

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Energi baru dan terbarukan adalah sumber energi yang cepat dipulihkan kembali secara alami, dan prosesnya berkelanjutan (Greenpeace, 2015). Energi terbarukan dihasilkan dari sumber daya energi yang secara alami tidak akan habis bahkan berkelanjutan jika dikelola dengan baik. Energi baru dan terbarukan dibagi dari berbagai sumber energi yakni, energi surya, energi angin, energi biomassa, energi panas bumi, dan energi air.

Energi air adalah energi yang dimiliki oleh air yang bergerak menyimpan energi yang besar. Klasifikasi umum pembangkit listrik tenaga air dapat dilihat pada tabel 1 dibawah ini:

Tabel 1. Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Air

Tipe	Kapasitas (kW)
Mikro Hidro	< 100
Mini Hidro	101-2.000
Small Hidro	2.001-25.000
Large Hidro	>25.000

Sumber: Teacher Manual Diploma Hydro Power

Mikrohidro adalah istilah yang digunakan untuk instalasi pembangkit listrik yang menggunakan energi air. Kondisi air yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber daya (*resources*) penghasil listrik adalah yang memiliki kapasitas aliran dan ketinggian tertentu. Pembangkit listrik tenaga mikrohidro dapat digunakan pada saluran irigasi dan sungai atau air terjun, dengan cara memanfaatkan tinggi terjunan (*head*, dalam m) dan jumlah debit airnya (m³/detik). (Muchlisin Riadi, 2016). Semakin besar kapasitas aliran maupun ketinggiannya dari instalasi maka semakin besar energi yang bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

PLTMH umumnya merupakan pembangkit listrik jenis *run of river* dimana *head* diperoleh tidak dengan cara membangun bendungan besar,

melainkan dengan mengalihkan aliran air sungai ke satu sisi dari sungai tersebut selanjutnya mengalirkannya lagi ke sungai pada suatu tempat dimana beda tinggi yang diperlukan sudah diperoleh. Air dialirkan ke *power house* (rumah pembangkit) yang biasanya dibangun dipinggir sungai. Air akan memutar sudu turbin/kincir air (*runner*), kemudian air tersebut dikembalikan ke sungai asalnya. Energi mekanik dari putaran poros turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh sebuah generator. (Muchlisin Riadi, 2016)

2.2 Prinsip Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

PLTMH tenaga Air Terjun umumnya merupakan pembangkit listrik jenis *run of natural waterfall hydropower* dengan prinsip memanfaatkan ketinggian air jatuh dan jumlah air yang jatuh (debit) perdetik yang ada pada air terjun (Henrylito,2014). Sejumlah air yang jatuh pada ketinggian tertentu memiliki energi yang disebut dengan energi Potensial kemudian mengalir pada kecepatan tertentu yang memberikan energi kinetik. Energi potensial dan kinetik yang dimiliki air dapat menggerakkan kincir, dimana air jatuh kemudian menabrak sudu-sudu kincir mengakibatkan kincir berputar. Perputaran yang dihasilkan oleh kincir menghasilkan daya mekanik kincir yang kemudian selanjutnya akan dikonversikan menjadi energi listrik melalui generator. Hal-hal yang mempengaruhi dalam mengkonversi energi air menjadi daya mekanik dan energi listrik yakni ketinggian air yang jatuh dan jumlah air yang mengalir atau debit. Semakin tinggi air yang jatuh maka semakin besar energi potensial yang dimiliki air, semakin besar kecepatan air yang mengalir maka semakin besar pula energi kinetik air. Semakin besar energi potensial dan kinetik air maka semakin besar daya mekanik kincir yang dihasilkan, semakin besar daya mekanik kincir maka semakin besar energi listrik yang dihasilkan.

Hal yang perlu diperhatikan dalam merancang sebuah PLTMH adalah menyesuaikan antara debit air yang tersedia dengan besarnya generator yang digunakan, jangan sampai generator yang dipakai terlalu besar atau terlalu kecil dari debit air yang ada. Potensi daya mikrohidro dapat dihitung dengan persamaan 1 pada halaman 6.

$$P = \rho g Q H \eta \dots \dots \dots (1) \text{ (Teacher Manual Diploma Hydro Power)}$$

Dimana:

ρ = massa jenis zat cair (kg/m^3)

P = Daya yang dibangkitkan PLTMH (Watt)

g = gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Q = Debit aliran Air (m^3/s)

H = beda ketinggian (m)

η = efisiensi sistem PLTMH, efisiensi sistem PLTMH umumnya 0,85

2.3 Kincir Air

Kincir air didefinisikan sebagai peralatan mekanis berbentuk roda (*wheel*), dengan sudu (*bucket atau vane*) pada sekeliling tepi-tepinya yang diletakkan pada poros vertikal dengan fluida air sebagai fluida kerjanya (Juneidy Morong, 2016).

Air yang mengalir ke dalam dan ke luar kincir tidak mempunyai tekanan lebih, hanya tekanan atmosfer. Kecepatan air yang mengalir ke dalam kincir haruslah besar, sebab bila kecepatannya besar maka dorongan pada sudu-sudu turbin semakin besar.

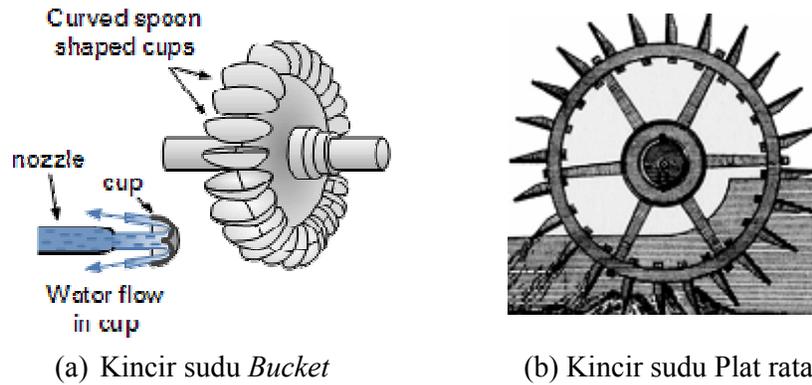
Menurut Junaedy Morong, tinggi air jatuh yang bisa digunakan kincir air berkisar antara 0,1 m sampai 12 m (roda kincir yang besar), dan kapasitas airnya $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ sampai $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Air yang menabrak sudu-sudu *runner* kincir air hanya mempunyai tekanan atmosfer.

Kincir air atau turbin air dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk sudu kincir dalam mengubah energi jatuh air menjadi energi mekanik dan dapat juga diklasifikasikan berdasarkan sistem aliran arah air pendorong yaitu titik darimana air akan mendorong sudu kincir.

2.3.1 Klasifikasi Kincir/Turbin Air berdasarkan Bentuk Sudu

Klasifikasi kincir atau turbin air berdasarkan bentuk sudu kincir dalam mengubah energi jatuh air menjadi energi mekanik yaitu bentuk sudu turbin

bucket dan bentuk sudu rata kincir. Untuk lebih jelas mengenai klasifikasi bentuk sudu dapat dilihat pada gambar 1 dibawah ini.

