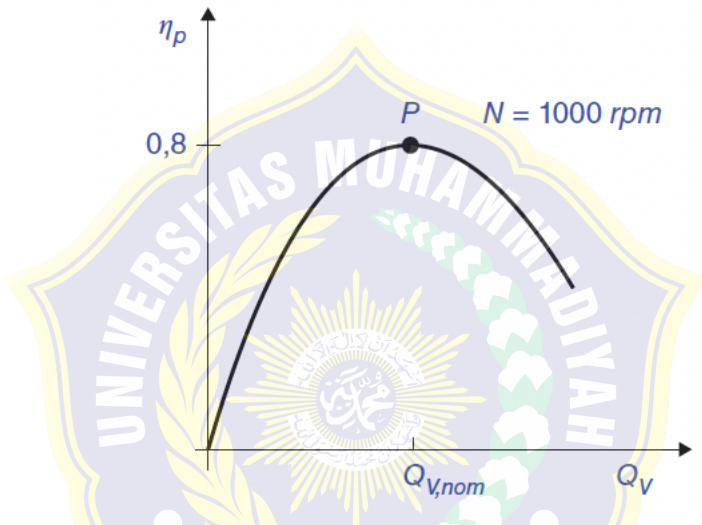
Gambar 2. 7 Kurva pompa dan kurva *system*  
 Sumber: Borremans, 2019

Kurva sistem meningkat secara monoton seiring bertambahnya laju aliran karena rugi-rugi gesek dalam sistem perpipaan berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan aliran. Sebaliknya, kurva pompa menunjukkan karakteristik maksimum pada titik tertentu akibat keterbatasan hidraulik *impeller* dan meningkatnya kerugian internal di luar titik desain. (Borremans, 2019)

Rentang debit aliran di sekitar *Best efficiency point* (BEP) di mana pompa boleh beroperasi secara kontinu dengan tingkat keandalan, efisiensi, dan umur komponen yang optimal. *Preferred Operating Region* (POR) merupakan rentang operasi di sekitar *best efficiency point* (BEP) yang direkomendasikan oleh API 610 untuk menjamin kestabilan aliran, minimisasi gaya hidraulik tidak seimbang, serta peningkatan keandalan dan umur pompa. Rentang yang diperbolehkan adalah 70% sampai 120% dari BEP. (API Standard 610, 2021)

### 2.6.3 Kurva Efisiensi

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, Titik pertemuan antara kurva pompa dan kurva sistem adalah titik kerja pompa dengan efisiensi paling baik sehingga kurva efisiensi digambarkan terhadap variasi  $Q$  debit aliran seperti gambar 2.8 berikut. (Borremans, 2019)



Gambar 2. 8 Kurva efisiensi kerja pompa  
Sumber: Borremans, 2019

### 2.6.4 Pengoperasian Kapasitas Pompa

Bila pompa dioperasikan dengan kapasitas kurang dari titik kerja normalnya, maka beberapa masalah berikut dapat timbul. Pada kapasitas aliran sangat kecil pompa dapat menjadi panas. Pada kapasitas rendah, gaya radial pada *impeller* akan bertambah besar. Pada umumnya kerugian yang terjadi pada pompa adalah dalam bentuk panas yang akan dibawa keluar oleh zat cair. Namun pada operasi dalam keadaan katup keluar tertutup atau terbuka sangat kecil maka kerugian akan meningkat

sedangkan panas yang dibawa keluar sangat sedikit. Maka temperatur pompa akan naik dengan cepat. Kenaikan temperatur ini dapat dihitung dengan rumus berikut jika radiasi dari permukaan pompa dinding pompa diabaikan. (Sularso & Tahara, 1996)

$$\Delta H = \frac{(1-n)H}{427n} \quad 2.7$$

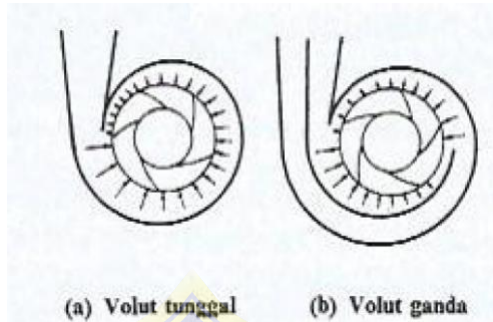
Keterangan:

H = *Head* total pompa pada titik operasi. (m)

t = Kenaikan temperatur. (°C)

$\eta$  = Efisiensi pompa pada titik operasi.

Jika pompa dengan rumah *volute* dengan *head* tinggi dioperasikan pada kapasitas dekat keadaan katup tertutup atau kapasitas rendah maka temperatur akan naik dan akan menimbulkan kesulitan seperti kavitasi, penguapan zat cair yang bocor ke sisi isap *impeller* melalui *wear ring*, tekanan di dalam *volute* yang bervariasi di sekeliling *impeller* yang menimbulkan gaya radial yang tak seimbang pada *impeller*. Gaya radial ini demikian besar hingga setelah dapat menyebabkan kerusakan pada komponen-komponen pompa. Jadi bila mungkin, pengoperasian pompa pada kapasitas tak penuh sejauh mungkin dihindari. (Sularso & Tahara, 1996)

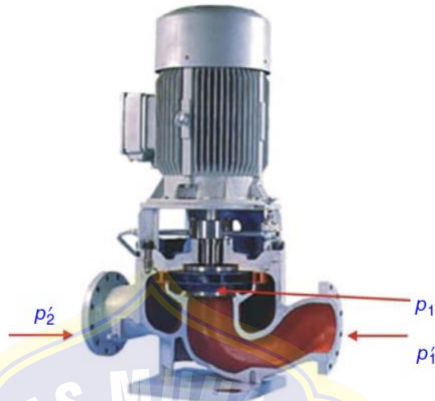


Gambar 2. 9 Distribusi tekanan pada *impeller* dibawah kapasitas normal.

Sumber: Sularso & Tahara, 1996

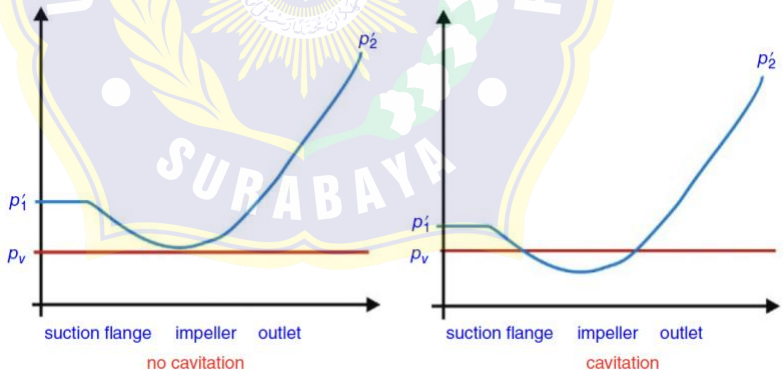
## 2.7 Net positive suction head (NPSH)

Pertimbangkan sebuah pompa sentrifugal seperti gambar 2.10. Pada *flange* isap (*suction flange*), fluida memiliki tekanan statis  $p'_1$ , sedangkan pada *flange* buang (*discharge flange*) tekanan statisnya adalah  $p'_2$ . Perubahan tekanan statis di dalam pompa ditunjukkan pada Gambar 2.11. Pada gambar tersebut juga ditampilkan garis tekanan uap jenuh fluida  $p_v$  pada temperatur operasi saat itu. (Borremans, 2019)



Gambar 2. 10 Ilustrasi penjelasan *pressure flange suction* dan *discharge* dalam NPSH  
 Sumber: Borremans, 2019

Dimungkinkan bahwa garis tekanan uap tersebut berpotongan dengan kurva tekanan statis di dalam pompa. Apabila terjadi perpotongan, maka kavitasi akan terjadi.



