

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) atau disebut Mikrohidro adalah suatu pembangkit listrik kecil yang menggunakan tenaga air dengan kapasitas lebih dari 100 kW yang bisa berasal dari sungai, saluran irigasi, atau air terjun dengan memanfaatkan tinggi jatuh (*head*) dan debit air.

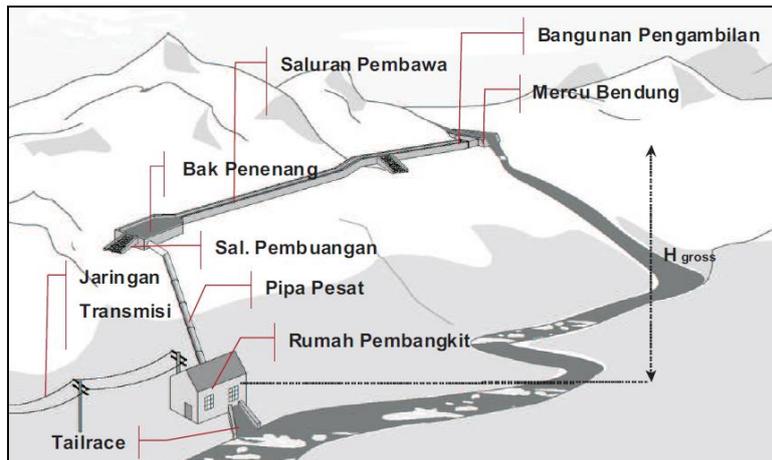
Mikrohidro merupakan sebuah istilah yang terdiri dari kata mikro yang berarti kecil dan hidro yang berarti air. Secara teknis, mikrohidro memiliki tiga komponen utama yaitu air sebagai sumber energi, turbin, dan generator. Mikrohidro mendapatkan energi dari aliran air yang memiliki perbedaan ketinggian tertentu. Pada dasarnya, mikrohidro memanfaatkan energi potensial jatuhnya air (*head*). Semakin tinggi jatuhnya air maka semakin besar energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik. (Gunawan, 2013, p.203)

Tabel 2.1
Klasifikasi PLTA

No.	Jenis PLTA	Kapasitas
1	PLTA Besar	> 100 MW
2	PLTA Menengah	15-100 MW
3	PLTA Kecil	1-15 MW
4	PLTM (Mini Hidro)	100 kW-1 MW
5	PLTMH (Mikro Hidro)	5 kW-100 kW
6	Pico Hidro	< 5 kW

Sumber : Anonim, .2003, p.16

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian dan jumlah debit air perdetik dari sungai, saluran irigasi, atau air terjun. Aliran ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik dan energi inilah yang selanjutnya menghasilkan energi listrik.



Gambar 2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Sumber: Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi, 2008, p.6

2.2 Analisa Hidrologi

Hidrologi merupakan ilmu yang berkaitan dengan sifat, fenomena, dan distribusi air di muka bumi khususnya distribusi air di daratan. Tidak terkecuali dalam program pembangunan mikrohidro yang akan dilaksanakan di berbagai wilayah, aliran air merupakan bagian yang penting dalam kehidupan, terutama lingkungan sekitar yaitu masyarakat yang berhubungan langsung dengan aliran air. Kondisi hidrologi, dalam hal ini meliputi potensi debit dan curah hujan dimana termasuk di dalamnya tentang perubahan iklim, menjadi parameter rujukan yang diperlukan untuk pengembangan mikrohidro. Kondisi ini secara alami sangat mempengaruhi skema pembangunan sistem PLTMH, dengan demikian pemilihan lokasi PLTMH dan memastikan kelayakan pembangunan PLTMH yang telah direncanakan. Faktor utama yang menjadi persoalan adalah semakin meningkatnya pembukaan lahan baru untuk tegalan dan kebutuhan lain di sekitar areal pembangunan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) terutama di daerah atau areal konservasi dan areal kawasan penyangga atau yang semakin intensif setiap tahunnya. Hal ini akan menjadi acuan untuk penghitungan ketersediaan air hingga dalam kurun waktu tertentu ke masa depan.

Hal yang perlu diperhatikan bahwa kondisi hidrologi yang kurang layak, berakibat kurangnya debit aliran akan mempengaruhi efisiensi dan daya yang dihasilkan. Termasuk dalam hal ini kondisi hidrologi yang beresiko tinggi seperti curah hujan yang berfluktuasi terlalu tinggi dan ekstrim serta potensi perubahan iklim akan menjadi hambatan serta berdampak pada peningkatan biaya dalam persiapan maupun pengolahan PLTMH yang direncanakan. (Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2A, 2009, p.5)

2.2.1 Analisa Debit Andalan (*Dependable Flow*)

Debit andalan adalah debit yang tersedia sepanjang tahun dengan besarnya resiko kegagalan tertentu yang tersedia digunakan untuk berbagai macam keperluan tertentu misalnya irigasi, PLTA, air baku, dan lain-lain. Jika debit andalan ditetapkan sebesar 80% berarti akan dihadapi resiko debit-debit lebih kecil dari debit andalan 20% pengamatan. (Soemarto, 1987, p.214)

Besarnya keandalan yang diambil untuk penyelesaian optimum penggunaan air dibeberapa macam proyek.

Tabel 2.2
Besarnya Keandalan Debit

Kebutuhan	Debit andalan (%)
Air Minum	99
Air Irigasi	95-98
Air Irigasi Daerah 1/2 Lembab	70-85
Air Irigasi Daerah Kering	80-95
PLTA	85-90

Sumber: Soemarto, 1987, p.214

Tabel 2.3
Hubungan Intensitas Curah Hujan dan Durasi Hujan

Periode Ulang	Durasi							
	1/2	3/4	1	2	3	6	12	24
Tahun	1/2	3/4	1	2	3	6	12	24
2	32	41	48	60	67	79	88	100
5	32	41	48	59	66	78	88	100
10	30	38	45	57	64	76	88	100
25	28	36	43	55	63	75	88	100
50	27	35	42	53	61	73	88	100
100	26	34	41	52	60	72	88	100
1000	25	32	39	49	57	69	88	100
PMP	20	27	34	45	52	64	88	100

Sumber: Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2A, 2009, p.33

Cara lain menghitung intensitas hujan dapat menggunakan persamaan Mononobe :

$$I = \frac{R_{24}}{t} \cdot \left[\frac{t}{24} \right]^{2/3} \dots\dots\dots (2-1)$$

Dimana:

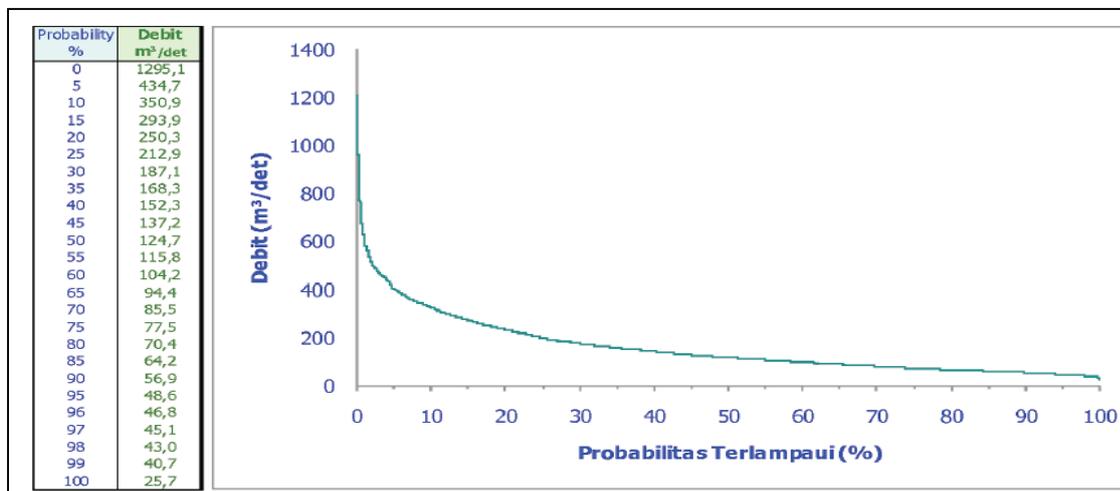
R_{24} = rata-rata hujan pada jam terpusat (mm)

t = lama hujan terpusat (jam)

2.2.1.1 Kurva Durasi Aliran (*Flow Duration Curve*)

Debit andalan pada umumnya dianalisis sebagai debit rata-rata untuk periode 10 hari, segenah bulanan atau bulanan. Kemungkinan tak terpenuhi dapat ditetapkan 20%, 30% atau nilai lainnya untuk menilai tersedianya air berkenaan dengan kebutuhan pengambilan dilakukan dengan cara data debit pencatatan pos duga muka air untuk jangka waktu tertentu disusun dari angka terbesar hingga terkecil dan tiap debit diberikan probabilitas yang dihitung dengan persamaan Weibull.

Debit perkiraan dan probabilitas digambarkan dalam *flow duration curve* yang menggambarkan probabilitas/persentase ketersediaan air pada sumbu ordinat dan besar debit andalan pada sumbu aksis. Debit andalan didapatkan dari untuk persentase keandalan yang diperlukan.