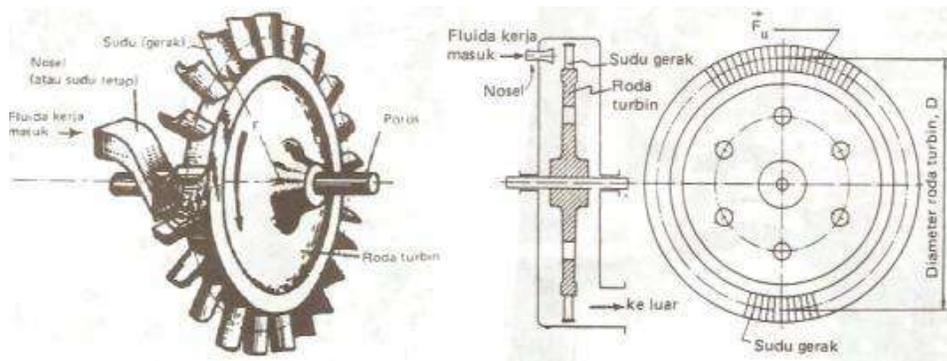


Gambar 1. Klasifikasi Bentuk sudu Kincir
(Sumber: Danillo Cappechi, 2013:13)

Bentuk sudu kincir *bucket* merupakan bentuk sudu kincir yang mengubah seluruh energi air yakni energi potensial dan kinetik menjadi energi mekanik putaran turbin, contoh dari jenis kincir atau turbin ini yaitu Pelton (Djoko Lunanto, 2012). Kincir Pelton merupakan kincir air yang memiliki sudu kincir berbentuk mangkok atau sendok. Air yang berada pada ketinggian tertentu memiliki energi potensial. Ketika air mengalir ke tempat yang lebih rendah energi potensial berubah menjadi energi kinetik. Oleh turbin air, energi kinetik dirubah menjadi energi mekanik (Dixon & Hall, 2010).

Fluida air ditransportasikan melalui nozel dengan kecepatan tertentu yang mana sudu tersebut dapat menampung sejumlah air yang telah ditabrakan kedalam sudu (Amazon, 2016). Adanya momentum pada sisi – sisi sudu akibat aliran air yang bergerak mengikuti kelengkungan sudu menyebabkan besarnya torsi pada sudu tipe ini meningkat. Air cenderung lebih lambat meninggalkan sudu akibat kelengkungan sudu menyebabkan tipe sudu ini mempunyai putaran dan power yang lebih kecil dari pada tipe datar. Tipe sudu ini tidak menimbulkan reaksi berisik saat air menumbuk sudunya, air menumbuk sudu dengan lebih lembut sehingga umur sudu dapat bertahan lebih lama.

Pada roda turbin terdapat sudu yaitu suatu konstruksi lempengan dengan bentuk dan penampang tertentu, air sebagai fluida kerja mengalir melalui ruang diantara sudu tersebut, dengan demikian roda turbin akan dapat berputar dan pada sudu akan ada suatu gaya yang bekerja. Gaya tersebut terjadi karena ada perubahan momentum dari fluida kerja air yang mengalir diantara sudunya. Untuk lebih jelasnya mengenai roda kincir air dapat dilihat pada gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Roda Kincir
(Sumber : Junaedy Morong, 2016)

Kincir sudu rata merupakan kincir air yang memiliki sudu kincir berbentuk plat datar atau rata. Fluida air ditransportasikan melalui nozel dengan kecepatan tertentu yang mana fluida tersebut menabrak sudu kincir yang menyebabkan kincir berputar. gaya puntir yang diteruskan ke poros hanya didapatkan dari gaya dorong air pada nossel, jadi gaya puntir yang diteruskan ke poros akan sama dengan gaya dorong air pada nossel. Profil sudu datar akan menimbulkan suara berisik saat terjadi tumbukan pada air dan sudunya sehingga akan memperpendek umur sudu.

Untuk menghitung perancangan desain kincir air dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

1. Energi Potensial Air

Energi potensial air adalah energi yang memanfaatkan jatuh air dari ketinggian tertentu. Untuk menghitung energi potensial air dapat ditentukan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$E_p = mgh \quad (2)$$

Dimana:

E_p = Energi Potensial (Joule)

m = massa air (kg)

g = gaya gravitasi (m/s^2)

h = beda ketinggian (m)

2. Potensi Energi Air (E_k)

Potensi energi air selain memanfaatkan energi air jatuh, energi air juga dapat diperoleh dari aliran kecepatan air datar. Dalam hal ini energi yang tersedia merupakan energi kinetik (Yusri, 2004). Untuk menghitung energi kinetik air dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3)$$

Dimana:

E_k = Energi Kinetik (Joule)

m = massa aliran air (kg)

v = kecepatan aliran air pada penampang pipa (m/s)

3. Luas Penampang Pipa

Untuk menghitung luas penampang pipa dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (4)$$

Dimana:

A = Luas penampang pipa (m^2)

d = diameter dalam pipa (m)

4. Debit Air

Untuk menghitung jumlah debit air yang mengalir dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q = \frac{1}{4} \pi d^2 v \quad (5)$$

Dimana:

Q = Debit aliran air (m^3/s)

d = diameter nozel air (m)

v = kecepatan aliran air (m/s)

5. Kecepatan aliran Air

Untuk menghitung kecepatan aliran air dapat digunakan persamaan sebagai berikut (*Ceri Steward Poea, 2013*):

$$v = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

Dimana:

v = kecepatan aliran air (m/s)

Q = Laju Alir (m^3/s)

A = Luas Penampang pipa (m^2)

6. Kecepatan keliling kincir

Kecepatan keliling kincir didefinisikan sebagai kecepatan putaran kincir akibat berputarnya dinding sudu ketika fluida kerja menabrak dinding. Untuk menghitung kecepatan keliling kincir dapat digunakan persamaan sebagai berikut (*Nababan, 2012*):

$$U = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (7)$$

Dimana:

U = kecepatan keliling kincir (m/s)

n = kecepatan putaran (rpm)

D = Diameter kincir (m)

7. Kecepatan relatif Kincir (V_r)

Kecepatan Relatif (V_r) kincir didefinisikan sebagai selisih kecepatan aliran fluida kerja masuk kincir dengan kecepatan putaran akibat berputarnya poros

akibat fluida kerja menabrak dinding. Untuk menghitung kecepatan relative kincir dapat digunakan persamaan sebagai berikut (Yusri, 2010):

$$V_r = v - U \quad (8)$$

8. Gaya Kincir

Untuk menghitung Gaya kincir dapat digunakan persamaan sebagai berikut, (Yusri, 2010) :

$$F = \rho_{air} p l v V_r \quad (\text{Gaya Kincir sudu Plat datar}) \quad (9)$$

$$F = \rho_{air} 1/2 \pi r^2 v V_r \quad (\text{Gaya Kincir sudu Mangkok}) \quad (10)$$

Dimana :

F = Gaya Kincir (N)

A = luas sudu kincir (m²)

v = kecepatan aliran air (m/s)

V_r = kecepatan relatif kincir (m/s)

p = panjang sudu plat datar (m)

l = lebar sudu plat datar (m)

r = jari-jari sudu mangkok

9. Torsi Kincir

Untuk menghitung Gaya kincir dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$T = F r \quad (11)$$

Dimana:

F = Gaya kincir (N)

T = Torsi Kincir (N.m)

r = jari-jari kincir (m)

10. Energi mekanik kincir.

Untuk menghitung energi mekanik kincir dapat digunakan persamaan sebagai berikut, (Yusri, 2010):

$$P_{mk} = \frac{2\pi n T}{60} \quad (12)$$

Dimana:

P_{mk} = Daya mekanik Kincir (W)

T = Torsi kincir (N.m)

n = kecepatan putaran kincir (rpm)

D = Diameter kincir (m)

12. Energi Listrik

Untuk menghitung Energi listrik yang dihasilkan dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{Listrik} = V.I \quad (13)$$

Dimana :

