

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, manusia selalu berusaha untuk menciptakan sistem pompa dengan performansi yang maksimal. Salah satunya dipakai untuk memenuhi kebutuhan akan air bersih yang selalu meningkat dari tahun ke tahun seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar penurunan nilai efisiensi pada empat unit pompa yang dipasang secara paralel, sehingga nantinya dapat dipilih suatu solusi yang tepat untuk mengurangi biaya operasional yang tinggi akibat dari usia penggunaan pompa distribusi yang sudah lama. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa penurunan nilai efisiensi dari berbagai jenis merk pompa tidak sama yaitu untuk pompa nomor 1, 2, dan 3 sebesar 0,17 per tahun. Sedangkan untuk pompa nomor 4 sebesar 1,24 per tahun (Saksono, P.,2010).

Telah dilakukan analisis kinerja pompa sentrifugal pada fase 1 DPPU Ngurah Rai berdasarkan hubungan daya listrik dan debit keluaran yang terukur, untuk mengetahui penyebab pemakaian listrik yang berlebih dikarenakan penurunan faktor daya. Penelitian ini akan mengkaji pengaruh masukan pada motor induksi, yang akan memberikan pengaruh pada pompa sentrifugal. Daya pompa dipengaruhi oleh arus listrik, tegangan dan faktor daya, torsi impeler akan dipengaruhi oleh kecepatan putar motor, dan debit fluida akan dipengaruhi oleh densitas, kecepatan dan diameter impeler. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan masing-masing komponen yang menyusun sistem pompa sentrifugal, yaitu motor induksi, rugi-rugi daya, perubahan daya ke torsi, kelembaman impeler, head fluida, kenaikan temperatur terhadap waktu, dan debit keluaran fluida. Hasil simulasi dengan menggunakan perubahan parameter arus listrik, didapatkan daya dengan rentang 68.119 – 103.18 kW, torsi 185.1 – 290.48 Nm, dan debit fluida 132.35 – 200.48 m<sup>3</sup>/jam. Daya ketika beban ketika beroperasi pada kondisi normal

(80.86 kW) tidak sesuai dengan spesifikasi, sehingga motor tidak berjalan pada beban yang seharusnya dan mengalami penurunan faktor daya. Kenaikan temperatur fluida juga berdampak pada penurunan densitas (Bhaskara, A.P.,2012)

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Pengertian Pompa

Pompa merupakan suatu alat untuk memindahkan fluida tidak mampu mengalir melalui saluran tertutup. Zat cair yang memiliki sifat mengalir dari suatu tempat bertekanan tinggi / elevasi lebih tinggi ke tempat yang bertekanan lebih rendah / elevasi lebih rendah membuat pompa digunakan untuk membangkitkan tekanan fluida sehingga dapat mengalir dari suatu tempat bertekanan yang lebih rendah / elevasi rendah ke tempat bertekanan yang lebih tinggi / elevasi lebih tinggi. Pada beberapa kasus, untuk memindahkan zat padat yang berbentuk bubuk atau tepung dapat digunakan pompa dengan spesifikasi tertentu. Prinsip kerja pompa adalah menghisap dan melakukan penekanan terhadap fluida.

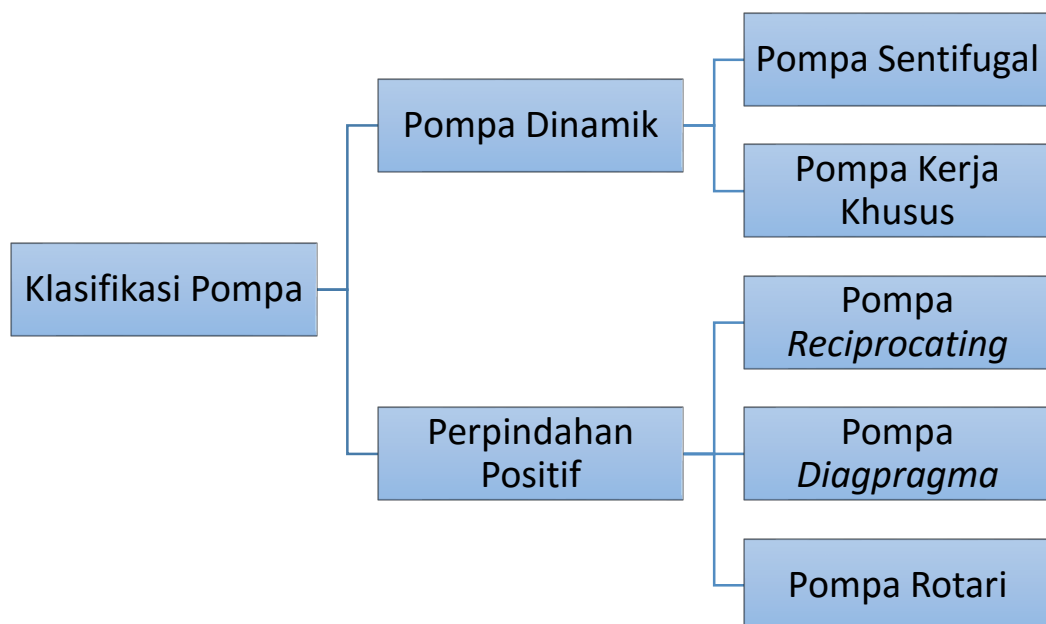
Pada sisi hisap (*suction*) elemen pompa akan menurunkan tekanan dalam ruang pompa sehingga akan terjadi perbedaan tekanan antara ruang pompa dengan permukaan fluida yang dihisap. Akibatnya fluida akan mengalir ke ruang pompa. Oleh elemen pompa, fluida ini akan didorong atau diberikan tekanan sehingga fluida akan mengalir ke dalam saluran tekan (*discharge*) melalui lubang tekan. Proses kerja ini akan berlangsung terus selama pompa beroperasi.

Pompa melakukan kerja hisap dan menekan membutuhkan energi yang berasal dari penggerak pompa. Energi mekanis dari penggerak pompa oleh elemen pompa akan diubah menjadi energi tekan pada fluida sehingga fluida akan memiliki daya air. Energi dari penggerak pompa selain untuk memberi daya alir pada fluida juga digunakan untuk melawan perbedaan energi potensial, mengatasi hambatan dalam saluran yang diubah menjadi

panas. Energi yang digunakan untuk mengatasi hambatan dan yang diubah menjadi panas merupakan kerugian energi bagi pompa.

Dari keterangan diatas maka dapat disimpulkan fungsi pompa adalah untuk mengubah energi mekanis dari penggerak pompa menjadi energi tekan dalam fluida sehingga akan menjadi aliran fluida atau perpindahan fluida melalui saluran tertutup. Perpindahan zat cair dapat terjadi menurut arah horizontal maupun vertikal, seperti zat cair yang berpindah secara mendatar akan mendapat hambatan berupa gesekan dan turbulensi. Pada perpindahan zat cair dengan arah vertikal, hambatan yang timbul yang diakibatkan adanya perbedaan tinggi antara permukaan isap (*suction*) dan permukaan tekan (*discharge*).

Klasifikasi pompa berdasarkan cara pemindahan dan pemberian energi pada cairan dapat diklasifikasikan menjadi 2 bagian yaitu pompa kerja positif (*positive displacement pump*) dan pompa kerja dinamis (*non positive displacement pump*). Klasifikasi pompa dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini:



**Gambar 2.1.** Klasifikasi pompa

### 1. Pompa pemindah positif (*positive displacement pump*)

Pompa jenis ini merupakan pompa dengan ruangan kerja yang secara periodik berubah dari besar ke kecil atau sebaliknya, selama pompa bekerja. Energi yang diberikan kepada cairan ialah energi potensial, sehingga cairan berpindah volume per volume.

Yang termasuk dalam kelompok pompa pemindah positif antara lain:

- Pompa *Reciprocating*
- Pompa *Diaphragma*
- Pompa Rotari

### 2. Pompa kerja dinamis (non positive displacement pump)

Pompa jenis ini adalah pompa dengan volume ruang yang tidak berubah pada saat pompa bekerja. Energi yang diberikan pada cairan adalah energi kecepatan, sehingga cairan berpindah karena adanya perubahan energi kecepatan yang kemudian diubah menjadi energi dinamis di dalam rumah pompa itu sendiri.

Yang termasuk dalam kelompok pompa kerja dinamis antara lain:

- Pompa kerja khusus
- Pompa Sentrifugal (*Centrifugal Pump*)

Mengingat tujuan utama dari materi ini adalah sebatas pengenalan pompa, maka yang akan dibahas selanjutnya hanyalah jenis pompa yang sesuai dengan judul materi ini karena banyak ditemukan pada instalasi pengolahan minyak bumi, yaitu pompa sentrifugal.

