

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Landasan Teori

2.2.1 Definisi PLTMH

PLTMH adalah pembangkit listrik yang menggunakan tenaga air sebagai media utama untuk penggerak Turbin dan Generator. Tenaga mikrohidro, dengan skala daya yang dapat dibangkitkan 5 kilo watt hingga 50 kilowatt. Pada PLTMH proses perubahan energi kinetik berupa (kecepatan dan tekanan air) yang digunakan untuk menggerakkan turbin air dan generator listrik hingga menghasilkan energi listrik. (Notosudjono, D.2002)

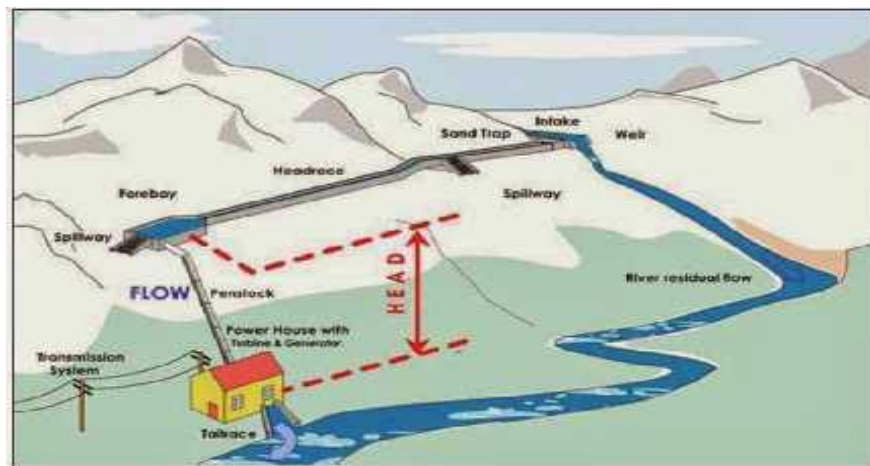
Pembangkit tenaga air merupakan suatu bentuk perubahan tenaga dari tenaga air dengan ketinggian dan debit tertentu menjadi energi listrik, dengan menggunakan turbin air dan generator. Bentuk pembangkit tenaga *mikro hidro* bervariasi tetapi prinsip kerjanya adalah sama yaitu : “Perubahan tenaga potensial menjadi tenaga elektrik (listrik).” Perubahan memang tidak langsung, tetapi berturut – turut melalui perubahan sebagai berikut:

- Tenaga potensial menjadi tenaga kinetik
- Tenaga kinetik menjadi tenaga mekanik
- Tenaga mekanik menjadi tenaga listrik

Tenaga potensial adalah tenaga air karena berada pada ketinggian. Energi kinetik adalah tenaga air karena mempunyai kecepatan. Tenaga mekanik adalah tenaga kecepatan air yang terus memutar turbin. Tenaga listrik adalah hasil dari generator yang berputar akibat berputarnya kincir/turbin. (Very.2016)

Secara teknis, *mikrohidro* mempunyai tiga komponen utama yaitu air sumber energi, turbin dan generator. Air yang mengalir dengan kapasitas tertentu disalurkan dengan ketinggian tertentu melalui *Penstock* menuju rumah instalasi (*power house*). Di rumah instalasi, air tersebut akan menumbuk turbin sehingga akan menghasilkan energi mekanik berupa berputarnya poros turbin. Putaran poros turbin ini akan memutar generator

sehingga dihasilkan energi listrik. Secara skematis ditunjukkan pada gambar dibawah ini. (Sri Sukamta, Adhi Kusmantoro.2013)



Gambar 2.1 Skema PLTMH

Sumber: Prayogo, 2003

Penentuan *Head* dan debit pada PLTMH mempunyai arti yang sangat penting dalam menghitung potensi tenaga listrik. Semakin tinggi jatuhnya air maka semakin besar energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik. Disamping faktor geografis (tata letak sungai), tinggi jatuhnya air dapat pula diperoleh dengan membendung aliran air sehingga permukaan air menjadi tinggi. Air dialirkan melalui sebuah *Penstock* ke dalam rumah pembangkit yang pada umumnya dibangun di bagian tepi sungai untuk menggerakkan turbin. Energi mekanik yang berasal dari putaran poros turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh sebuah generator (Wibawa, U.2006).

Beberapa keuntungan yang terdapat pada Pembangkit Listrik Tenaga *Mikrohidro* (PLTMH) adalah sebagai berikut:

1. Dibandingkan dengan pembangkit listrik jenis yang lain, PLTMH ini cukup murah karena menggunakan energi alam.
2. Memiliki konstruksi yang sederhana dan dapat dioperasikan di daerah terpencil dengan tenaga terampil penduduk daerah setempat dengan sedikit latihan.