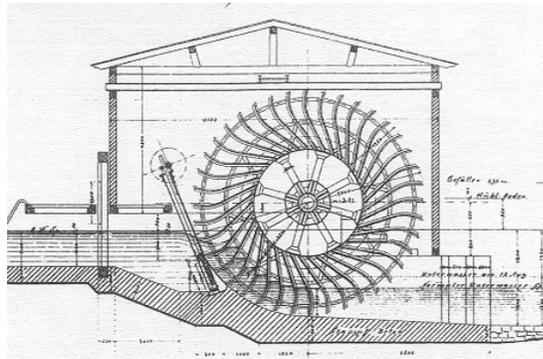
$P_{Listrik}$ = Energi Listrik (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

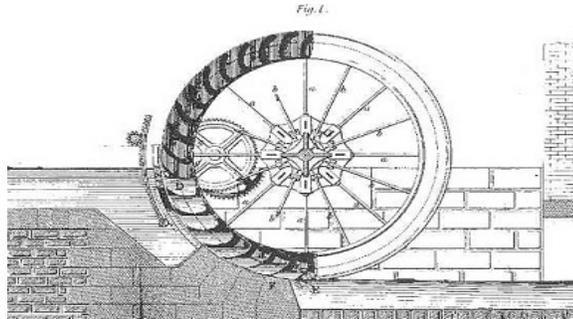
2.3.2 Klasifikasi Kincir Berdasarkan Arah Air Pendorong

Klasifikasi kincir air berdasarkan aliran arah tembak fluida pada sudu kincir yakni, *Undershot*, *Overshoot*, dan *Breastshot* (Gerrad Muller, 1899). Tipe *undershot* adalah tipe kincir air yang aliran air pendorongnya menabrak sudu pada bagian bawah kincir. Untuk lebih jelas mengenai arah dorong air tipe *Undershoot* dapat dilihat pada gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3. Kincir Air Tipe *Undershot*
(Sumber: Juneidy Morong, 2016)

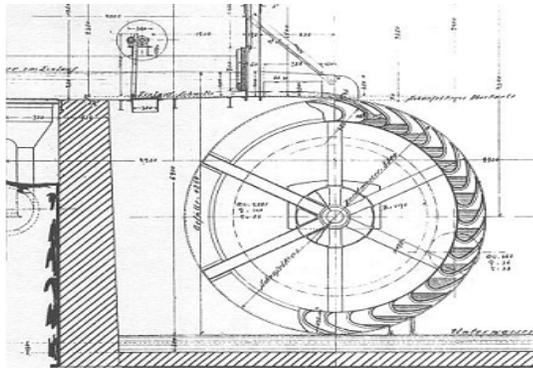
Sedangkan kincir air tipe *breastshot* adalah tipe kincir air yang aliran air pendorongnya menabrak sudu pada bagian tengah kincir. Untuk lebih jelas mengenai gambar kincir air tipe *breastshot* dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Kincir Air Tipe *Breastshot*
Sumber : Juneidy Morong, 2016

Kemudian tipe *overshot* adalah tipe kincir air yang aliran air pendorongnya menabrak sudu pada bagian atas kincir.

Untuk lebih jelasnya mengenai kincir air tipe *overshot* dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Kincir Air Tipe *Overshot*
(Sumber: Juneidy Morong, 2016)

Kincir air digerakkan oleh tenaga aliran air yang mengalir deras yang dapat menyebabkan terdorongnya sudu-sudu kincir sehingga kincir berputar pada

porosnya, yang kemudian pada poros kincir dipasang puli. Dimana putaran dari *pulley* di teruskan ke generator menggunakan sabuk. Putaran tersebut memutar kumparan dari generator yang akan mendorong garis-garis medan magnetnya. Gerakan inilah yang menimbulkan gaya gerak listrik (GGL).

Pembangkit listrik tipe kincir air sangat mudah untuk digunakan pada kondisi debit air (Q) tertentu, dalam pemilihan kincir air yang efektif dapat dilihat dari keunggulan dan kerugian masing-masing kincir yang ada ialah sebagai berikut:

1. Kincir Air *Undershot*

Kincir air *Undershot* bekerja bila air yang mengalir menghantam dinding sudu yang terletak pada bagian bawah dari kincir air. Tipe ini cocok dipasang pada perairan dangkal pada daerah yang rata. Tipe ini disebut juga dengan "*vitruvian*". Disini aliran air berlawanan dengan arah sudu yang memutar kincir.

Keuntungan:

- a. Membutuhkan ruang yang lebih luas untuk penempatan.
- b. Konstruksi lebih sederhana
- c. Lebih ekonomis
- d. Mudah untuk dipindahkan

Kerugian:

- a. Efisiensi kecil (25%-70%)
- b. Daya yang dihasilkan relatif kecil

2. Kincir Air *Breastshot*

Kincir air *Breastshot* merupakan perpaduan antara tipe *overshot* dan *undershot* dilihat dari energi yang diterimanya.

Keuntungan:

- a. Tipe ini lebih efisiensi dari tipe *undershot*
- b. Dibandingkan tipe *overshot* tinggi jatuhnya lebih pendek
- c. Dapat diaplikasikan pada sumber air aliran rata

Kerugian:

- a. Sudu-sudu dari tipe ini tidak rata seperti tipe *undershot* (lebih rumit)
- b. Diperlukan pada arus aliran rata
- c. Efisiensi lebih kecil daripada tipe *overshot* (20% - 75%)

3. Kincir air *Overshot*

Kincir air *Overshot* bekerja bila air yang mengalir ke dalam bagian sudu sudu sisi bagian atas dan karena gaya berat air roda kincir berputar. Kincir air *overshot* adalah kincir air yang paling banyak digunakan dibandingkan dengan jenis kincir air yang lain.

Keuntungan:

- a. Tingkat efisiensi yang tinggi dapat mencapai 85 %
- b. Tidak membutuhkan aliran yang deras.
- c. Konstruksi yang sederhana
- d. Mudah dalam perawatan
- e. Teknologi yang sederhana mudah diterapkan di daerah yang terisolir

Kerugian:

- a. Karena aliran air berasal dari atas maka biasanya reservoir air atau bendungan air memerlukan investasi lebih banyak
- b. Tidak dapat untuk mesin putaran tinggi
- c. Membutuhkan ruang yang lebih luas untuk penempatan.

2.3.2 Klasifikasi Kincir/ Turbin Air berdasarkan Cara Merubah Energi Air menjadi Energi Puntir

Pada umumnya turbin air dapat diklasifikasi menjadi 2 jenis berdasarkan cara kerja turbin dalam mengubah energi air menjadi energi puntir (Djoko Luknanto, 2007) :

1. Turbin Impuls

Turbin impuls adalah turbin air yang memiliki prinsip merubah seluruh energi air yang terdiri dari energi potensial dan energi kecepatan kinetik menjadi energi mekanik untuk memutar turbin. Energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada nozle. Air keluar nozle yang mempunyai kecepatan tinggi

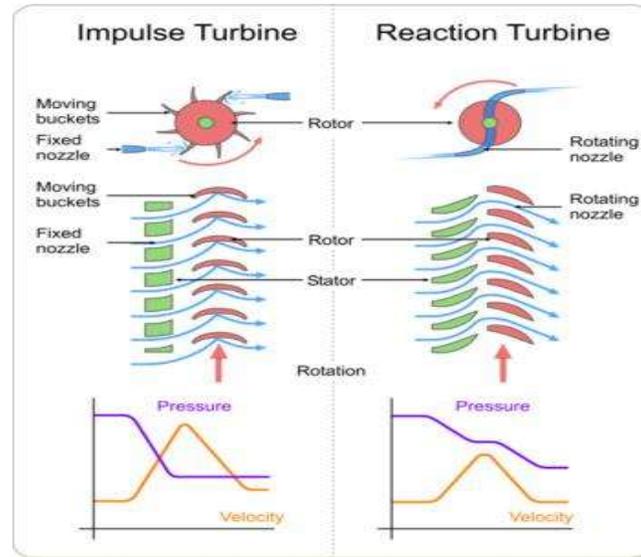
menabrak sudu turbin. Setelah menabrak sudu, arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (impulse) yang mengakibatkan roda turbin berputar. Turbin impuls adalah turbin yang memiliki tekanan sama karena aliran air yang keluar dari nozle tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfer sekitarnya. Semua energi tinggi air jatuh dan tekanan ketika masuk ke sudu jalan turbin dirubah menjadi energi kecepatan. Contoh turbin impuls adalah turbin Pelton dan Crossflow.