#### **2.2.2 Pompa Sentrifugal**

Salah satu jenis pompa kerja dinamis adalah pompa sentrifugal yang prinsip kerjanya memindahkan energi mekanik menjadi energi kinetik dan energi potensial fluida melalui suatu impeler yang berputar dalam *casing*. Kemudian fluida melalui lintasan *volute* yang berfungsi menurunkan kecepatan dan menaikkan tekanannya. Gaya sentrifugal yang timbul karena adanya gerakan sebuah benda atau partikel melalui lintasan lengkung

(melingkar). Pompa sentrifugal merupakan pompa kerja dinamis yang paling banyak digunakan karena mempunyai bentuk yang sederhana dan harga yang relatif murah. Salah satu pompa sentrifugal yang digunakan di PT Pertamina EP dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini:



**Gambar 2.2.** Pompa sentrifugal

### 2.2.3 Prinsip Kerja Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal adalah salah satu jenis pompa *non positive displacement pump* dengan prinsip kerja sebagai berikut:

1. Energi mekanik dari unit penggerak dikonversikan menjadi energi cairan akibat adanya gaya sentrifugal yang ditimbulkan oleh impeler yang berputar.
2. Energi kecepatan cairan kemudian dirubah menjadi energi potensial didalam *volute* dan melalui *diffuser* dengan cara memperlambat laju cairan.
3. Energi tekanan cairan yang keluar dari pompa sentrifugal merupakan tekanan cairan dibagian sisi tekan *discharge*.

Dengan demikian pompa sentrifugal memiliki prinsip kerja mengkonversikan energi mekanik menjadi kecepatan fluida selanjutnya energi kecepatan fluida diubah menjadi energi tekanan keluar dari pompa.

### 2.2.4 Klasifikasi Pompa Sentrifugal

Pompa diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal sesuai dengan kegunaannya, adapun klasifikasi pompa adalah sebagai berikut:

#### 1. Berdasarkan Kapasitas

Berdasarkan kapasitas kerjanya, pompa dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- Rendah =  $< 20 \text{ m}^3/\text{jam}$
- Sedang =  $20 \text{ m}^3/\text{jam} - 60 \text{ m}^3/\text{jam}$
- Tinggi =  $> 60 \text{ m}^3/\text{jam}$

#### 2. Berdasarkan Tekanan *Discharge*

Berdasarkan tekanan *discharge*, pompa juga diklasifikasikan sebagai berikut:

- Rendah =  $< 5 \text{ kg/cm}^2$
- Sedang =  $5 - 50 \text{ kg/cm}^2$
- Tinggi =  $> 50 \text{ kg/cm}^2$

#### 3. Berdasarkan Jenis Aliran

- Pompa *Radial Flow*

Pompa yang arah alirannya tegak lurus terhadap garis sumbu poros pompa. Pompa jenis ini menghasilkan *head* yang tinggi tapi dengan kapasitas yang rendah. Seperti pada Gambar 2.3 di bawah ini:



**Gambar 2.3.** Pompa *radial flow*

(<http://www.oilngasprocess.com/pumps/radialflow.html>)

- Pompa *Mixed Flow*

Pompa yang arah alirannya membentuk sudut terhadap sumbu poros pompa. Pompa jenis ini menghasilkan *head* yang lebih rendah

dibanding pompa radial tapi kapasitasnya lebih besar. Seperti pada Gambar 2.4 di bawah ini:



**Gambar 2.4.** Pompa *mixed flow*  
(<http://www.oilngasprocess.com/pumps/mixedflow.html>)

- Pompa *Axial Flow*

Pompa yang arah alirannya sejajar dengan sumbu poros pompa. Pompa jenis ini menghasilkan *head* yang rendah tapi kapasitasnya besar. Seperti pada Gambar 2.5 di bawah ini:

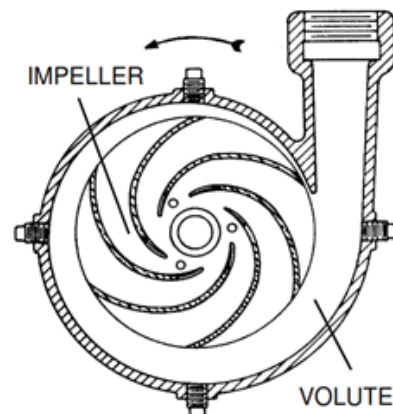


**Gambar 2.5.** Pompa *axial flow*  
(<http://www.oilngasprocess.com/pumps/axialflow.html>)

#### 4. Berdasarkan bentuk rumahnya

- Pompa *Volute*,

Bentuk rumah pompa seperti rumah keong/siput (*volute*), sehingga kecepatan aliran keluar bisa dikurangi dan menghasilkan kenaikan tekanan, arah aliran impelernya langsung dibawa ke *volute*. Seperti pada Gambar 2.6 di bawah ini:

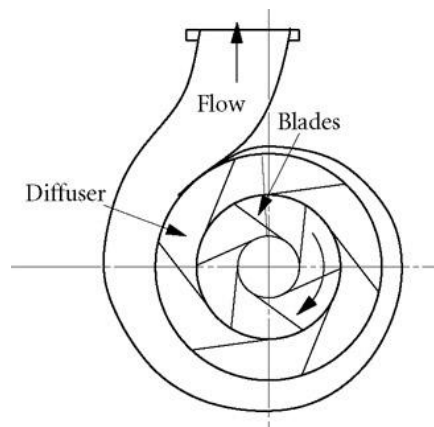


**Gambar 2.6.** Pompa *Volute*

([https://i1.wp.com/www.introtopumps.com/wpcontent/uploads/sites/2/2012/11/Volute-Pump-Assembly\\_thumb.png](https://i1.wp.com/www.introtopumps.com/wpcontent/uploads/sites/2/2012/11/Volute-Pump-Assembly_thumb.png))

- Pompa *Diffuser*

Pompa yang impelernya dikelilingi sudu – sudu pengarah sebelum memasuki *volute*, hal ini bertujuan untuk menaikkan tekanan cairan dengan cara mengubah arah alirannya. Seperti pada Gambar 2.7 di bawah ini:



**Gambar 2.7.** Pompa *Diffuser*

([http://images.books24x7.com/bookimages/id\\_21466/fig5-1.jpg](http://images.books24x7.com/bookimages/id_21466/fig5-1.jpg))

- Berdasarkan jumlah aliran masuknya

- Single Suction*

Pompa yang arah aliran masuknya dari satu arah. Pompa ini akan mengakibatkan gaya dorong (*axial force*) yang besar terhadap impeler dan harus bisa diatasi dengan pemasangan *thrust bearing*.



*b. Double Suction*

Pompa yang arah aliran masuknya dari dua arah. Pompa ini akan menghasilkan kapasitas yang lebih besar serta gaya dorong yang ditimbulkan lebih kecil.

- Berdasarkan Jenis Impeler

- a. Impeler tertutup (*closed impeller*)

Sudu-sudu ditutup oleh dua buah dinding yang merupakan satu kesatuan, digunakan untuk pemompaan zat cair yang bersih karena ruang impeler yang kecil. Seperti pada Gambar 2.8 di bawah ini:



**Gambar 2.8.** Impeler tertutup (*closed impeller*)

([http://www.marutisteelcasting.com/wpcontent/uploads/2015/12/pl3454854customized\\_cast\\_ss316\\_304\\_stainless\\_steel\\_impeler\\_water\\_pump\\_brass\\_impeler.jpg](http://www.marutisteelcasting.com/wpcontent/uploads/2015/12/pl3454854customized_cast_ss316_304_stainless_steel_impeler_water_pump_brass_impeler.jpg))

- b. Impeler setengah terbuka (*semi open impeller*)

Impeler jenis ini terbuka disebelah sisi masuk (depan) dan tertutup di sebelah belakangnya. Sesuai untuk memompa zat cair yang sedikit mengandung kotoran misalnya : air yang mengandung pasir, zat cair yang mengauskan, *slurry*, dll. Seperti pada Gambar 2.9 di bawah ini:



**Gambar 2.9.** Impeler setengah terbuka (*semi open impeller*)  
(<http://www.sulzer.com/sr/Products-andServices/Pumps-Services/Parts-and-Retrofit/Original-Spare-Parts/Original-Scanpump-Pump-Spare-Parts>)

c. Impeler terbuka (*open impeller*)

Impeler jenis ini tidak memiliki dinding di depan maupun di belakang. Jenis ini banyak digunakan untuk pemompaan zat cair yang banyak mengandung kotoran / kental. Seperti pada Gambar 2.10 di bawah ini:



**Gambar 2.10.** Impeler terbuka (*open impeller*)  
(<http://blog.poolcenter.com/designdocuments/blog-impeler-ss.jpg>)

- Berdasarkan jumlah impelernya

*a. Single Stage*

Pompa yang hanya terdiri dari satu impeler saja. Pompa jenis ini akan menghasilkan tekanan yang terbatas. Seperti pada Gambar 2.11 di bawah ini:



**Gambar 2.11.** *Single stage impeller*

(<http://www.pumpfundamentals.com/images/pump-cutaway.jpg>)

*b. Multi Stage*

Pompa yang terdiri dari beberapa impeler yang disusun seri. Pompa jenis ini akan menghasilkan tekanan yang lebih besar. Pada Gambar 2.12 adalah pompa injeksi *multi stage* yang akan di bahas dalam Tugas Akhir ini:



**Gambar 2.12.** *Multi stage impeller*

- Berdasarkan posisi pemasangannya

a. Pompa Horizontal

Pompa yang pemasangannya sejajar dengan permukaan tanah, pompa ini adalah yang sering digunakan. Seperti pada Gambar 2.13 di bawah ini:



**Gambar 2.13.** Posisi horizontal pompa sentrifugal

b. Pompa Vertikal

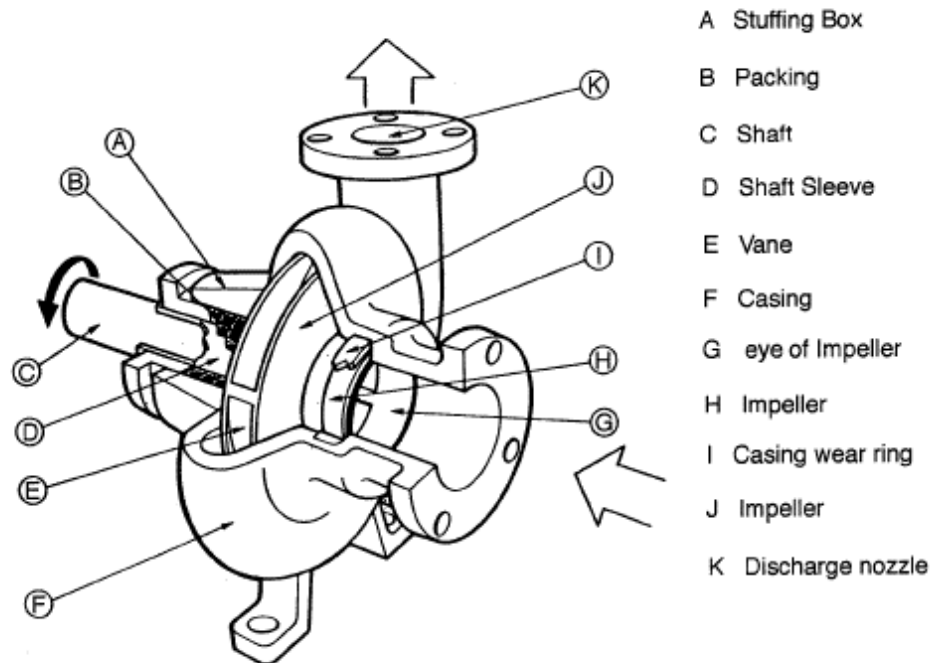
Pompa yang pemasangannya tegak lurus terhadap permukaan tanah. Pompa ini biasa digunakan untuk mengalirkan air karena ada perbedaan elevasi dengan debit yang besar dan tekanan yang tidak terlalu tinggi. Seperti pada Gambar 2.14 di bawah ini:



**Gambar 2.14.** Posisi vertikal pompa sentrifugal

### 2.2.5 Bagian – Bagian Pompa Sentrifugal

Secara umum bagian – bagian utama pompa sentrifugal dapat dilihat seperti Gambar 2.15 di bawah ini:



**Gambar 2.15.** Komponen utama pompa sentrifugal

(<http://image.slidesharecdn.com/pumpandcoolingto werenergyperformance-131016081552 phpapp02/95/pump-and-cooling-tower-energy-performance-5-638.jpg?cb=1381911408>)

a. *Stuffing Box*

*Stuffing Box* berfungsi untuk menerima kebocoran pada daerah dimana poros pompa menembus *casing*.

b. *Packing*

Digunakan untuk mencegah dan mengurangi bocoran cairan dari *casing* pompa melalui poros.

c. *Shaft* (poros)

Poros berfungsi untuk meneruskan momen puntir dari penggerak selama beroperasi dan tempat kedudukan impeler dan bagian-bagian berputar lainnya.

d. *Shaft sleeve*

*Shaft sleeve* berfungsi untuk melindungi poros dari erosi, korosi, dan keausan pada *stuffing box*.

e. *Vane*

Sudu dari impeler sebagai tempat berlalunya cairan pada impeler.

f. *Casing*

Merupakan bagian paling luar dari pompa yang berfungsi sebagai pelindung elemen yang berputar, tempat kedudukan *diffuser (guide vane)*, *inlet* dan *outlet nozzle* serta tempat memberikan arah aliran dari impeler dan mengkonversikan energi kecepatan cairan menjadi energi dinamis (*single stage*).

g. *Eye of Impeller*

Bagian sisi masuk pada arah isap impeler.

h. *Bearing* (bantalan)

Berfungsi untuk menumpu dan menahan beban dari poros agar dapat berputar, baik berupa beban *radial* maupun beban *axial*. *Bearing* juga memungkinkan poros untuk dapat berputar dengan lancar dan tetap pada tempatnya, sehingga kerugian gesek menjadi kecil.

i. *Casing Wear Ring*

*Casing Wear Ring* berfungsi untuk memperkecil kebocoran cairan yang melewati bagian depan impeler maupun bagian belakang impeler, dengan cara memperkecil celah antara *casing* dengan impeler.

j. *Impeller*

*Impeller* berfungsi untuk mengubah energi mekanis dari pompa menjadi energi kecepatan pada cairan yang dipompakan secara kontinyu, sehingga cairan pada sisi isap secara terus-menerus akan masuk mengisi kekosongan akibat perpindahan dari cairan yang masuk sebelumnya.

k. *Discharge Nozzle*

*Discharge nozzle* berfungsi untuk mengeluarkan cairan dari impeler. Di dalam *nozzle* ini sebagian *head* kecepatan aliran diubah menjadi *head* tekanan.

### 2.2.6 Kelebihan dan Kekurangan Pompa Sentrifugal

1. Kelebihan pompa sentrifugal
  - Menghasilkan aliran yang terus-menerus dengan kapasitas yang besar
  - Harga pompa dan biaya pemeliharannya relatif murah dibandingkan pompa jenis lain
  - Dapat dihubungkan langsung dengan motor listrik maupun turbin
  - *Getaran* dan kebisingan rendah pada operasi normal
2. Kekurangan pompa sentrifugal
  - Mudah mengalami kavitasi
  - *Casing* harus terisi penuh sebelum pompa dijalankan
  - Pada kapasitas rendah efisiensi juga rendah
  - Kurang baik untuk cairan yang kental

### 2.2.7 Dasar Perhitungan Pompa

#### 1. Persamaan Kontinuitas

Persamaan ini dikembangkan dari hukum kekekalan energi. Aliran fluida yang mengalir di dalam pipa memiliki kecepatan yang diberikan menurut persamaan kontinuitas untuk aliran yang stabil (*steady state*) yang tidak tergantung oleh waktu:

$$\dot{m} = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \dots\dots\dots(2.1)$$

Sedangkan,

$$Q = v \cdot A$$

Sehingga,

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2$$

Untuk fluida *incompressible*,

$$\rho_1 = \rho_2)$$

Maka,

$$Q_1 = Q_2$$

Jadi persamaan diatas dapat ditulis:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

- $\dot{m}$  = Laju aliran massa (kg/s)
- $\rho$  = Massa jenis (kg/m<sup>3</sup>)
- Q = Kapasitas aliran (m<sup>3</sup>/s)
- v = Kecepatan aliran (m/s)
- A = Luas penampang pipa (m<sup>2</sup>)

## 2. Aliran pada Pompa

Kecepatan fluida yang mengalir pada pipa menuju pompa, dapat dihitung dengan persamaan:

$$v = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

- v = Kecepatan aliran fluida dalam pipa (m/s)
- Q = Kapasitas aliran (m<sup>3</sup>/s)
- A = Luas penampang pipa (m<sup>2</sup>)
- $= \frac{\pi}{4} \times D^2$

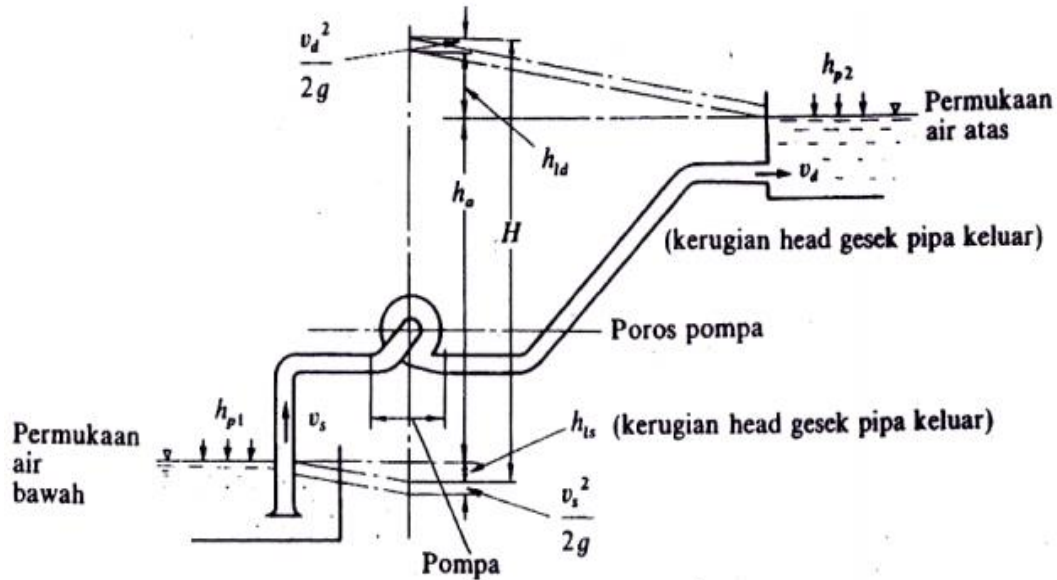
## 3. Head Total Pompa

Dalam merancang suatu sistem pompa, pertama-tama harus diketahui debit dan *head* yang diperlukan untuk mengalirkan zat cair yang akan dipompakan. Pengertian *head* pompa adalah energi yang dapat diberikan pompa dalam satuan elevasi. *Head* pompa berbeda-beda tergantung dari berat jenis fluida yang dialirkan, tetapi *standard* yang biasa digunakan produsen pompa untuk memberikan spesifikasi *head* pompa adalah *head* pompa dalam kolom air.