3. Tidak menimbulkan pencemaran.
4. Dapat dipadukan dengan program lainnya seperti irigasi dan perikanan.
5. Dapat mendorong masyarakat agar dapat menjaga kelestarian hutan sehingga ketersediaan air terjamin. (Rifki Nurul Shadikin.2013)

2.2.2 Prinsip Kerja PLTMH

Pembangkit listrik tenaga air skala mikro pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian dan jumlah debit air per detik yang ada pada aliran air saluran irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Aliran sungai dibendung agar mendapatkan debit air (Q) dan tinggi air jatuh (H), kemudian air yang dihasilkan disalurkan melalui saluran penghantar air menuju kolam penenang. Kolam penenang dihubungkan dengan *Penstock* dan bagian paling bawah di pasang turbin air. Turbin air akan berputar setelah mendapat tekanan air (P) dan perputaran turbin dimanfaatkan untuk memutar generator. Setelah mendapat putaran yang konstan maka generator akan menghasilkan tegangan listrik, yang dikirim ke konsumen melalui saluran kabel distribusi Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR). (Donald, 1994)

2.2.3 Komponen Utama PLTMH

Komponen utama PLTMH dapat dilihat pada gambar 2.1 diantaranya sebagai berikut:

1. Bendungan (*Weir*)

Bendungan (*Weir*) adalah pembatas yang dibangun melintasi sungai yang dibangun untuk mengubah karakteristik aliran sungai. Bendung merupakan sebuah konstruksi yang lebih kecil dari bendungan yang menyebabkan air menggenang membentuk kolam tetapi mampu melewati bagian atas bendung. Bendung mengizinkan air meluap melewati bagian

atasnya sehingga aliran air tetap ada dan dalam debit yang sama bahkan sebelum sungai dibendung.

2. Pintu pengendali air (*Intake*)

Intake adalah pintu yang dipasang di ujung pipa dan hanya digunakan saat *Penstock* dikosongkan untuk melaksanakan pembersihan pipa atau perbaikan.

3. Saluran pembawa (*Waterways*)

Saluran pembawa berfungsi sebagai saluran pembawa debit dari bangunan pengambilan menuju ke *Penstock*.

4. Penjebak Pasir (*Sandtrap*)

Saringan ini dipasang di depan pintu pengendali air (*intake*), berguna untuk menyaring kotoran – kotoran atau sampah yang terbawa sehingga air menjadi bersih dan tidak mengganggu operasi mesin PLTMH.

5. Bak penenang (*Forebay*)

Bak penenang merupakan tempat permulaan *Penstock* yang mengendalikan aliran minimum, sebagai antisipasi aliran yang cepat pada turbin tanpa menurunkan elevasi yang berlebihan dan menyebabkan arus balik pada saluran. Bak penenang dilengkapi saringan (*trashrack*) dan pelimpas (*spillway*).

6. Saluran pelimpah (*Spillway*)

Adalah suatu bangunan beton yang berfungsi untuk mengalirkan air jika air waduk melebihi kapasitas maksimum.

7. *Penstock*

Fungsi dari *Penstock* adalah untuk mengalirkan air dari saluran penghantar atau kolam tando menuju Turbin. *Penstock* mempunyai posisi kemiringan yang tajam dengan maksud agar diperoleh kecepatan dan tekanan air yang tinggi untuk memutar turbin. Konstruksinya harus diperhitungkan agar dapat menerima tekanan besar yang timbul termasuk tekanan dari pukulan air (*water hammer*). *Penstock* merupakan bagian yang cukup mahal, untuk itu pemilihan pipa yang tepat sangat penting.

8. Rumah pembangkit (*Power House*)

Adalah tempat dimana generator, turbin dan peralatan kontrol lainnya berada.

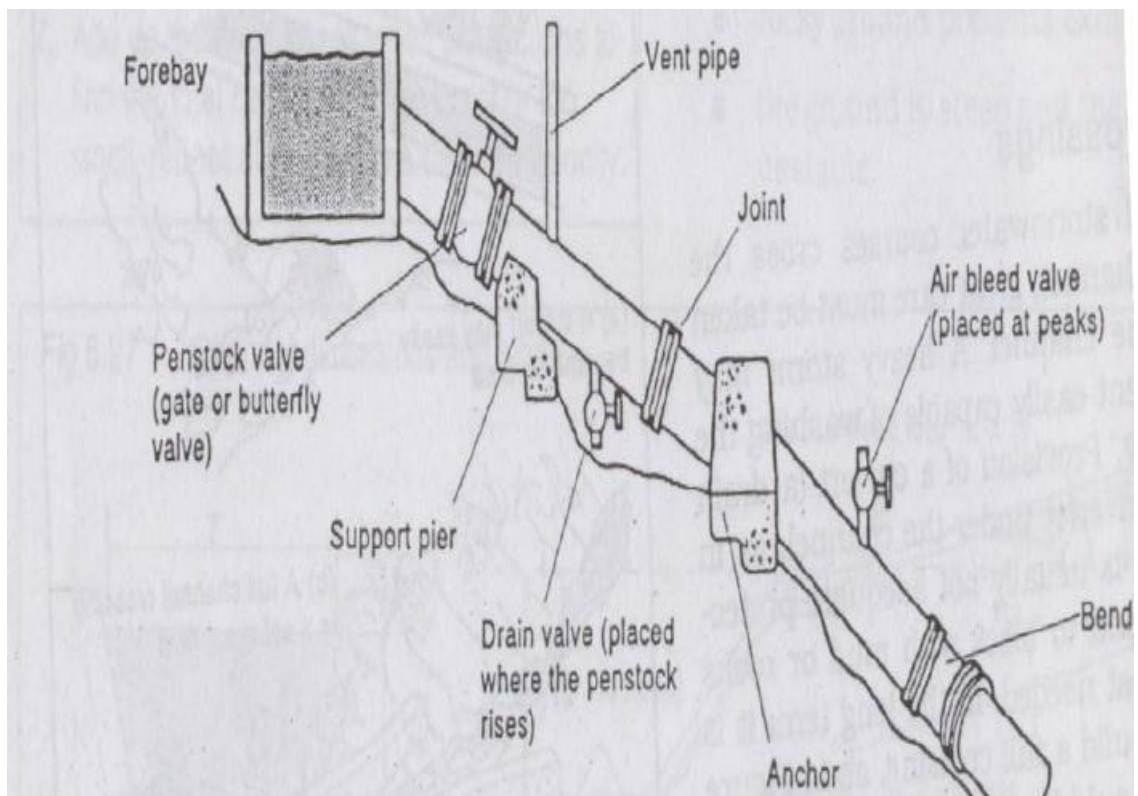
9. Saluran buang (*Tail Race*)