Gambar 2.2 Contoh *Flow Duration Curve*

Sumber: Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi 2A, 2009, p.22

Tabel 2.4

Kondisi Kelas Hidrologi

Durasi Aliran	Kondisi Kelas Hidrologi
0 - 10%	Aliran Tinggi
10 - 40%	Kondisi Lembab
40 - 60%	Kondisi Menengah (Normal)
60 - 90%	Kondisi Kering
90 - 100%	Aliran Rendah

Sumber : Anonim, 2007, p.23

Untuk mengetahui besarnya aliran yang mengalir pada sungai dalam satu tahun, maka kurva durasi aliran (FDC) dengan mengurutkan data debit rerata 10 harian dari terbesar hingga terkecil dan diberikan probabilitas yang dihitung menggunakan persamaan weibull, Persamaan:

$$\overline{Q_{10 \text{ harian}}} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} \dots\dots\dots (2-2)$$

$$P_w = \frac{m}{n+1} \times 100\% \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan:

$\overline{Q_{10 \text{ harian}}}$ = debit.rerata dalam 1 periode

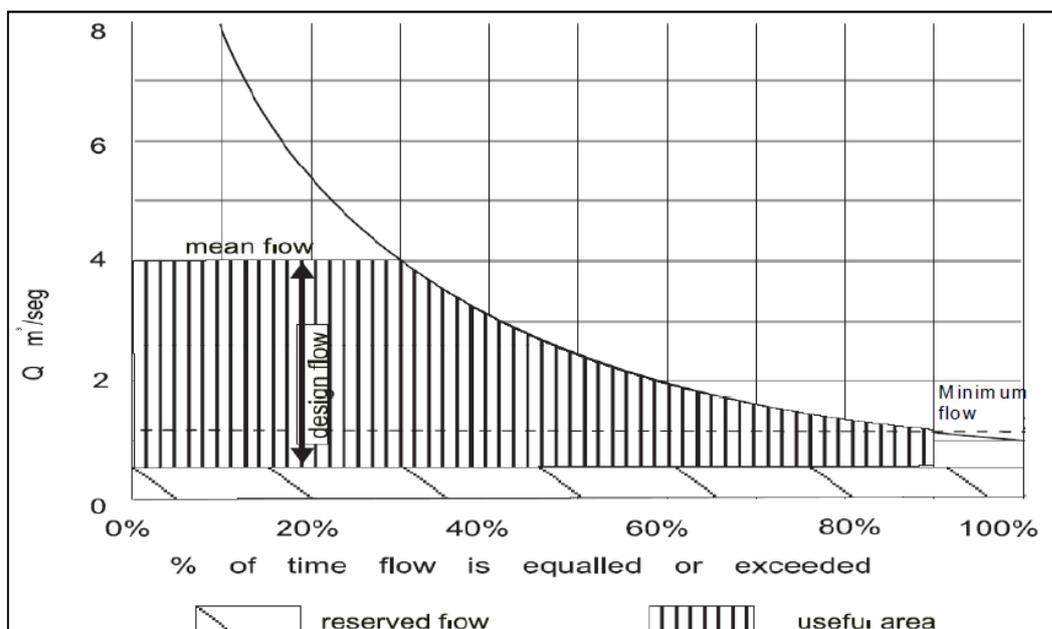
P_w = nilai probabilitas

m = data ke-n

n = jumlah data

2.3 Penentuan Debit Pembangkit

Debit desain didapatkan dari optimasi tingkatan nilai-nilai debit yang berbeda, yang akan menghasilkan nilai debit yang optimum.



Gambar 2.3 Debit Tersedia Pada Flow Duration Curve

Sumber: ESHA, 2004, p.61

Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 12 Tahun 2017 tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan untuk Penyediaan Listrik dengan kapasitas paling tinggi 10 MW untuk penyediaan listrik minimal nilai *Capacity Factor* sebesar 65%. Untuk menghitung kapasitas faktor dilakukan analisa energi secara teoritis. Menggunakan tinggi jatuh kasar dan debit andalan dari *flow duration curve*.

Jika *flow duration curve* setiap interval 5% bernilai 8760 tahun (jumlah jam dalam satu tahun), maka energi tahunan dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$E = \sum_{n=1}^{20} \left(\frac{P_{s(n-1)} + P_{sn}}{2} \right) \left(\frac{5}{100} \right) 8760 \dots\dots\dots (2-4)$$

Daya teoritis pada interval tertentu dapat dihitung dengan rumus:

$$P_n = Q_n \times \eta \times h \times g \dots\dots\dots(2-5)$$

dengan:

E = energi tahunan (kWh)

P_n = daya (kW)

Q_n = debit pada saat n ($m^3/detik$)

h = tinggi jatuh (m)

g = gaya gravitasi (m/dt^2)

n = daya dan debit pada interval tertentu

Kapasitas faktor untuk mengukur efisiensi dari suatu pembangkit listrik. Kapasitas faktor dihitung dengan energi dan daya untuk periode tertentu.

$$K = \frac{E}{8760 \times P_{desain}} \dots\dots\dots(2-6)$$

dengan:

K = kapasitas faktor (%)

E = energi tahunan (kWh)

P_{desain} = daya pada waktu Q_{desain} (kW)

Tabel 2.5
Minimum *Technical Flow* untuk Turbin

Tipe Turbin	Q_{min} (% of Q_{desain})
Francis	50
Semi Kaplan	30
Kaplan	15
Pelton	10
Turgo	20
Propeller	75

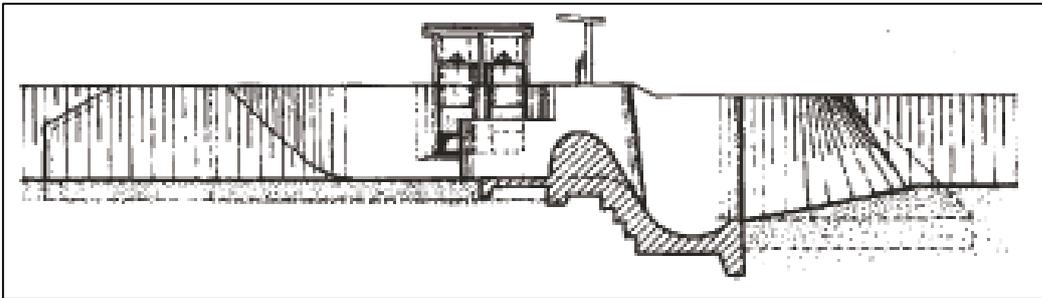
Sumber: ESHA, 2004, p.62

2.4 Analisa Hidrolika

Dalam suatu lokasi potensi Pembangkit Listrik Mikro Hidro dipetakan sebagai suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen bangunan sipil seperti bangunan pengambilan (*intake*), saluran pembawa (*headrace*), bak penenang (*forebay*), pipa pesat (*penstock channel*), dan saluran pembuang (*tail race*). Bangunan-bangunan yang akan menyalurkan debit kebutuhan yang akan di bangkitkan oleh turbin.

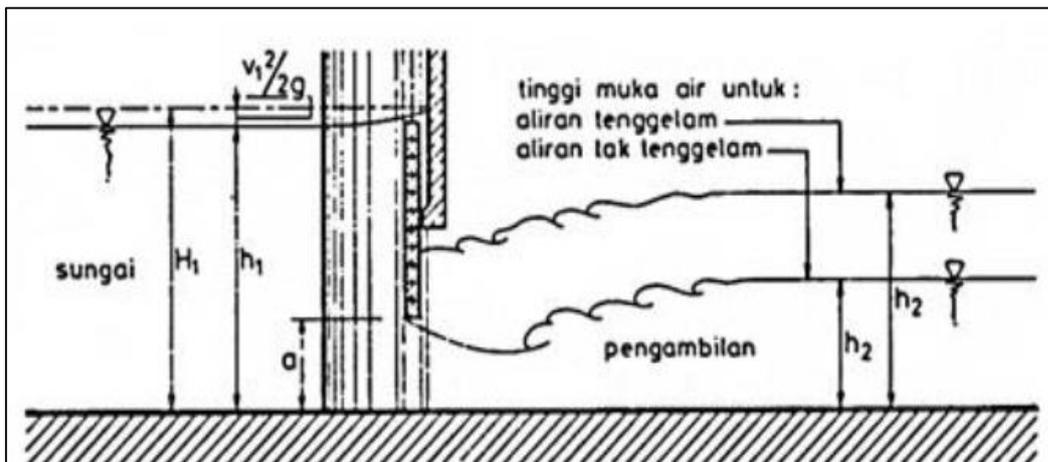
2.4.1 Bangunan Pengambilan (*Intake*)

Konstruksi bendung dilengkapi dengan bangunan pengambilan (*intake*) yang berfungsi mengarahkan air dari sungai masuk ke dalam saluran pembawa (*headrace channel*). Bangunan pengambilan (*intake*) yang berfungsi untuk menaikkan dan mengontrol aliran air sungai untuk instalasi PLTMH dengan debit yang diperlukan untuk pengolahan. (Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2B, 2009, p.6)



Gambar 2.4 Struktur Lengkap Bangunan Pengambilan (*Intake*)

Sumber: Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2B, 2009, p.8



Gambar 2.5 Aliran Di bawah Pintu Sorong dengan Dasar Horizontal

Sumber: KP-02, 1986, p.56

2.4.2 Pintu Sorong (*Sluice Gate*)

Biasanya pintu pengambilan adalah pintu sorong kayu sederhana. Bila didaerah yang bersangkutan mahal, maka dapat dipakai baja. Jika air di depan pintu sangat dalam, maka eksploitasi pintu sorong mungkin sulit. (KP-02, 2013, p.122)

Pintu sorong digunakan untuk membuka, mengatur, dan menutup aliran air di saluran baik yang terbuka maupun tertutup. Pintu sorong bentuknya sangat sederhana, untuk membuka daun pintu dilakukan dengan menggeser ke atas sedang untuk menutupnya dengan menggeser ke bawah. Banyak digunakan untuk bangunan pengambilan dengan debit air kecil. Agar mampu mengatasi tinggi muka air yang berubah-ubah di sungai, pengambilan

harus direncanakan sebagai pintu aliran bawah. Rumus debit yang digunakan adalah: (KP-02, 2013, p.108)

$$Q = K \mu a b \sqrt{2g \cdot h_1} \dots\dots\dots(2-7)$$

dengan:

Q = debit (m^3/dt)

K = faktor untuk aliran tenggelam (pada Gambar 2.6)

μ = koefisien bukaan.debit (pada Gambar 2.7)

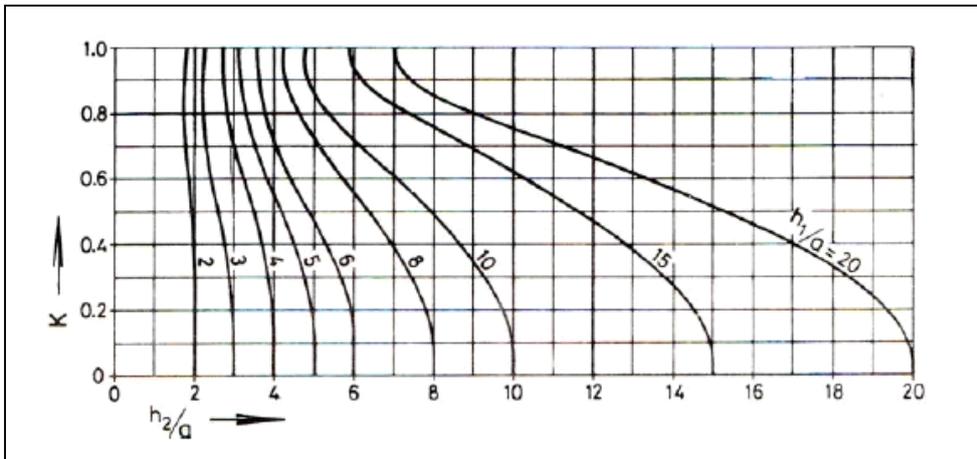
a = bukaan pintu (m)

b = lebar pintu (m)

g = percepatan gravitasi (m/dt^2) \rightarrow 9,81 m/dt^2

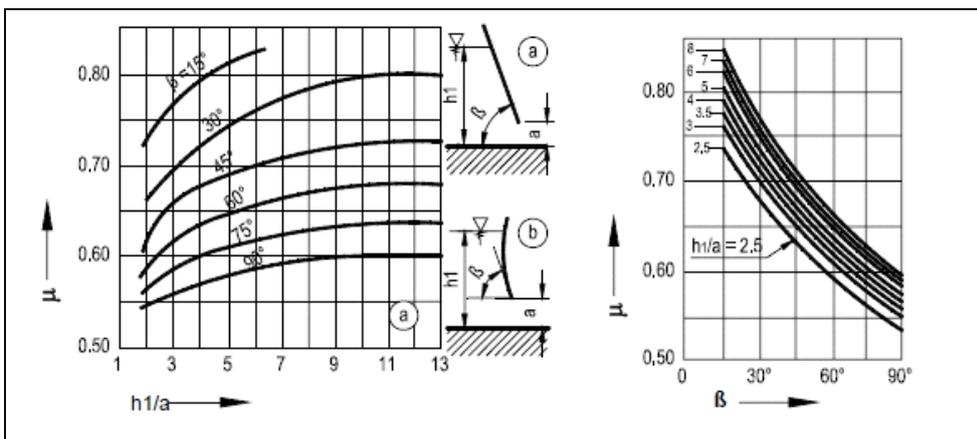
h_1 = kedalaman air di depan pintu di atas ambang (m)

h_2 = kedalaman air di belakang pintu (m)