2. Turbin Reaksi

Turbin reaksi adalah turbin yang sudunya mempunyai profil/bentuk khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu. Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga runner (bagian turbin yang berputar) dapat berputar. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi. Runner turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin. Contoh turbin reaksi adalah turbin Francis dan Propeller.

Pada turbin impuls perubahan energi tekanan menjadi energi kinetik hampir seluruhnya terjadi pada sudu pengarah (*guide vane*) dimana tekanan air masuk hampir sama dengan tekanan keluar, sedangkan pada sudu gerak tekanan dan kecepatan relatif fluida tidak berubah (Junaedy Morong, 2016). Pada sudu gerak kecepatan absolut fluida berkurang karena digunakan untuk memutar poros turbin (berubah menjadi energi mekanik). Sedangkan pada turbin reaksi perubahan energi tekanan menjadi energi kinetik terjadi pada sudu pengarah dan sudu gerak. Pada turbin impuls ketika air melewati sudu pengarah (*nozzle*) kecepatan akan meningkat serta tekanannya akan turun. Ketika air melewati sudu pengarah tekanan dan kecepatan relatifnya tidak berubah. Sebaliknya pada turbin reaksi, ketika air melewati sudu pengarah (*nozzle*) tekanannya akan turun dan kecepatannya akan meningkat, demikian juga ketika air melewati sudu gerak (*runner*) tekanannya juga turun dan kecepatan relatif fluida meningkat, bagaimanapun juga kecepatan absolut fluida menurun karena ada perubahan dari

energi kinetik menjadi energi mekanik pada poros turbin. Untuk lebih jelasnya mengenai turbin impuls dan turbin reaksi dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Hubungan P-v pada turbin impuls dan reaksi
Sumber : Junaedy Morong, 2016

Berikut jenis-jenis turbin yang digunakan sesuai dengan *head* air jatuh yang dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Jenis-jenis Turbin dengan Head Air Jatuh

Jenis Turbin	Head (m)
Kaplan	$2 < H < 20$
Crossflow	$6 < H < 100$
Francis	$10 < H < 350$
Francis Pelton	$50 < H < 1000$
Turgo	$50 < H < 250$

Sumber : Veri Dwiyanto, 2016

Adapun pengertian dan prinsip kerja turbin diantaranya sebagai berikut:

a. Turbin Pelton

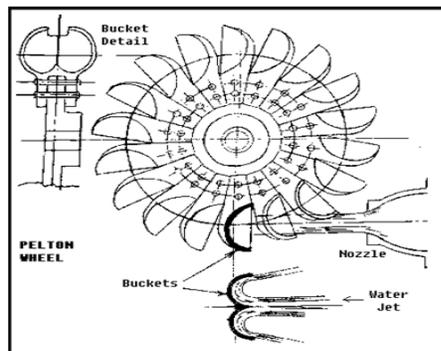
Turbin Pelton adalah turbin untuk tinggi terjun yang tinggi, yaitu diatas 300 meter, tetapi untuk skala mikro head 20 meter sudah mencukupi. Teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air

turbin dilakukan melalui proses impuls sehingga turbin Pelton juga disebut sebagai turbin impuls.

Bagian-bagian utama turbin Pelton :

1. Pipa nozzle dan lain-lain yang diperlukan untuk mengarahkan aliran jet air.
2. Runner yang menggunakan energi kinetis aliran jet (semburan) air.
3. Kotak Penutup untuk mengamankan runner dan nozzle.
4. Alat pengatur kecepatan (governor) agar kecepatan tetap sama pada beberapa bahan.

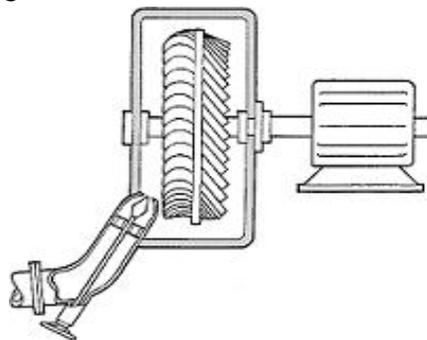
Untuk lebih jelas mengenai turbin pelton dapat dilihat pada gambar 7 dibawah ini.



Gambar 7. Turbin Pelton
Sumber : Junaedy Morong, 2016

b. Turbin Turgo

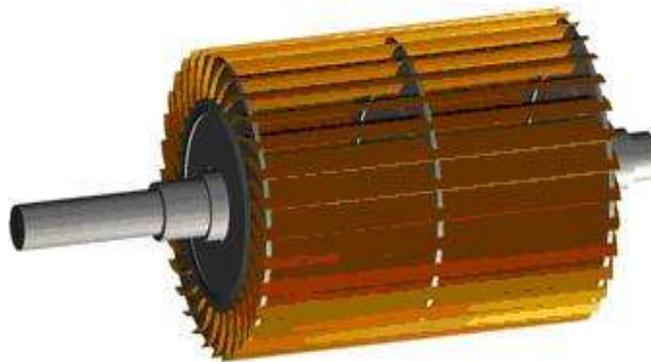
Dapat beroperasi pada head 30 s/d 300 m. Seperti turbin pelton turbin turgo merupakan turbin impuls, tetapi sudunya berbeda yakni memiliki konstruksi sudu yang disusun secara sinusoidal. Untuk lebih jelas mengenai turbin turgo dapat dilihat pada gambar 8 dibawah ini.



Gambar 8. Turbin Turgo
Sumber : Junaedy Morong, 2016

c. Turbin *Crossflow*

Salah satu jenis turbin impuls ini juga dikenal dengan nama Turbin Michell-Banki yang merupakan penemunya. Selain itu juga disebut Turbin Osberger yang merupakan perusahaan yang memproduksi turbin crossflow. Turbin crossflow dapat dioperasikan pada debit 20 L/sekon hingga 10000 L/sekon dan head antara 1 s/d 200 m. Untuk lebih jelas mengenai turbin crossflow dapat dilihat pada gambar 9 dibawah ini.