Saluran pembuang akhir (*tail race*) berfungsi untuk mengalirkan debit kembali ke sungai. Saluran ini direncanakan berberntuk segi empat dan menggunakan pasangan batu. (Very Dwiyanto.2016)

2.2 Penstock

2.2.1 Pengertian *Penstock*

Salah satu komponen dalam PLTMH adalah *Penstock*. *Penstock* adalah saluran yang menyalurkan dan mengarahkan air dari waduk ke turbin. (Dandekar dan Sharma, 1991). Diameter *Penstock* dipilih dengan pertimbangan keamanan, kemudahan proses pembuatan, ketersediaan material dan tingkat rugi (*friction losses*) seminimal mungkin. Selain itu *Penstock* adalah sebuah pipa bertekanan yang mengalirkan air bertekanan dari bak penenang (*forebay*) ke Turbin. Berfungsi untuk menahan gaya pukulan air yang diakibatkan oleh penutupan katup secara tiba – tiba. Bagian – bagian *Penstock* dapat dilihat dari gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2.2 Komponen *Penstock*

Sumber : Rifki Nurul Shadikin.2013

Penstock biasanya dilengkapi dengan tangki perendam (*surge tank*) yang berfungsi untuk menyerap pukulan air serta menyimpan air cadangan untuk mengatasi peningkatan beban yang tiba – tiba. Berdasarkan lokasinya pipa pesat dibagi dua, yaitu:

a. ***Penstock* tertanam (*Burried Penstock*)**

Untuk penanaman batang pipa dalam tanah, maka topografi tanah dan sisa kelebihan dari pipa harus dipikirkan dengan baik. (Dandekar dan Sharma, 1991). Kekurangan dan kelebihan pipa pesat dalam tanah diantaranya sebagai berikut:

Tabel 2.1 Kelebihan dan Kekurangan *Penstock* dalam Tanah

No.	Kelebihan	Kekurangan
1	Terlindung dari pengaruh suhu karena tertutup tanah	Akses yang sulit untuk inspeksi
2	Terlindung dari pembekuan	Biaya mahal jika diameter besar dan kondisi tanah berbatu
3	Tidak membutuhkan sambungan (<i>Expansion Joint</i>)	Cenderung terjadi pergeseran pipa pada lembah yang curam
4	<i>Landscape</i> tetap tidak bisa diubah	Membutuhkan lapisan tertentu terhadap korosi dan salinitas tanah
5	Terlindung dari gempa, longsor tanah, dan badai	Sulit dalam pemeliharaan dan perbaikan.

Sumber: Varsney, 1977

b. ***Penstock* tidak tertanam (*Exposed penstock*)**

Pipa diatas tanah didukung oleh fondasi atau tanggul penunjang. Biasanya didesain dengan menggunakan sistem katup (*valve*). Menurut USBR, batang pipa yang didukung diatas tanah dan batang pipa yang dilindungi oleh lapisan beton tidak diijinkan untuk menahan tegangan struktur. (Dandekar dan Sharma, 1991)

Kelebihan dan kekurangan *Penstock* tidak tertanam diantaranya sebagai berikut:

Tabel 2.2 Kelebihan Dan Kekurangan *Penstock* Tidak Tertanam

No	Kelebihan	Kekurangan
1	Mudah dalam inspeksi	Sangat terpengaruh oleh suhu eksternal
2	Biaya instalasi lebih murah	Kemungkinan terjadi pembekuan saat musim dingin
3	Terlindung terhadap longsor jika dilengkapi dengan <i>blok angker</i>	Tekanan longitudinal mungkin timbul karena <i>blok angker</i>
4	Mudah dalam pemeliharaan dan perbaikan	Diperlukan sambungan (<i>Expansion Joints</i>)

Sumber: Varsney, 1977

2.2.2 Bahan *Penstock*

Bahan yang digunakan untuk *penstock* bermacam – macam mulai dari bahan alami sampai bahan buatan. Bahan alami yang digunakan adalah bahan yang terbuat dari kayu atau bambu. Bahan buatan terbuat dari baja, beton, *Unplasticized Polyvinyl Chloride* (uPVC), *high density pyethylene* (HDPE) dan *glass reinforced plastic* (GRP). Tabel 2.3 memperlihatkan berbagai jenis bahan *Penstock*. (Rifki Nurul Shadikin.2013)