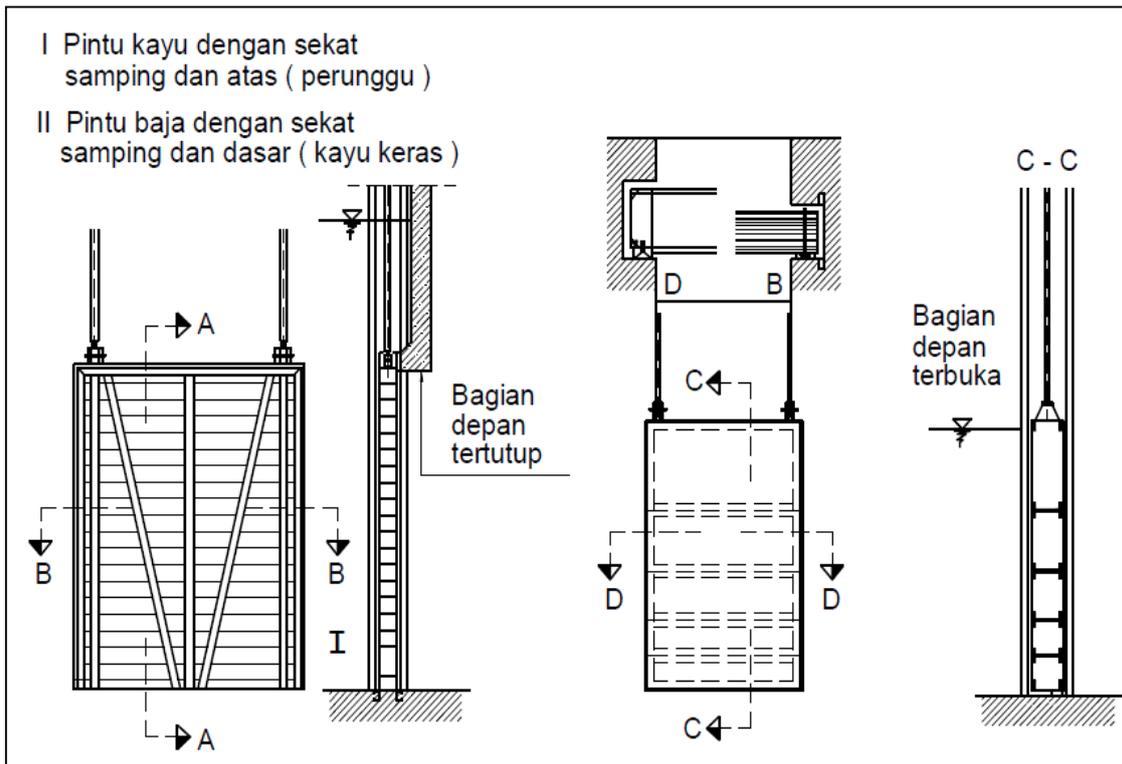
Gambar 2.6 Koefisien K untuk Debit Tenggelam

Sumber: KP-02, 1986, p.110



Gambar 2.7 Koefisien Debit μ untuk Permukaan Pintu Datar atau Lengkung

Sumber: KP-02, 1986, p.100

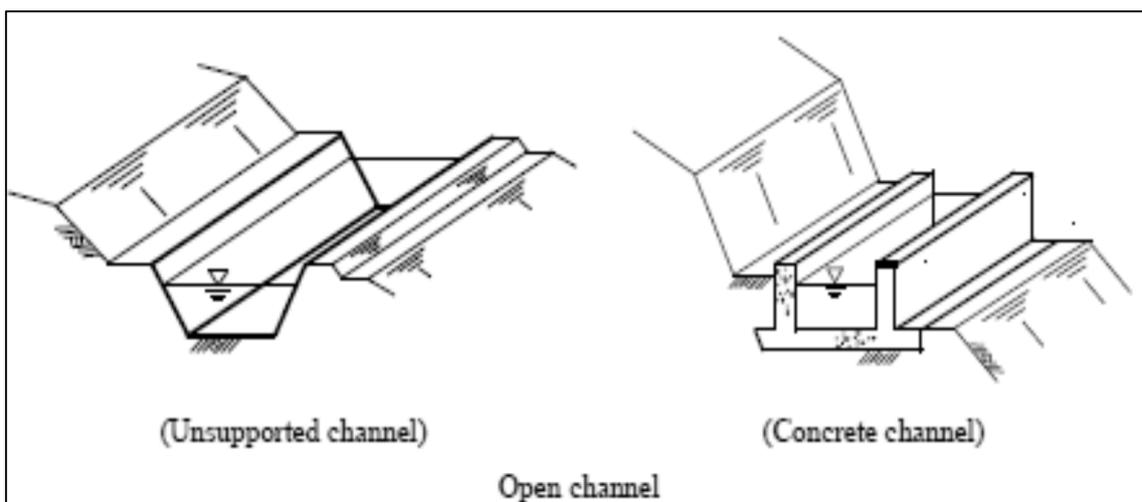


Gambar 2.8 Tipe-tipe Pintu Pengambilan Pintu Sorong dan Baja

Sumber: KP-02, 2013, p.123

2.4.3 Saluran Pembawa Air (*Headrace*)

Saluran pembawa (*Headrace*) menyalurkan air dari intake sampai ke bak penenang, atau tempat mulainya pipa pesat (*Penstock*). Saluran pembawa dapat berupa saluran terbuka, saluran tertutup atau terowongan. (Modul Pelatihan Studi kelayakan Pembangunan Mikrohidro, 2010:40)



Gambar 2.9 Tipe Saluran Pembawa Air

Sumber: JICA, 2013, p.9-11

2.4.3.1 Perhitungan Kecepatan

Debit yang melalui suatu saluran tenaga dihitung sebagai berikut:

$$Q = V \times A \quad \dots\dots\dots(2-8)$$

Kecepatan diperoleh dengan formula *Manning-Strickler*:

$$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad \dots\dots\dots(2-9)$$

dengan: ..

Q = debit (m³/dt)

V = kecepatan rata-rata (m/dt)

R = jari-jari hidrolis (m)

S = kemiringan dasar saluran

n = koefisien kekasaran

Tabel 2.6

Tipikal Nilai Koefisien Kekasaran *Manning* (n) Yang Sering Digunakan

No.	Tipe saluran dan jenis bahan	Harga n		
		Minimum	Normal	Maksimum
1.	Beton			
	▪ Gorong-gorong lurus dan bebas dari kotoran	0,010	0,011	0,013
	▪ Gorong-gorong dengan lengkungan dan sedikit kotoran/gangguan	0,011	0,013	0,014
	▪ Beton dipoles	0,011	0,012	0,014
	▪ Saluran pembuang dengan bak kontrol	0,013	0,015	0,017
2.	Tanah, lurus dan seragam			
	▪ Bersih baru	0,016	0,018	0,020
	▪ Bersih telah melapuk	0,018	0,022	0,025
	▪ Berkerikil	0,022	0,025	0,030
	▪ Berumput pendek, sedikit tanaman pengganggu	0,022	0,027	0,033
3.	Saluran alam			
	▪ Bersih lurus	0,025	0,030	0,033
	▪ Bersih, berkelok-kelok	0,033	0,040	0,045
	▪ Banyak tanaman pengganggu	0,050	0,070	0,08
	▪ Dataran banjir berumput pendek – tinggi	0,025	0,030	0,035
	▪ Saluran di belukar	0,035	0,050	0,07

Sumber: Chow, 1984, p.109

Koefisien kekasaran *strickler* (k) dan kecepatan maksimum dapat dilihat paa tabel 2.7. nilai yang diberikan sudah cukup lama digunakan konservatif, untuk konstruksi-konstruksi besar bisa menggunakan nilai yang lebih tinggi tergantung pada metode pelaksanaannya.

Tabel 2.7

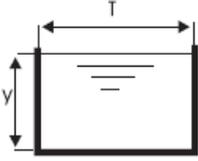
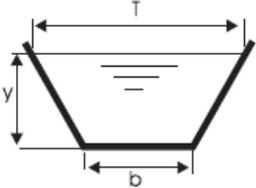
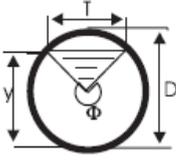
Nilai Kecepatan Maksimum dan K (*strickler*)

Bahan Konstruksi	V _{maks} , m/dt	k, m ^{1/3} /dt
Pasangan batu	2	60
Beton	3	70

Sumber: KP-03, 2013, p.68

2.4.3.2 Dimensi Saluran

Suatu saluran yang penampangnya melintangnya dibuat tidak berubah-ubah dan kemiringan dasarnya tetap, disebut saluran prismatis. Bila sebaiknya, disebut saluran tak prismatik (Chow, 1997, p.20).