*Total Dynamic Head* secara umum digunakan untuk merancang sistem pompa dengan memperhitungkan tekanan permukaan, perbedaan kecepatan aliran, perbedaan tinggi, dan rugi-rugi yang akan terjadi di dalam sistem perpipaan. Hasil perhitungan dari *Total Dynamic Head* adalah *head* minimum yang harus disediakan pompa untuk mengalirkan



fluida sesuai dengan sistem pompa yang sudah direncanakan. Pada Gambar 2.11. dan persamaan 2.8 adalah penjelasan tergambar untuk menghitung *Total Dynamic Head*:



Gambar 2.16. *Total Dynamic Head* pompa  
 (<http://www.mcnallyinstitute.com/images1.gif>)

$$TDH = \Delta H_p + H_{ST} + H_L + H_v \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

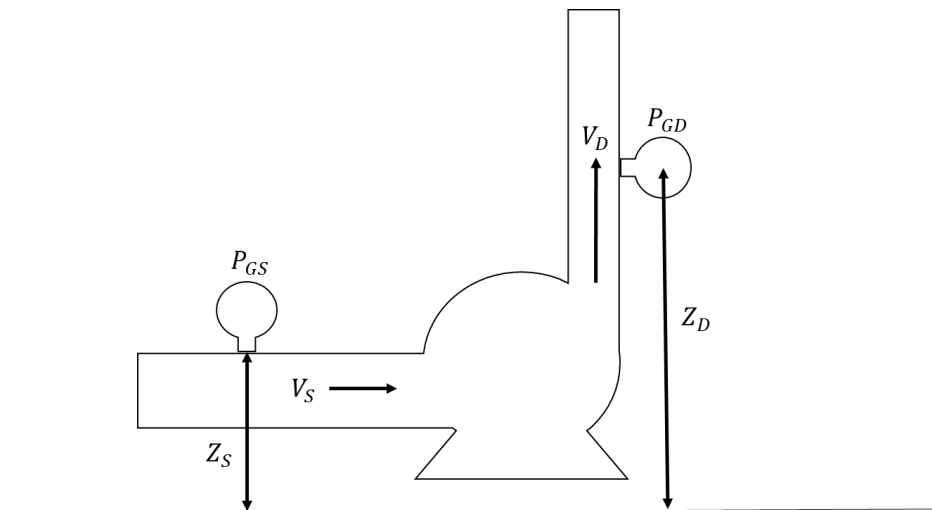
- $TDH$  = Total Dynamic Head (m)
- $\Delta H_p$  = Perbedaan head tekanan pada kedua permukaan (m)  
 $= \left( \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right)$
- $H_v$  = Head yang diakibatkan perbedaan kecepatan (m)  
 $= \left( \frac{V_d^2 - V_s^2}{2g} \right)$
- $H_{ST}$  = Head statis ( $Z_d - Z_s$ ) (m)
- $H_L$  = Head losses pada sisi suction ke discharge (m)

Head total pompa salah satunya dipengaruhi oleh berbagai kerugian pada sistem perpipaan yaitu gesekan dalam pipa, katup, belokan, sambungan, reducer dll. Untuk menentukan head total yang harus

disediakan pompa, perlu menghitung terlebih dahulu kerugian-kerugian pada instalasi. Dimana kerugian-kerugian tersebut akan dijumlahkan untuk mengetahui kerugian *head* yang terjadi dalam instalasi.

- *Head* Total Pompa Terpasang

Untuk dapat menghitung total *head* pompa yang sudah terpasang, maka dibutuhkan alat ukur tekanan (*pressure gauge*) pada sisi *suction* dan sisi *discharge* pompa. Alat ukur sebaiknya sangat dekat pada kedua sisi pompa. Kebanyakan rumus yang digunakan adalah dengan menghitung perbedaan *head* pada sisi *suction* dengan *head* pada sisi *discharge*. Mekanisme perhitungan *Head* total pompa akan dijelaskan pada Gambar 2.16 di bawah ini:



**Gambar 2.17.** *Head* total pompa terpasang  
(Jacquest C., *Pump System Analysis*:5.1)

*Head* total pompa terpasang dapat dinyatakan dengan rumus:

$$\begin{aligned}
 H &= H_D - H_S \\
 H &= \left( \frac{P_{GD}}{\gamma} + \frac{V_D^2}{2g} + Z_D \right) - \left( \frac{P_{GS}}{\gamma} + \frac{V_S^2}{2g} + Z_S \right) \\
 H &= \frac{P_{GD} - P_{GS}}{\gamma} + \frac{V_D^2 - V_S^2}{2g} + (Z_D - Z_S) \dots \dots \dots (2.5)
 \end{aligned}$$

Dimana:

- $H$  = *Head* total pompa (m)
- $P_{GD}$  = Tekanan pada *discharge* (N/m<sup>2</sup>)
- $P_{GS}$  = Tekanan pada *suction* (N/m<sup>2</sup>)
- $\gamma$  = Berat jenis (N/m<sup>3</sup>)
- $Z_D$  = Elevasi sisi *discharge* (m)
- $Z_S$  = Elevasi sisi *suction* (m)
- $V_D$  = Kecepatan aliran *discharge* (m/s)
- $V_S$  = Kecepatan aliran *suction* (m/s)

#### 4. Daya pada Sistem pompa

Daya dapat diartikan energi per satuan waktu. Daya yang berhubungan pada sistem pompa ada tiga yaitu, daya air (*Water Horse Power*), daya poros (*Brake Horse Power*), dan daya listrik untuk menjalankan sistem pompa. Besarnya daya tersebut dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

- Daya air (*Water Horse Power*)

Daya hidrolis (daya pompa teoritis) adalah daya dari pompa sentrifugal yang digunakan untuk mengalirkan debit pada *head* tertentu. Daya air dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$WHP = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{1000} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana:

- $WHP$  = *Water Horse Power* (kW)
- $\gamma$  = Berat jenis air (N/m<sup>3</sup>)
- $Q$  = Debit (m<sup>3</sup>/s)
- $H$  = *Head* total pompa (m)

- Daya Poros (*Brake Horse Power*)

Daya poros yang diperlukan untuk menggerakkan sebuah pompa adalah sama dengan daya hidrolis ditambah kerugian daya didalam pompa. Daya ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$BHP = \frac{WHP}{\eta_{pompa}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana:

$BHP$  = Brake Horse Power (kW)

$WHP$  = Water Horse Power (kW)

$\eta_{pompa}$  = Efisiensi pompa

- Daya Motor

Daya Penggerak (*Driver*) adalah daya poros dibagi dengan efisiensi mekanis (efisiensi transmisi). Dapat dihitung dengan rumus :

$$P_{in} = \frac{BHP}{\eta_{motor}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana:

$P_{in}$  = Daya masuk (kW)

$BHP$  = Brake Horse Power (kW)

$\eta_{motor}$  = Efisiensi motor

Bila ditinjau dari motor 3 fasa, dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$P_{in} = \sqrt{3} V . A . \cos\phi \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

$P_{in}$  = Daya Masuk (kW)

$V$  = Voltage (Volt)

$I$  = Ampere (Amp)

$\cos\phi$  = Faktor daya /Power Factor

## 5. Efisiensi Sistem Pompa

Pengertian dari efisiensi adalah ukuran dari perbandingan keluaran sistem dengan daya yang diperlukan untuk menggerakkan sistem. Pada sistem pompa ada tiga hal yang berhubungan dengan efisiensi sistem pompa yaitu:

- Efisiensi motor penggerak
- Efisiensi pompa
- Efisiensi pemanfaatan akhir

Secara matematis rumus efisiensi adalah :

$$\eta_{sistem} = \frac{\text{Daya Output}}{\text{Daya Input}} (x100\%) \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\eta_{motor} = \frac{BHP}{P_{in}} (x100\%) \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\eta_{pompa} = \frac{WHP}{BHP} (x100\%) \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

$WHP$  = *Water Horse Power* (kW)

$BHP$  = *Brake Horse Power* (kW)

Untuk perhitungan efisiensi pompa yang bekerja secara paralel dapat menggunakan rumus di bawah ini:

$$\eta_{paralel} = \frac{H \cdot SG}{k} \cdot \frac{\sum Q}{\sum BHP} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

$H$  = *Head* pompa (m)

$SG$  = *Specific gravity*

$k$  = konstanta 0.1021 SI

$\sum Q$  = Total debit paralel (dm<sup>3</sup>/s)