Gambar 2. 11 Ilustrasi grafik *pressure suction* dan *discharge* terhadap vapor *pressure*  
 Sumber: Borremans, 2019

Tekanan statis  $p'_1$  pada *flange* isap dapat dihitung oleh pengguna pompa. Namun, tekanan statis tepat

sebelum fluida memasuki *impeller* tidak dapat dihitung secara langsung oleh pengguna. Hal ini disebabkan karena fluida yang mengalir dari *flange* isap menuju *impeller* mengalami kerugian tekanan akibat gesekan dan percepatan aliran. Besarnya kerugian tekanan ini tidak dapat ditentukan secara presisi tanpa pengujian internal pompa. Oleh karena itu, besarnya tekanan statis minimum pada *flange* isap yang diperlukan untuk mencegah terjadinya kavitasi harus ditentukan oleh pabrikan pompa. Konsep awal yang digunakan untuk tujuan ini adalah *Net positive suction head* (NPSH). (Borremans, 2019)

Pengguna pompa menghitung tekanan total fluida pada inlet *flange* isap, kemudian mengonversinya ke dalam satuan meter kolom fluida dengan membagi tekanan tersebut terhadap  $\rho \cdot g$ . Nilai ini disebut sebagai *net positive suction head available* (NPSHa), di mana indeks a menyatakan *available*. Dengan demikian, NPSHa merupakan tekanan total yang dapat disediakan oleh sistem pada *flange* isap pompa. Besarnya NPSHa dapat ditulis sebagai berikut:

$$NPSHa = \frac{Pa}{\rho g} - \frac{Pv}{\rho g} - Hs - Hls \quad 2.8$$

Keterangan:

NPSHa = NPSH yang tersedia (m)

$\rho$  = massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

Pa = Tekanan atmosfer ( $\text{kgf/m}^2$ )

g = Percepatan Gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

Pv = Tekanan uap jenuh ( $\text{kgf/m}^2$ )

Hs = *Head* isap statis (m)

Hls = Kerugian *head* di dalam pipa isap (m)

Namun, nilai NPSHa yang tersedia belum tentu menjamin bahwa kavitasi tidak akan terjadi. Oleh sebab itu, pabrikan pompa harus menentukan tekanan minimum yang dibutuhkan agar kavitasi tidak terjadi. Nilai ini disebut

sebagai *net positive suction head required* (NPSHr), di mana indeks r menyatakan *required*.

Untuk menentukan NPSHr, pabrikan melakukan pengujian khusus pada pompa guna mengukur kerugian tekanan dari *flange* isap hingga titik tekanan terendah di sisi masuk *impeller*. Secara praktis, kondisi bebas kavitasi hanya dapat dicapai apabila NPSHa selalu lebih besar daripada NPSHr. (Borremans, 2019)

Dalam praktik industri, umumnya ditambahkan faktor keamanan, sehingga kriteria yang digunakan adalah:

$$\text{NPSHa} > \text{NPSHr} + 0.5 \text{ m}$$

### 2.7.1 Fenomena Kavitasi Pada Pompa Sentrifugal

Kavitasi terjadi Ketika tekanan statis fluida menurun hingga berada di bawah suatu nilai kritis yang mendekati tekanan uap jenuhnya. Kondisi tekanan statis rendah ini umumnya terjadi di sisi isap (*suction side*) pompa. Pada kondisi tersebut, gelembung uap terbentuk di dalam fluida dan kemudian terbawa aliran menuju daerah dengan tekanan yang lebih tinggi. Ketika gelembung uap tersebut memasuki daerah bertekanan tinggi, gelembung akan runtuh (*implode*) secara tiba-tiba. (Borremans, 2019)

Proses runtuhnya gelembung uap berlangsung sangat cepat, dalam orde milidetik, dan menghasilkan lonjakan tekanan lokal yang sangat tinggi, yang dapat mencapai hingga 20.000 bar. Lonjakan tekanan ini menghasilkan gelombang kejut dengan frekuensi tinggi, sekitar 20 kHz, yang berulang kali menghantam permukaan dinding rumah pompa dan sudu *impeller*. Akibatnya, terjadi erosi material pada permukaan tersebut.

Kavitasi merupakan proses yang bersifat kontinu selama kondisi tekanan yang tidak memadai masih terjadi. Pada tahap awal, kerusakan

permukaan material ditandai dengan struktur yang berpori atau menyerupai spons. Seiring dengan berlanjutnya kavitasi, karakteristik aliran dan efisiensi pompa akan menurun. Pada kondisi kavitasi yang parah, kerusakan dapat berkembang sangat cepat hingga menyebabkan *impeller* mengalami kerusakan total dalam waktu beberapa hari. Fenomena kavitasi dapat dikenali melalui beberapa indikasi operasional, antara lain:

- Terjadinya penurunan dan fluktuasi tekanan serta laju aliran.
- Munculnya getaran dan kebisingan, mulai dari suara desiran ringan hingga suara kasar menyerupai letupan.

Bunyi akibat kavitasi sering digambarkan menyerupai pukulan palu logam dan dapat dibedakan dengan jelas dari suara gelembung udara yang terperangkap di dalam fluida.

Kavitasi tidak terbatas hanya pada pompa jenis tertentu, tetapi dapat terjadi pada berbagai jenis pompa. Untuk mencegah terjadinya penguapan fluida, perlu dipastikan bahwa kerugian tekanan pada pipa isap tidak terlalu besar dan tekanan isap yang tersedia cukup tinggi. Pada aplikasi pemompaan fluida bertemperatur tinggi, umumnya pompa dipasang sedemikian rupa sehingga fluida mengalir secara gravitasi menuju pompa.

Secara praktis, batas aman operasi terhadap kavitasi ditentukan oleh *Net positive suction head* (NPSH). Sesuai penjelasan diatas, NPSHa harus melebihi nilai NPSHr untuk menghindari kavitasi pada sisi isap pompa. (Marc Borremans, 2019)

Beberapa Tindakan di bawah ini dapat dilakukan untuk menghindari terjadinya kavitasi: (Borremans, 2019)

- Mengurangi Tekanan uap jenuh (Pv) dengan menurunkan temperatur fluida
- Meningkatkan tekanan pada sisi isap pompa dengan menaikkan level cairan fluida pada reservoir di sisi isap pompa atau meletakkan pompa lebih rendah.
- Mengurangi gesekan pada sisi isap pompa dengan menambah diameter pipa isap pompa, mengurangi debit aliran, dan membersihkan filter pada sisi isap pompa.
- Tidak menggunakan katup aliran pada sisi isap pompa untuk mengatur debit aliran pompa, melainkan menggunakan katup aliran di sisi buang pompa.
- Mengubah debit aliran sehingga NPSHr menjadi lebih kecil.

