

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Energi Baru Terbarukan

Energi Baru Terbarukan (EBT) merupakan energi yang berasal dari alam yang dapat diperoleh secara berkelanjutan. Karena berasal dari alam, maka energi tersebut sangat ramah lingkungan dan tidak menyebabkan terjadinya perubahan iklim seperti pemanasan global. Yang termasuk kedalam energi baru terbarukan antara lain air, angin, sinar matahari, biofuel, dan geothermal (ESDM, 2016).

Implementasi dari Energi Baru Terbarukan ini dapat membantu masyarakat untuk lebih mandiri dalam mengelola dan mengupayakan kebutuhan energi mereka. Pengembangan Energi Baru Terbarukan dapat disesuaikan dengan potensi energi yang dimiliki oleh masing-masing wilayah. Sumber energi terbarukan berasal dari alam dengan jumlah yang besar dan tidak dapat habis secara alamiah (Silitonga dan Ibrahim, 2020).

2.2 Macam-macam Energi Baru Terbarukan

Berikut adalah macam-macam sumber energi baru terbarukan.

2.2.1 Energi Surya

Energi surya atau sinar matahari cukup untuk memenuhi kebutuhan manusia setiap menitnya jika dapat ditangkap dengan benar. Hal ini bisa dimaksimalkan dengan cara mengonversi sumber energi terbarukan ini menjadi listrik oleh sel/panel surya secara langsung (Silitonga dan Ibrahim, 2020).

Karena energi surya hanya tersedia saat malam hari, maka untuk penggunaan malam hari memerlukan penyimpanan. Alat penyimpan energi yang paling dikenal adalah baterai/accu, untuk itu maka energi surya disimpan dalam arus DC dan sebaiknya digunakan untuk alat-alat listrik dan penerangan dengan arus DC, sehingga tidak perlu mengubah ke arus AC dan menjadi lebih efisien dan murah (Suwignyo, 2022).

2.2.2 Energi Angin

Energi angin merupakan suatu energi kinetis atau energi akibat kecepatan angin dan selanjutnya energi kinetis inilah yang dapat digunakan untuk memutar sudu-sudu kincir angin. Pemanfaatan energi angin untuk dapat dikonversi ke energi lain membutuhkan data kecepatan dan arah angin dalam waktu yang cukup lama (Sam dan Patabang, 2005).

2.2.3 Energi Hidro

Energi hidro diperoleh melalui aliran air yang digunakan untuk memutar turbin. Putaran turbin ini kemudian dihubungkan dengan generator. Untuk mendapatkan putaran turbin yang konstan, maka diperlukan jumlah air yang juga konstan. Jika semakin banyak jumlah air yang digunakan, maka semakin besar pula energi yang dapat dihasilkan (Christiawan, Jasa & Sudarmojo, 2017).

2.2.4 Energi Panas Bumi

Energi panas bumi atau geothermal merupakan pemanfaatan energi panas yang bersumber dari panas yang dipancarkan oleh inti bumi. Bumi berbentuk bola dengan inti berupa logam yang jaraknya 4000 mil dari permukaan bumi. Inti ini mengeluarkan panas yang dapat melelehkan bebatuan sehingga menjadi magma. Magma tersebut akan mengalir dan memanaskan air yang ada di lapisan terluar bumi, akibatnya bebatuan dan air menjadi panas sehingga menyemburkan uap panas ke permukaan bumi pada wilayah tertentu. Pada wilayah pada lintasan gunung berapi akan tersembur keluar gas/uap panas bertekanan tinggi, gas inilah yang akan dimanfaatkan untuk memutar turbin jika panas yang dihasilkan melebihi 100°C (Suwignyo, 2022).

2.2.5 Energi Biomasa

Biomasa merupakan salah satu bagian atau salah satu jenis dari bioenergi yang terdiri dari bahan bakar nabati dan merupakan sumber energi terbarukan yang dihasilkan dari bahan tanaman. Biomasa sudah digunakan di Indonesia sejak tahun 1820an terutama untuk pembangkit mesin uap pada pabrik-pabrik gula di Jawa dengan menggunakan limbah batang tebu (ampas) sisa limbah padat dari

proses penggilingan tebu. Potensi energi biomasa sangat melimpah di Indonesia, namun belum dapat dimanfaatkan secara optimal. Ini dikarenakan pemakaian bahan bakar fosil masih lebih disukai (Suwignyo, 2022).

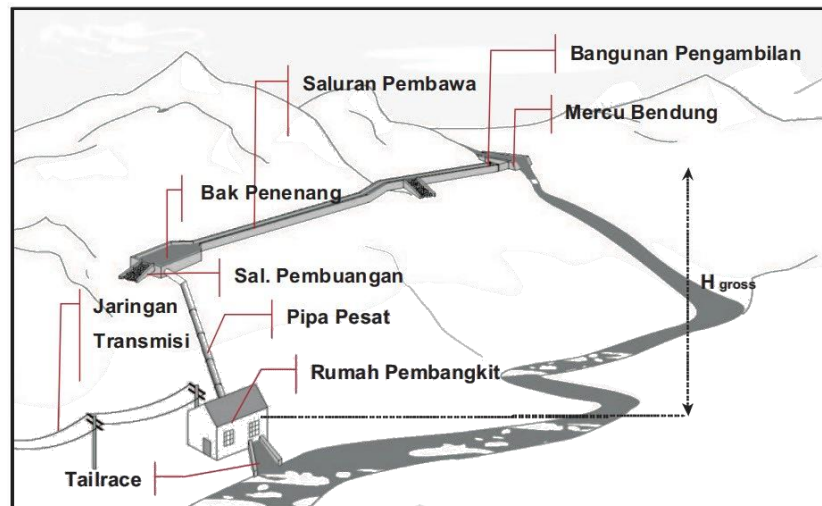
2.2.6 Energi Arus Laut

Pemanfaatan energi arus laut merupakan teknologi pemanfaatan energi melalui konversi tenaga kinetik masa air laut menjadi tenaga listrik. Pada dasarnya, arus laut merupakan gerakan horizontal massa air laut, sehingga arus laut memiliki energi kinetik yang dapat digunakan sebagai tenaga penggerak rotor atau turbin pembangkit listrik. Selain itu, arus laut juga menarik untuk dikembangkan sebagai pembangkit listrik karena sifatnya yang relatif stabil dan dapat diprediksi karakteristiknya (Suryansyah, 2013).

2.3 PLTMH

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan bentuk skala kecil dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). PLTMH memanfaatkan aliran air pada sungai ataupun irigasi yang menjadikannya sumber tenaga untuk dapat memutar turbin. Pemanfaatan PLTMH ini akan sangat cocok untuk dikembangkan pada daerah pedesaan karena ramah lingkungan dan harga jual listrik yang lebih murah (Rohermanto, 2007).

Komponen PLTMH terdiri dari komponen bangunan sipil PLTMH dan komponen mekanikal dan elektrikal PLTMH. Bagian yang termasuk ke dalam komponen bangunan sipil adalah bangunan intake, bangunan pengendap, saluran pembawa, pipa pesat dan rumah turbin. Sedangkan bagian lain seperti turbin air, generator listrik dan sistem jaringan dan distribusi listrik masuk ke dalam komponen mekanikal dan elektrikal (IMIDAP, Pedoman Teknis Standardisasi Peralatan dan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), 2008).