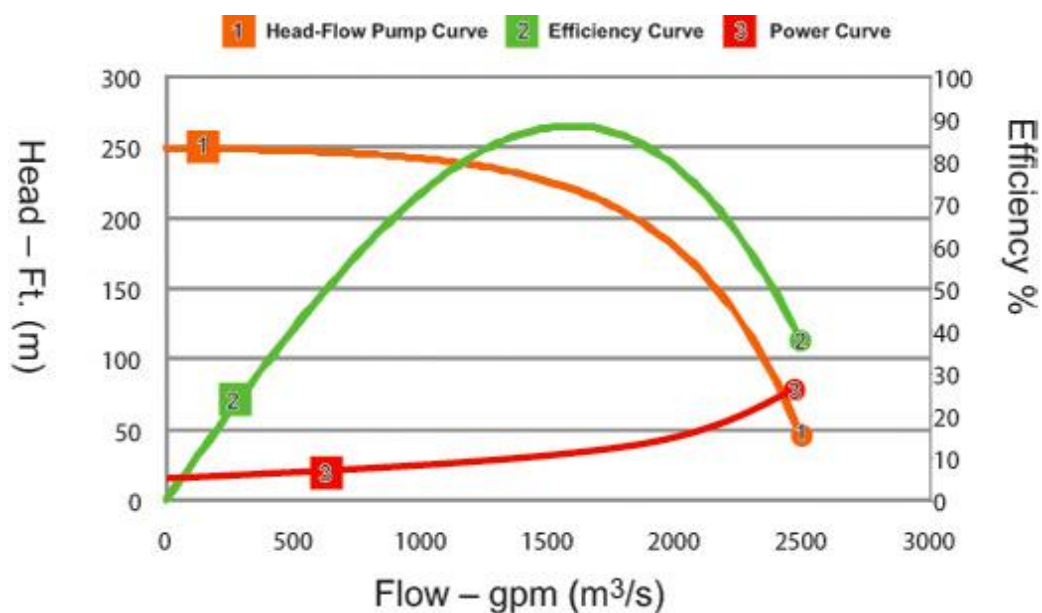
$\sum BHP$  = Total daya poros paralel (W)

## 6. Karakteristik Pompa

Karakteristik dari pompa sentrifugal merupakan hubungan antara tekanan yang dibangkitkan (*head*) dan debit aliran (kapasitas). Karakteristik dapat juga menyertakan kurva efisiensi dan harga BHPnya. Karakteristik pompa sentrifugal dapat digambarkan dalam kurva karakteristik yang melukiskan jalannya lintasan dan besaran-besaran tertentu terhadap besaran kapasitas, besaran-besaran itu adalah:

- *Head* pompa ( $H$ )
- Daya poros pompa ( $BHP$ )
- Efisiensi pompa ( $\eta$ )

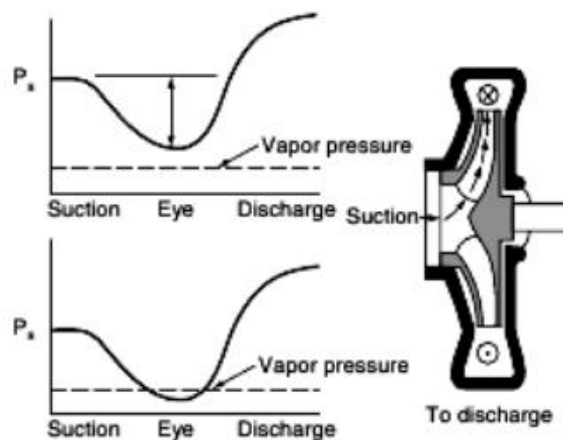
Karakteristik pompa berbeda-beda berdasarkan pada jenis pompa, putaran spesifik, dan pabrik pembuatnya. Contoh karakteristik sebuah pompa dapat digambarkan pada Gambar 2.18. Kurva-kurva karakteristik yang menyatakan besarnya *head* total pompa, daya poros, dan efisiensi pompa terhadap kapasitasnya. Kurva performansi tersebut, pada umumnya digambarkan pada putaran yang tetap. Kurva efisiensi terhadap kapasitas dari pompa sentrifugal umumnya berbentuk lengkung seperti kurva berikut ini:



**Gambar 2.18.** Kurva *head*, efisiensi, dan daya  
(<http://www.bing.com/images/search?q=pump+curve&view>)

## 7. Kavitas

Kavitas adalah gejala menguapnya zat cair yang sedang mengalir, karena tekanannya turun sampai dibawah tekanan uap jenuhnya. Ketika zat cair terhisap pada sisi isap pompa, maka tekanan pada permukaan zat cair akan turun. Menurunnya tekanan hingga mencapai tekanan uap jenuhnya mengakibatkan cairan akan menguap dan membentuk gelembung uap. Selama bergerak sepanjang impeler, kenaikan tekanan akan menyebabkan gelembung uap pecah dan menumbuk permukaan pompa. Jika permukaan saluran/pipa terkena tumbukan gelembung uap tersebut secara terus menerus dalam jangka lama maka akan mengakibatkan terbentuknya lubang-lubang pada dinding saluran atau sering disebut erosi kavitas. Pengaruh lain dari kavitas adalah timbulnya suara berisik, getaran dan turunnya performansi pompa. Fenomena tersebut dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.19 dibawah ini.



**Gambar 2.19.** Perubahan tekanan pada sisi isap pompa  
<https://blog.craneengineering.net/hsfs/hub/367944/file-1212470497-jpg/Blog-Images/cavitation-damage-228548-edited.jpg?t=1477490124833>

### 2.2.8 Peluang Efisiensi Energi

Bagian ini meliputi area utama untuk memperbaiki pompa dan sistem pemompaan. Area utama bagi penghematan energi meliputi:

1. Memilih pompa yang benar
2. Pompa dalam susunan paralel untuk memenuhi permintaan yang beragam

3. Meminimalkan penggunaan kran pengendali aliran (*Throttle control*)
4. Meminimalkan penggunaan *by-pass* (*Bypass control*)
5. Kendali *start/stop* pompa
6. Memodifikasi diameter impeler
7. Mengendalikan debit aliran dengan variasi kecepatan

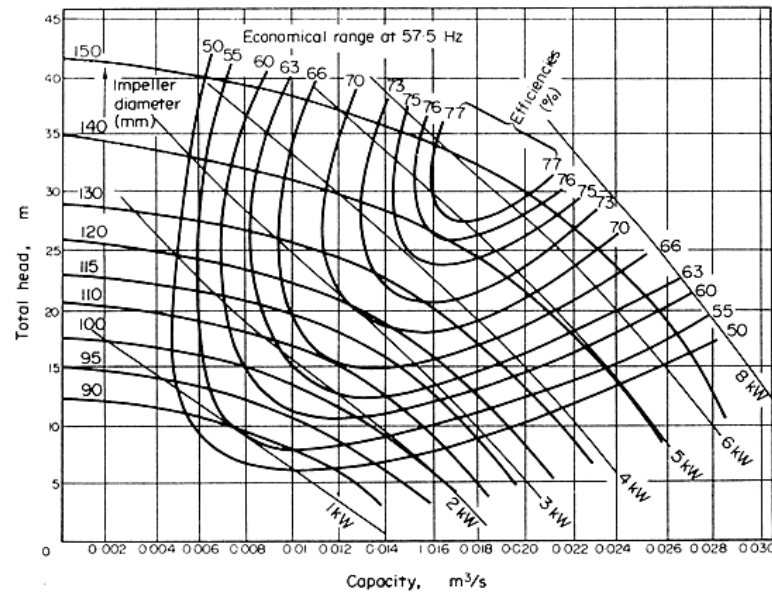
Secara lebih terperinci akan dijelaskan di bawah ini:

1. Memilih pompa yang benar

Dalam memilih pompa, para pemasok berusaha untuk mencocokkan kurva sistim yang diberikan oleh pihak pengguna dengan kurva pompa yang memenuhi kebutuhan tersebut sedekat mungkin. Titik operasi pompa adalah titik dimana kurva pompa dan kurva tahanan sistim berpotongan. Walau begitu, tidak memungkinkan untuk satu titik operasi memenuhi seluruh kondisi operasi yang dikehendaki. Sebagai contoh, bila kran pembuangan tersumbat, kurva tahanan sistim bergeser ke sebelah kiri dan begitu juga dengan titik operasinya (lihat Gambar 3.21).