Gambar 9. Turbin *Crossflow*
Sumber : Junaedy Morong, 2016

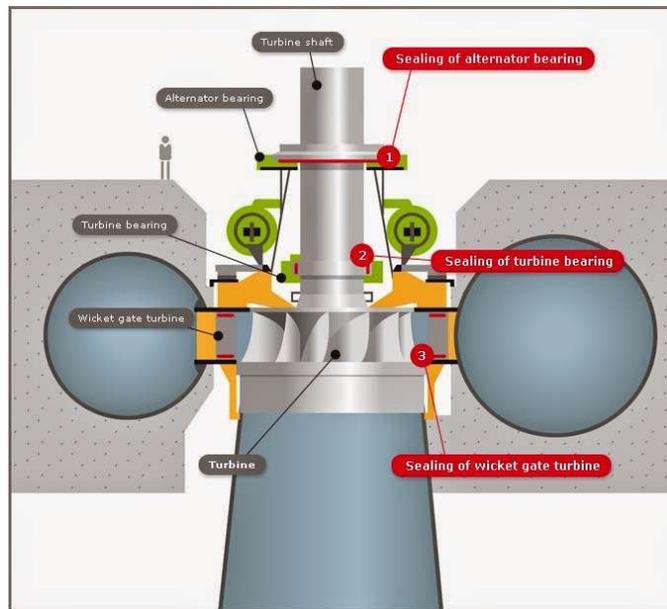
d. Turbin Francis

Turbin Francis paling banyak digunakan di Indonesia. Turbin ini digunakan pada PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) dengan tinggi terjun sedang, yaitu antara 20-400 meter, Turbin Francis digunakan untuk memanfaatkan energi potensial pada ketinggian menengah (dari beberapa puluh meter sampai 100 m). Selain itu turbin Francis dapat menghasilkan kecepatan putaran poros tinggi yang biasanya digunakan untuk menggerakkan generator. Teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses reaksi sehingga turbin Francis juga disebut sebagai turbin reaksi. Bagian-bagian utama turbin Francis :

1. Rumah spiral (scroll-case) yang menerima air dari pipa pesat dan mengarahkan aliran air ke turbin. Fungsi rumah spiral adalah membagi rata air yang diterima dari pipa pesat sekeliling turbin.

2. Runner (sudu gerak) dan Sudu pengarah (*nozzle*) yang meneruskan air dari turbin kesaluran pembuangan.

Untuk lebih jelas mengenai turbin francis dapat dilihat pada gambar 10 dibawah ini.



Gambar 10. Turbin Francis

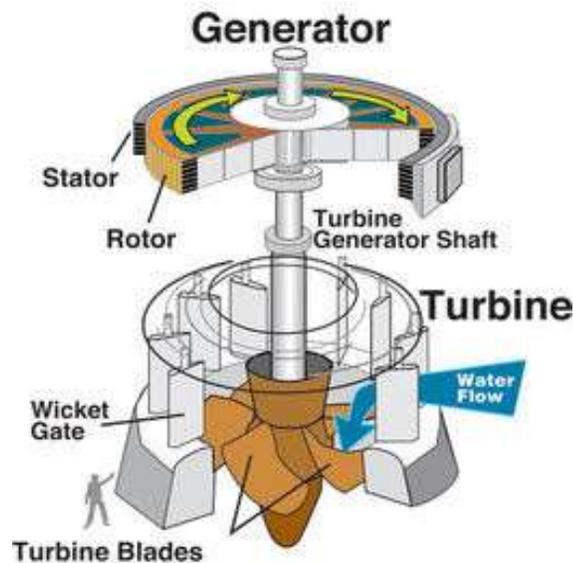
Sumber : Junaedy Morong, 2016

e. Turbin Kaplan/Propeller

Disebut turbin Propeller apabila mangkok-mangkok turbinnya tetap, sedangkan turbin Kaplan memiliki mangkok-mangkok turbin yang dapat diatur. Turbin Kaplan/Propeller baik digunakan pada PLTA dengan tinggi terjun yang rendah, yaitu dibawah 20 meter. Teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui pemanfaatan kecepatan air. Bagian-bagian utama sama dengan turbin Francis yaitu :

1. Rumah spiral (*scroll-case*)
2. *Runner*
3. Pipa pelepas air (*drafttube*)

Untuk lebih jelasnya mengenai gambar turbin propeller dapat dilihat pada gambar 11 halaman 21.



Gambar 11. Turbin Kaplan/Propeller
 Sumber : Junaedy Morong, 2016

Pemilihan Jenis turbin dapat ditentukan berdasarkan kelebihan dan kekurangan dari jenis-jenis turbin untuk desain yang sangat spesifik. Tahap awal, pemilihan jenis turbin dapat diperhitungkan dengan memperhitungkan parameter-parameter khusus yang mempengaruhi sistem operasi turbin, yaitu :

1. Faktor tinggi jatuh efektif air (tinggi jatuh net) atau aliran air (kecepatan) dan debit air yang akan mempengaruhi pemilihan jenis turbin. Sebagai salah satu contoh turbin pelton. yang beroperasi pelton yang beroperasi pada tinggi jatuh yang tinggi, sedangkan pada turbin propeller sangat efektif beroperasi pada tinggi jatuh yang renda (percepatan aliran air) dengan jumlah debit air yang besar.
2. Faktor daya yang diinginkan berkaitan dengan debit dan tinggi jatuh yang tersedia.
3. Faktor kecepatan putar turbin yang akan ditransmisikan ke generator. Sebagai contoh, untuk system transmisi *derect couple* antara generator dan turbin pada tinggi jatuh rendah, sebuah turbin reaksi (propeller) dapat mencapai putaran yang diinginkan, sementara turbin pelton dan crossflow berputar sangat lambat (*low speed*) yang akan menyebabkan sistem tidak beroperasi.

2.4 Konsep Dasar Pompa

2.4.1 Pengertian Fluida, Debit, dan *Head*.

Fluida didefinisikan sebagai zat atau substansi yang akan mengalami deformasi secara berkesinambungan apabila terkena gaya geser (gaya tangensial) sekecil apapun. Berdasarkan mampu mampatnya fluida dibagi menjadi 2 yaitu *compressible fluid* dan *incompressible fluid*. Berdasarkan sifat alirannya fluida dibagi menjadi 3 yaitu aliran laminar, transisi dan turbulen. Berdasarkan hubungan antara laju deformasi dan tegangan gesernya fluida dibagi menjadi 2 yaitu *Newtonian fluid* dan *non-newtonian fluid*. Berdasarkan gaya yang bekerja pada fluida dan gerakannya, fluida dibagi 2 yaitu fluida statis dan dinamis.

Debit/kapasitas merupakan volum fluida yang dapat dialirkan per satuan waktu. Pengukuran dari kapasitas dilakukan dengan menggunakan venturimeter, *orifice*, *pitottube* dan lain-lain (Sularso, 2006). Satuan dari kapasitas (Q) adalah m^3/s , liter/s, atau ft^3/s .

Head didefinisikan sebagai energi per satuan berat fluida. Satuan dari *head* (H) adalah meter atau feet fluida. Di dalam pompa, *head* diukur dengan cara menghitung beda tekanan total antara pipa isap dan pipa tekan, bila pengukuran dilakukan pada ketinggian yang sama. Menurut persamaan Bernoulli, terdapat tiga macam *head* dari sistem instalasi aliran, yaitu *head* kecepatan, *head* potensial dan *head* tekanan, sebagai berikut (Sularso, 2006):

- a. *Head* tekanan adalah perbedaan *head* yang disebabkan perbedaan tekanan statis (*head* tekanan) fluida pada sisi tekan dan sisi isap.
- b. *Head* kecepatan adalah perbedaan antara *head* kecepatan zat cair pada sisi tekan dengan *head* kecepatan zat cair pada sisi isap.
- c. *Head* potensial / elevasi adalah perbedaan ketinggian antara fluida pada sisi tekan dengan ketinggian fluida pada sisi isap.

2.4.2 Pengertian Pompa

Pompa adalah jenis mesin fluida yang berfungsi untuk memindahkan fluida melalui pipa dari satu tempat ke tempat lain. Dalam menjalankan fungsinya,

pompa mengubah energi mekanik poros yang menggerakkan sudu-sudu pompa mejadi energi kinetik dan tekanan pada fluida (Sularso, 2006).