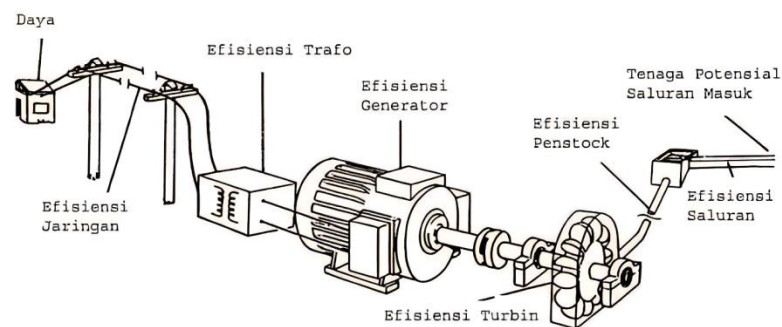


Gambar 2.1 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Sumber: (IMIDAP, Pedoman Teknis Standardisasi Peralatan dan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), 2008)

2.3.1 Syarat Perencanaan PLTMH

Sistem kerja Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah memanfaatkan energi potensial air untuk diubah menjadi sumber energi listrik dengan menggunakan perbedaan ketinggian dan debit aliran yang terjadi dalam saluran. Aliran tersebut dapat berupa aliran sungai, air terjun, saluran irigasi atau aliran air lainnya. Air dengan kapasitas tertentu dan dari ketinggian tertentu dialirkan menuju *power house*, dimana aliran tersebut akan menggerakkan turbin dan mengubahnya menjadi energi mekanik. Perputaran turbin tersebut ditransmisikan ke generator untuk kemudian diubah menjadi energi listrik. Daya yang dapat dihasilkan oleh PLTMH adalah 5-100 kW (IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Mekanikal Elektrikal, 2009).



Gambar 2.2 Prinsip Kerja PLTMH

Sumber: (IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Mekanikal Elektrikal, 2009)

Formula untuk menganalisis daya (P) yang dapat dibangkitkan dari suatu PLTMH adalah:

$$P = 9,8 \times Q \times H_{eff} \times \eta \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

P = daya yang dibangkitkan (watt)

Q = debit air (m³/dt)

H_{eff} = tinggi efektif (m)

η = efisiensi dari sistem

9,8 = konstanta gravitasi bumi (m/dt²)

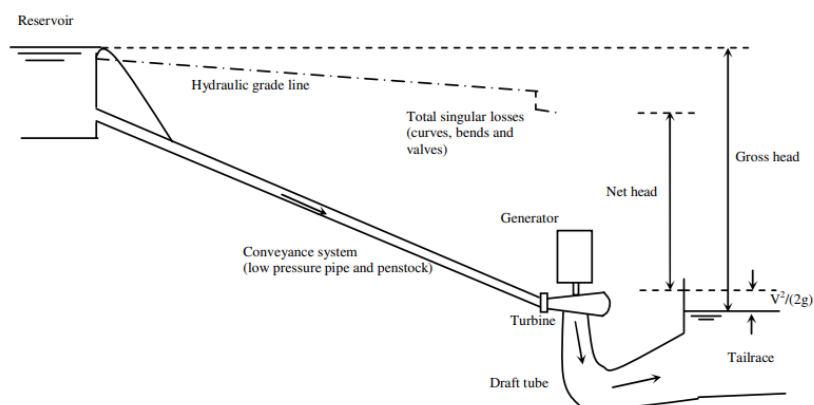
Berdasarkan formula di atas, maka untuk dapat mengetahui besar daya yang dapat dihasilkan dari suatu PLTMH dibutuhkan data tinggi jatuh (*head*), debit aliran dan efisiensi. Tinggi jatuh (*head*) adalah selisih beda tinggi daerah aliran sampai ke lokasi instalasi. Tinggi jatuh efektif yang digunakan dalam perencanaan mikrohidro bergantung pada jenis turbin yang digunakan.

Perhitungan H_{gross} disesuaikan dengan jenis turbin yang digunakan.

Turbin *impulse* : $H_{gross} = E_{res} - E_{as} \dots\dots\dots(2.2)$

Turbin *reaction* : $H_{gross} = E_{res} - E_{river} \dots\dots\dots(2.3)$

Tinggi jatuh efektif : $H_{eff} = H_{gross} - H_f - \frac{v^2}{2 \times g} \dots\dots\dots(2.4)$



Gambar 2.3 Kehilangan Energi pada Turbin Reaksi
Sumber: (*Guidelines for Design of Small Hydropower Plants*, 2000)

Dimana:

H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

E_{res} = elevasi muka air reservoir/kolam penampung (m)

E_{as} = elevasi sumbu as turbin (m)

E_{river} = elevasi muka air pada sungai di luar *power house* (m)

H_f = total kehilangan energi (m)

$\frac{v^2}{2g}$ = kehilangan energi pada saluran akhir (m)

Kehilangan energi (h_f) yang dimaksud adalah kehilangan energi yang terjadi di dalam pipa pesat (*penstock*). Total kehilangan energi maksimal yang didesain pada *penstock* adalah 10%. Kehilangan energi ini termasuk kehilangan energi minor (kehilangan energi akibat belokan pipa, kontraksi inlet, dll), kehilangan energi mayor (kehilangan energi akibat gesekan pipa) dan kehilangan energi akibat *trashrack* (Suwignyo & Nissa, 2022).

Berdasarkan buku *Guidelines for Design of Small Hydropower Plants*, kehilangan energi juga termasuk pada kehilangan energi pada saluran akhir. Pada kasus ini, yaitu pada *Draft Tube* dan *Tail Race* melalui persamaan $\frac{v^2}{2g}$. Apabila v merupakan sebuah kecepatan masuk turbin (v_1) dan kecepatan keluar saluran (v_2), maka persamaan menjadi $\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$.

$$h_f = h_f \text{ minor} + h_f \text{ mayor} + h_t \dots\dots\dots (2.5)$$

$$h_{f_{\text{minor}}} = \frac{v^2}{2g} \times (\sum Kc + \sum Ke + \sum Kb + \sum Kv) \dots\dots\dots (2.6)$$

$$h_{f_{\text{mayor}}} = 10,3 \times L \times \frac{n^2 \times Q^2}{d^{5,33}} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$h_t = K_t \times \left(\frac{t}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \times \left(\frac{v^2}{2g}\right) \times \sin\theta \dots\dots\dots (2.8)$$

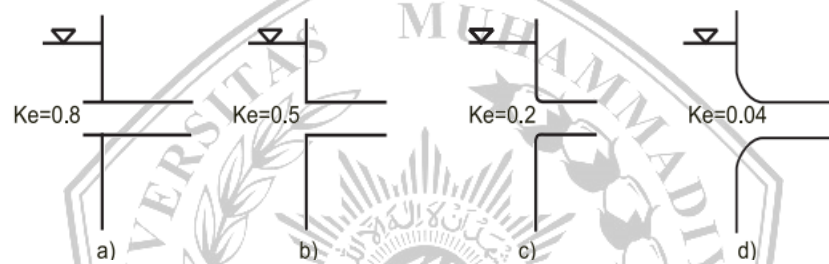
Dimana:

v = kecepatan aliran (m/dt)

g = percepatan gravitasi (9,8 m/dt²)