Titik efisiensi terbaik atau *Best Efficiency Point* (BEP) merupakan kapasitas pemompaan pada diameter impeler maksimum, dimana efisiensi pompanya adalah yang paling tinggi. Seluruh titik kesebelah kanan atau kiri BEP memiliki efisiensi lebih rendah. BEP terpengaruh jika pompa yang terpilih ukurannya berlebih. Alasannya adalah bahwa aliran pompa dengan ukuran berlebih harus dikendalikan dengan metode yang berbeda, seperti kran penutup atau jalur *by-pass*. Keduanya memberikan tahanan tambahan dengan meningkatnya gesekan. Sebagai akibatnya kurva sistim bergeser ke kiri dan berpotongan dengan kurva pompa pada titik lainnya. Sekarang BEP nya juga menjadi lebih rendah. Dengan kata lain, efisiensi pompa berkurang sebab aliran keluar berkurang akan tetapi pemakaian dayanya tidak terlalu menurun. (BEE, 2004). Contoh dari kurva karakteristik pompa yang diberikan oleh pemasok dapat dilihat pada Gambar 2.20 di bawah ini:

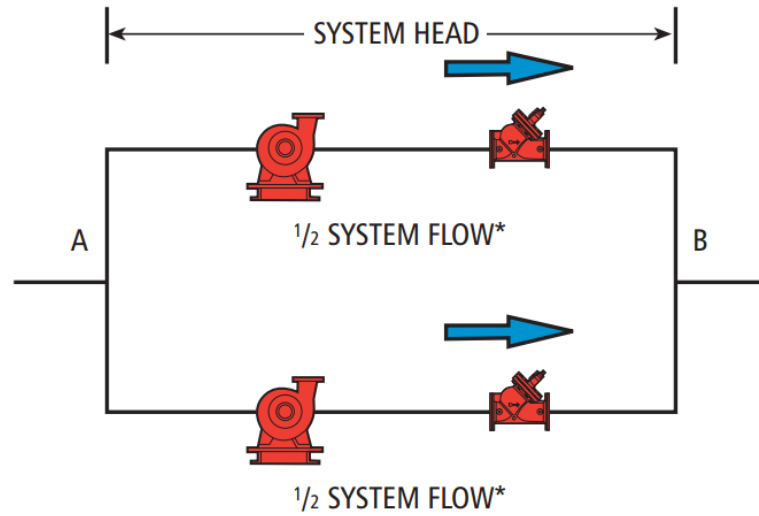




**Gambar 2.20.** Kurva kinerja pompa sentrifugal yang diberikan oleh pemasok (<http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/unopsassets/fig4-4.gif>)

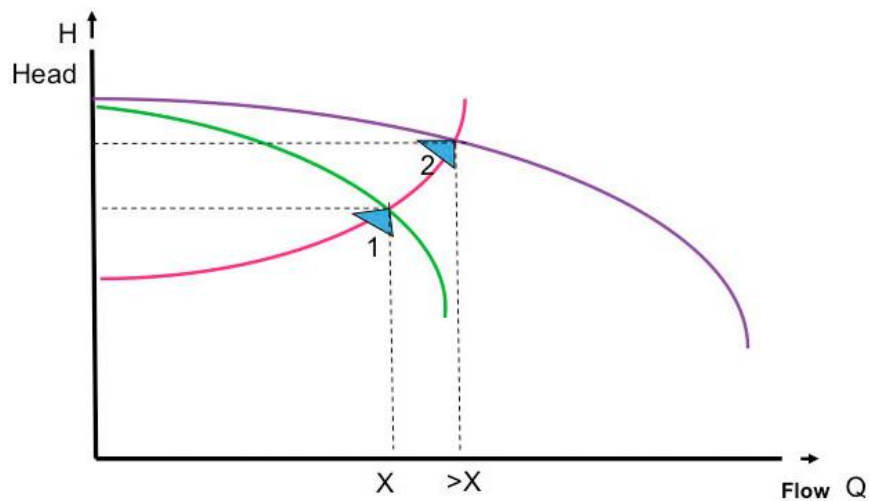
2. Pompa yang dipasang paralel untuk memenuhi permintaan yang bervariasi

Mengoperasikan dua pompa secara paralel dan mematikan salah satu jika kebutuhan menjadi lebih rendah, dapat menghasilkan penghematan energi yang signifikan. Dapat digunakan pompa yang memberikan debit aliran yang berbeda-beda. Pompa yang dipasang secara paralel merupakan sebuah opsi jika *head* statik lebih dari lima puluh persen *head* total. Jika beberapa pompa sentrifugal dipasang secara paralel, maka besar debit aliran total adalah jumlah dari debit aliran dari semua pompa yang sedang bekerja. Dengan cara ini, kita dapat mengatur debit aliran fluida dengan jalan menjalankan sejumlah pompa secara bersamaan sesuai dengan kebutuhan sistem. Kurva karakteristik pompa dan sistem menjadi acuan kerja untuk masing-masing pompa. Skema instalasi kerja pompa paralel dapat dilihat pada Gambar 2.21 di bawah ini:



**Gambar 2.21.** Instalasi pompa secara paralel  
(<http://artikel-teknologi.com>, 2016)

Kurva karakteristik pompa paralel didapatkan dengan cara menjumlahkan debit aliran fluida dari beberapa pompa pada nilai *head* yang sama. Pada prakteknya, yang perlu diperhatikan di sini adalah bahwa semakin tinggi debit aliran, maka akan semakin tinggi pula hambatan sistem (*resistance*). Sehingga untuk mengkompensasi hambatan tersebut, titik operasional pompa menjadi lebih tinggi nilai tekanan praktisnya dari pada nilai tekanan teoritisnya. Kurva karakteristik pompa paralel dapat dilihat pada Gambar 2.22 di bawah ini:

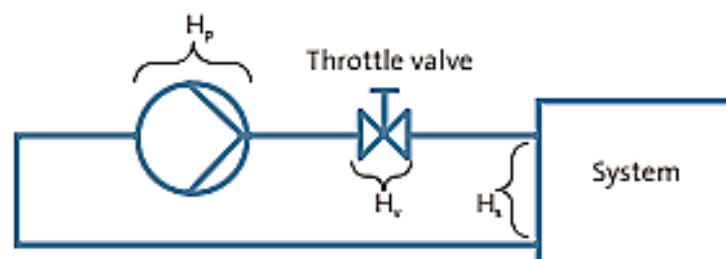


**Gambar 2.22.** Kurva kinerja pompa yang dipasang paralel  
(<http://www.pumpsandsystems.com/sites/default/files/0316/Common-Slide2.jpg>)

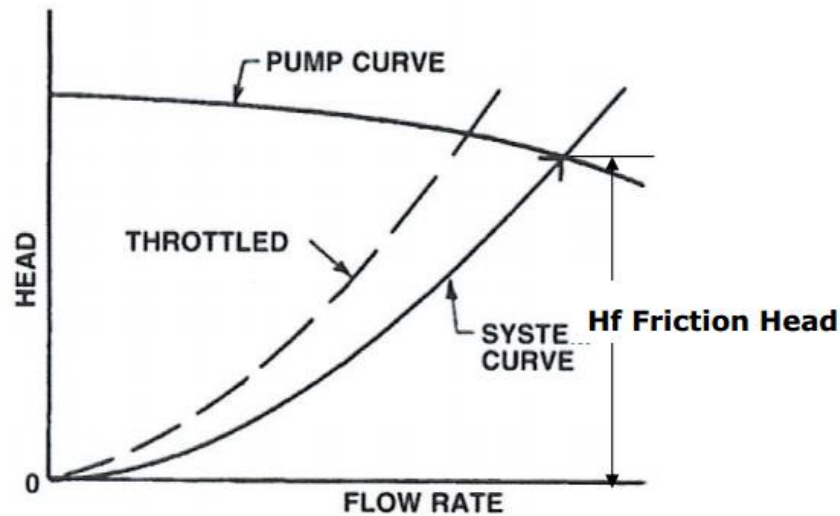
### 3. Meminimalkan penggunaan kran pengendali aliran

Metoda lain untuk mengendalikan aliran adalah dengan menutup atau membuka kran pembuangan (hal ini dikenal juga dengan metode “*throttling*”). Walaupun metode ini menurunkan tekanan menuju sistem namun tekanan yang terjadi pada sisi *discharge* pompa malah bertambah dikarenakan garis sistem bergerak ke kiri. Akibatnya *head* pompa akan bertambah dan debit aliran yang mengalir pada pompa akan menurun. Penurunan debit juga akan mempengaruhi penurunan daya pompa tetapi penurunannya tidak begitu signifikan. Gambar 2.24 memperlihatkan bagaimana kurva sistim bergerak naik dan ke kiri ketika kran pembuangan ditutup setengahnya.