Spesifikasi pompa dinyatakan dengan jumlah fluida yang dapat dialirkan per satuan waktu (kapasitas) dan energi angkat (*head*) dari pompa (Sularso, 2006). Spesifikasi pompa dipengaruhi oleh kapasitas, putaran pompa, torsi pompa, daya pompa, dan efisiensi pompa.

a. Kapasitas (Q)

Merupakan volum fluida yang dapat dialirkan persatuan waktu. Dalam pengujian ini pengukuran dari kapasitas dilakukan dengan menggunakan venturimeter. Satuan dari kapasitas (Q) adalah m^3/s , liter/s, atau ft^3/s .

b. Putaran (n)

Yang dimaksud dengan putaran disini adalah putaran poros (impeler) pompa, dinyatakan dalam satuan rpm. Putaran diukur dengan menggunakan tachometer.

c. Torsi (T)

Torsi didapatkan dari pengukuran gaya dengan menggunakan dinamometer, kemudian hasilnya dikalikan dengan lengan pengukur momen (L). Satuan dari torsi adalah Nm.

d. Daya (P)

Daya dibagi menjadi dua macam, yaitu daya poros yang merupakan daya dari motor listrik, serta daya air yang dihasilkan oleh pompa. Satuan daya adalah Watt.

e. Efisiensi (η)

Merupakan perbandingan antara daya air yang dihasilkan dari pompa, dengan daya poros dari motor listrik.

2.4.3 Klasifikasi Pompa

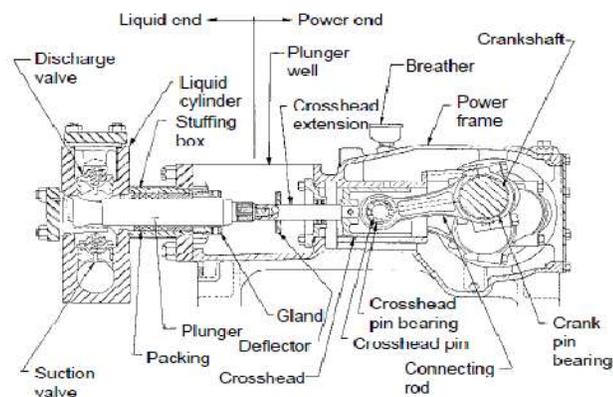
Menurut prinsip kerjanya, pompa diklasifikasikan menjadi dua macam, yaitu *Positive Displacement Pump* dan *Dynamic Pump*.

a. *Positive Displacement Pump*

Merupakan pompa yang menghasilkan kapasitas yang *intermittent*, karena fluida ditekan di dalam elemen-elemen pompa dengan volume tertentu. Ketika fluida masuk, langsung dipindahkan ke sisi buang sehingga tidak ada kebocoran (aliran balik) dari sisi buang ke sisi masuk. Kapasitas dari pompa ini kurang lebih berbanding lurus dengan jumlah putaran atau banyaknya gerak bolak-balik pada tiap satuan waktu dari poros atau engkol yang menggerakkan. Pompa jenis ini menghasilkan *head* yang tinggi dengan kapasitas rendah. Pompa ini dibagi lagi menjadi:

1. *Reciprocating Pump* (pompa torak)

Pada pompa ini, tekanan dihasilkan oleh gerak bolak-balik translasi dari elemen-elemennya, dengan perantara *crankshaft*, *camshaft*, dan lain-lainnya. Pompa jenis ini dilengkapi dengan katup masuk dan katup buang yang mengatur aliran fluida keluar atau masuk ruang kerja. Katup-katup ini bekerja secara otomatis dan derajat pembukaannya tergantung pada fluida yang dihasilkan. Tekanan yang dihasilkan sangat tinggi, yaitu lebih dari 10 atm. Kecepatan putar rendah yaitu 250 sampai 500 rpm. Oleh karena itu, dimensinya besar dan sangat berat. Pompa ini banyak dipakai pada pabrik minyak dan industri kimia untuk memompa cairan kental, dan untuk pompa air ketel pada PLTU. Skema pompa torak ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 12. Skema Pompa Torak.

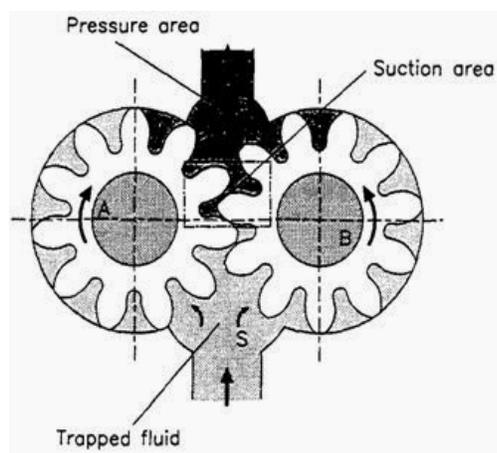
(Sumber: Karrasik, 2008)

2. Rotary Pump

Tekanan yang dihasilkan dari pompa ini adalah akibat gerak putar dari elemen-elemennya atau gerak gabungan berputar. Prinsip kerjanya adalah fluida yang masuk ditekan oleh elemen-elemen yang memindahkannya ke sisi buang kemudian menekannya ke pipa tekan. Karena tidak memiliki katup-katup, maka pompa ini dapat bekerja terbalik, sebagai pompa maupun sebagai motor. Pompa ini bekerja pada putaran yang tinggi sampai dengan 5000 rpm atau lebih. Karena keuntungan tersebut, pompa ini banyak dipakai untuk pompa pelumas dan pada *hydraulic power transmission*. Yang termasuk jenis pompa ini adalah:

a. Gear Pump (Pompa Roda Gigi)

Prinsip kerja dari pompa ini adalah berputarnya dua buah roda gigi berpasangan yang terletak dalam rumah pompa akan menghisap dan menekan fluida yang dipompakan. Fluida yang mengisi ruang antar gigi ditekan ke sisi buang. Akibat diisinya ruang antar sisi tersebut maka pompa ini dapat beroperasi. Aplikasi dari pompa ini adalah pada sistem pelumasan, karena pompa ini menghasilkan *head* yang tinggi dan debit yang rendah. Untuk lebih jelas mengenai pompa roda gigi dapat dilihat pada gambar 13 dibawah ini.

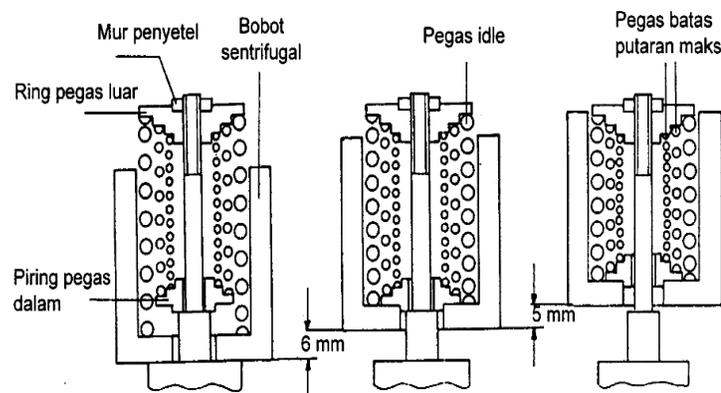


Gambar 13. Pompa Roda Gigi.

Sumber: Sularso, 2006

b. Pompa Piston

Prinsip kerja dari pompa ini adalah berputarnya selubung putar menyebabkan piston bergerak sesuai dengan posisi ujung piston di atas piring dakian. Fluida terhisap ke dalam silinder dan ditekan ke saluran buang akibat gerakan naik turun piston. Fungsi dari pompa ini adalah untuk pemenuhan kebutuhan *head* tinggi dan kapasitas rendah. Skema pompa piston ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 14. Skema Pompa Piston.