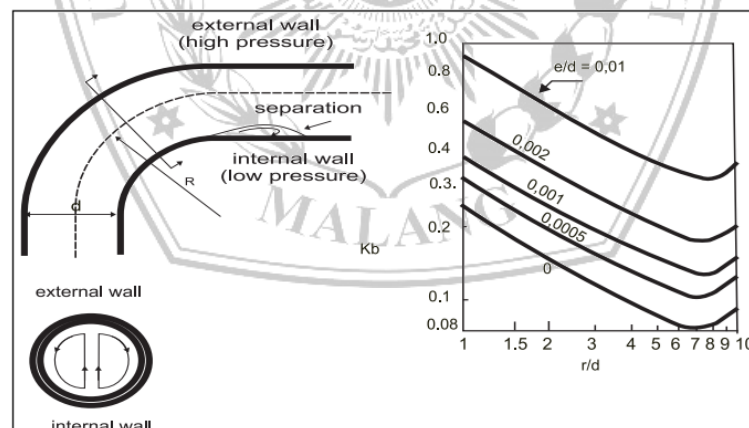
Kc = koefisien kehilangan energi akibat perubahan dimensi profil pipa

- K_e = koefisien kehilangan energi akibat kontraksi pada inlet
 K_b = koefisien kehilangan energi akibat belokan (*bending*) pipa
 K_v = koefisien kehilangan energi akibat aliran pada katup
 L = panjang pipa (m)
 d = diameter dalam pipa (m)
 n = koefisien manning
 K_t = koefisien kehilangan energi akibat *trashrack*
 t = ketebalan bar
 b = jarak antar bar
 \emptyset = sudut kemiringan dari arah horizontal



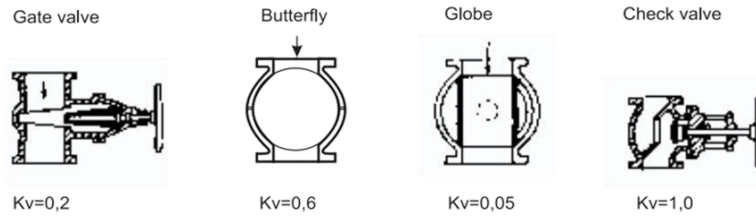
Gambar 2.4 Koefisien K_e Akibat Kontraksi pada Inlet

Sumber: (Layman's Guidebook on How to Develop a Small Hydro Site)

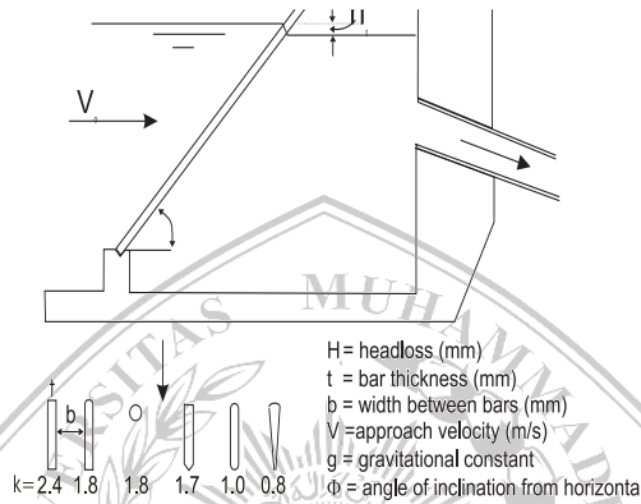


Gambar 2.5 Hubungan Koefisien K_b Akibat *Bending* Pipa dengan R/d

Sumber: (Layman's Guidebook on How to Develop a Small Hydro Site)



Gambar 2.6 Koefisien *Kv* Berdasarkan Jenis Katup
Sumber: (Layman’s Guidebook on How to Develop a Small Hydro Site)



Gambar 2.7 Koefisien *Kt* pada *Trashrack*
Sumber: (Layman’s Guidebook on How to Develop a Small Hydro Site)

Tabel 2.1 Koefisien Manning Tiap Jenis Material Pipa

Material Pipa	N
PVC	0,009
Welded Steel	0,012
Cast Iron	0,014
Concrete	0,014

Sumber: (Pembangkit Listrik Tenaga Mini & Mikro Hidro (PLTM & PLTMH), 2022)

Rumus umum untuk menghitung debit adalah sebagai berikut (SNI 8066, 2015):

$$Q = A \times V \dots\dots\dots(2.9)$$

Karena pengukuran dilakukan menggunakan metode pelampung, maka persamaan yang digunakan adalah:

$$Q = A \times V \times k \dots\dots\dots(2.10)$$

$$k = 1 - 0,116 \times \sqrt{\left(1 - \frac{h}{d}\right) - 0,1} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana:

- Q = debit air (m^3/dt)
 A = luas penampang saluran (m^2)
 V = kecepatan aliran (dt)
 k = koefisien pelampung
 h = tinggi pelampung tenggelam (m)
 d = kedalaman saluran (m)

2.4 Perencanaan Turbin

Turbin dalam sistem PLTMH berperan untuk mengubah energi air menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Putaran poros inilah yang selanjutnya diubah oleh generator menjadi energi listrik. Berdasarkan prinsip kerjanya, turbin air dibagi menjadi kelompok berikut:

Tabel 2.2 Jenis Turbin

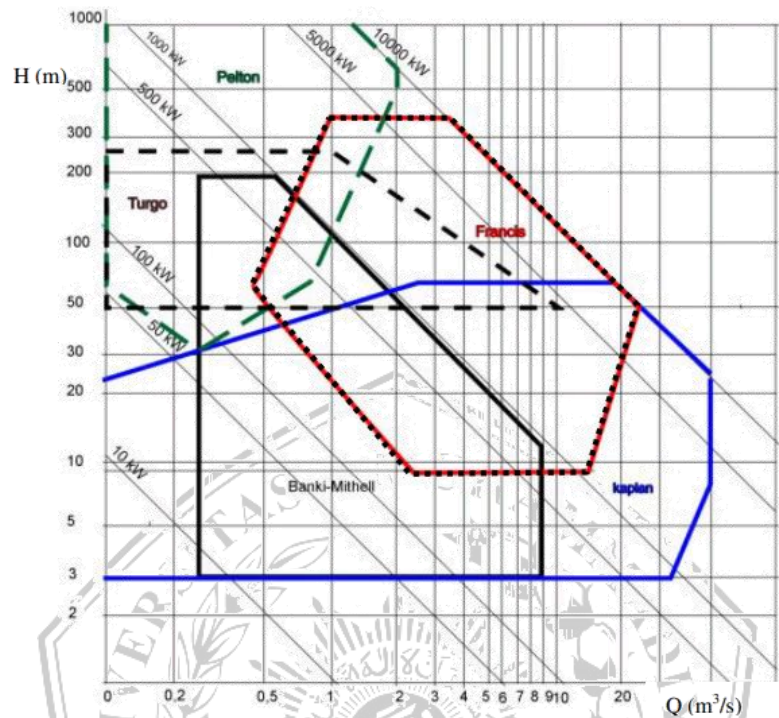
Turbine Runner	Head Pressure		
	High	Medium	Low
Impulse	- Pelton	- Crossflow (Michel/Banki)	- Crossflow (Michel/Banki)
	- Turgo	- Turgo	
	- Multi-jet Pelton	- Multi-jet Pelton	
Reaction		- Francis	- Propeller
		- Pump as Turbine (PAT)	- Kaplan

Sumber: (IMIDAP. Pedoman Studi Kelayakan Mekanikal Elektrikal, 2009)

Turbin *impulse* bekerja menggunakan tekanan yang sama pada setiap sisi sudut gerakanya (*runner*) dimana bagian turbin yang berputar. Sedangkan turbin reaksi menggunakan energi kinetik dan tekanan dikonversikan di *runner*. Secara umum, jenis turbin ini tidak menerima tumbukan dan hanya mengikuti aliran air (IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Mekanikal Elektrikal, 2009).