Metode ini meningkatkan getaran dan korosi sehingga meningkatkan biaya perawatan pompa dan secara potensial mengurangi umurnya. VSD merupakan suatu pemecahan yang lebih baik dari sudut pandang efisiensi energi. Di samping dapat menurunkan *head* dan debit pompa, metode VSD juga mengurangi pemakaian daya yang begitu besar dibandingkan metode kran pengendali. Skema penggunaan kran pengendali aliran dapat dilihat pada Gambar 2.23 di bawah ini:



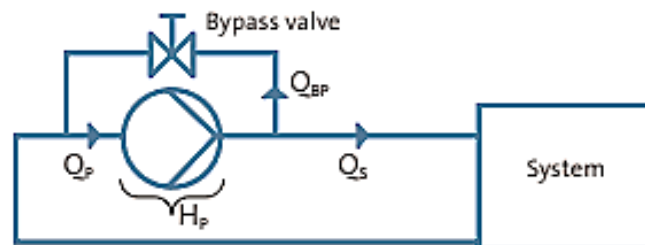
**Gambar 2.23.** Skema kran pengendali aliran pada sistim pemompaan (Handbook, G. P., 2004)



**Gambar 2.24.** Kurva pengendalian aliran pompa dengan kran (CEATI., 2008)

4. Meminimalkan pengaturan aliran menggunakan *by-pass*

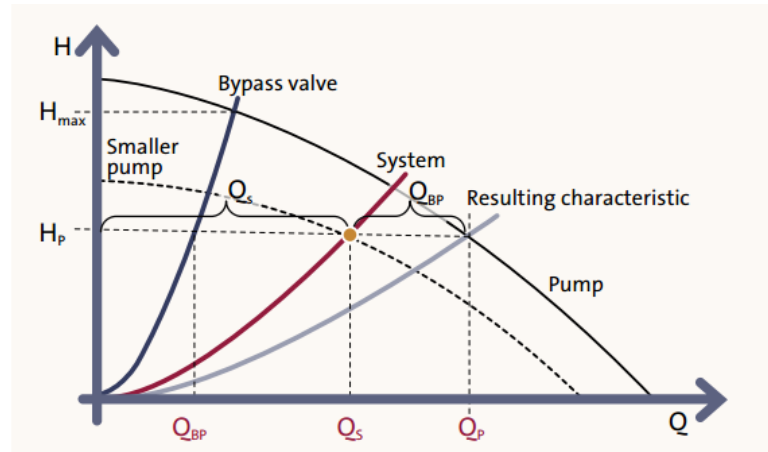
Aliran dapat juga diturunkan dengan cara memasang sebuah sistem kendali *by-pass*, dimana pembuangan pompa dibagi menjadi dua aliran menuju dua pipa saluran yang terpisah. Satu pipa saluran mengirimkan fluida ke titik tujuan pengiriman, sementara pipa saluran kedua mengembalikan fluida ke sumbernya. Dengan kata lain, sebagian fluida diputarakan dengan tanpa alasan, dengan demikian maka hal ini merupakan pemborosan energi. Oleh karena itu maka opsi ini harus dihindarkan. Skema instalasi kerja pompa dengan pengendali *by-pass* dapat dilihat pada Gambar 2.25 di bawah ini:



**Gambar 2.25.** Skema pengendali *by-pass* pada sistem pemompaan (Handbook, G. P., 2004)

Skema pengendali *by-pass* tidak mengubah karakteristik kerja pompa, namun aliran yang menuju sistem akan lebih rendah dengan

tekanan sesuai tekanan kerja pompa. Sebagian aliran akan melewati jalur *by-pass* dan kembali lagi ke penampungan. Kurva karakteristik pompa dengan pengendali *by-pass* dapat dilihat pada Gambar 2.26 dibawah ini:



**Gambar 2.26.** Kurva karakteristik pengendali *by-pass* pada sistim pemompaan (Handbook, G. P., 2004)

#### 5. Kendali *Start / stop* pompa

Suatu cara yang sederhana dan masuk akal berkenaan dengan energi yang efisien adalah menurunkan debit aliran dengan menjalankan dan menghentikan pompa, sepanjang hal ini tidak sering dilakukan. Sebuah contoh dimana opsi ini dapat digunakan adalah bila sebuah pompa digunakan untuk mengisi tangki penyimpanan dimana fluida mengalir ke proses pada debit yang tetap. Dalam sistem ini, pengendali dipasang pada tingkatan minimum dan maksimum didalam tangki untuk menjalankan dan menghentikan pompa. Beberapa perusahaan menggunakan metoda ini juga dalam rangka menghindarkan kebutuhan maksimum yang lebih rendah (yaitu dengan pemompaan pada bukan jam puncak).

#### 6. Memodifikasi diameter impeler

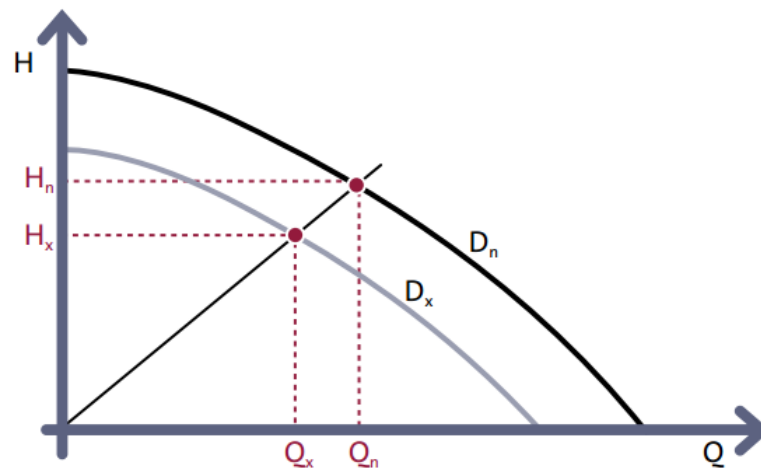
Mengubah diameter impeler akan memberikan perubahan yang sebanding dengan kecepatan keliling impeler. Sama halnya dengan hukum afinitas, persamaan berikut berlaku untuk diameter impeler:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad \frac{BHP_1}{BHP_2} \dots\dots\dots(2.14)$$

Mengubah diameter impeler merupakan suatu cara mengefisienkan energi untuk mengendalikan debit aliran. Walau demikian, beberapa hal berikut harus dipertimbangkan:

- Opsi ini tidak dapat digunakan jika terdapat pola aliran yang bervariasi.
- Impeler tidak direkomendasikan berubah lebih dari 25% dari ukuran impeler aslinya, karena akan menyebabkan getaran oleh terjadinya kavitasi yang akan menurunkan efisiensi pompa.
- Keseimbangan pompa harus dijaga yang berarti, keseimbangan impeler harus sama pada seluruh sisi.

Kadangkala impeler yang lebih kecil di pasaran ukurannya jauh lebih kecil dari kebutuhan. Perubahan kurva karakteristik pompa dengan penggantian impeler dapat dilihat pada Gambar 2.26 dibawah ini:



**Gambar 2.27.** Kurva penurunan diameter impeler pada kinerja pompa sentrifugal (Handbook, G. P., 2004)

#### 7. Mengendalikan debit aliran dengan variasi kecepatan

- Menjelaskan pengaruh kecepatan

Perputaran impeler pompa sentrifugal menghasilkan *head*. Kecepatan keliling impeler berhubungan langsung dengan kecepatan perputaran batang torak. Oleh karena itu variasi kecepatan putaran berpengaruh langsung pada kinerja pompa. Parameter kinerja pompa (debit aliran, *head*, daya) akan berubah dengan bervariasinya kecepatan

putaran. Oleh karena itu, untuk mengendalikan kecepatan yang aman pada kecepatan yang berbeda-beda maka penting untuk mengerti hubungan antara keduanya. Persamaan yang menjelaskan hubungan tersebut dikenal dengan “ Hukum Afinitas” :

- Debit aliran ( $Q$ ) berbanding lurus dengan kecepatan putaran ( $\omega$ )
- *Head* ( $H$ ) berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan putarar
- Daya poros ( $BHP$ ) berbanding lurus dengan kubik kecepatan putaran

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \quad \frac{BHP_1}{BHP_2} = \frac{\omega_1^3}{\omega_2^3} \dots\dots\dots(2.15)$$

Sebagaimana dapat dilihat dari hukum diatas, peningkatan kecepatan putaran pompa sentrifugal akan meningkatkan pemakaian dayanya. Sebaliknya penurunan kecepatan akan berakibat pada penurunan pemakaian dayanya. Hal ini menjadikan dasar bagi penghematan energi pada pompa sentrifugal dengan kebutuhan aliran yang bervariasi.

Hal yang relevan untuk dicatat bahwa pengendalian aliran oleh pengaturan kecepatan selalu lebih efisien dari pada dengan kontrol kran pengendali. Hal ini disebabkan kran menurunkan aliran namun hanya sedikit menurunkan pemakaian energi pompa. Sebagai tambahan terhadap penghematan energi, terdapat manfaat lainnya dari kecepatan yang lebih rendah tersebut.

- Umur bantalan meningkat. Hal ini disebabkan bantalan membawa gaya hidrolis pada impeler (dihasilkan oleh profil tekanan dibagian dalam wadah pompa), yang berkurang kira-kira sebesar kuadrat kecepatan.
- Getaran dan kebisingan berkurang dan umur sil meningkat selama titik tugas tetap berada didalam kisaran operasi yang diperbolehkan.

- Menggunakan penggerak kecepatan yang bervariasi / *variable speed drive* (VSD)

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa pengendalian kecepatan pompa merupakan cara yang paling efisien dalam mengendalikan aliran, sebab jika kecepatan pompa berkurang maka pemakaian daya juga akan berkurang. Metode yang biasanya banyak digunakan untuk menurunkan kecepatan pompa adalah penggerak kecepatan yang bervariasi/ *Variable Speed Drive* (VSD).

VSD menggunakan dua jenis sistem pengendalian yaitu:

- VSD mekanis meliputi sarang hidrolik, kopling fluida, dan *belt* dan *pully* yang dapat diatur-atur.
- VSD listrik meliputi pengendalian frekuensi / *variable frequency drives* (VFD). Akibatnya akan mengubah putaran dari motor listrik dan mengubah daya yang masuk ke motor listrik.