			
Area A	by	$(b+zy)y$	$\frac{1}{8}(\Phi - \text{sen}\Phi)D^2$
Wetted perimeter P	$b+2y$	$b + 2y\sqrt{1+z^2}$	$1/2\phi D$
Top width of section T	b	$b+2zy$	$2\sqrt{y(D-y)}$
Hydraulic radius R	$\frac{by}{b+2y}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen}\Phi}{\Phi}\right)D$
Hydraulic depth D	y	$\frac{(b+zy)y}{b+2zy}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\Phi - \text{sen}\Phi}{\text{sen}\frac{\Phi}{2}}\right)D$
Section factor	$by^{1.5}$	$\frac{[(b+zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b+2zy}}$	$\frac{\sqrt{2}(\theta - \text{sen}\theta)^{1.5}}{32\sqrt{\text{sen}\frac{1}{2}\theta}}D^{2.5}$

Gambar 2.10 Geometri dari Beberapa Saluran Terbuka

Sumber: ESHA, 1998, p.50

Unsur-unsur geometri adalah sifat-sifat suatu penampang saluran yang dapat diuraikan seluruhnya berdasarkan geometri penampang dan kedalaman aliran. Definisi beberapa unsur geometri dasar yang terpenting diberikan di bawah ini:

- Kedalaman aliran (h) adalah jarak vertikal titik terendah pada suatu penampang saluran sampai kepermukaan bebas,
- Tarf adalah elevasi atau jarak vertikal dari permukaan bebas di atas suatu bidang persamaan. Bila titik terendah dari penampang saluran dipilih sebagai bidang persamaan, taraf ini sama dengan kedalaman aliran,
- Lebar puncak (T) adalah lebar penampang saluran pada permukaan bebas,
- Luas basah (A) adalah luas penampang melintang aliran yang tegak lurus arah aliran,
- Keliling basah (P) adalah panjang garis perpotongan dari permukaan basah saluran dengan bidang penampang melintang yang tegak lurus arah aliran,

f. Jari-jari hidrolis (R) adalah rasio luas basah dengan keliling basah,

$$R = \frac{A}{P} \dots\dots\dots(2-10)$$

g. Kedalaman hidrolis (D) adalah rasio luas basah dengan lebar puncak.

$$D = \frac{A}{T} \dots\dots\dots(2-11)$$

h. Faktor penampang untuk perhitungan aliran seragam $AR^{2/3}$.

2.4.3.3 Kemiringan Dasar Saluran

Kemiringan dasar pada saluran pembawa harus dibuat selandai mungkin untuk mengurangi kehilangan energi (perbedaan tinggi muka air di *intake* dan *forebay*), tapi hal ini akan mengurangi kecepatan dan mengakibatkan dimensi yang lebih besar. Umumnya, pada skala mikrohidro, *slope* saluran pembawa didesain antara 1/500– 1/1.500. (Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2B, 2009, p.3).

2.4.3.4 Tinggi Jagaan

Tinggi jagaan saluran adalah jarak vertikal dari puncak saluran ke permukaan air pada kondisi rancang. Jarak ini harus cukup untuk mencegah gelombang atau kenaikan muka air yang melimpah ke tepi. (Chow,1997, p.158)

Tinggi jagaan berguna untuk menaikkan muka air diatas tinggi muka air maksimum dan mencegah kerusakan tanggul saluran. Kenaikan muka air hingga diatas tinggi yang direncanakan dapat disebabkan oleh penutupan pintu secara tiba-tiba di hilir. Kenaikan muka air juga diakibatkan oleh pengaliran air buangan ke dalam saluran.

Tinggi jagaan minimum yang diberikan pada saluran primer dan sekunder dikaitkan dengan debit rencana saluran seperti pada tabel berikut:

Tabel 2.8

Tinggi Jagaan untuk Saluran Pasangan

Debit (m ³ /dt)	Tinggi Jagaan (m)
<0,5	0,40
0,5-0,15	0,50
1,5-5,0	0,60
5,0-10,0	0,75
10,0-15,0	0,85
>15,0	1,00

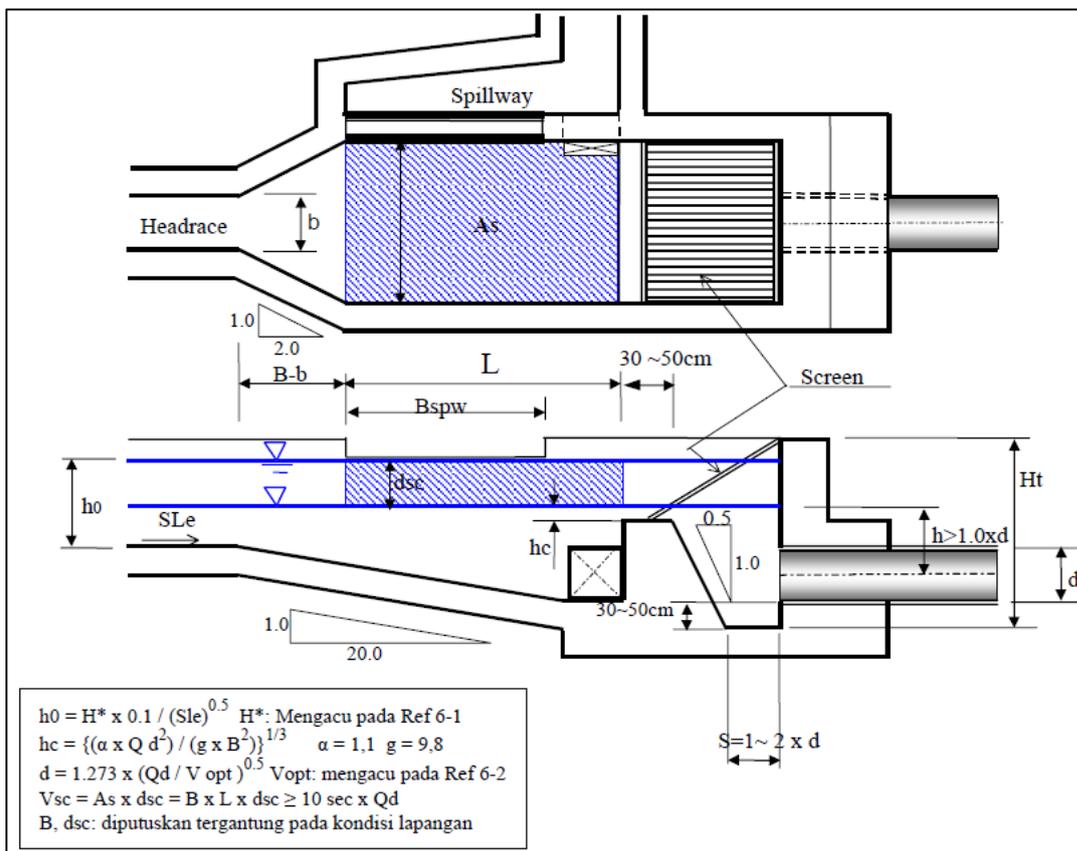
Sumber: KP-03, 2013, p.29

2.4.4 Bak Penenang (Forebay)

Saluran penghantar akan berujung pada bak penenang yang berfungsi untuk menyaring akhir dan untuk mereduksi arus turbulensi air serta kemudian mengarahkannya untuk masuk ke pipa pesat sesuai dengan debit yang diinginkan. Untuk menghemat panjang pipa pesat memang biasanya kolam atas ini diletakkan sedekat mungkin diatas *powerhouse*. (Modul Pelatihan Studi kelayakan Pembangunan Mikrohidro, 2010, pp.44-45)

Berkaitan dengan fungsi tersebut maka untuk masukan desain beberapa yang perlu dipertimbangkan adalah : (Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2B, 2009, pp.16-17)

- Pemeliharaan bak penenang terutama untuk mengontrol debit aliran, mengendalikan dan membuang sampah.
- Saat desain diperhatikan kedalaman air dan ketinggiannya dari untuk menghindarkan aliran turbulensi, umumnya bereferensi pada diameter pipa pesat .
- Dilengkapi dengan instalasi pipa lubang angin.



Gambar 2.11 Skema Bak Penenang

Sumber: JICA, 2010, pp.6-19

✓ Dimensi bak penenang:

$$V_f = A_f \times h_f \dots\dots\dots (2-12)$$

$$= B_f \times L \times (b_s + \Delta z) \dots\dots\dots (2-13)$$

dengan:

- Vf = volume desain bak
- Af = luas bak penenang
- Hf = tinggi muka air pada bak penenang
- L = panjang bak penenang
- Δz = beda tinggi

✓ Kapasitas bak penenang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V_{sc} = A_{sc} \times d_{sc} = B \times L \times d_{sc} \dots \dots \dots (2-14)$$

dengan:

- V_{sc} = Kapasitas bak penenang (m^3),
- A_{sc} = luas bak penenang (m^2)
- B = lebar bak penenang (m)
- L = panjang bak penenang (m)
- D_{sc} = kedalaman air dari kedalaman aliran yang sama dari sebuah saluran ketika menggunakan debit maksimum (h_0) menuju kedalaman kritis dari ujung tanggul untuk menjebak pasir dalam sebuah bak penenang (h_c)

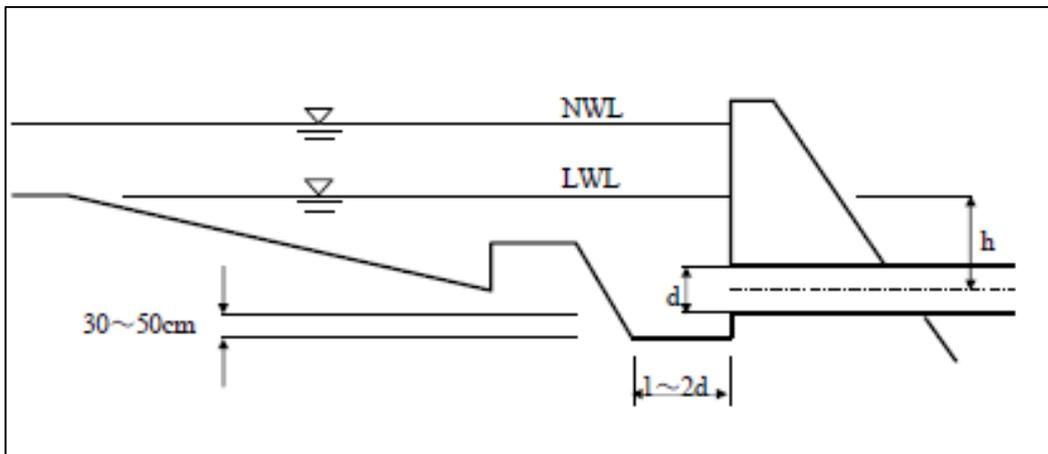
✓ Menentukan kedalaman air pada inlet penstock harus diatas nilai berikut untuk mencegah adanya aliran turbulen (JICA, 2009, pp.6-22)

$$d \leq 1,0 \text{ meter} \rightarrow h \geq 1,0 d \dots \dots \dots (2-15)$$

$$d < 1,0 \text{ meter} \rightarrow h \geq d^2 \dots \dots \dots (2-16)$$

dengan:

- h = kedalaman air dari pusat inlet ke level air terendah dari bak penenang = seluruh kedalaman air (meter)
- d = diameter dalam dari penstock (meter)



Gambar 2.12 Penampang Melintang Bak Penenang

Sumber: JICA, 2010, pp.6-22

- ✓ Menentukan Instalasi pipa lubang angin sebagai pelengkap pintu bak penenang untuk mencegah rusaknya saluran pensstock. Dalam kasus ini, formula empiris dibawah ini digunakan untuk menentukan dimensi pipa lubang angin.

$$d = 0,0068 \left(\frac{P^2 L}{H^2} \right)^{0,273} \dots\dots\dots (2-17)$$

dengan:

d = diameter dalam dari pipa lubang angin (meter)

P = nilai output dari turbin (kW)

L = panjang total pipa lubang angin (meter)

H = head (meter)

- ✓ Menentukan spillway (pelimpah) akan dipasang pada bak penenang agar kelebihan kuantitas air dialirkan ke sungai dengan aman ketika turbin dihentikan. Ukuran dari spillway ditentukan dengan persamaan berikut.

$$Qd = C \times B_{spw} \times h_{spw}^{1,5} \rightarrow h_{spw} = \left\{ \frac{Qd}{C \times B_{spw}} \right\}^{1/1,5} \dots\dots\dots (2-18)$$

Dengan

Qd = debit desain (m³/detik)

C = koefisien, biasanya C = 1,8

B_{spw} = Lebar spillway (meter)

h_{spw} = kedalaman spillway (meter)

2.4.5 Pipa Pesat (*Penstock Pipe*)

Pipa pesat (*Penstock Pipe*) adalah pipa yang berfungsi untuk mengalirkan air dari bak penenang (*forebay*) menuju ke Rumah Pembangkit (*Power House*). Perencanaan pipa pesat mencakup pemilihan material, diameter, tebal dan jenis sambungan (*coordination point*). Diameter pipa pesat dipilih dengan pertimbangan keamanan, kemudahan proses pembuatan. Ketebalan *Penstock* dipilih untuk menahan tekanan hidrolik dan *surge pressure* yang dapat terjadi. (Modul Pelatihan Studi kelayakan Pembangunan Mikrohidro, 2010, p.42)

2.4.5.1 Tebal Pipa Pesat

Untuk mendapatkan diameter pipa pesat dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$d = 2,69 \times \left(\frac{n^2 \times Q^2 \times L}{H} \right)^{1,875} \dots\dots\dots (2-19)$$

dengan:

d = diameter pipa pesat (mm)

n = nilai kekasaran Manning (untuk *welded steel* n = 0,012; PVC = 0,009)

- Q = debit pembangkit (m³/dt)
- L = panjang pipa pesat (m)
- H = tinggi jatuh total/kotor (m)

Sedangkan untuk menentukan tebal pipa pesat digunakan persamaan *Cylinder*

Formulae: (Varshney, 1977, p.411)

$$t = \frac{P \times r \times 1000}{q} \dots\dots\dots(2-20)$$

$$P = \rho \times g \times h \dots\dots\dots(2-21)$$

Dengan:

- t = tebal pipa pesat (m)
- P = gaya (ton/m²)
- r = jari-jari pipa.pesat (m)
- q = tegangan meterial pipa pesat yang digunakan (ton/m²)
- ρ = massa jenis air (ton/m³)
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²)
- H = tinggi jatuh total/kotor (m)

2.4.5.2 Diameter Pipa Pesat

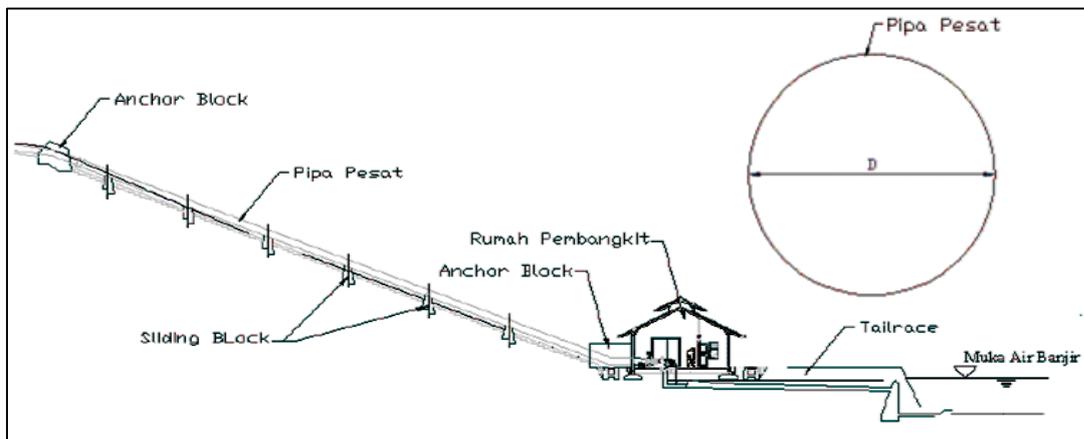
Untuk keadaan tidak ada *vortice-vortice* pada pengambilan, dua buah hubungan empiris berikut dapat digunakan:

$$d \leq 1,0 \text{ m} \longrightarrow h \geq 1,0 \text{ d} \dots\dots\dots(2-22)$$

$$d > 1,0 \text{ m} \longrightarrow h \geq d^2 \dots\dots\dots(2-23)$$

dengan:

- h = kedalaman tenggelam untuk pengambilan (m)
- d = diameter pipa pesat (m)



Gambar 2.13 Pipa Pesat (Penstock Pipe)

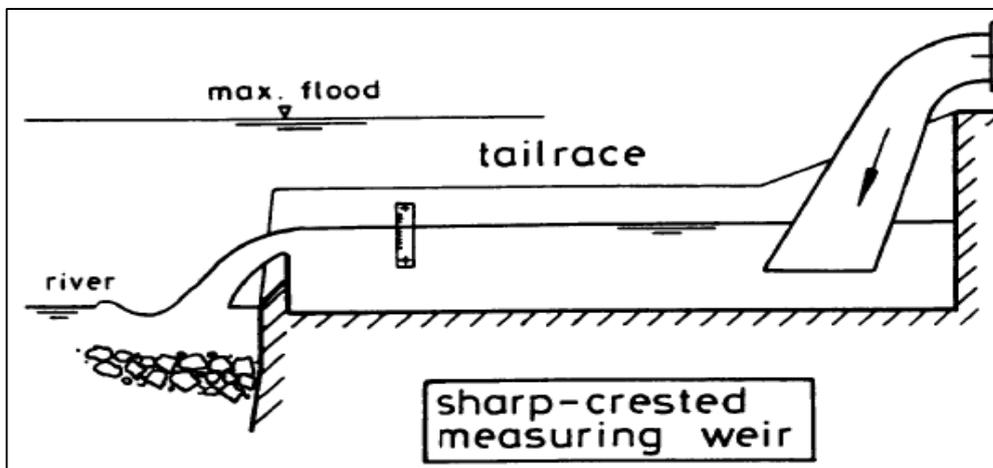
Sumber: Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi, 2008, p.69

2.4.6 Saluran Pembuang Akhir (*Tail Race*)

Saluran Pembuang (*Tile Race*) adalah sebuah saluran yang dilalui oleh air yang keluar dari turbin air, terus ke sungai. Tinggi genangan tergantung dari debit air yang keluar dari turbin, jenis penampang serta dimensi penampang saluran pembuang. Saluran pembuang mengalirkan air dari turbin kembali ke sungai. Saluran pembuang perlu didesain cukup luas agar air buangan turbin dapat mengalir dengan aman.

Jenis penampang saluran ada tiga yaitu saluran segiempat, trapesium, dan segitiga. Namun penampang saluran yang paling baik adalah penampang trapesium dan kemiringan talud dinding saluran (m) dapat diambil sebesar: (Patty, 1995, p.47)

- Saluran..tanah (1:1,5 hingga 1:2)
- Saluran pemasangan batu/beton (1:1 hingga 1:2)



Gambar 2.14 Sketsa Tailrace

Sumber: Manual on Pumps Used As Turbines, 1992, p.119

Debit air yang keluar dari turbin yang berfluktuasi mengakibatkan perubahan tinggi air dalam saluran. Dikarenakan pada *afterbay* jenis alirannya adalah turbulen, maka diperlukan beda tinggi dari *power house* ke permukaan air pada *afterbay* sebesar 30-50 cm. Tinggi permukaan air pada *afterbay* (Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2B, 2009, p.37) perubahan tinggi muka air dapat dihitung dengan menggunakan dengan rumus manning-Strickler:

$$Q = V \times A \dots\dots\dots (2-24)$$

$$V = k \times \frac{A^{2/3}}{P} \times I^{1/2} \dots\dots\dots (2-25)$$

dengan:

Q = debit air yang keluar dari turbin (m³/dt)

V = kecepatan aliran (m/dt)

- A = luas penampang saluran (m²)
- P = keliling basah saluran (m)
- I = Kemiringan saluran atau slope
- K = Koefisien kekasaran Strickler (m^{1/3}/dt)

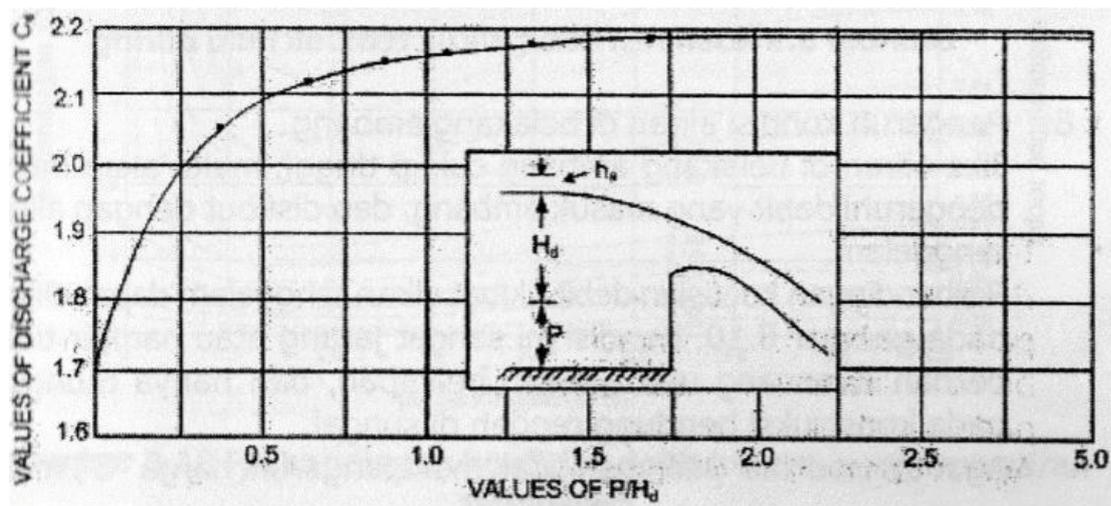
Untuk menganalisa tinggi muka air pada ambang yang digunakan untuk merencanakan elevasi dasar saluran pembuang dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q = C.B.H_e^{1.5} \dots\dots\dots(2-26)$$

dengan:

- Q = debit yang melalui ambang (m³/dt)
- C = Koefisien debit (m^{1/2}/dt)
- B = lebar ambang (m)
- H_e = tinggi muka air diatas ambang (m)

Untuk mendapatkan nilai koefisien debit (C) didapat grafik hubungan P/H_d pada ambang ogee untuk hulu vertikal dan berkisar 1,6 – 2,21. Berikut grafik hubungan P/H_d :



Gambar 2.15 Koefisien Debit (C) untuk Hulu Vertikal

Sumber: Marsevaniah, 2012, p.13

Dengan menggunakan persamaan tersebut, maka didapat mencari lengkung kapasitas ambang untuk beberapa tinggi muka air di atas ambang.