## 2.8 Re-rate *impeller* Pompa Sentrifugal

Perubahan diameter *impeller* pada pompa sentrifugal (*rerate impeller*) mempengaruhi karakteristik hidraulik pompa. Berdasarkan hukum *affinity*, perubahan *impeller* diameter secara langsung mengubah laju aliran dan *head* pompa; laju aliran berbanding lurus dengan diameter *impeller* sedangkan *head* berbanding kuadrat diameter *impeller*, sehingga diameter yang lebih besar dapat meningkatkan kapasitas aliran sekaligus *head* yang dihasilkan. (Ticaret, 2000)

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad 2.9$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad 2.10$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$$

2.11

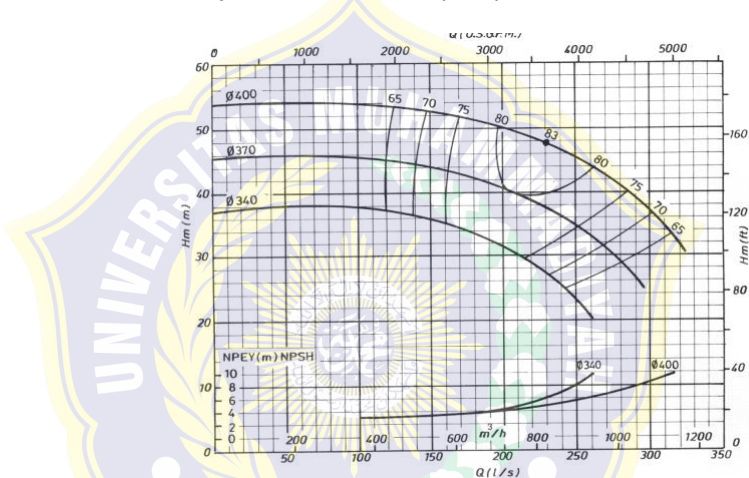
Keterangan:

Q = Debit aliran (m<sup>3</sup>/h)

D = Diameter *impeller* (mm)

H = *Head* total pompa (m)

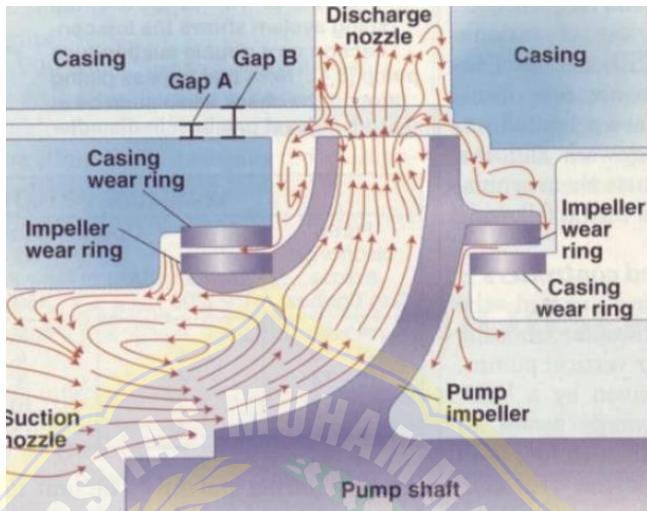
P = Daya poros pompa (KW)



Gambar 2. 12 Kurva pompa dengan perubahan diameter *impeller* dan RPM yang konstan

Sumber: Ticaret, 2000

Perubahan diameter *impeller* yang dilakukan memiliki batasan, terutama dalam hal menambah ukuran diameter *impeller* pompa harus memperhatikan *clearance* antara sisi buang *impeller* terhadap *casing* pompa seperti yang sudah diatur dalam standar API 610 agar resirkulasi aliran di sisi buang pompa dapat terkendali seperti gambar 2.13 dibawah. (API Standard 610, 2021)

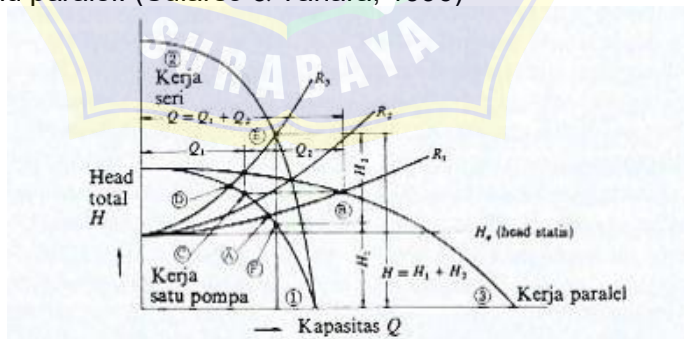


Gambar 2. 13 Ilustrasi peristiwa *recirculation* di sisi buang *impeller*

Sumber: Alkhowaiter, 2025

## 2.9 Pengoperasian Pompa Secara Seri dan Paralel

Jika *head* atau kapasitas aliran yang diperlukan tidak dapat dicapai dengan satu pompa saja, maka dapat digunakan dua pompa atau lebih yang disusun secara seri atau paralel. (Sularso & Tahara, 1996)



Gambar 2. 14 Operasi seri dan paralel dari pompa dengan karakteristik sama

Sumber: Sularso & Tahara, 1996

Operasi pompa secara seri digunakan untuk meningkatkan *head* total sistem dengan debit aliran yang sama, sedangkan operasi pompa secara paralel digunakan untuk meningkatkan kapasitas aliran dengan *head* yang relatif konstan. Karakteristik ini tercermin pada kurva *head*-kapasitas, di mana pompa seri menghasilkan kurva dengan *head* yang lebih tinggi, sedangkan pompa paralel menghasilkan kurva dengan kapasitas yang lebih besar. (Sularso & Tahara, 1996)

## 2.10 Fenomena Getaran Pada Pompa

Mesin yang berotasi seperti pompa pada umumnya tidak terlepas dari adanya getaran yang ditimbulkan dari rotasi mesin tersebut. Mesin yang berotasi seiring waktu akan menyebabkan timbulnya kerusakan-kerusakan atau kegagalan pada komponen mesin itu sendiri yang mana akan berakibat bagi kualitas dan ketahanan dari mesin tersebut. Karena itulah, getaran atau vibrasi merupakan parameter penting yang harus dimonitor dan dikendalikan pada sebuah peralatan putar (*rotating equipment*). (Musad dkk., 2024)

Analisa vibrasi merupakan kegiatan yang dilakukan untuk memonitor dan menilai fungsi dan keadaan getaran pada sebuah mesin, dalam hal ini pompa sentrifugal. Dari analisa vibrasi, dapat diketahui data kondisi keparahan vibrasi pada suatu pompa serta dapat juga mengetahui penyebab dari vibrasi tersebut. Dari hal tersebut akan didapatkan data berupa tren kenaikan vibrasi, serta analisis kerusakan pada komponen-komponen yang akan digunakan untuk kegiatan *maintenance*. Adapun cara lain yang lebih baik dalam mengatasi akan terjadinya suatu kerusakan atau kegagalan yang disebabkan oleh getaran pada suatu pompa adalah dengan menerapkan *predictive maintenance*, yang mana metode ini jauh lebih baik dari metode perawatan lainnya dimana pada metode ini memiliki efektivitas dan produktif dalam segi pembiayaan dan produksi yang mana juga akan berdampak bagi

peningkatan produktivitas, kualitas produk, efektivitas manufaktur dan produksi.