Tabel 2.3 Jenis Bahan

Material	Density kg/m ³	Ultimate Strength			Yield Strength ³		Modulus of Elasticity, GPa	Modulus of Rigidity, GPa	Coefficient of Thermal Expansion, 10 ⁻⁶ /°C	Ductility, Percent Elongation in 50 mm
		Tension, MPa	Compres- sion, ² MPa	Shear, MPa	Tension, MPa	Shear, MPa				
Steel										
Structural (ASTM-A36)	7860	400			250	145	200	77.2	11.7	21
High-strength-low-alloy										
ASTM-A709 Grade 345	7860	450			345		200	77.2	11.7	21
ASTM-A913 Grade 450	7860	550			450		200	77.2	11.7	17
ASTM-A992 Grade 345	7860	450			345		200	77.2	11.7	21
Quenched & tempered										
ASTM-A709 Grade 690	7860	760			690		200	77.2	11.7	18
Stainless, AISI 302										
Cold-rolled	7920	860			520		190	75	17.3	12
Annealed	7920	655			260	150	190	75	17.3	50
Reinforcing Steel										
Medium strength	7860	480			275		200	77	11.7	
High strength	7860	620			415		200	77	11.7	
Cast Iron										
Gray Cast Iron										
4.5% C, ASTM A-48	7200	170	655	240			69	28	12.1	0.5
Malleable Cast Iron										
2% C, 1% Si, ASTM A-47	7300	345	620	330	230		165	65	12.1	10
Aluminum										
Alloy 1100-H14 (99% Al)	2710	110		70	95	55	70	26	23.6	9
Alloy 2014-T6	2800	455		275	400	230	75	27	23.0	13
Alloy-2024-T4	2800	470		280	325		73		23.2	19
Alloy-5456-H116	2630	315		185	230	130	72		23.9	16
Alloy 6061-T6	2710	260		165	240	140	70	26	23.6	17
Alloy 7075-T6	2800	570		330	500		72	28	23.6	11
Copper										
Oxygen-free copper (99.9% Cu)										
Annealed	8910	220		150	70		120	44	16.9	45
Hard-drawn	8910	390		200	265		120	44	16.9	4
Yellow-Brass (65% Cu, 35% Zn)										
Cold-rolled	8470	510		300	410	250	105	39	20.9	8
Annealed	8470	320		220	100	60	105	39	20.9	65
Red Brass (85% Cu, 15% Zn)										
Cold-rolled	8740	585		320	435		120	44	18.7	3
Annealed	8740	270		210	70		120	44	18.7	48
Tin bronze (88 Cu, 8Sn, 4Zn)	8800	310			145		95		18.0	30
Manganese bronze (63 Cu, 25 Zn, 6 Al, 3 Mn, 3 Fe)	8360	655			330		105		21.6	20
Aluminum bronze (81 Cu, 4 Ni, 4 Fe, 11 Al)	8330	620	900		275		110	42	16.2	6

Sumber: Harvey, Adam. 1993

- **Baja**

Penstock berbahan baja banyak digunakan untuk pembangkit listrik tenaga air. Harganya relatif mahal dan diproduksi di tempat lokal, bisa di pesan mulai dari ukuran medium di bengkel pembuatan baja. *Penstock* baja ini dibuat dari plat baja *roll* kemudian plat tersebut digabungkan menjadi satu kesatuan membuat bentuk silinder. Memiliki gaya gesekan menengah, baja yang dilapis cat atau dilapis *coating* umur pemakaiannya bisa mencapai 20 tahun. Sambungan yang digunakan adalah *flanges*, pengelasan di lokasi, dan sambungan mekanik.

- ***Unplasticized polyvinyl chloride (uPVC)***

Bahan uPVC jarang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga air di dunia. Harganya relatif mahal, memiliki diameter antara 25 mm sampai 500 mm, dan cocok untuk tekanan tinggi. Secara umum diameter luarnya konstan untuk range *pressure rating* menggunakan diameter yang ada di pasaran. Memiliki gaya gesek yang rendah tahan terhadap korosi, transportasi menuju lokasi mudah, namun umurnya pendek antara 5 sampai 10 tahun. *Penstock* jenis rentan terhadap suhu tinggi maka lebih baik ditempatkan di dalam permukaan tanah karena agar terhindar dari panas matahari secara langsung.

- ***High density polyethylene (HDPE)***

HDPE adalah alternatif dari uPVC tetapi lebih mahal. Diameter yang tersedia di pasaran mulai dari 25 mm sampai lebih dari 1 m. HDPE memiliki rugi gesekan paling kecil dan tahan terhadap korosi. Secara umum sambungan dengan cara dipanaskan dan fusi dibawah tekanan menggunakan alat khusus. Diameter yang kecil dapat menggunakan sambungan *fitting*.

- **Glass reinforced plastic (GRP)**

Penstock GRP terbuat dari bahan resin diperkuat dengan serat fiber spiral dan *inert filler* seperti pasir. GRP dapat digunakan pada kondisi tekanan tinggi, bahannya ringan dan memiliki rugi gesekan yang rendah. Bahannya rapuh sehingga pada saat pemasangan harus hati – hati. Sambungan yang digunakan biasanya adalah *spigot* dan soket dengan *flexible seal*.

- **Beton**

Penstock bahan beton tidak cocok digunakan pada tekanan *inoderate*. Bahannya berat dan pengangkutan ke lokasi sangat sulit. Karakteristik rugi gesek yang bagus harus mengeluarkan biaya yang mahal. Sambungan menggunakan sambungan ring karet.