Tabel 2.9
Koefisien Kekasaran.Strickler

	kofisien kekasaran (K)	
pasangan beton	70	m(1/3)/dt
pasangan batu	60	m(1/3)/dt
pasangan tanah	35-45	m(1/3)/dt
forrocement	70	m(1/3)/dt

Sumber: KP-03, 2013, p.72

2.4.7 Kehilangan Tinggi Tekan Aliran

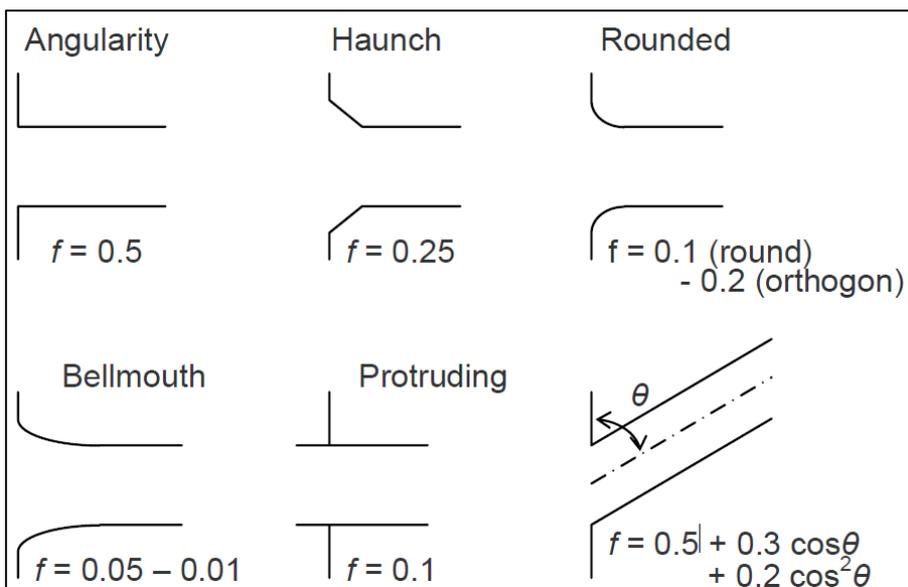
Kehilangan tinggi tekan aliran adalah menurunnya besaran energi akibat gesekan maupun kontraksi yang terjadi selama proses pengaliran. Dalam perhitungan kehilangan tinggi tekan pada perencanaan sistem pembangkit listrik tenaga mikrohidro dapat dibedakan menjadi 2 yaitu kehilangan tinggi pada saluran terbuka dan kehilangan tinggi pada saluran tertutup.

a) Kehilangan pada bangunan pengambilan dihitung dengan persamaan: (Liu, 2003, p.32)

$$h_l = f \times \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2-27)$$

dengan:

- h_l = jumlah kehilangan tinggi (m)
- f = nilai koefisien kehilangan tinggi
- V = kecepatan aliran (m/dt)
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²)



Gambar 2.16 Koefisien Dari Aliran Yang Berkurang Pada Berbagai Bentuk Pemasukan

Sumber: Manual Perencanaan PLTMH, JICA, 2010, p.6-10

b) Kehilangan tinggi tekan akibat belokan *intake*

$$h_l = f \times \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2-28)$$

dengan:

- h_l = jumlah kehilangan tinggi tekan akibat belokan *intake* (m)
- f = nilai koefisien kehilangan tinggi
- V = kecepatan aliran (m/dt)
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²)

c) Kehilangan tinggi tekan akibat pelebaran saluran menuju *forebay*

$$h_l = f \times \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(2-29)$$

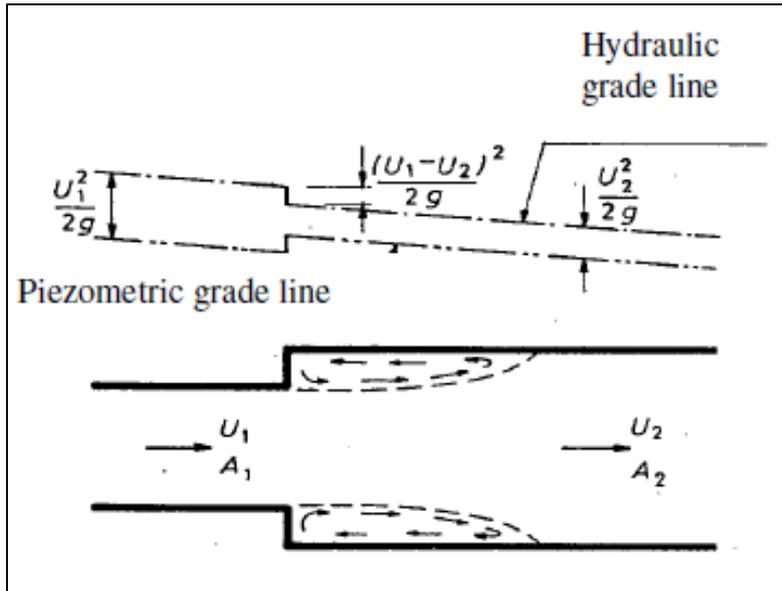
dengan:

h_l = jumlah kehilangan tinggi tekan akibat pelebaran saluran menuju *forebay* (m)

f = nilai koefisien kehilangan tinggi

V = kecepatan aliran (m/dt)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²)



Gambar 2.17 Sketsa Situasi Kehilangan Tinggi Akibat Penyempitan Dan Pelebaran

Sumber: Ramos, 2000, p.64

$$\xi = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \dots\dots\dots(2-30)$$

dengan:

ξ = koefisien

A = luas penampang (m²)

d) Kehilangan tinggi tekan akibat saringan (*trashrack*) (Sosrodarsono, 1989, p.244).

$$h_s = \beta \cdot \sin \alpha \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3} \cdot \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(2-31)$$

dengan:

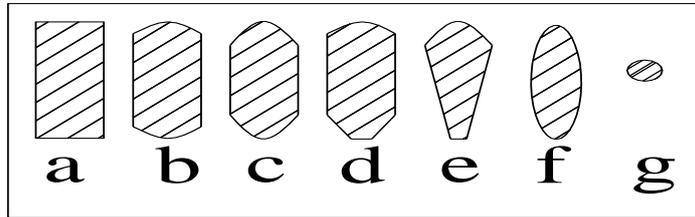
h_s = kehilangan tinggi energi

V = kecepatan datang (m/dt)

g = percepatan gravitasi (9,81 m²/dt)

β = Koefisien Penampang Lintang Kawat-Kisi

- α = sudut kemiringan horizontal dalam derajat
- t = tebal jeruji (m)
- b = jarak bersih antar jeruji b ($b > 50$ mm) (m)



Gambar 2.18 Profil Kisi Saringan

Sumber: Patty, 1995, p.40)

Faktor bentuk profil kisi saringan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.10
Profil Kisi Saringan

Profil	a	b	c	d	e	f	g
ϕ	2,42	1,83	1,67	1,03	0,92	0,76	1,79

Sumber: Patty, 1995:40

Untuk kehilangan tinggi tekan pada saluran tertutup dapat dibagi menjadi kehilangan tinggi mayor dan minor. Kehilangan tinggi mayor disebabkan oleh gesekan yang terjadi didalam pipa akibat kekasaran pipa.

e) Kehilangan tinggi tekan akibat pipa pesat

❖ Pada lubang pemasukan pipa

Kehilangan tinggi tekan akibat pemasukan pipa dengan persamaan sebagai berikut:

$$h_f = \xi \times \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2-32)$$

dengan:

h_f = Kehilangan tinggi tekan akibat pemasukan pipa (m)

ξ = koefisien berdasarkan bentuk pemasukan

V = kecepatan aliran (m/dt)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²)

❖ Pada tikungan atau belokan pipa pesat

$$h_f = \xi \times \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2-33)$$

dengan:

h_f = Kehilangan tinggi tekan akibat pemasukan pipa (m)

ξ = koefisien berdasarkan bentuk pemasukan

V = kecepatan aliran (m/dt)

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

❖ Kehilangan tinggi tekan akibat gesekan

Besarnya kehilangan tinggi mayor pada saluran tertutup dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$h_g = f \times \frac{L_p}{d} \times \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(2-34)$$

$$f = \frac{124,5 \times n^2}{d^{1/3}} \dots\dots\dots(2-35)$$

dengan:

h_g = kehilangan tinggi akibat gesekan (m)

f = koefisien diameter pada pipa pesat *Darcy-Weisback*

L_p = panjang pipa pesat (m)

V = kecepatan aliran pada pipa pesat (m/dt)

d = diameter dalam pipa (m)

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

n = koefisien kekasaran (untuk *weldeed steel* $n = 0,012$; PVC = 0,009)

Sedangkan perhitungan kehilangan tinggi minor dapat dihitung dengan persamaan berikut: (Ramos, 2000, p.64)

$$h_f = \xi \times \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(2-36)$$

dengan:

ξ = koefisien berdasarkan kontraksi

V = kecepatan masuk (m/detik)

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

Nilai ξ dapat ditentukan berdasarkan jenis kontraksi atau hambatan yang terjadi pada pengaliran, berikut jenis kontraksi dan hambatan yang diperhitungkan: (Ramos, 2000, p.64).