Pemilihan jenis turbin perlu menyesuaikan kondisi di lapangan. Pada beberapa daerah, memungkinkan untuk dapat menggunakan beberapa jenis turbin. Pemilihan jenis turbin yang *overlapping* ini memerlukan perhitungan yang lebih mendalam. Secara umum, hasil *survey* lapangan mendapatkan potensi pengembangan PLTMH dengan head 6-60 m. pemilihan tipe turbin dapat dicari

berdasarkan hubungan antara debit dengan tinggi jatuh menggunakan grafik berikut:

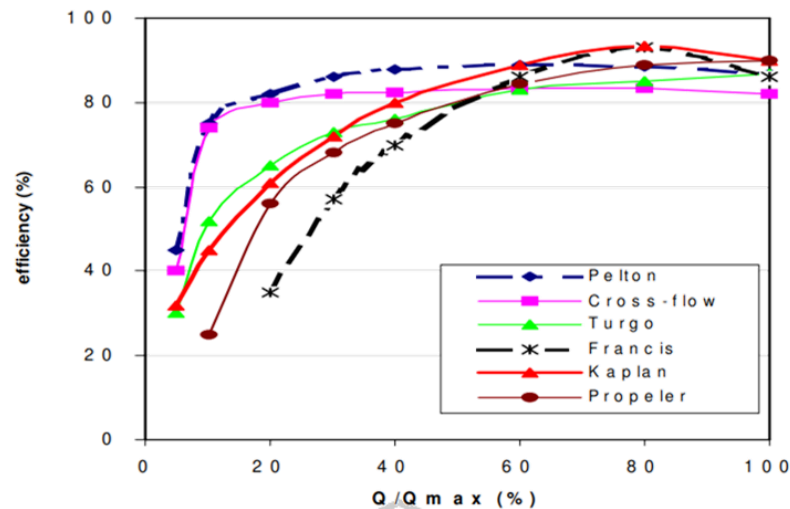


Gambar 2.8 Grafik Pemilihan Tipe Turbin

Sumber: (*Guidelines for Design of Small Hydropower Plants*, 2000)

Cara untuk membaca grafik pemilihan tipe turbin diatas adalah dengan menghubungkan garis debit air dan ketinggian yang telah ditetapkan. Kemudian dari garis tersebut, buat garis tegak lurus dengan kecepatan turbin sehingga didapat jenis turbin yang ideal.

Dalam perencanaan turbin, kinerja turbin dipengaruhi oleh efisiensi dari masing-masing jenis turbin. Efisiensi yang dimaksud disebabkan karena adanya perbedaan tenaga yang digunakan dengan daya yang dibawa oleh aliran air. Efisiensi turbin dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 2.9 Grafik Efisiensi Masing-masing Turbin
Sumber: (*Guidelines for Design of Small Hydropower Plants*, 2000)

2.5 Desain Bangunan Sipil PLTMH

Berikut adalah macam-macam bangunan sipil yang digunakan dalam PLTMH.

2.5.1 Bangunan Pengambil (*Intake*)

Bangunan pengambil (*Intake*) merupakan bangunan bendung yang berada pada melintang sungai. Fungsi dari bangunan ini adalah untuk membelokkan arah aliran air dan menaikkan tinggi air agar elevasi muka air cukup untuk dapat digunakan pada sistem pembangkit mikrohidro. Saluran *intake* dan bendung dibangun pada posisi yang berdekatan karena PLTMH merupakan bangunan pembangkit tipe *run off river* (IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Sipil, 2009).

Bangunan pengambil (*Intake*) dilengkapi dengan pintu penutup. Pada bagian ini, debit air tidak bisa terkontrol mulai dari debit air rendah hingga debit air banjir. Pintu penutup berfungsi untuk menstabilkan debit air yang masuk ke dalam saluran *intake*. Selain itu, digunakan juga untuk mengosongkan saluran *intake* dalam rangka perawatan dan perbaikan. (IMIDAP, Pedoman Teknis Standardisasi Peralatan dan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), 2008). Dimensi bukaan pada *intake* dapat direncanakan berdasarkan persamaan:

$$Q = \mu \times b \times a \times \sqrt{2 \times g \times z} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

μ = koefisien debit

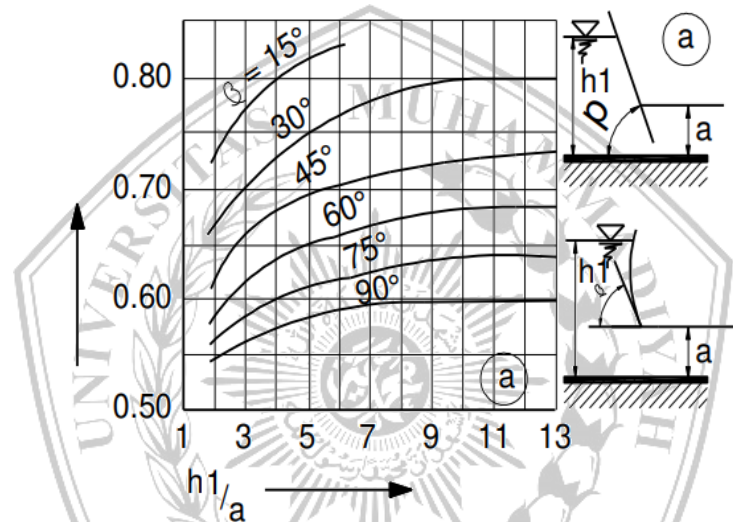
b = lebar bukaan (m)

a = tinggi bukaan (m)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²)

z = kehilangan tinggi energi pada bukaan (m)

koefisien debit (μ) ditentukan dengan grafik berikut:



Gambar 2.10 Koefisien Debit μ untuk Permukaan Pintu Datar dan Lengkung
(Sumber: KP-02 Bangunan Utama, 2013: 98)

Untuk lebar bangunan bendung, sebaiknya sama dengan lebar rata-rata sungai pada bagian yang stabil. Lebar maksimum bendung hendaknya tidak lebih dari 1,2 kali lebar rata-rata sungai pada ruas yang stabil. Lebar efektif mercu (B_e) dihubungkan dengan lebar mercu yang sebenarnya (B) yakni jarak antara pangkal-pangkal bendung dan/atau tiang pancang (KP-02 Bangunan Utama, 2013).

$$B_e = B - 2(nK_p + K_a) H_1 \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

n = jumlah pilar

K_p = koefisien kontraksi pilar

K_a = koefisien kontraksi pangkal bendung

H_1 = tinggi energi (m)

Harga-harga koefisien K_a dan K_p diberikan pada tabel berikut:

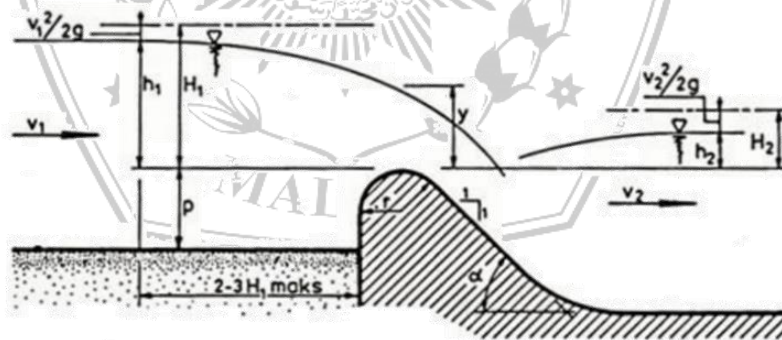
Tabel 2.3 Harga-harga Koefisien K_a dan K_p

Bentuk Pilar	K_p
Untuk pilar berujung segi empat dengan sudut-sudut yang dibulatkan pada jari-jari yang hampir sama dengan 0,1 dari tebal pilar	0,02
Untuk pilar berujung bulat	0,01
Untuk pilar berujung runcing	0
Bentuk Pangkal Tembok	K_a
Untuk pangkal tembok segi empat dengan tembok hulu pada 90° ke arah aliran	0,20
Untuk pangkal tembok bulat dengan tembok hulu pada 90° ke arah aliran dengan $0,5 H_1 > r > 0,15 H_1$	0,10
Untuk pangkal tembok bulat dimana $r > 0,5 H_1$ dan tembok hulu tidak lebih dari 450 ke arah aliran	0

Sumber: (KP-02 Bangunan Utama, 2013: 49)

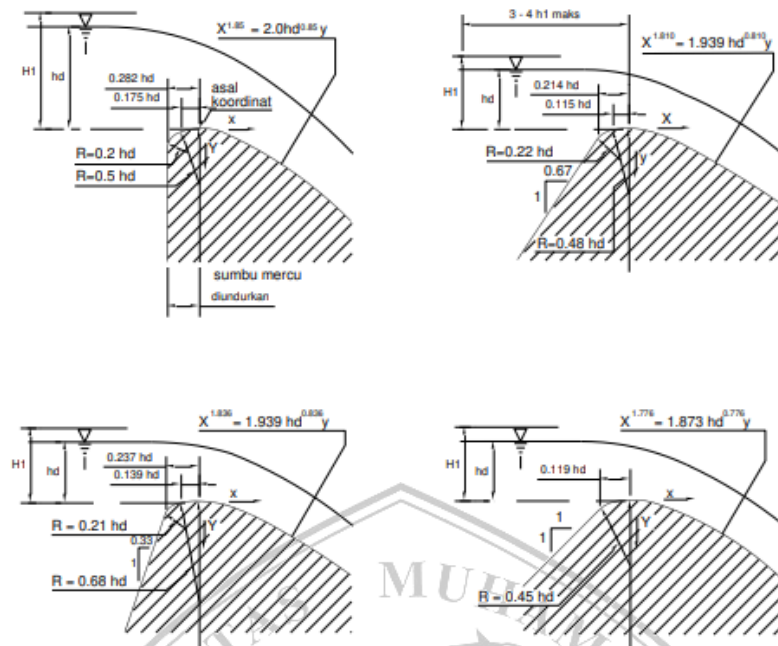
2.5.1.1 Perencanaan Mercu

Berdasarkan KP-02 Bangunan Utama, ada dua jenis mercu yang umum digunakan di Indonesia, yaitu mercu dengan pelimpah tipe Ogee dan tipe bulat. Kemiringan pada bagian hilir dibatasi maksimum 1 banding 1.



Gambar 2.11 Bendung dengan Mercu Bulat

Sumber: (KP-02 Bangunan Utama, 2013: 51)



Gambar 2.12 Bentuk-bentuk Bendung Mercu Ogee
Sumber: (KP-02 Bangunan Utama, 2013: 56)

Tinggi energi (H_1) pada rumus 2.13 dapat dicari melalui persamaan antara tinggi energi dan debit seperti berikut:

$$Q = cd \times \frac{2}{3} \times \sqrt{\frac{2}{3} \times g} \times Be \times H_1^{1,5} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana:

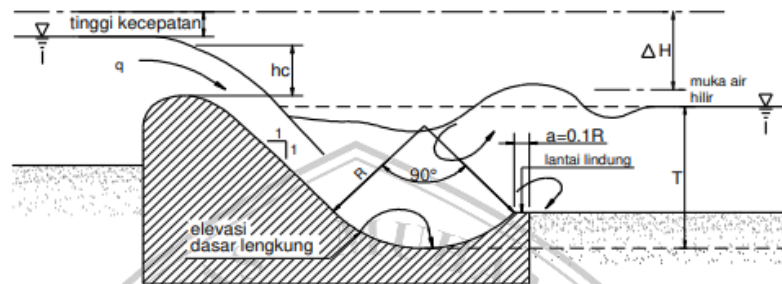
- n = jumlah pilar
- C_d = koefisien debit ($C_d = C_0 C_1 C_2$)
- b = lebar mercu (m)
- C_0 = konstanta (1,3)
- C_1 = fungsi p/h_d dan H_1/h_d
- C_2 = faktor koreksi untuk permukaan hulu

Untuk memudahkan dalam proses perhitungan, maka dapat digunakan fitur *goalseek* pada Ms. Excel. Selanjutnya adalah perhitungan tinggi muka air pada mercu (H_d).

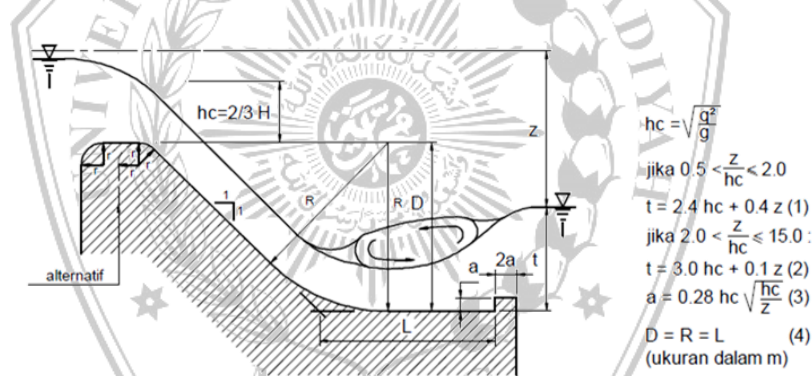
$$H_d = H_1 - \frac{v^2}{2 \times g} \dots\dots\dots(2.15)$$

2.5.1.2 Kolam Peredam Energi

Aliran pada bagian hilir bendung dapat menunjukkan beberapa perilaku yang dapat menyebabkan terjadinya gerusan. Untuk meminimalisir hal tersebut, maka dapat direncanakan sebuah peredam energi. Berdasarkan KP-02 Bangunan Utama, ada 3 jenis peredam energi, antara lain: 1) Kolam olak tipe USBR, 2) Bak tenggelam, 3) Kolam *Vlughter*



Gambar 2.13 Peredam Energi Tipe Bak Tenggelam
Sumber: (KP-02 Bangunan Utama, 2013: 71)