Berbagai Karakteristik bahan *Penstock* diperlihatkan pada Tabel 2.4 di bawah ini :

Tabel 2.4 Karakteristik Fisik Bahan

Material	Young's Modulus (E) N/m ²	Coefficient of linear expansion (α) m/m °C	Ultimate tensile strength (S) N/m ²	Density (ρ) kg/m ³
Steel	200×10^9	12×10^{-6}	350×10^6 *	7.8×10^3
uPVC	2.8×10^9	54×10^{-6}	28×10^6	1.4×10^3
HDPE/MDPE	$0.2 - 0.8 \times 10^9$	140×10^{-6}	$6 - 9 \times 10^6$	0.9×10^3
Ductile Iron	170×10^9	11×10^{-6}	350×10^6	0.7×10^3
Cast Iron	100×10^9	10×10^{-6}	140×10^6	7.2×10^3
Asbestos cement	variable	8×10^{-6}	variable	$1.6 - 2.1 \times 10^3$
Concrete	20×10^9	10×10^{-6}	variable	$1.8 - 2.5 \times 10^3$

Sumber: Harvey, Adam. 1993

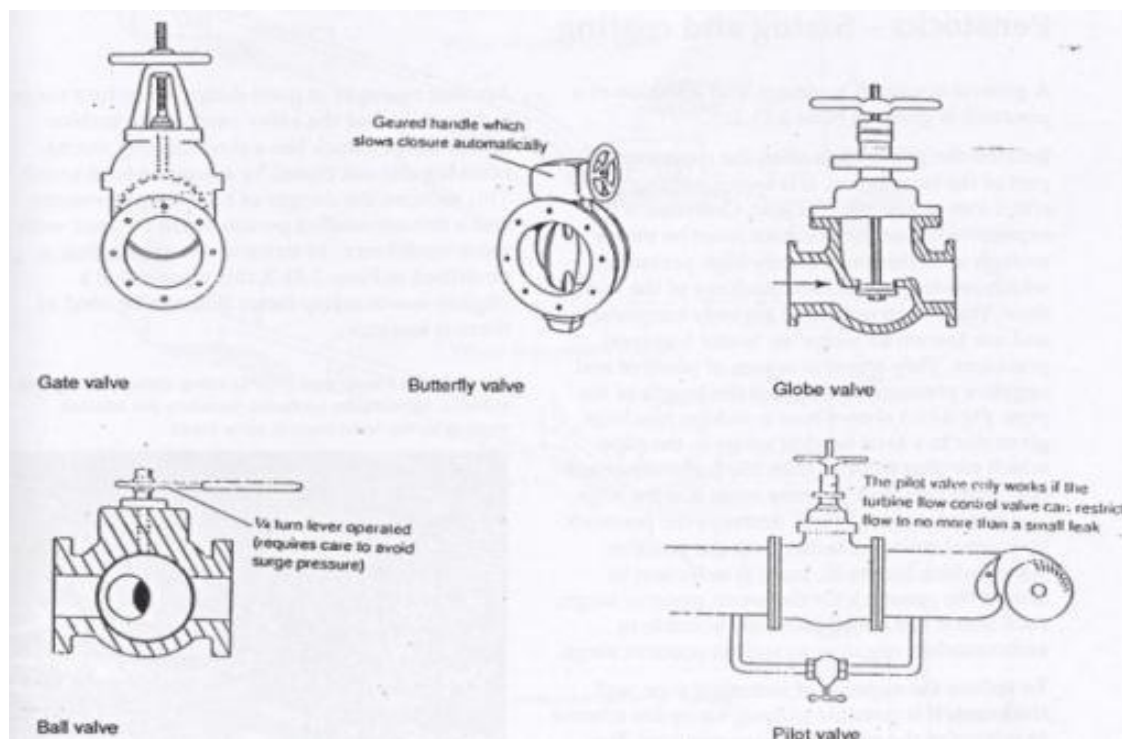
2.2.3 Katup

Katup merupakan bagian dari *Penstock* yang berfungsi untuk mengontrol aliran fluida dalam *Penstock*. Katup yang sering digunakan untuk kontrol pada *Penstock* yaitu *gate valve*, *butterfly valve*, *globe valve*, *ball valve*, dan *pilot valve*. Posisi katup tersebut biasanya terdapat di saluran masuk *Penstock* dan saluran masuk Turbin. Gambar 2.3 memperlihatkan berbagai macam katup. (Rifki Nurul Shadikin.2013)

Tabel 2.5 Koefisien sebagai fungsi sudut belokan

Sudut	20 ⁰	45 ⁰	60 ⁰	80 ⁰	90
	0,05	0,14	0,36	0,74	0,98

Sumber: Bambang Triatmojo, 1993



Gambar 2.3 Katup

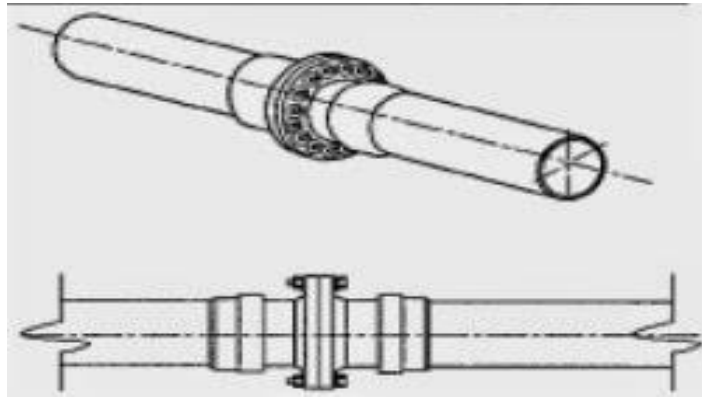
Sumber: Rifki Nurul Shadikin.2013

2.2.4 Sambungan

Ada beberapa jenis sambungan pada Pipa diantaranya:

1. Sambungan Las (*But Weld Joint*)

Sesuai namanya, maka untuk menyambungkan dua buah pipa ini menggunakan las. Tipe sambungan pipa jenis ini cocok untuk pipa yang berukuran besar, ketahanan atas kebocorannya cukup bagus. Sambungannya dapat di cek kualitasnya menggunakan *radiography*.