Untuk beberapa sistem, VFD dapat memperbaiki efisiensi operasi pompa pada kondisi operasi yang berbeda-beda. Pengaruh pelambatan kecepatan pompa pada operasi pompa digambarkan pada Gambar 2.30. Ketika VFD menurunkan RPM pompa, maka kurva *head*, aliran, daya, dan efisiensi bergerak turun.

Adapun hubungan frekuensi dan kecepatan putar yang di paparkan pada persamaan 2.22 dibawah ini:

$$f = \frac{120 \cdot \omega}{p} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana:

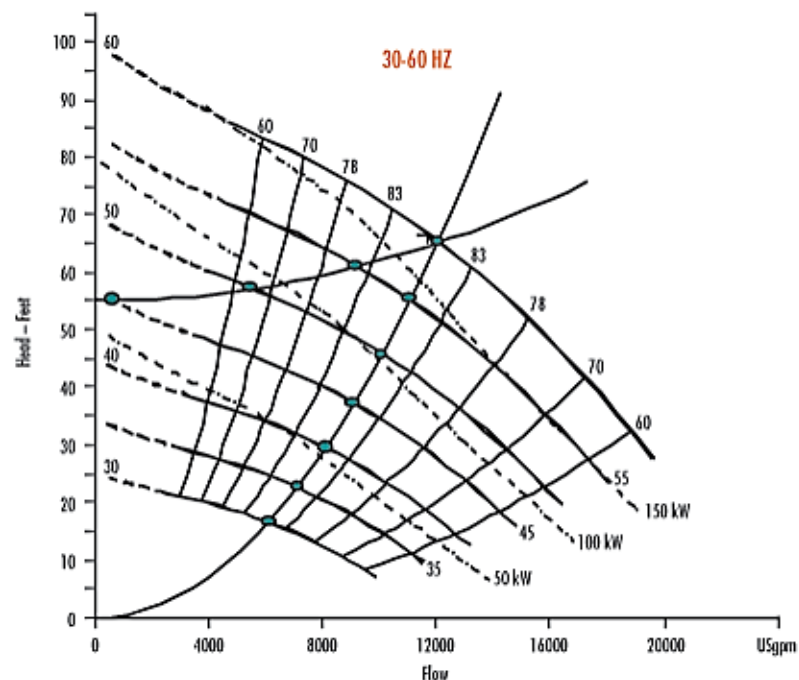
- $f$  = Frekuensi (Hz)
- $\omega$  = Kecepatan putar (rpm)
- $p$  = Jumlah *poles* motor listrik



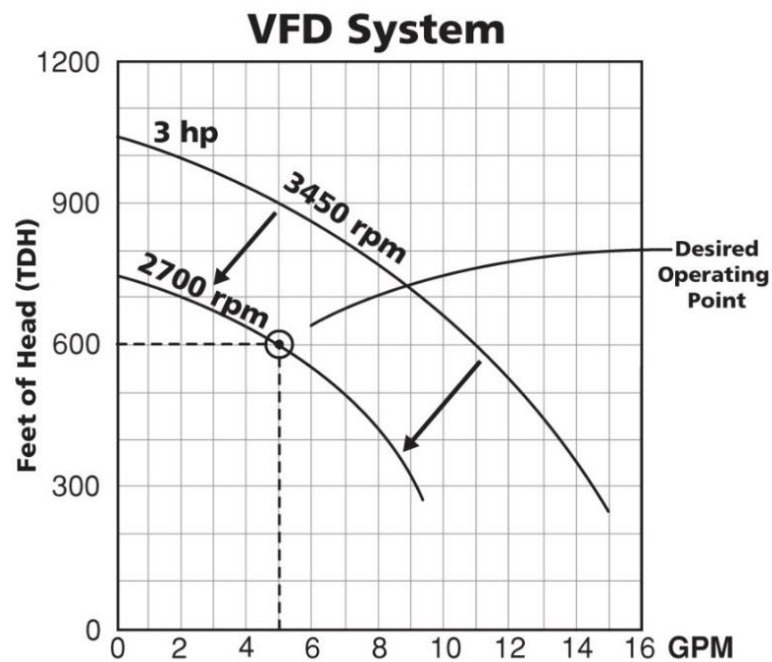
Keuntungan utama penggunaan VSD disamping penghematan energi adalah (US DOE, 2004):

- Memperbaiki pengendalian proses sebab dapat memperbaiki variasi-variasi kecil dalam aliran lebih cepat.
- Memperbaiki kehandalan sistim sebab pemakaian pompa, bantalan dan sil jadi berkurang.
- Penurunan modal dan biaya perawatan sebab kran pengendali, jalur *by-pass*, dan *starter* konvensional tidak diperlukan lagi. Kemampuan *starter* lunak: VSD membolehkan motor memiliki arus *start-up* yang lebih rendah.

Pada Gambar 2.28 dan 2.29 akan dipaparkan perubahan kurva karakteristik pompa dengan sistem *Variable Speed Drive* (VSD) di bawah ini:



**Gambar 2.28.** Kurva variasi frekuensi pada kinerja pompa sentrifugal ([http://www.waterworld.com/content/dam/etc/medialib/new-lib/waterworld/print.articles/volume27/issue/09/86622.res/\\_jcr\\_content/renditions/pennwell.web.450.420.gif](http://www.waterworld.com/content/dam/etc/medialib/new-lib/waterworld/print.articles/volume27/issue/09/86622.res/_jcr_content/renditions/pennwell.web.450.420.gif))



**Gambar 2.29.** Pengaruh variasi frekuensi pada kecepatan putar motor pompa (<https://franklinaid.files.wordpress.com/2011/08/figure-3.jpg>)

### 2.2.9 Perbandingan Peluang Efisiensi Energi

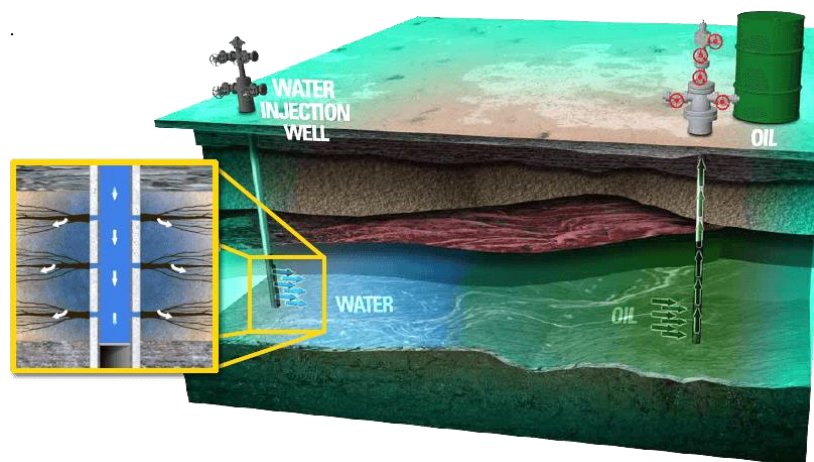
Perbandingan berbagai opsi penghematan energi pada pompa dan sistim pemompaan diringkaskan seperti dibawah ini:

**Tabel 2.1.** Perbandingan berbagai opsi penghematan energi pada pompa (diadaptasi dari US DOE, 2001)

Parameter	Perubahan kran kendali	Modifikasi impeler	VFD
Diameter impeler	16,93 in	14,76 in	16,93 in
Head pompa	71,7 m	42 m	34,5 m
Efisiensi pompa	75,1 %	72,1 %	77 %
Debit aliran	80 m <sup>3</sup> /jam	80 m <sup>3</sup> /jam	80 m <sup>3</sup> /jam
Daya terpakai	32,1 kW	14 kW	11,6 kW

### 2.2.10 Injeksi Air / *Waterflood EOR*

Juliasty (2010) dalam tulisannya mendefinisikan, *Waterflood EOR* (*Enhanced Oil Recovery*) merupakan metode untuk meningkatkan perolehan minyak dari reservoir dengan cara menginjeksikan air dari sumur injeksi, kemudian mendesak minyak menuju sumur produksi. Seperti pada Gambar 2.30 di bawah ini:



**Gambar 2.30.** Metode injeksi air

([http://www.corec.no/COREC/images/iris\\_visu\\_test\\_02\\_CC\\_645.jpg](http://www.corec.no/COREC/images/iris_visu_test_02_CC_645.jpg))

Injeksi air merupakan salah satu metoda EOR yang paling banyak dilakukan hingga saat ini. Biasanya injeksi air digolongkan ke dalam injeksi tak tercampur. Alasan-alasan sering digunakannya injeksi air ialah:

1. Mobilitas yang cukup rendah
2. Air cukup mudah diperoleh
3. Pengadaan air cukup murah
4. Berat kolom air dalam sumur injeksi turut menekan, sehingga cukup banyak mengurangi besarnya tekanan injeksi yang perlu diberikan di permukaan, jika dibandingkan dengan injeksi gas, dari segi ini berat air sangat membantu.
5. Air biasanya mudah tersebar ke seluruh reservoir, sehingga menghasilkan efisiensi penyapuan yang cukup tinggi.