Gambar 2.14 Kolam Olak Menurut Vlugter
Sumber: (KP-02 Bangunan Utama, 2013: 75)

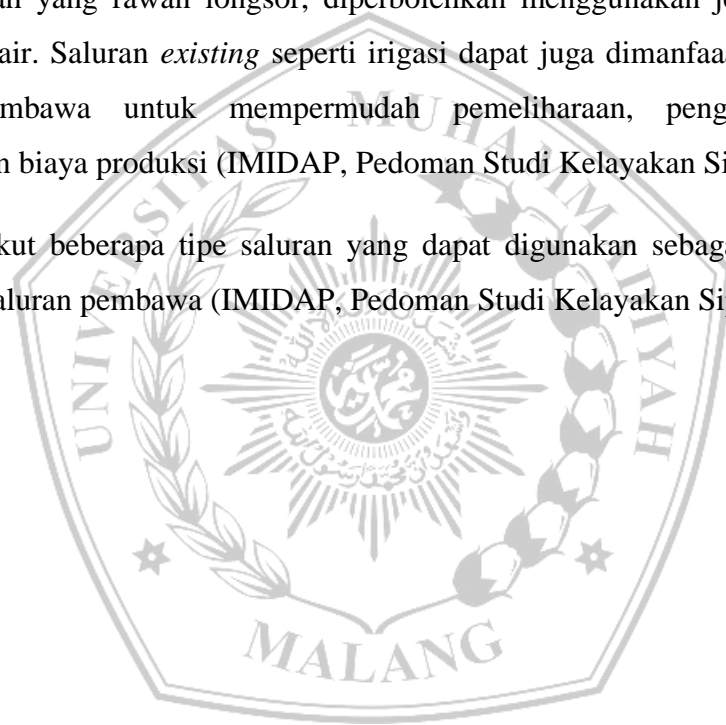
Kolam *vlughter* ini tidak dianjurkan untuk digunakan pada bendung sungai dengan debit yang selalu mengalami fluktuasi. Karena pada dasarnya, kolam tipe ini khusus dikembangkan untuk bangunan terjun pada saluran irigasi dengan debit yang konstan. Pada perencanaan kolam *vlughter*, diberikan batasan untuk z/h_c 0,5; 2,0 dan 15,0 dihubungkan dengan bilangan Froude 1,0; 2,8 dan 12,8 (KP-04 Bangunan, 2013).

2.5.2 Saluran Pembawa (*Headrace*)

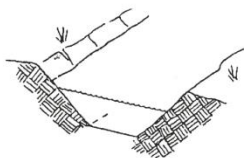
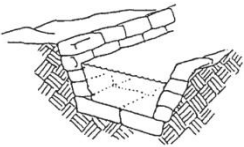
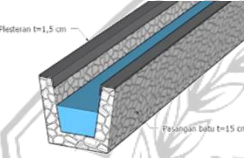
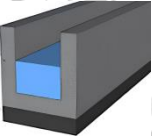
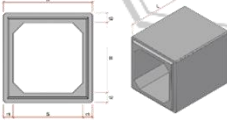
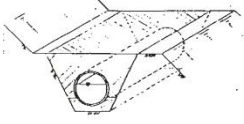
Fungsi dari saluran pembawa adalah menyalurkan air dari bangunan *intake* atau bak pengendap ke bak penenang (*forebay*). Saluran ini juga berfungsi untuk menstabilkan debit air. Saluran pembawa dapat berupa saluran beton terbuka, ataupun menggunakan pipa plastik. Saluran pembawa yang menggunakan pipa, harus dipendam minimal 60 cm di dalam tanah. Pada pembangkit dengan skala kecil, biasanya digunakan saluran beton terbuka.

Penempatan saluran pembawa harus memperhatikan kekuatan tanah. Pada kondisi tanah yang rawan longsor, diperbolehkan menggunakan jembatan pipa atau talang air. Saluran *existing* seperti irigasi dapat juga dimanfaatkan sebagai saluran pembawa untuk mempermudah pemeliharaan, pengawasan dan meringankan biaya produksi (IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Sipil, 2009).

Berikut beberapa tipe saluran yang dapat digunakan sebagai opsi untuk pemilihan saluran pembawa (IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Sipil, 2009):



Tabel 2.4 Tipe Saluran

Tipe Saluran	Ilustrasi	Keuntungan	Permasalahan
Saluran Tanah Sederhana (tidak direkomendasikan)		<ul style="list-style-type: none"> - Konstruksi dan perawatan mudah - Murah 	<ul style="list-style-type: none"> - Mudah terjadi kerusakan pada dinding saluran - Tidak dapat diterapkan pada jenis tanah yang mudah lulus air/lembek - Sukar membersihkan sedimen
Saluran dengan Pasangan Batu Kosong		<ul style="list-style-type: none"> - Konstruksi mudah dengan bahan material lokal - Ketahanan tinggi terhadap gerusan - Relatif mudah perawatan dan perbaikan 	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak dapat diterapkan pada jenis tanah yang mudah lulus air/lembek
Saluran dengan Dinding Pasangan Batu		<ul style="list-style-type: none"> - Konstruksi mudah dengan bahan material lokal - Ketahanan tinggi terhadap gerusan - Dapat diterapkan pada jenis tanah yang mudah lulus air/lembek - Relatif mudah membersihkan sedimen 	<ul style="list-style-type: none"> - Biaya konstruksi lebih mahal dari saluran tanah sederhana - Memerlukan tenaga kerja lebih banyak untuk pelaksanaan konstruksi
Saluran Beton		<ul style="list-style-type: none"> - Perawatan sangat mudah dan murah - Sangat mudah membersihkan sedimen - Ketahanan sangat tinggi terhadap gerusan 	<ul style="list-style-type: none"> - Biaya konstruksi paling mahal dari tipe saluran lainnya - Metode pelaksanaan lebih rumit - Masa konstruksi lebih lama
Box Culvert		<ul style="list-style-type: none"> - Pelaksanaan konstruksi relatif singkat dengan menggunakan produk siap pakai - Variasi dimensi ukuran lebih banyak - Aman apabila diterapkan pada lokasi rawan longsor dan atau sampah 	<ul style="list-style-type: none"> - Beban konstruksi lebih besar - Biaya transportasi untuk produk siap pakai mahal - Apabila dibuat di lokasi akan membutuhkan waktu konstruksi lebih lama
Saluran Pipa		<ul style="list-style-type: none"> - Mudah dilaksanakan untuk daerah yang tidak terlalu curam - Memungkinkan untuk konstruksi yang tinggi dengan bentang kecil - Waktu pelaksanaan konstruksi relatif singkat - Ketahanan yang tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> - Biaya transportasi bahan material lebih mahal

Sumber: (IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Sipil, 2009).

2.5.3 Bak Penenang (*Forebay*)

Bak penenang (*Forebay*) merupakan tempat untuk menstabilkan aliran dan berfungsi sebagai tempat pengendapan akhir. *Forebay* merupakan bangunan terakhir yang terhubung langsung ke *penstock*, sehingga aliran air harus dijaga agar debit yang masuk ke dalam turbin tidak terlalu besar. Lokasi *forebay* biasanya diletakkan pada elevasi yang lebih tinggi dari turbin. *Forebay* didesain untuk menjaga elevasi tinggi muka air di hulu sebelum masuk ke dalam *penstock* agar tinggi jatuh rencana tidak berubah-ubah.