❖ Kehilangan tinggi tekan akibat pemasukan katup pada pipa pesat:

$$H_f = k \times \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(2-37)$$

h_f = Kehilangan tinggi tekan akibat katup pada pipa pesat (m)

ξ = koefisien berdasarkan bentuk katup

V = kecepatan aliran (m/dt)

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

2.4.8 Tinggi Jatuh Efektif (H_{eff})

Tinggi jatuh efektif adalah selisih antara elevasi muka air pada bangunan pengambilan atau waduk (EMAW) dengan *tail water level* (TWL) dikurangi dengan total kehilangan tinggi tekan (Ramos, 2000, p.57).

Persamaan tinggi jatuh efektif adalah:

$$H_{eff} = EMAI - TWL - H_{loss} \dots\dots\dots (2-38)$$

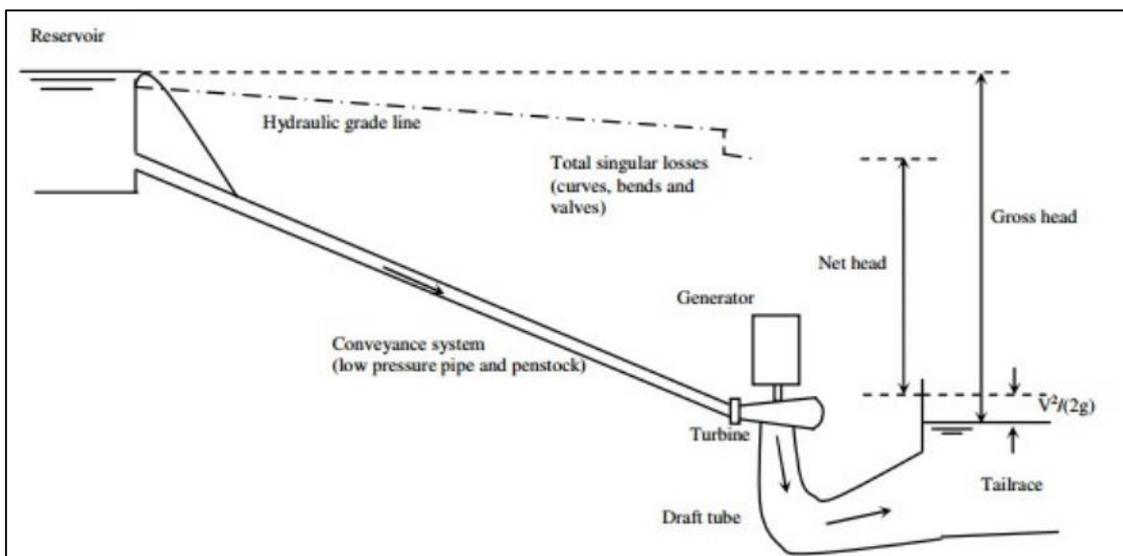
dengan:

H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

EMAW = elevasi muka air waduk atau hulu bangunan pengambilan (m)

TWL = *tail water level* (m)

H_{loss} = total kehilangan tinggi tekan (m)



Gambar 2.19 Sketsa Tinggi Jatuh efektif

Sumber: Ramos, 2000, p.61)

2.5 Analisa Mekanikal Elektrikal

Mekanikal elektrikal dilakukan dengan tujuan untuk memilih jenis turbin dan komponene elektrikal yang sesuai sehingga dapat dioperasikan dengan baik sesuai umur teknis dan mudah dioperasikan oleh operator lokal yang terlatih. (Modul Pelatihan Studi kelayakan Pembangunan Mikrohidro, 2010, p.46)

2.5.1 Turbin Air

Turbin air berperan untuk mengubah energi air (energi potensial, tekanan dan energi kinetik) menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Putaran poros turbin ini akan diubah oleh generator menjadi tenaga listrik. Berdasarkan prinsip kerjanya, turbin air dibagi menjadi kelompok yang ditunjukkan Tabel 2.5.

Tabel 2.11
Jenis Turbin

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

Sumber: Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2C, 2009, p.8

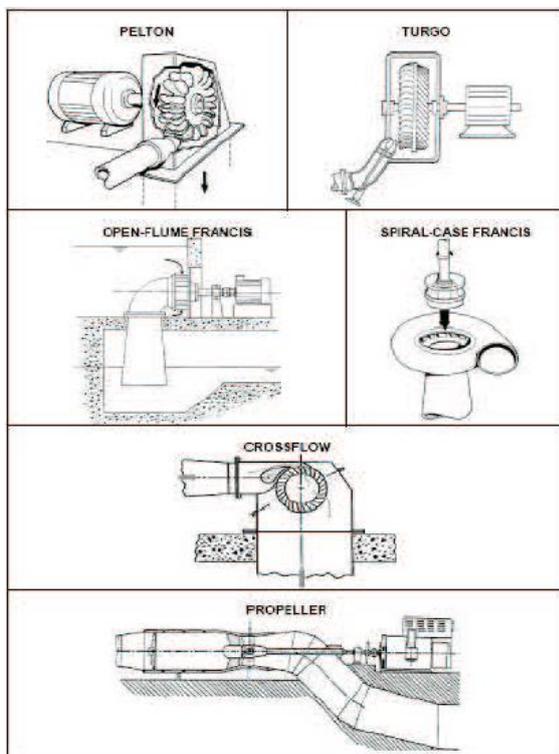
Cara kerja kedua tipe turbin tersebut diuraikan sebagai berikut:

- Turbin Impuls

Merupakan turbin yang dibuat sedemikian sehingga rotor (*runner*) bekerja karena aliran air, di sini beda tinggi diubah menjadi kecepatan karena perbedaan tinggi. Turbin jenis ini meliputi *crossflow*, *pelton*, dan *turgo*, menggunakan tekanan yang sama pada setiap sisi sudut gerakanya dimana bagian turbin yang berputar.

- Turbin Reaksi

Turbin ini meliputi jenis *francis* dan *kaplan/propeller*, menggunakan energi kinetik dan tekanan dikonversikan di *runner*. Secara umum, jenis turbin ini tidak menerima tumbukan dan hanya mengikuti aliran air.



Gambar 2.20 Jenis Turbin

Sumber: Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2C, 2009, p.9

2.5.1.1 Pemilihan Tipe Turbin Air

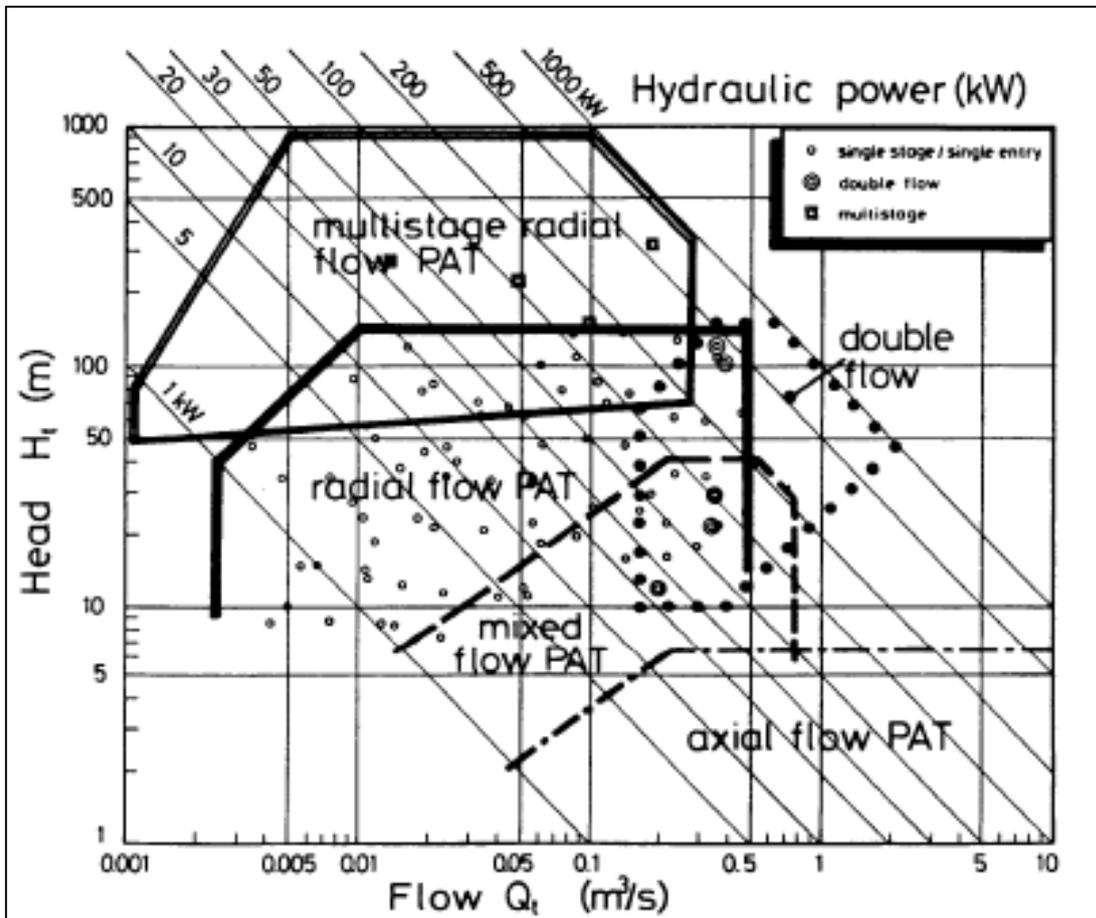
Pemilihan turbin air berdasarkan tinggi jatuh pada lokasi, sehingga didapatkan dari grafik atau tabel yang sudah ditentukan.