Dalam penerapan *predictive maintenance*, terdapat salah satu cara yang bisa dilakukan yaitu dengan melakukan *monitoring* vibrasi mesin, atau biasa disebut *condition monitoring*. Grafik spektrum vibrasi yang dihasilkan memberikan informasi tentang hubungan antara frekuensi (sumber vibrasi) dan amplitudo (tingkat keparahan). Analisis grafik spektrum vibrasi cukup efektif untuk mengungkap permasalahan pada mesin. (Musad dkk., 2024)

### **2.11 Analisa Vibrasi**

Analisa vibrasi adalah kegiatan yang dilakukan untuk menentukan kondisi operasi dan mekanik suatu peralatan atau mesin. Kegiatan ini bertujuan untuk melakukan pemantauan berkala terhadap getaran mesin, yang mana merupakan parameter penting kesehatan dari sebuah peralatan sehingga identifikasi terhadap masalah dapat terdeteksi sebelum masalah menjadi terlalu serius dan menyebabkan *downtime* yang tidak terjadwal. Pemantauan vibrasi secara teratur dapat mendeteksi munculnya masalah-masalah kesehatan mesin seperti bantalan yang rusak, kelonggaran mekanis komponen-komponen yang berputar pada sebuah mesin, ataupun roda gigi yang aus atau rusak. Analisa getaran juga dapat mendeteksi ketidaksejajaran antara dua poros pompa dan motor yang disambung (*coupling misalignment*) yang mana dapat menyebabkan kerusakan fatal pada operasional suatu pompa. Selain kegiatan pemantauan berkala, analisa vibrasi juga dilakukan ketika operator dan teknisi lapangan mendeteksi suara atau getaran tidak normal pada suatu pompa sehingga dilakukan analisa vibrasi untuk mendeteksi lebih lanjut penyebab ketidaknormalan parameter pada pompa. (Suhesti dkk., 2024)



Gambar 2. 15 Kegiatan pengecekan vibrasi pada pompa sentrifugal  
Sumber: [www.emerson.com](http://www.emerson.com)

## 2.12 Teori Dasar Getaran

Getaran atau vibrasi berasal dari kata dasar getar, yang menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI) Adalah Gerak yang berulang-ulang secara cepat. Contoh yang sederhana dari prinsip dasar getaran adalah pendulum yang berayun dan senar pada gitar. Secara garis besar, ada beberapa komponen parameter penting dalam getaran, yaitu: (Adli, 2020)

### 1. Amplitudo

Amplitudo Adalah jarak terjauh dari simpangan yang berawal dari titik kesetimbangan. Semakin besar nilai amplitudo berarti semakin besar getaran yang terjadi.

### 2. Frekuensi

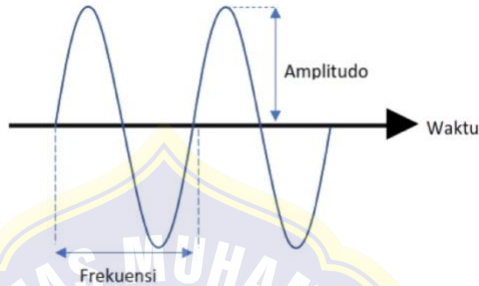
Frekuensi Adalah banyaknya getaran yang terjadi dalam kurun waktu satu detik. Frekuensi memiliki satuan yaitu Hertz (Hz). Satu siklus frekuensi terdiri dari satu 'bukit' dan satu 'lembah'.

### 3. Fase

Fase merupakan perpindahan posisi dari bagian-bagian yang bergetar secara relative untuk menentukan titik referensi atau titik awal pada bagian lain yang bergetar.

## 1. *Waveform*

Merupakan representasi grafik dari amplitudo getaran terhadap waktu dari suatu getaran yang terjadi pada suatu mesin.



Gambar 2. 16 Ilustrasi gelombang sinusoidal  
Sumber: [www.researchgate.com](http://www.researchgate.com)

### 2.13 Gerak Harmonik Sederhana

Untuk membahas analisa vibrasi, perlu diketahui tentang gerak harmonik sederhana yang diperlihatkan pada gambar 2.17 yang terdiri dari bobot/benda yang melekat pada salah satu ujung pegas. Gambar 2.17 menjelaskan tentang karakteristik getaran yang bergerak dari posisi netral, ke batas atas perjalanan (amplitudo), lalu Kembali ke posisi netralnya, setelah itu ke batas bawah perjalanan dan Kembali ke posisi netral dapat mewakili satu siklus gerak. Dalam satu siklus Gerak, mengandung semua informasi yang diperlukan untuk mengukur getaran. Gerakan yang berkelanjutan dari massa yang tergantung di ujung pegas akan mengulangi siklus yang sama. Gerakan ini disebut Gerak harmonik sederhana, dan hubungan antara perpindahan massa dan waktu dinyatakan dalam bentuk persamaan sinusoidal pada persamaan 2.12 (Girdhar, 2004)

$$X = X_0 \sin \omega t \quad (2.12)$$

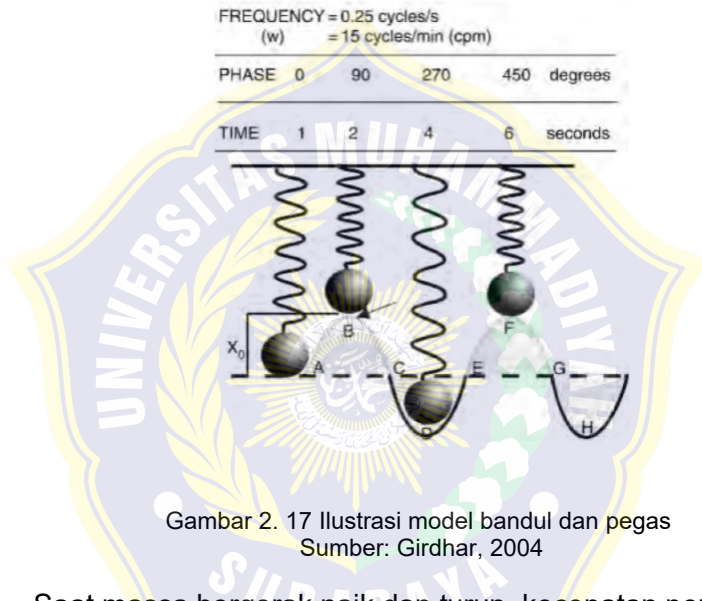
$X$  = Perpindahan pada waktu ( $t$ ) instan tertentu.