Desain volume *forebay* direncanakan untuk dapat menampung 10 – 30 kali dari debit rencana (Suwignyo & Nissa, 2022). *Forebay* juga harus didesain kedap air dan tahan bocor. Konstruksi dapat dibuat menggunakan beton atau pasangan bata dengan tebal dinding minimal 25 cm. Bak penenang harus dilengkapi dengan *trash rack* yang halus, *flush gate* untuk membuang sisa endapan dan *spill way* untuk membuang kelebihan air pada *forebay*. *Forebay* juga harus dilengkapi dengan tangga untuk mempermudah akses pembersihan dan perawatan.

$$V = (10 \text{ sd } 30) \times Q_{rencana} \dots\dots\dots(2.16)$$

Untuk *forebay* yang dilengkapi dengan saluran *spillway*, maka kapasitas *forebay* minimal 120% dari debit rancangan. Ukuran lebar *forebay* minimal selebar *trash rack*. *Penstock* harus diposisikan di dalam *forebay* dengan kedalaman minimum 2 kali diameter *penstock* untuk menghindari turbulensi aliran yang masuk ke dalam pipa. Jarak *penstock* dari dasar *forebay* minimum 30 cm (IMIDAP, Pedoman Teknis Standardisasi Peralatan dan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), 2008).

2.5.4 Pipa Pesat (*Penstock*)

Pipa pesat (*Penstock*) merupakan saluran tertutup untuk mengalirkan air langsung ke turbin yang berada di *power house*. *Penstock* bisa terbuat dari *mild steel* ataupun pipa plastik PVC atau HDPE. Tipe pipa yang digunakan disesuaikan dengan kondisi topografi dan sistem yang digunakan pada sistem PLTMH.

Berikut perbandingan bahan pipa pesat menurut buku IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Sipil (2009):

Tabel 2.5 Perbandingan Bahan Pipa Pesat

Material	Gesekan Dinding Pipa	Berat	Ketahanan Karat	Biaya Pipa/Konstruksi	Sambungan	Ketahanan Tekanan
<i>Mild Steel</i>	***	***	***	****	****	*****
HDPE ¹⁾	*****	*****	*****	**	**	*****
PVC ²⁾	*****	*****	****	****	****	*****
Beton	*	*	*****	***	***	*

Sumber: (IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Sipil, 2009)

Diameter penstock: (Perancangan Penstock (Pipa Pesat) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Banjar Dinas Mekarsari, Desa Panji, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng)

$$d = 0,72 \times Q^{0,5} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana:

d = diameter penstock (m)

Q = debit (m³/dt)

Karena fungsi *penstock* sangat krusial, maka ada beberapa kriteria untuk penggunaan *penstock*, yaitu (IMIDAP, Pedoman Teknis Standardisasi Peralatan dan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), 2008):

- Pipa dengan bahan *mild steel* menggunakan tebal bahan 1,5 mm dan harus terhindar dari korosi.
- Pipa dengan bahan plastik harus ditanam di dalam tanah atau dibungkus untuk menghindari paparan sinar matahari secara langsung
- *Penstock* harus didesain agar kehilangan tekanannya maksimal 10% dari total *head* dan maksimal 15% untuk *penstock* dengan panjang 5 kali *head*.
- Tingkat tekanan yang diterima *penstock* juga harus mempertimbangkan *surge pressure*, *static pressure* dan tekanan yang dihasilkan karena penutupan *guide vane*.
- *Penstock* harus mampu menahan tekanan akibat *water hammer*.
- *Penstock* harus dilengkapi dengan pipa napas di ujung atas *penstock* dengan diameter pipa napas 1-2% dari diameter *penstock*.

- Jika pada *penstock* terjadi belokan, maka diperlukan katub udara pada titik-titik perubahan arah tersebut

Selain itu, menurut Ramos, dkk (2000) batas kecepatan aliran maksimum pada *penstock* adalah adalah 2-3 m/dt untuk head rendah. Sehingga hal ini juga perlu diperhitungkan menggunakan persamaan berikut:

$$v = \frac{Q}{\frac{1}{4} \times \pi \times d^2} \dots \dots \dots (2.18)$$

Penstock juga harus didesain untuk terhindar dari kavitasi. Salah satu kriteria yang dibutuhkan menurut Bratko dan Doko (2013) adalah kedalaman minimum pipa pesat dari permukaan air (submergence depth). Rumus untuk perhitungan kedalaman pipa ada beragam, antara lain:

$$\text{Knauss} \geq D \times \left(1 + 2,3 \times \frac{v}{\sqrt{g \times D}} \right) \dots \dots \dots (2.19)$$

$$\text{Rohan} \geq 1,474 \times V^{0,48} \times D^{0,76} \dots \dots \dots (2.20)$$

$$\text{Gordon} \geq c \times V \times \sqrt{D} \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana:

D = diameter *penstock* (m)

V = kecepatan aliran dalam pipa (m/dt)

c = pendekatan simetris (0,5434)

2.5.5 Rumah Pembangkit (*Power House*)

Rumah pembangkit merupakan bangunan yang berfungsi untuk melindungi peralatan mekanikal dan elektrikal. Peralatan tersebut antara lain turbin, generator, panel kontrol dan yang lainnya. Perlindungan ini dimaksudkan untuk melindungi peralatan dari cuaca yang tidak menentu dan juga dari pihak-pihak yang tidak berkepentingan.

Bisa dibilang *power house* merupakan bangunan inti dari sistem PLTMH. Sehingga diperlukan beberapa pertimbangan untuk menentukan lokasi *power house*, antara lain (IMIDAP, Pedoman Studi Kelayakan Sipil, 2009):

- *Power house* harus berada pada tanah yang stabil dan datar dengan lokasi yang relatif kering dan luas.

- Memiliki akses yang mudah untuk mobilisasi peralatan mekanikal dan elektrikal maupun kegiatan perawatannya.
- Elevasi lantai *power house* harus berada di atas elevasi muka air banjir paling besar dalam beberapa tahun terakhir.
- Bangunan *power house* harus dilengkapi dengan pencahayaan yang baik dan ventilasi udara yang dengan kassa untuk menghindari keluar masuknya serangga.
- Luas bangunan cukup untuk menyimpan peralatan dan atau suku cadang peralatan mekanikal dan elektrikal dengan *layout* yang memudahkan pergerakan operator untuk bekerja di dalamnya.
- Pondasi harus dibuat cukup kuat untuk menahan peralatan yang berat juga mampu menahan gaya dan tekanan dari turbin maupun *penstock*.
- *Power house* juga harus diproteksi dengan pembumian.

Power house harus mampu melindungi peralatan mekanikal dan elektrikal dari segala gangguan. Maka dari itu, sebaiknya *power house* didesain menggunakan komponen yang kokoh seperti beton bertulang. Bagian struktural yang perlu direncanakan antara lain kolom, plat lantai dan pondasi.

2.5.6 Saluran Pembuang (*Tail Race*)

Tail race adalah saluran yang digunakan untuk membuang aliran air dari *power house*. Aliran air tersebut diarahkan kembali ke sungai. Saluran pembuang harus dibuat searah dengan aliran sungai dengan lokasi yang memiliki stabilitas tanah yang baik. Posisi saluran pembuang sebaiknya mudah diakses untuk kepentingan perawatan.