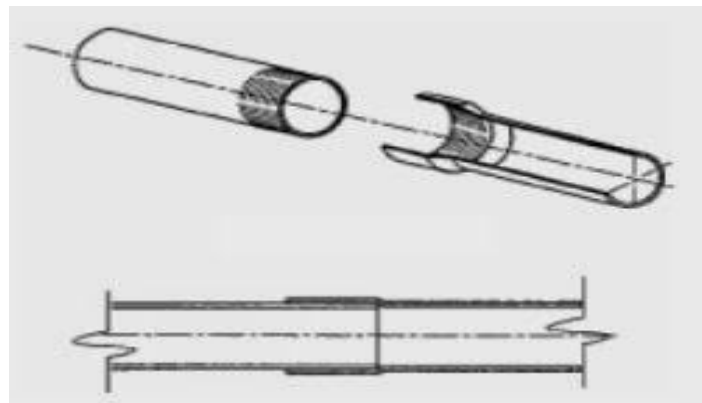


Gambar 2.4 Sambungan Las

Sumber: *Marine Engineering*, 1992

2. Sambungan Soket (*Socket Weld Pipe Joint*)

Sambungan Tipe ini menggunakan soket, artinya pipa yang satu lebih besar dari pipa yang lain, kemudian pipa yang kecil dimasukkan ke pipa yang diameternya lebih besar. Kalau anda pernah melihat sambungan antar pipa paralon, mirip seperti itulah sambungannya. Untuk metal, biasanya seperti sambungan pada pipa AC.



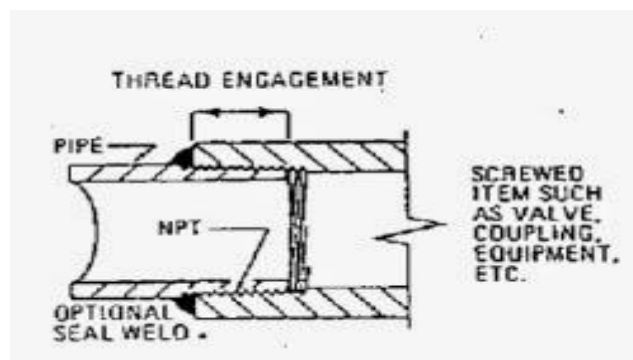
Gambar 2.5 Sambungan Soket

Sumber: *Marine Engineering*, 1992

3. Sambungan Ulir (*Screwed Pipe Joint*)

Sambungan jenis ulir ini, seperti halnya pada pipa pipa ledeng. Ia menggunakan ulir untuk merekatkan dua pipa. Keuntungan menggunakan sambungan ulir ini, ia mudah diaplikasikan dilapangan dan ia bisa diaplikasikan manakala pengelasan tidak diijinkan karena dapat menimbulkan kebakaran misalnya.

Kerugiannya, sambungan bisa saja bocor kalau *seal* (perapat) yang digunakan tidak baik. Tidak dapat digunakan untuk service yang korosif. Kekuatan pipa turun karena ulir sudah memakan ketebalan pipa.



Gambar 2.6 Sambungan Ulir

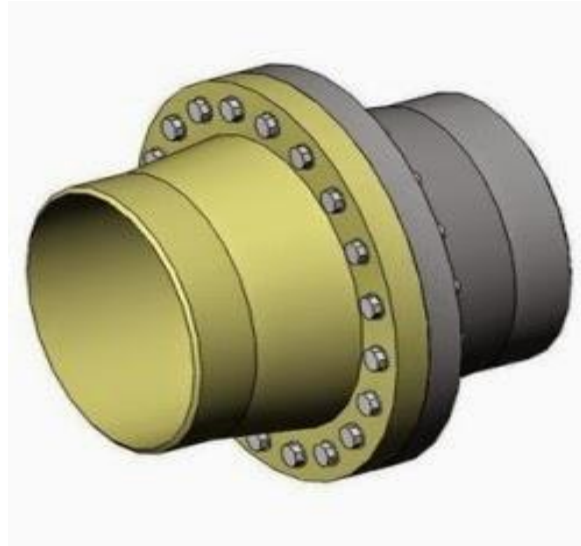
Sumber: *Marine Engineering*, 1992

4. Sambungan Flanged (*Flanged Pipe Joints*)

Sambungan dengan menggunakan *flanged* juga banyak digunakan dalam sistem pemipaan. Sambungan *Flanged* adalah sambungan sebagai koneksi yang menghubungkan antar pipa satu dengan pipa yang lain. Lalu kenapa dengan *flanged*?

Flanged adalah mekanisme pengencangan yang tidak permanen, ia bisa dibongkar dan dipasang dengan memanfaatkan baut sebagai media pengencang. Pipa yang menggunakan *Flanged* sebagai sambungannya, biasanya pipa tersebut nantinya akan dilakukan maintenance, jadi agar mudah dibongkar dan dipasang kembali.

Flanged yang digunakan untuk menyambungkan antar pipa pun akan berbeda jenisnya.