$X_0$  = Perpindahan maksimum.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$f$  = Frekuensi dalam Hertz (Hz)

$t$  = Waktu (detik)



Gambar 2. 17 Ilustrasi model bandul dan pegas  
Sumber: Girdhar, 2004

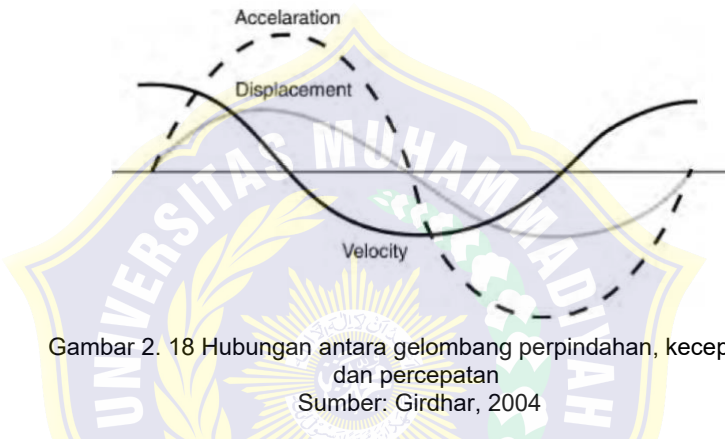
Saat massa bergerak naik dan turun, kecepatan perjalanan berubah dari nol ke maksimum. Kemudian, persamaan kecepatan (*velocity*) dapat diperoleh dari turunan persamaan perpindahan (2.13) sebagai berikut:

$$\text{Velocity } (v) = \frac{dX}{dt} = X_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (2.13)$$

Demikian pula, percepatan (*acceleration*) massa juga bervariasi dan dapat diperoleh dengan turunan dari persamaan kecepatan, dapat dilihat pada persamaan 2.14 berikut:

$$\text{Acceleration (a)} = \frac{dv}{dt} = -X_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \quad (2.14)$$

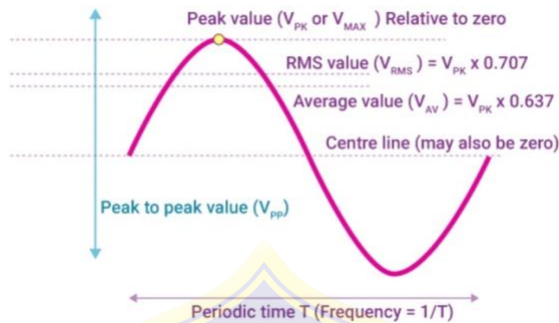
Dalam gambar 2.18 dibawah ini, perpindahan ditampilkan sebagai kurva sinus, kecepatan sebagai kurva kosinus dan akselerasi dalam kurva sinus.



Gambar 2. 18 Hubungan antara gelombang perpindahan, kecepatan, dan percepatan  
Sumber: Girdhar, 2004

### 2.14 Skala Pengukuran Vibrasi

Ketika membandingkan nilai keseluruhan dalam getaran, terdapat beberapa skala yang digunakan untuk menentukan besaran pengukuran pengukuran vibrasi. Dalam hal ini, skala yang digunakan dalam pengukuran getaran keseluruhan adalah *Peak*, *Peak to Peak*, dan *Root Mean Square (RMS)*. Skala-skala ini memiliki hubungan satu sama lain dalam gelombang dan digambarkan dalam bentuk sinusoidal. Gambar 2.19 dibawah ini menunjukkan hubungan antara skala-skala yang disebutkan diatas. (Girdhar, 2004)



Gambar 2. 19 Skala pengukuran pada gelombang  
Sumber: [www.byjus.com](http://www.byjus.com)

1. Perpindahan vibrasi / *Displacement (Peak to Peak)*  
Jarak totak yang ditempuh oleh sebuah benda atau massa yang bergetar dari batas atas ke batas bawah disebut sebagai perpindahan peak to peak dalam satuan jarak 'mikron' dalam SI.
2. Kecepatan vibrasi / *Velocity (Root Mean Square)*  
Ketika massa akan bergerak, kecepatannya berubah. Kecepatan dari massa tersebut akan berada di nilai nol tepat di titik batas atas dan bawah sesaat sebelum berubah arah (dari batas atas ke batas bawah dan sebaliknya). Berdasarkan *International Standards Organization (ISO)*, skala pengukuran vibrasi yang disarankan adalah *velocity* dalam root mean square. totak yang ditempuh oleh sebuah benda atau massa yang bergetar dari batas atas ke batas bawah disebut sebagai perpindahan peak to peak dalam satuan jarak 'mikron' dalam SI.
3. Percepatan vibrasi / *Acceleration (Peak)*  
Percepatan atau *acceleration* didefinisikan sebagai laju perubahan kecepatan, dimana ketika sebuah massa yang menempuh jarak akan berhenti

pada suatu batas atas atau bawah massa tersebut harus mengalami percepatan untuk berhenti dan bergerak. Berdasarkan model *spring-mass* body seperti pada gambar 2.17, percepatan massa akan mencapai nilai maksimum saat kecepatannya nol. Sebaliknya Ketika kecepatan berada pada nilai maksimum, percepatan akan menjadi nol dan terus menerus berulang. Percepatan biasanya diekspresikan dalam satuan G, yaitu percepatan yang dihasilkan dari gaya gravitasi pada permukaan bumi. Nilai G adalah  $9.8 \text{ m/s}^2$ .

Ketiga komponen skala pengukuran vibrasi diatas digunakan untuk menentukan tingkat keparahan atau severity dari suatu vibrasi dan biasa disebut juga sebagai 'amplitudo' vibrasi. Nilai amplitudo merupakan indikator utama untuk mengetahui bagaimana kondisi getaran pada suatu pompa, di mana semakin besar nilai amplitudo maka semakin parah vibrasi yang sedang dialami oleh suatu pompa. Tabel 2.1 dibawah ini menjelaskan hubungan antara skala yang digunakan dalam analisa vibrasi. (SKF Reliability Systems, 2000)

Tabel 2. 1 Tabel jenis skala pengukuran dan nilai skala

Skala	Nilai Skala
Peak	1
Peak to Peak	2 x Peak
Root Mean Square (RMS)	0.707 x Peak

Sumber: SKF Reliability Systems

Namun, nilai skala *root mean square* (RMS) pada tabel diatas hanya berlaku untuk sinyal yang berbentuk gelombang sinusoidal murni. Pada aplikasi aktualnya, gelombang yang dihasilkan dari getaran mesin menghasilkan gelombang yang lebih kompleks sehingga

persamaan RMS yang digunakan untuk memproses sinyal getaran kompleks adalah sebagai berikut.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.15)$$

Keterangan:

$x(t)$ : sinyal getaran analog (contoh: velocity,  $v(t)$ )

T: durasi pengamatan

Pada alat vibrasi seperti CSI 2140 Emerson Nilai RMS yang ditampilkan merupakan hasil persamaan matematika 2.15 diatas sehingga nilai RMS inilah yang kemudian dibandingkan dengan standar-standar yang mengatur limitasi vibrasi seperti ISO 10816 dan API 610.