Sumber: Sularso, 2006

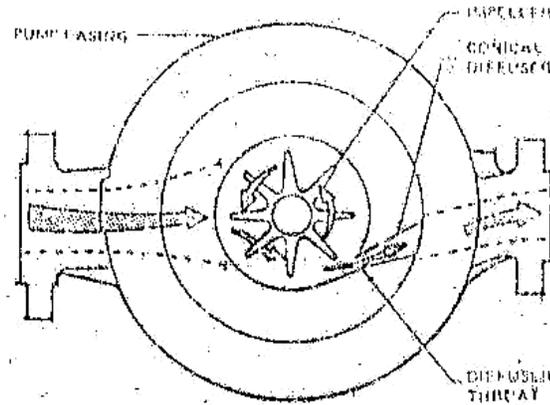
b. *Dynamic Pump*

Merupakan pompa yang ruang kerjanya tidak berubah selama pompa bekerja. Untuk merubah kenaikan tekanan, tidak harus mengubah volume aliran fluida. Dalam pompa ini terjadi perubahan energi, dari energi mekanik menjadi energi kinetik, kemudian menjadi energi potensial. Pompa ini memiliki elemen utama sebuah rotor dengan suatu impeler yang berputar dengan kecepatan tinggi. Yang termasuk di dalam jenis pompa ini adalah pompa aksial dan pompa sentrifugal, antara lain:

1. Pompa Aksial

Prinsip kerja dari pompa ini adalah berputarnya impeler akan menghisap fluida yang dipompakan dan menekannya ke sisi tekan dalam arah aksial. Pompa ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan *head* rendah dan

kapasitas tinggi, seperti pada sistem pengairan. Untuk lebih jelas mengenai pompa aksial dapat dilihat pada gambar 15 dibawah ini.



Gambar 15. Pompa Aksial

Sumber: Sularso, 2006

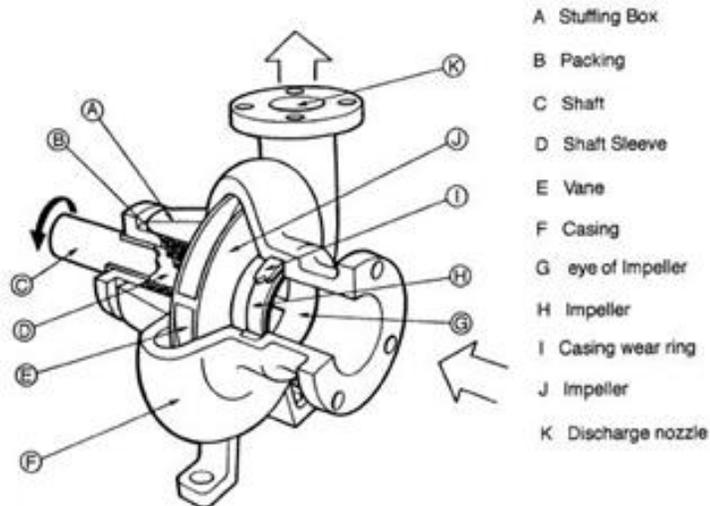
2. Pompa Sentrifugal

Elemen pokok dari pompa ini adalah sebuah rotor dengan sudu-sudu yang berputar pada kecepatan tinggi. Fluida yang masuk dipercepat oleh impeler yang menaikkan tekanan maupun kecepatannya, dan melempar fluida keluar melalui *volute* atau rumah siput. Pompa ini digunakan untuk memenuhi kebutuhan *head* medium sampai tinggi dengan kapasitas aliran medium. Dalam aplikasinya, pompa sentrifugal banyak digunakan untuk proses pengisian air pada ketel dan pompa rumah tangga.

Secara garis besar, pompa bekerja dengan cara mengubah energi mekanik dari poros yang menggerakkan sudu-sudu pompa, kemudian menjadi energi kinetik dan tekanan pada fluida. Demikian pula pada pompa sentrifugal, agar bisa bekerja pompa membutuhkan daya dari mesin penggerak pompa. Berputarnya impeler menyebabkan tekanan vakum pada sisi isap pompa, akibatnya fluida yang mengalir terhisap masuk ke dalam impeler. Di dalam impeler, fluida mendapatkan percepatan sedemikian rupa dan terkena gaya sentrifugal, sehingga fluida mengalir keluar dari impeler dengan kecepatan tertentu. Kecepatan keluar fluida ini selanjutnya akan berkurang dan berubah menjadi energi tekanan di dalam

rumah pompa. Besarnya tekanan yang timbul tergantung pada besarnya kecepatan fluida.

Untuk lebih jelas mengenai bagian-bagian dari pompa sentrifugal dapat dilihat pada gambar 16 dibawah ini.



Gambar 16. Bagian-bagian Pompa Sentrifugal

Sumber: Sularso, 2006

a. Impeler

Merupakan bagian yang berputar dari pompa dan memberikan daya pada air, sehingga air akan mendapatkan energi spesifik berupa kecepatan dan tekanan. Di dalam rumah siput, kecepatan air secara berangsur-angsur diubah menjadi tekanan statis.

b. Rumah Pompa

Rumah pompa memiliki beberapa fungsi, antara lain:

1. Berfungsi sebagai pengarah fluida yang dilemparkan impeler. Akibat gaya sentrifugal yang menuju pompa tekan, sebagian energi kinetik fluida diubah menjadi tekanan.
2. Menutup impeler pada penghisapan dan pengiriman pada ujung dan sehingga berbentuk tangki tekanan.
3. Memberikan media pendukung dan bantalan poros untuk batang torak dan impeler.

c. Poros Pompa

Sebagai penerus putaran penggerak kepada impeler dan pompa. Poros pompa dibedakan menjadi dua, yaitu:

1. Poros pompa datar atau horizontal
2. Poros pompa tegak atau vertikal

d. Cincin Penahan Keausan atau Cincin Perapat (*Waring Ring*)

Untuk mencegah keausan rumah pompa dan impeler pada sambungan yang bergerak (*running joint*), maka dipasang cincin penahan keausan (*waring ring*) yang disebut juga cincin rumah pompa atau cincin perapat.

e. Bantalan Poros

Bantalan yang banyak dipakai pada pompa sentrifugal adalah bantalan anti gesek, selongsong, rol bola, dan bantalan *kingsbury*. Bantalan anti gesek dapat berupa baris tunggal atau ganda. Bantalan rol banyak dipakai untuk poros pompa berukuran besar.

f. Selongsong Poros

Berfungsi untuk mencegah kebocoran udara ke dalam pompa bila beroperasi dengan tinggi isap (*suction lift*) dan untuk mendistribusikan cairan perapat secara merata di sekeliling ruang cincin (*anular space*) antara lubang peti dan permukaan selongsong poros. Selongsong poros disebut juga sangkar perapat atau cincin *lantern*. Selongsong poros ini menerima cairan yang bertekanan dari pompa atau sumber tersendiri lainnya. Kadang-kadang digunakan minyak gemuk sebagai medium perapat apabila cairan yang bersih tidak tersedia atau tidak dapat dipakai (pompa air kotor).

g. Peti Gasket

Berfungsi untuk mencegah udara bocor ke dalam rumah pompa bila tekanan di dalamnya berada di bawah tekanan atmosfer.