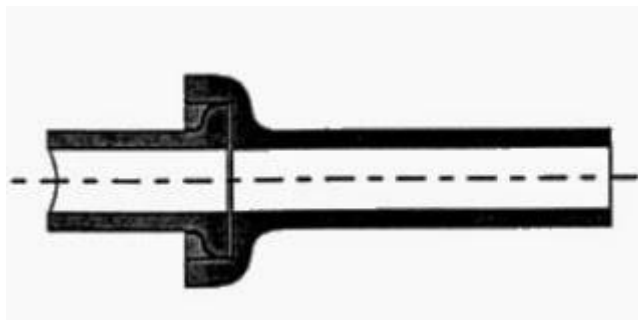
Gambar 2.7 Sambungan *Flanged*

Sumber: *Marine Engineering*,1992

5. Sambungan Spigot (*Spigot Socket Pipe Joint*)

Sambungan tipe *spigot* ini adalah dengan memasukkan pipa satu ke pipa yang lainnya, mirip dengan soket. Seperti apa jenis sambungan ini? Kalau kita melihat disamping kanan atau kiri jalan ada galian, biasanya pipa yang dipasang atau bahkan beton menggunakan sambungan pipa ini.

Karena desain dan pengerjaan yang bagus, sambungan ini sangat baik sangat baik untuk kedepan air dan mudah untuk di pasang di lapangan. Keuntungan lainnya, tipe sambungan ini dapat mengakomodir *mis-alignment* (pemasangan pipa yang tidak lurus) sampai dengan 10 derajat. Sisi lain, kelemahan sambungan tipe ini adalah ia hanya mampu untuk menahan pressure yang rendah.

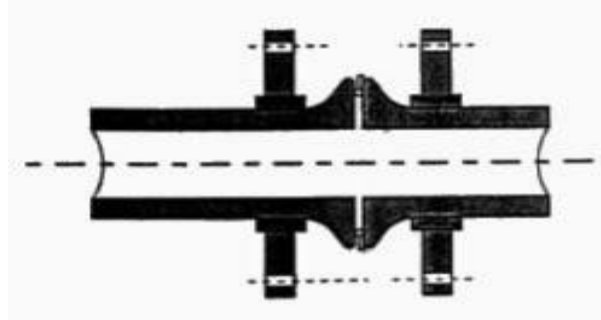


Gambar 2.8 Sambungan *Spigot*

Sumber: *Marine Engineering*,1992

6. Sambungan *Buttress end* (*Buttress end pipe joints*)

Buttress biasanya digunakan untuk pipa non metal, jenis sambungan ini menggunakan *flanged* namun tidak di las jadi semacam *slip – on* jenis *flanged*. Pertanyaannya, kenapa digunakan pipa non metal? Karena bisa jadi fluida yang digunakan sangat korosif, sehingga kalau digunakan metal akan banyak mengikis.



Gambar 2.9 Sambungan *Buttress end*

Sumber: *Marine Engineering*, 1992

2.2.5 Perancangan *Penstock*

Adapun tahap – tahap perancangan *Penstock* adalah sebagai berikut:

1. Menghitung Diameter *Penstock*

Dalam mengukur diameter *penstock* menggunakan persamaan (2.1) seperti yang tertulis di bawah ini : (Rifki.2013)

$$D = 0.72 \times Q^{0.5} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana : D = Diameter *penstock* (m)

 Q = Debit (m³ / s)

2. Menghitung Tebal *Penstock*

Setelah menghitung diameter *Penstock* lalu menentukan ketebalan batang *penstock* menggunakan persamaan (2.2) dibawah ini :

(Caesar.2016)

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \eta} + \epsilon \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana : t = Tebal *penstock* (m)

P = Tekanan maksimum air (kg / m²)

σ = Tegangan yang diijinkan dari bahan *penstock* (kg / m²)

η = Efisiensi sambungan

D = Diameter (m)

ϵ = Perlindungan terhadap korosi (2mm)

Sebelum mencari tebal *Penstock* pertama – tama harus mencari nilai P .
Untuk mencari nilai P dapat menggunakan rumus (2.3)

$$P = Ha \times \rho \times Hb \dots \dots \dots (2.3)$$

ρ = Massa jenis air (1000 kg /m³)

Hb = Head Bruto (m)

Untuk mencari tebal minimum menggunakan rumus (2.4)

$$t_{min} = \frac{D+20}{400} \dots \dots \dots (2.4)$$

3. Menghitung kecepatan aliran *Penstock*

Dalam menentukan kecepatan aliran membutuhkan data debit air dan diameter *Penstock* menggunakan persamaan (2.5) yang ada pada persamaan di bawah ini: (Rifki.2013)

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana: v = Kecepatan aliran (m / s)

d = Diameter *penstock* (m)

4. Menghitung $H_{friction}$

Untuk menghitung $H_{friction}$ dapat menggunakan persamaan (2.6) sebagai berikut: (Rifki.2013)

$$h_{friction\ loss} = h_{wall\ loss} + h_{turb\ loss} \dots \dots \dots (2.6)$$

dimana : $h_{friction\ loss}$ = rugi gesekan (m)

$h_{wall\ loss}$ = rugi pada dinding *penstock* (m)

$h_{turb\ loss}$ = rugi pada aliran turbulensi (m)

Rugi – rugi yang terjadi pada *penstock* meliputi rugi pada jenis dinding pipa pesat dan belokan. Persamaan (2.7) dan (2.8) memperlihatkan persamaan untuk menghitung *losses* di beberapa tempat.

$$h_{wall\ loss} = \frac{f \cdot L_{pipe} \cdot L \cdot V^2}{D \times 2g} \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana: Q = debit (m³/ s)