### 2.15 Metode Analisa Sinyal Getaran

Dalam proses analisis sinyal vibrasi, terdapat metode-metode yang paling umum untuk digunakan, yaitu:

#### 1. Analisis Getaran Domain Waktu

Metode ini menggunakan sinyal getaran dalam bentuk *waveform*, yaitu grafik getaran yang disajikan dalam bentuk grafik amplitudo getaran terhadap waktu. Pada gambar 2.20 dibawah ini dapat dilihat contoh grafik *waveform* yang menampilkan nilai amplitudo getaran terhadap waktu. (Adli, 2020)



Gambar 2. 20 Contoh sinyal getaran dalam bentuk *waveform*

Sumber: [www.researchgate.com](http://www.researchgate.com)

## 2. Analisis Getaran Domain Frekuensi

Metode ini dilakukan dengan mengubah sinyal getaran dari bentuk *waveform* menjadi bentuk yang menampilkan grafik amplitudo getaran terhadap frekuensi, atau lebih sering disebut grafik spektrum. Konversi *waveform* menjadi spektrum ini dilakukan dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Karena data getaran diperoleh secara diskrit, spektrum frekuensi yang muncul dihasilkan dari model matematika *Discrete Fourier Transform* (DFT).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2.16)$$

Keterangan:

$X[k]$  = komponen spektrum pada indeks frekuensi ke- $k$

$N$  = jumlah data

$n$  = indeks waktu

$k$  = indeks frekuensi

Hubungan antara indeks frekuensi dan frekuensi aktual diberikan oleh:

$$f_k = \frac{k}{N} f_s \quad (2.17)$$

Keterangan:

$f_k$  = indeks frekuensi

$f_s$  = frekuensi actual

*Discrete Fourier Transform* (DFT) merupakan model matematika dasar untuk menghasilkan spektrum frekuensi diskrit yang

menunjukkan distribusi energi getaran pada masing-masing frekuensi. Kemudian Cooley dan Tukey mengembangkan algoritma yang digunakan untuk mempercepat proses DFT sehingga diberi nama *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mempercepat pemrosesan DFT. (Mobius Institute, 2014)

$$f(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i) t \quad (2.18)$$

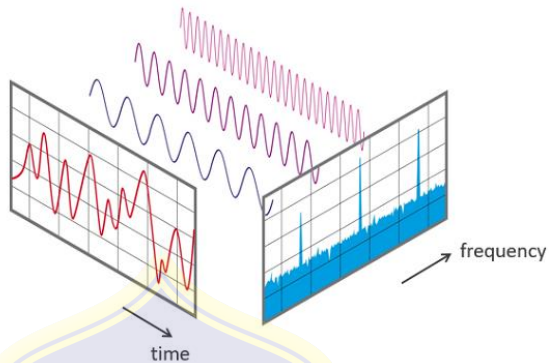
Keterangan:

$i$  = indeks komponen harmonik

$f_i$  = frekuensi komponen ke- $i$

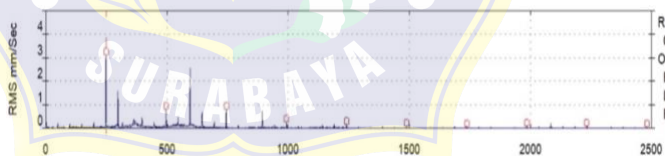
$a_i$  = amplitude komponen ke- $i$

Metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan untuk menganalisa penyebab kerusakan yang diakibatkan oleh getaran karena dengan domain spektrum dapat menampilkan frekuensi dasar dan frekuensi kelipatan dari frekuensi dasar yang disebut frekuensi harmonik. Untuk gambaran transformasi dari gelombang berbasis domain waktu ke gelombang berbasis domain frekuensi ditunjukkan pada gambar 2.21 dibawah ini. (Adli, 2020)



Gambar 2. 21 Konversi sinyal getaran bentuk *waveform* ke bentuk spektrum FFT  
 Sumber: [www.researchgate.com](http://www.researchgate.com)

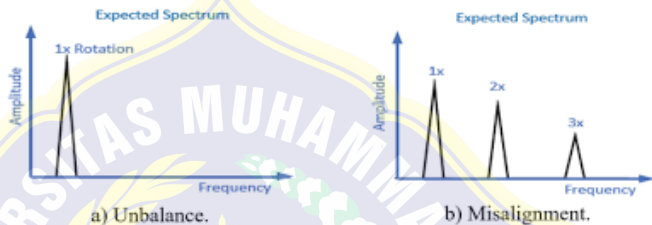
Kemunculan frekuensi-frekuensi pada spektrum menunjukkan sinyal frekuensi komponen seperti frekuensi *bearing*, frekuensi *blade pass impeller*, frekuensi motor listrik penggerak, dan banyak lagi. Contoh plot analisis vibrasi dengan domain frekuensi ditunjukkan pada gambar 2.22 dibawah ini. (Mobius Institute, 2014)



Gambar 2. 22 Contoh sinyal getaran dalam bentuk spektrum FFT  
 Sumber: Data PT.TPPI

Getaran yang disebabkan oleh masalah pada komponen pada suatu rotor pompa seperti *unbalance*, *misalignment*, ataupun *mechanical looseness* akan menghasilkan peak pada frekuensi yang sama dengan frekuensi putaran rotor ataupun

kelipatan dari frekuensi putaran rotor yang disebut juga dengan frekuensi *synchronous*. Sebagai contoh, apabila sebuah rotor berputar dengan putaran 1500 rpm atau 25 Hz, maka peak spektrum yang muncul dari masalah *unbalance* adalah 1x rpm atau 25 hz (Mobius Institute, 2018). Ilustrasi peak spektrum frekuensi *synchronous* dapat pada gambar 2.23 dibawah ini.



Gambar 2. 23 Contoh penggunaan spektrum FFT untuk diagnosis sumber vibrasi  
Sumber: www.springer.com

Sedangkan getaran yang disebabkan oleh masalah-masalah yang tidak berkaitan atau tidak *synchronous* dengan frekuensi putaran rotor biasanya disebabkan oleh masalah-masalah seperti kegagalan *bearing*, kavitasi, ataupun lubrikasi *bearing* yang buruk. Frekuensi ini disebut *non-synchronous* (1.2x rpm, 4,6x rpm, dll). (Mobius Institute, 2014)

### 2.16 Flow induced vibration

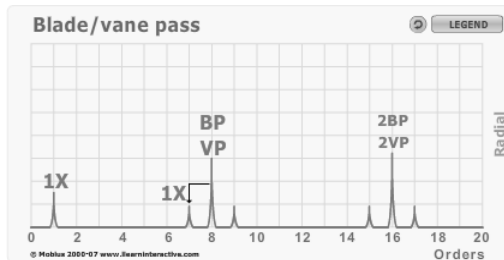
Dalam pemantauan getaran pompa, sangat penting bahwa kondisi operasi dijaga tetap konsisten dari satu pengukuran ke pengukuran berikutnya agar pola getaran yang diperoleh juga konsisten. Tekanan isap, tekanan buang, serta terutama masuknya udara (air induction) dan kavitasi akan sangat memengaruhi pola getaran.

Pompa sentrifugal selalu memiliki komponen getaran yang menonjol pada frekuensi lintasan sudu (*vane passing frequency*), yaitu hasil perkalian antara jumlah sudu *impeller* dengan kecepatan putar (RPM). Apabila amplitudo getaran pada frekuensi ini meningkat secara signifikan, hal tersebut umumnya menunjukkan adanya masalah internal, seperti erosi pada *impeller*, permasalahan aliran, atau kemungkinan ketidaksejajaran (*misalignment*). Harmonisa dari frekuensi lintasan sudu juga umum dijumpai pada pompa jenis ini. Gaya-gaya getaran dihasilkan oleh variasi tekanan ketika sudu, *vane*, atau *lobe* yang berputar melewati rumah pompa atau komponen stasioner. Komponen stasioner tersebut menimbulkan gangguan aliran yang tidak seragam pada fluida atau gas.