2.5.7 *Trash Rack*

Trash rack merupakan komponen pelengkap bangunan sipil pada PLTMH. *Trash rack* berfungsi untuk menyaring segala benda dan agregat agar tidak mengganggu aliran air yang masuk ke dalam *power house*. *Trash rack* harus mampu menahan tekanan air ketika ada penyumbatan dengan kondisi air penuh. Karenanya, *trash rack* harusnya terbuat dari besi, bukan bambu ataupun kayu. *Trash rack* dipasang pada bangunan *intake* dan *forebay* dengan bukaan

menyesuaikan ukuran dan karakter agregat yang lewat. *Trash rack* harus didesain untuk mudah dilepas pasang dan dipasang dengan posisi miring, kurang lebih 70° dari dataran untuk memudahkan proses pembersihan dan perbaikan.

2.5.8 Pintu Air

Pintu air merupakan salah satu komponen dalam bangunan sipil PLTMH yang berfungsi untuk mengontrol keluar masuknya air di dalam sistem. Ukuran pintu air dapat bervariasi menyesuaikan ukuran saluran yang akan dilayani. Pintu air harus mampu menahan tekanan pada saat kondisi air penuh. Pintu air dilengkapi dengan pemutar untuk mempermudah dalam pengoperasiannya. Pintu air juga harus terhindar dari karat, sehingga proses fabrikasinya harus dilakukan secara detail (IMIDAP, Pedoman Teknis Standardisasi Peralatan dan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), 2008).

2.6 Stabilitas Bangunan

Pada perencanaan bendung, perlu dilakukannya kontrol stabilitas. Tujuannya adalah agar desain yang telah direncanakan dapat memenuhi syarat kelayakan dan dapat dimanfaatkan secara maksimal. Stabilitas bendung adalah kemampuan bendung untuk dapat menahan gaya-gaya yang bekerja padanya. Adapun gaya-gaya tersebut antara lain:

- a. Gaya vertikal
 - Gaya akibat beban konstruksi bendung
 - Gaya akibat berat air di atas mercu bendung
 - Gaya akibat uplift
- b. Gaya horizontal
 - Gaya akibat tekanan air
 - Gaya akibat tekanan tanah dan lumpur
 - Gaya akibat gempa

2.6.1 Keamanan Terhadap Rembesan

Metode perhitungan angka rembesan disebut sebagai Metode Lane. Metode ini digunakan untuk mengetahui adanya erosi bawah tanah pada bangunan-bangunan utama (KP-02 Bangunan Utama hal. 148).

$$C_L = \frac{\sum^{1/3} \times L_h + L_v}{H} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana:

C_L = angka rembesan lane

$\sum L_v$ = jumlah panjang vertikal (m)

$\sum L_h$ = jumlah panjang horizontal (m)

H = beda tinggi muka air (m)

Sedangkan panjang jalur rembesan dapat dihitung dengan persamaan:

$$L_d = \sum^{1/3} \times L_h + L_v \dots\dots\dots (2.23)$$

Menurut KP-02 Bangunan Utama, harga minimum angka rembesan lane dapat ditentukan berdasarkan jenis tanahnya. Pada lokasi penelitian, diperoleh jenis tanah yaitu lempung sedang.

Tabel 4.1 Harga-harga Minimum Angka Rembesan Lane (C_L)

Jenis Tanah	C_L
Pasir sangat halus atau lanau	8,5
Pasir halus	7,0
Pasir sedang	6,0
Pasir kasar	5,0
Kerikil halus	4,0
Kerikil sedang	3,5
Kerikil kasar termasuk berangkal	3,0
Bongkah dengan sedikit berangkal dan kerikil	2,5
Lempung lunak	3,0
Lempung sedang	2,0
Lempung keras	1,8
Lempung sangat keras	1,6

Sumber: (KP-02 Bangunan Utama hal. 148, 2013)

2.6.2 Gaya Angkat (*Uplift*)

Gaya angkat (*Uplift*) → KP-02 hal 138

$$P = \left(H - \frac{L_x}{L_d} \times Z \right) \times \gamma_w \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana:

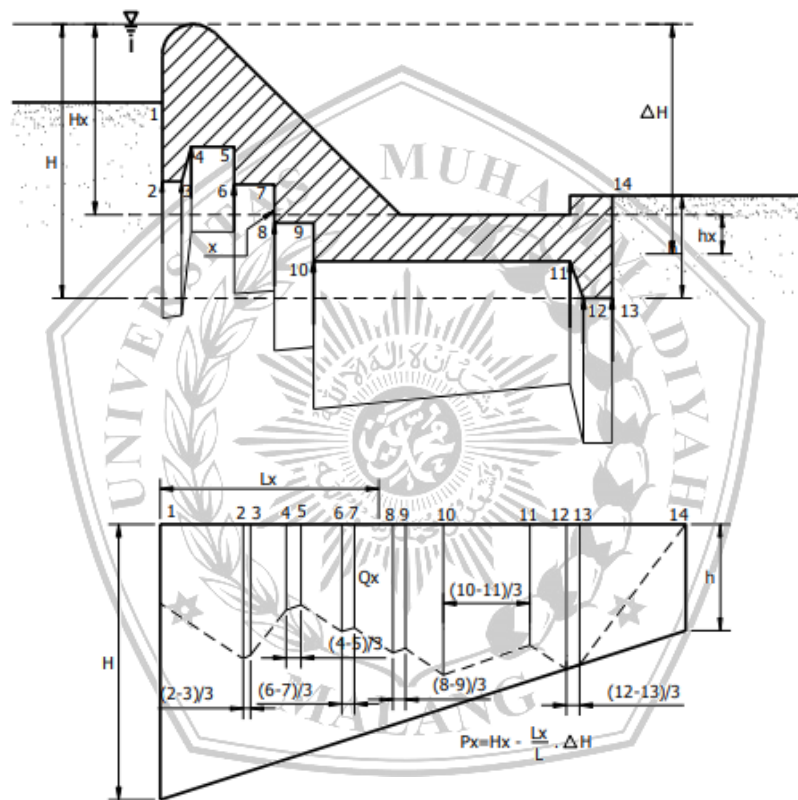
P = gaya angkat (kN/m²)

H = tinggi energi di hulu bendung (m)

L_x = panjang jalur rembesan (m)

L_d = total panjang rembesan (m)

Z = beda tinggi muka air di hulu dan hilir bendung, H (m)



Gambar 2.15 Gaya Angkat pada Pondasi Bendung
Sumber: (KP-02 Bangunan Utama, 2013)

2.6.3 Tebal Minimum Lantai Kolam Olak

Lantai kolam olak perlu direncanakan dengan ketebalan tertentu untuk dapat menahan gaya uplift yang terjadi pada lantai kolam. Dalam perencanaan ini, lantai kolam direncanakan dengan tebal 1,05 m. Menurut KP-02 Bangunan Utama, tebal minimum lantai kolam olak dapat dikontrol menggunakan persamaan berikut:

$$d_x \geq S \times \frac{P_x - W_x}{\gamma} \dots\dots\dots(2.25)$$

Dimana:

P_x = gaya angkat pada lantai kolam olak

W_x = kedalaman air pada kolam olak

γ = berat jenis (pasangan batu kali)

S = faktor keamanan (1,2)