L = panjang *penstock* (m)

d = diameter (m)

f = *friction factor*

Untuk mencari bilangan Reynold maka menggunakan rumus (2.8) dengan rumus :

$$Re = \frac{v \times D}{u} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana v = Kecepatan aliran (m/s)

D = Diameter *Penstock* (m)

U = Viskositas kinematik (m²/s)

$$h_{turb\ loss} = \frac{k \times v^2}{2g} \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana: v = kecepatan aliran (m / s)

g = gaya gravitasi (m / s²)

5. Menghitung *Head Nett*

Untuk menghitung *Head Nett* dapat dicari menggunakan rumus *Head Gross* dikurangi *head friction* dengan menggunakan persamaan (2.10) (Rifki.2013)

$$Head_{nett} = Head_{gross} - Head_{friction} \dots \dots \dots (2.10)$$

6. Persentase kehilangan *head* akibat rugi – rugi

Dalam mencari kehilangan *head* akibat rugi – rugi menggunakan persamaan (2.11) (Rifki.2013)

$$\% losses = \frac{h_{friction}}{h_{gross}} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.11)$$

7. Menghitung h_{surge} dan kecepatan rambat gelombang

Untuk menghitung h_{surge} dan kecepatan rambat gelombang digunakan persamaan (2.12) dan (2.13). Untuk mencari nilai *Surge Pressure* ditentukan terlebih dahulu nilai dari cepat rambat gelombang. (Rifki.2013)

Surge pressure

$$h_{surge} = \frac{a \cdot v}{g} \dots \dots \dots (2.12)$$

dimana : v = kecepatan aliran (m / s)

a = kecepatan rambat gelombang

Sebelum mencari h_{surge} harus dicari terlebih dahulu nilai a dengan menggunakan persamaan (2.13)

$$a = \frac{1400 \text{ m/s}}{1 + \left(\frac{2,1 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \times d}{E \times t} \right)} \dots \dots \dots (2.13)$$

dimana: d = Diameter (m)

t = Ketebalan dinding *penstock* (m)

E = *Modulus Young Elastisitas* (N/m²)

8. Menghitung *Safety Factor*

Menghitung *safety factor* digunakan persamaan (2.13) (Rifki.2013)

$$SF = \frac{t \times S}{5 \times h_{total} \times 10^3 \text{ N/m}^2 \times d} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana : SF = *Safety factor*
 t = Ketebalan dinding *penstock* (m)
 S = Kekuatan bahan (N/m²)
 d = Diameter (m)
 h_{total} = Rugi – rugi total (m)

Faktor keamanan (*Safety Factor*) adalah faktor yang digunakan untuk mengevaluasi agar perencanaan elemen mesin terjamin keamanannya dengan dimensi yang minimum.(Joseph.2012)

Tabel 2.6 Nilai *Safety Factor* dan keterangannya

No.	Nilai	Keterangan
1	1,25 – 1,5	Kondisi terkontrol dan tegangan yang bekerja dapat ditentukan dengan pasti.
2	1,5 – 2,0	Bahan yang sudah diketahui, kondisi lingkungan beban dan tegangan yang tetap dan dapat ditentukan dengan mudah.
3	2,0 – 2,5	Bahan yang beroperasi secara rata – rata dengan batasan beban yang diketahui.
4	2,5 – 3,0	Bahan yang diketahui tanpa mengalami tes. Pada kondisi beban dan tegangan rata – rata.
5	3,0 – 4,5	Bahan yang sudah diketahui. Kondisi beban, tegangan dan lingkungan yang tidak pasti.

Sumber: Joseph.2012

2.3 Tinjauan Pustaka

Dalam skripsi Rifki.2013 melakukan Perancangan *Penstock* di PLTMH Ciherang di Desa Ciawi Kecamatan Wanayasa Kabupaten Purwakarta dengan hasil seperti pada tabel dibawah ini. Pada penelitian tersebut belum mengkaji kerugian di dinding pipa dan kerugian di dalam belokan yang ditimbulkan dari *Penstock*.

Tabel 2.7 Dimensi Perancangan *Penstock* PLTMH Ciherang

No.	Data Perancangan	Hasil Perancangan
1	Bahan <i>Penstock</i>	<i>Mild Steel Galvanized</i>
2	Panjang <i>Penstock</i>	580 m
3	Diameter <i>Penstock</i>	1.34 m
4	Tebal <i>Penstock</i>	0.024 m
5	Kecepatan Aliran	2.457 m/s
6	Jumlah Belokan	4 belokan
7	Belokan Pertama	5 ⁰
8	Belokan Kedua	10 ⁰
9	Belokan Ketiga	60 ⁰
10	Belokan Keempat	20 ⁰
11	Jumlah Katup	2 katup
12	<i>Gate Valve</i>	1 katup
13	<i>Butterfly Valve</i>	1 katup
14	Jumlah <i>Anchor Block</i>	4 buah
15	Jumlah <i>Slide Block</i>	92 buah

Sumber: Rifki.2013

Lalu dalam Skripsi (Angga.2016) dalam penelitiannya menghitung kehilangan energi pada belokan 45⁰ dimana pada volume 9 Liter diperoleh kehilangan untuk belokan 45⁰ secara langsung dengan debit (Q) 0,00049505 m³/s maka kehilangan energi yang didapatkan(H_f) 0,0209 m. Sedangkan pada belokan pipa secara berangsur – angsur dengan debit yang sama didapatkan kehilangan tenaga akibat gesekan

(Hf) 0,0490 m. Sehingga semakin besar volume maka semakin besar pula kehilangan debit pada belokan yang sama yaitu 45° .