#### **2.16.1 Blade pass frequency**

Dalam pengertian yang paling luas, *Blade passing frequency* (BPF) mencakup komponen serupa seperti sudu, *vane*, *lobe*, dan piston. Frekuensi gaya eksitasi ditentukan oleh jumlah sudu/*vane* dikalikan kecepatan putar. Penyebab tingginya *blade passing frequency* antara lain: (Mobius Institute, 2014)

- Eksentrisitas rotor atau rumah pompa
- Sudu dengan pitch yang tidak seragam
- *Vane diffuser* rumah pompa yang longgar, bengkok, atau tidak sejajar
- Keausan sudu atau *vane* (akibat abrasi atau kavitasi)
- Kondisi operasi yang tidak sesuai (parameter kinerja tidak tepat)
- Pengaturan peredaman (*damping*) yang tidak sesuai
- Filter yang kotor, rusak, atau hilang
- Pembatasan aliran pada sisi masuk (*inlet*) atau keluar (*discharge*)



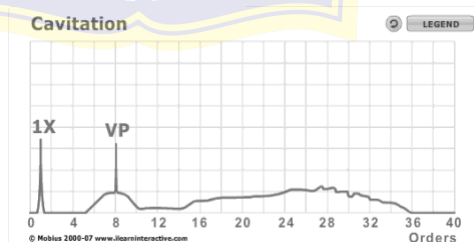
Gambar 2. 24 Blade/Vane Pass *Frequency* pada spektrum vibrasi pompa

Sumber: Mobius Institute, 2014

### 2.16.2 Kavitasasi

Kavitasasi umumnya menghasilkan getaran acak dengan frekuensi tinggi atau yang sering disebut sebagai “noise”. Fenomena ini sering teramati sebagai suatu “gundukan” (*hump*) pada spektrum getaran yang menaikkan *noise floor* pada kisaran sekitar 15X hingga 35X frekuensi putar.

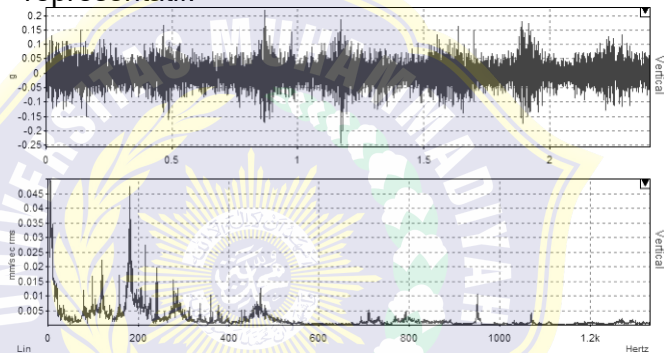
Kavitasasi umumnya mengindikasikan tekanan isap yang tidak mencukupi atau kondisi *starvation*, yaitu tekanan masuk yang rendah. Fluida cenderung mengalami penguapan saat meninggalkan *impeller* sehingga membentuk gelembung vakum yang kemudian mengalami implosi. Pada domain waktu, sinyal getaran sering kali terdengar seperti suara kerikil di dalam pompa. (Mobius Institute, 2014)



Gambar 2. 25 Ilustrasi spektrum vibrasi dalam kondisi pompa kavitasasi

Sumber: Mobius Institute, 2014

Data pada Gambar 2.25 menunjukkan sebuah pompa sentrifugal yang mengalami permasalahan kavitasi. Secara auditori, pompa tersebut terdengar seolah-olah memompa kerikil. Bentuk gelombang waktu (*time waveform*) merupakan alat analisis yang sangat berguna, karena lonjakan energi frekuensi tinggi sering kali terlihat dengan jelas seperti pada gambar 2.26 dibawah. Namun demikian, diperlukan data waktu yang lebih panjang dibandingkan kondisi normal untuk memperoleh gambaran yang representatif.



Gambar 2. 26 Ilustrasi kondisi spektrum dan *time waveform* pada kondisi kavitasi

Sumber: Mobius Institute, 2014

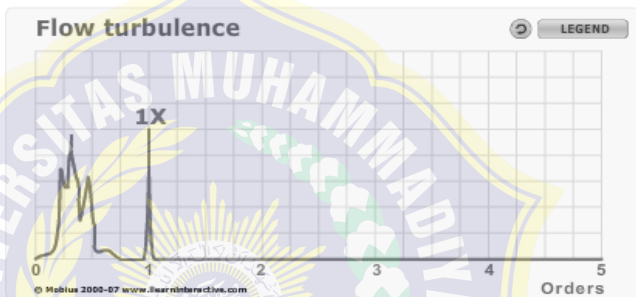
Spektrum getaran mencerminkan adanya tumbukan melalui peningkatan *noise floor* serta akumulasi energi di bawah puncak-puncak frekuensi. Puncak tertinggi pada spektrum berada pada frekuensi lintasan sudu (*vane passing frequency*). (Mobius Institute, 2014)

### 2.16.3 Turbulensi

Turbulensi pada *blower*, pompa, dan kompresor terjadi ketika aliran normal dibatasi atau terhambat selama operasi. Fenomena ini muncul pada data spektrum getaran sebagai puncak lebar

berfrekuensi rendah pada kisaran 0,5 hingga 0,8 orde frekuensi putar. Penyebab terjadinya turbulensi antara lain: (Mobius Institute, 2014)

- Adanya penyumbatan pada saluran udara atau pipa aliran
- Belokan pipa dengan jari-jari yang tajam
- Perubahan diameter pipa yang terjadi secara tiba-tiba
- Operasi melebihi kapasitas yang dirancang



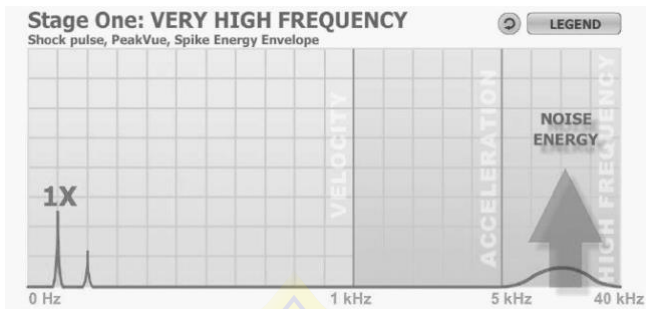
Gambar 2. 27 Ilustrasi spektrum pada pompa yang mengalami turbulensi aliran

Sumber: Mobius Institute, 2014

## 2.17 Teknologi *Peakvue Analysis* untuk Mendeteksi Kavitasi

*Peakvue* merupakan teknik analisis getaran berbasis domain frekuensi tinggi yang dikembangkan untuk mengekstraksi sinyal impulsif beramplitudo kecil yang umumnya tertutup oleh *noise* pada spektrum konvensional.

Metode ini bekerja dengan menerapkan *high-pass filter* pada sinyal percepatan untuk menghilangkan komponen frekuensi rendah, sehingga energi frekuensi tinggi yang berkaitan dengan kejadian impulsif dapat diamati secara lebih jelas.



Gambar 2. 28 Ilustrasi deteksi high frekuensi dengan peakVue  
 Sumber: Mobius Institute, 2018

Setelah proses konversi analog-ke-digital, hanya puncak amplitudo yang melampaui ambang batas tertentu (trigger level) yang diproses menggunakan algoritma FFT, sehingga spektrum yang dihasilkan merepresentasikan frekuensi kejadian pulsa beserta harmoniknya.