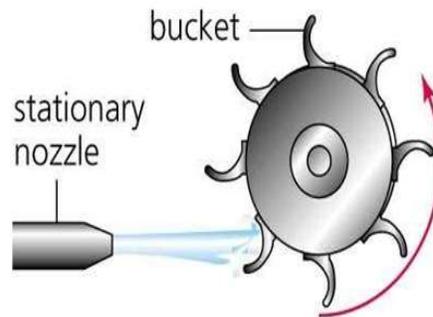
h. Perapat Poros (Perapat Mekanis)

Digunakan untuk mencegah kebocoran di sekeliling poros. Perapat poros ini juga dipakai apabila peti gasket tidak dapat mencegah kebocoran secara maksimal. Permukaan perapat tegak lurus terhadap

poros pompa dan biasanya terdiri dari dua bagian yang dihaluskan dan dilumasi. Perapat poros dibedakan menjadi dua, yaitu jenis dalam dan jenis luar. Jenis luar dipakai apabila cairan yang dipompa berpasir dan tidak diinginkan adanya kebocoran pada peti gasket. Jenis dalam digunakan untuk cairan yang mudah menguap.

2.5 Nozel

Nozel adalah alat yang berfungsi untuk meningkatkan kecepatan aliran fluida saat keluar atau memasuki sebuah ruang tertutup atau pipa. Sebuah nozzle sering berbentuk pipa atau tabung dari berbagai variasi luas penampang. Untuk lebih jelas mengenai nozel dapat dilihat pada gambar 17 dibawah ini.



Gambar 17. Nozel Air
Sumber : Iriansyah Putra, 2013

Nozel sering digunakan untuk mengontrol laju aliran, kecepatan, arah, massa, bentuk, dan / atau tekanan dari aliran yang muncul. Kecepatan nozzle dari fluida meningkat sesuai energi tekanannya. Prinsip utama penggunaan nozel untuk fluida air atau tak mampat menggunakan prinsip hukum kontinuitas yaitu kekekalan massa.

Adapun klasifikasi jenis-jenis nozel air sebagai berikut:

1. Nozel jet

Nozel jet memiliki diameter yang lebih besar dan tekanan yang lebih rendah pada bagian input dari pada bagian output yang memiliki diameter lebih kecil dan tekanan yang lebih besar akibat pengecilan diameter.

2. Nozel Magnetik

Magnetic nozel juga telah diusulkan untuk beberapa jenis penggerak, di mana aliran plasma diarahkan oleh medan magnet, bukan dinding yang terbuat dari materi padat.

3. Nozel *Spray*

Nozel *spray* memiliki prinsip kerja yang hampir sama dengan nozel jet namun memiliki diameter yang lebih kecil dan terjadi perluasan aliran output fluida atau memecah aliran fluida (aerosol).

2.6 Generator

Generator digunakan sebagai alat untuk merubah energi putar mekanis menjadi energi listrik melalui adanya medan magnet yang diputar melalui rotor dan akan menimbulkan medan magnet yang timbul disisi stator. Medan magnet yang terjadi di stator dengan pola-pola tertentu akan menimbulkan arus listrik yang mengalir dikumparan stator yang dialirkan melalui saluran transmisi sebagai arus listrik. Semakin besar putaran generator maka semakin besar energi listrik yang didapat dan semakin besar energi kinetis yang diperlukan untuk memutarnya. Beban yang terpasang merupakan beban listrik yang digunakan sebagai media penerangan (Jasa, dkk, 2010).

Generator merupakan salah satu mesin listrik, untuk mengubah energi gerakatau mekanik menjadi energi listrik. Generator terdiri atas dua bagian utama yaitu kumparan jangkar dan kumparan medan yang ditempatkan pada stator dan rotor. Stator merupakan bagian yang diam sedangkan rotor merupakan bagian yang bergerak. (Nurhadi, dkk 2013). Generator merupakan piranti atau peralatan listrik yang dapat digunakan untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik yang terdiri dari dua jenis yaitu generator arus searah DC dan generator arus bolak-balik AC (Wahab, 2009). Generator arus searah adalah suatu mesin yang digunakan untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik berupa arus searah (DC). Dimana energi listrik yang digunakan berasal dari suatu penggerak mula (*prime mover*) yang memutar poros rotor dari generator tersebut.

Dimana dalam memperoleh tegangan yang searah diperlukan alat penyearah yang disebut dengan komutator.

Dalam bentuknya yang sederhana sebuah generator listrik terdiri dari atas magnet dan kumparan. Bilamana terdapat suatu gerakan antara kedua komponen diatas, garis-garis gaya magnet memotong belitan-belitan kumparan dan suatu gaya gerak listrik (ggl) akan dibangkitkan. Sebuah generator listrik atau alternator modern atas suatu sistim *electromagnet* dan suatu alatur yang terdiri atas sejumlah kumparan dari konduktor berisolasi yang diletakkan dalam alur (slot) inti besi berlaminasi.

Pada pengoperasiannya, rugi-rugi sangat tidak diharapkan karena dapat meningkatkan temperatur serta dapat mengurangi kinerja generator apabila nilai dan rugi – rugi ini terlalu besar. Menurut Eduward Aliansyah (2008) rugi-rugi yang terjadi pada generator arus searah dapat dikategorikan secara umum menjadi 5 kategori antara lain rugi-rugi tembaga, rugi-rugi sikat, rugi-rugi inti, rugi-rugi mekanis, dan rugi-rugi beban stray.

1. Rugi-Rugi Tembaga

Rugi-rugi tembaga adalah rugi-rugi daya yang terjadi di dalam kumparan medan dan kumparan jangkar generator pada saat dibebani. Karena kawat tembaga kedua kumparan tersebut memiliki nilai resistansi.

2. Rugi-Rugi Sikat

Jika kumparan jangkar generator arus searah dibebani maka akan mengalir arus pada kumparan jangkar tersebut maka sikat-sikatnya juga akan dialiri arus yang sama. Karena sikat memiliki nilai resistansi dan juga tahanan kontak antara permukaan sikat dengan komutator maka terdapat rugi jatuh tegangan pada sikat.

3. Rugi-Rugi Inti

Rugi-rugi inti terjadi di dalam jangkar generator arus searah yang disebabkan oleh perputaran jangkar di dalam medan magnet kutub-kutub dari kumparan medan. Rugi arus rugi merupakan rugi yang disebabkan oleh arus yang mengalir pada inti yang menyebabkan terjadinya panas yang dapat menaikkan temperatur generator dan menurunkan efisiensinya. Jika suatu inti besi padat

digunakan sebagai inti jangkar, resistansi terhadap arus pusar ini akan menjadi kecil karena lebarnya luas penampang inti. Akibatnya, nilai arus pusar dan juga rugi arus pusarnya akan menjadi besar. Besarnya nilai arus pusar dapat dikurangi dengan membuat resistansi inti sebesar mungkin dengan merancang suatu inti yang tipis, berupa lembaran-lembaran besi bulat yang disebut laminasi-laminasi.

4. Rugi-Rugi Mekanis

Rugi-rugi mekanis di dalam generator arus searah merupakan rugi-rugi yang berhubungan dengan efek-efek mekanis. Ada dua bentuk dasar rugi-rugi mekanis di dalam generator arus searah yaitu gesekan. Rugi-rugi gesekan adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh pergesekan antara permukaan bagian-bagian yang berputar dengan bagian-bagian yang diam dari motor, diantaranya gesekan bearing atau bantalan peluru dengan rumah bearing atau dengan as rotor.

5. Rugi-Rugi Beban Stray

Rugi-rugi beban stray merupakan rugi-rugi yang disebabkan oleh arus pusar di dalam tembaga dan rugi-rugi inti tambahan di dalam besi, yang timbul karena pendistorsian fluks magnetik oleh arus beban (tidak termasuk yang disebabkan oleh jatuh tegangan IR) dan rugi-rugi hubung singkat komutasi. Besarnya rugi-rugi ini dinyatakan sebesar $\pm 1\%$ dari beban penuhnya.