Berbeda dengan teknik *envelope analysis*, *Peakvue* tidak menggunakan proses penyearahan (*rectification*) maupun *low-pass filtering*, melainkan secara langsung menekankan karakter impulsif dari sinyal frekuensi tinggi. (Girdhar, 2004)

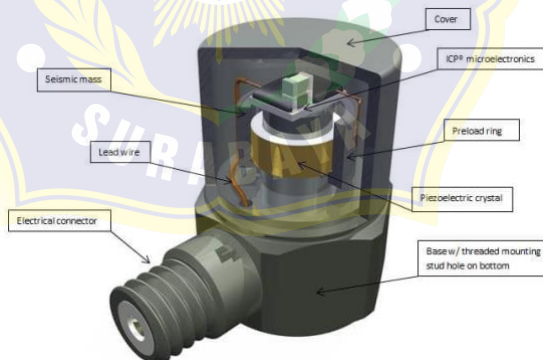
Dalam konteks sistem fluida, khususnya pompa sentrifugal, fenomena kavitasi menghasilkan tumbukan mikro akibat runtuhnya gelembung uap yang memunculkan pulsa berfrekuensi tinggi dan bersifat repetitif. Teknik berbasis *envelope analysis* mampu memperkuat fenomena berulang seperti kavitasi dan gangguan aliran melalui ekstraksi modulasi amplitudo dari sinyal getaran frekuensi tinggi.

Prinsip fisik yang sama mendasari penggunaan *Peakvue* untuk deteksi kavitasi, karena metode ini sensitif terhadap impuls berenergi tinggi yang dihasilkan oleh proses runtuhnya gelembung kavitasi. Oleh karena itu, *Peakvue* dapat digunakan sebagai metode alternatif atau pelengkap *envelope analysis* untuk mendeteksi kavitasi

tahap awal yang sering kali tidak terlihat pada spektrum getaran konvensional. (Girdhar, 2004)

### 2.18 Accelerometer

*Accelerometer* adalah alat ukur yang paling banyak digunakan dalam industri dalam pengambilan data vibrasi untuk mengubah sinyal getaran yang merupakan energi mekanis menjadi sinyal voltase. *Accelerometer* menggunakan prinsip piezoelektrik dimana data yang diubah menjadi sinyal voltase proporsional dengan getaran yang diterima. *Accelerometer* terdiri dari kristal piezoelektrik, yang dapat menghasilkan tegangan listrik ketika diberikan getaran. Hasil output dari sensor *Accelerometer* dapat didiferensialkan menjadi *velocity* maupun *acceleration*. Akselerometer kemudian akan disambungkan dengan kabel menuju alat untuk mengkoliksi dan menganalisa data vibrasi, atau umumnya disebut *vibration data collector/analyzers* yang kemudian data-data vibrasi tersebut akan digunakan untuk mengetahui dan menganalisa kondisi kesehatan pompa. (Adli, 2020)



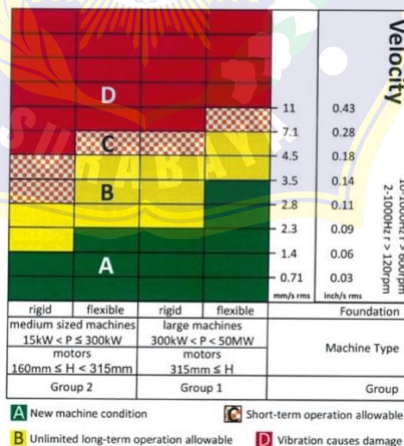
Gambar 2. 29 Komponen-komponen *Accelerometer*  
Sumber: [www.pcbpiezotronics.com](http://www.pcbpiezotronics.com)



Gambar 2. 30 Alat *Vibration Analyzer* CSI 2140 Emerson  
 Sumber: www.emerson.com

### 2.19 Standar Level Vibrasi Terhadap Kelayakan Pompa

Vibrasi pada pompa memiliki standar yang sudah ditetapkan sebagai indikator untuk menentukan nilai batas keadaan normal sebuah pompa dan keadaan pompa yang mulai mengalami kerusakan ataupun pompa yang sudah rusak. Dalam penelitian ini indikator standar yang digunakan adalah ISO 10816-1 yang ditunjukkan pada gambar 2.31 dibawah ini. (International Organization for Standardization, 2018)

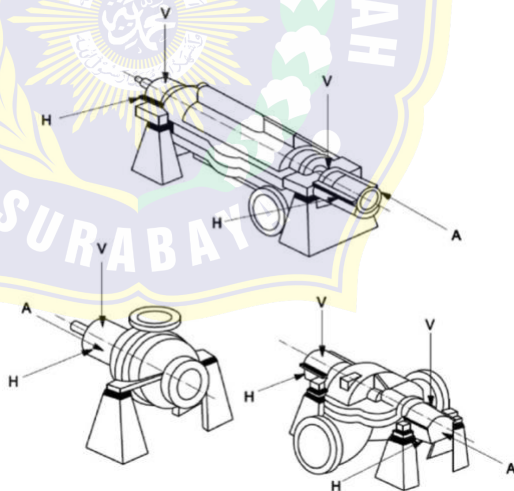


Gambar 2. 31 Standar kelayakan level vibrasi (*velocity*)  
 Sumber: International Organization for Standardization, 2018

## 2.20 Metode Pengambilan Data Vibrasi

Berdasarkan API 610 yang merupakan standar internasional yang mengatur tentang pompa sentrifugal pada aplikasi industri petroleium, pengambilan vibrasi pada pompa sentrifugal harus dilakukan dengan syarat sebagai berikut ini:

- Range frekuensi yang digunakan dalam pengambilan vibrasi adalah 5 Hz sampai 1000 Hz menggunakan metode spektrum *Fast Fourier Transform* (FFT).
- Pengambilan data vibrasi dilakukan dengan kondisi pompa yang beroperasi pada *preffered operating region* (POR) pada kurva operasi pompa yang sudah ditentukan dari desain pompa.
- Pengukuran data vibrasi diambil pada *minimum 5* titik pengambilan pada sumbu *horizontal*, *vertical*, dan *axial* pada *bearing housing* pompa seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.32 dibawah ini.



Gambar 2. 32 Titik pengambilan vibrasi pada pompa sentrifugal  
Sumber: API Standard 610, 2021

- Skala pengukuran vibrasi yang digunakan pada pengukuran vibrasi pada *bearing housing* adalah *velocity root mean square* (RMS) dalam satuan milimeter per sekon (mm/s)

### 2.20 Mean time between failure (MTBF)

*Mean time between failure* (MTBF) merupakan rata-rata interval waktu kerusakan yang terjadi pada saat mesin atau komponen telah selesai diperbaiki hingga mesin atau komponen tersebut mengalami kerusakan kembali. MTBF diaplikasikan pada mesin yang bersifat ‘dapat diperbaiki’ setelah mengalami kerusakan. Dengan mengetahui nilai MTBF, perusahaan dapat mengetahui ketersediaan dan ketahanan dari mesin atau komponen

Perhitungan yang dilakukan terhadap nilai MTBF adalah untuk mengetahui seberapa lama durasi waktu rangkaian mesin mengalami kerusakan kembali setelah dilakukannya perbaikan, karena jika mesin produksi mengalami kurangnya perawatan sehingga akan terjadi kerusakan terus menerus dan akan menghambat pada proses produksi untuk menghasilkan produk oleh suatu Perusahaan. (Husein Habibi dkk., 2025)

$$MTBF = \theta = \frac{\text{Total Up Time}}{\text{Number of Failures (Down Time)}} \quad (2.13)$$