Tabel 2.12

Klasifikasi Tinggi Jatuh

Jenis Turbin	Variasi Head (m)
<i>Kaplan dan Propeller</i>	$2 < H < 20$
<i>Francis</i>	$10 < H < 350$
<i>Pelton</i>	$50 < H < 1000$
<i>Crossflow</i>	$6 < H < 100$
<i>Turgo</i>	$50 < H < 250$

Sumber: Modul Pelatihan Studi kelayakan Pembangunan Mikrohidro, 2010, p.47



Gambar 2.21 Grafik Pemilihan Turbin

Sumber: *Manual On Pumps Used As Turbines*, 1992, p.15)

Perancangan dan pemilihan sebuah turbin air yang baik tergantung pada:

1. Head yang tersedia
2. Daya yang diharapkan sesuai debit dan head yang tersedia
3. Putaran turbin yang akan diteruskan ke generator

2.5.1.2 Karakteristik Turbin Air

Metode yang sering dipakai untuk memilih jenis turbin air adalah dengan menentukan kecepatan spesifiknya. Kecepatan spesifik (N_s), merupakan suatu istilah yang dipakai untuk mengelompokkan turbin-turbin atas dasar unjuk kerja dan ukuran perimbangannya. (Modul Pelatihan Studi kelayakan Pembangunan Mikrohidro, 2010, p.56)

Kecepatan spesifik (*Specific speed*) adalah kecepatan turbin model (turbin dengan bentuk sama tetapi skalanya berlainan), yang bekerja pada tinggi satu-satuan jatuh dan dengan debit satu-satuan debit dan menghasilkan daya (*output*) satu-satuan daya. Rumus yang digunakan untuk menentukan N_s (kecepatan spesifik) adalah sebagai berikut (Dandekar, 1991, p.397):

$$n_{QE} = \frac{2,294}{H^{0,486}} \dots\dots\dots(2-39)$$

$$n = \frac{n_{QE} \times E^{3/4}}{\sqrt{Q}} \dots\dots\dots(2-40)$$

$$n_{max} = 3,2 \times n \dots\dots\dots(2-41)$$



Gambar 2.22 Turbin Jenis Axial Flow PAT

Sumber: *Electway Electric*, 2013

- Menentukan Diameter Luar Sudu Turbin

$$D_e = 84,5 \times (0,79 + 1,602 \times n_{QE}) \times \frac{\sqrt{H_n}}{60 \times n} \dots\dots\dots(2-42)$$

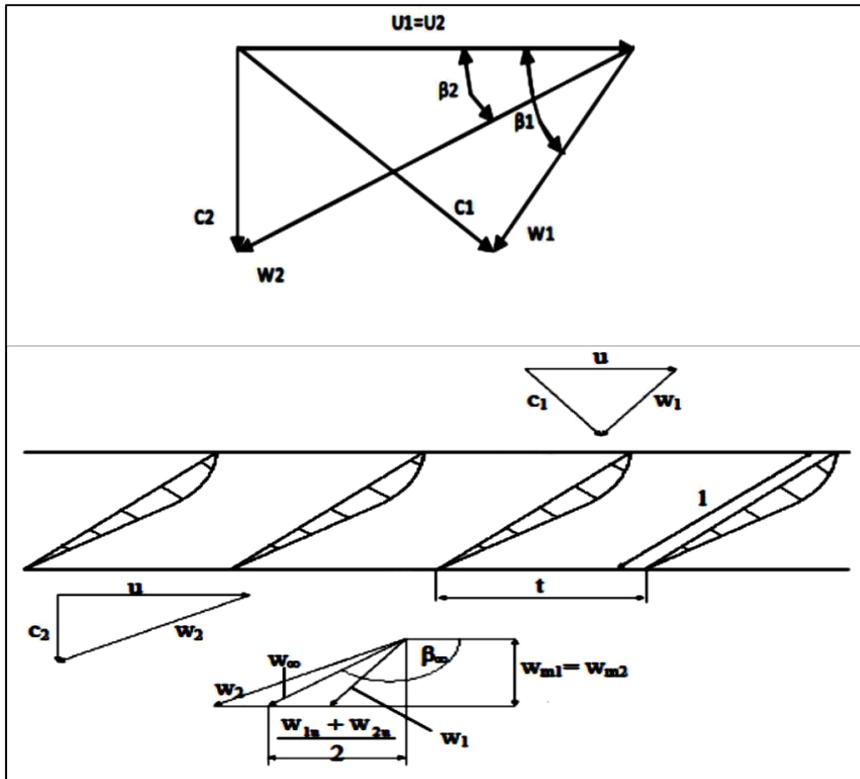
- Menentukan diameter dalam turbin

$$D_i = (0,25 + \frac{0,0951}{n_{QE}}) D_e \dots\dots\dots(2-43)$$

2.5.1.3 Dimensi Sudu Turbin

2.5.1.3.1 Segitiga Kecepatan

Segitiga kecepatan, yang terjadi pada sudu mempunyai peran penting dalam menentukan kelengkungan sudu, dalam Gambar (2.10) ditunjukkan segitiga kecepatan.



Gambar 2.23 Segitia Kecepatan

Sumber: Anonim, 2015, p.15)

$$u = \pi \times n \times d \dots\dots\dots (2-44)$$

$$C_{u1} = \frac{H_1 \times g}{u} \dots\dots\dots (2-45)$$

$$W_{u1} = C_{u1} - u \dots\dots\dots (2-46)$$

$$W_u = \frac{W_{u1} + W_{u2}}{2} \dots\dots\dots (2-47)$$

$$W_m = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (2-48)$$

$$W = \sqrt{W_u^2 + W_m^2} \dots\dots\dots (2-49)$$

$$\beta = \text{arc Cos} \frac{W_u}{W} \dots\dots\dots (2-50)$$

dimana:

U1 = kecepatan tengensial air masuk sudu (m/s)

W1 = kecepatan relatif air masuk sudu (m/s)

C1 = kecepatan mutlak air masuk sudu (m/s)

- U2 = kecepatan tengensial air keluar sudu (m/s)
 W2 = kecepatan relatif air keluar sudu (m/s)
 C2 = kecepatan mutlak air keluar sudu (m/s)

2.5.1.3.2 Menentukan Dimensi Utama Sudu

Untuk menentukan dimensi utama sudu adalah sebagai berikut:

- Langkah 1

Koefisien gaya angkat untuk setiap radius dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\xi_a = \frac{W_2^2 - W_\infty^2 + 2 \times g \times \left(\frac{p}{\gamma} - H_s - \frac{P_{min}}{\gamma} - \gamma_s - \eta_s \times \left(\frac{c_3^2 - c_4^2}{2g} \right) \right)}{k \times W_\infty^2} \dots\dots\dots(2-51)$$

dimana:

- P_{atm} = Tekanan atmosfer (m),
 H_s = Tinggi hisapan (m),
 P_{min} = Tekanan minimal air (m),
 H_s = Efisiensi energi (m),
 c₃ = Kecepatan keluaran sudu (m/s),
 c₄ = Kecepatan keluaran (m/s),
 K = Nomor karakteristik Profil

Nilai-nilai lain harus diasumsikan tetapi bisa ditemukan dalam referensi dimana rentang untuk nilai-nilai yang diberikan ini adalah sebagai berikut, P_{min} = 2 - 2,5, η_s = 0,88 - 0,91, K = 2,6 - 3.

- Langkah 2: Perbandingan l/t (Panjang Sudu Gerak dengan Jarak Antara Sudu)

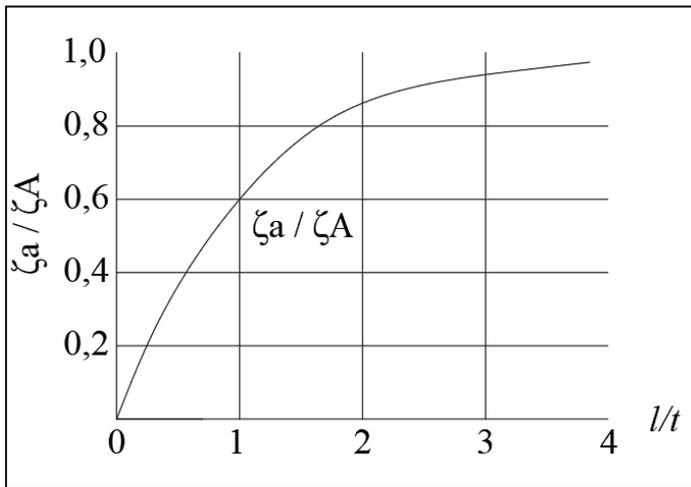
Ketika koefesien angkat diketahui untuk menentukan ketebalan sudu, maka perbandingan l/t dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\frac{l}{t} = \frac{\eta \times g \times H}{W_\infty} \times \frac{c_m}{u} \times \frac{\cos \lambda}{\sin(180 - \beta - \lambda)} \times \frac{1}{\xi_a} \dots\dots\dots(2-52)$$

Dalam persamaan di atas, sudut luncur (λ) harus diasumsikan, kisaran untuk asumsi sudut luncur adalah λ = 2,5° ÷ 3°. Dengan menggunakan asumsi ini, perkiraan nilai rasio l/t dapat dibentuk.

- Langkah 3: Perhitungan Koefisien Gaya Angkat ζ

Nilai timbal balik dari perbandingan l/t harus ditetapkan. Melalui nilai timbal balik, rasio koefisien gaya angkat ζ_a/ζ_A dapat dibaca dalam mengikuti Gambar (2.24) Menggunakan rasio ini maka koefisien ζ_A dapat dibentuk

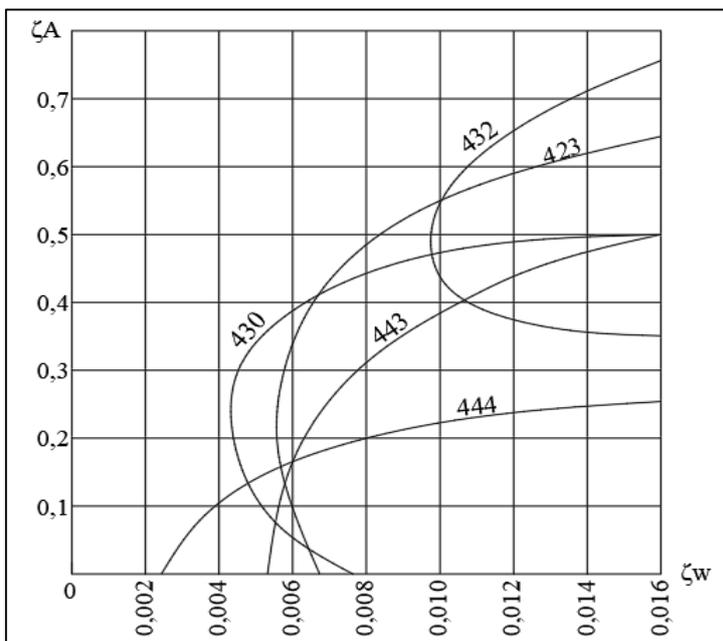


Gambar 2.24 Grafik Menentukan Nilai ζ_a / ζ_A

Sumber: Anonim, 2015, p.17)

- Langkah 4: Perhitungan Koefisien Gaya Gesek (ζ_W)

Grafik pada gambar berikut memberikan informasi tentang hambatan koefisien gaya gesek (ζ_W) dari profil yang berbeda. Profil sudu dapat dipilih berdasarkan tingkat kesulitan dari bentuk sudu tersebut dan berdasarkan dimensi turbin yang direncanakan, dapat dilihat pada Gambar (2.25)



Gambar 2.25 Grafik Untuk Menentukan Profil Yang Akan Digunakan

Sumber: Anonim, 2015, p.18)

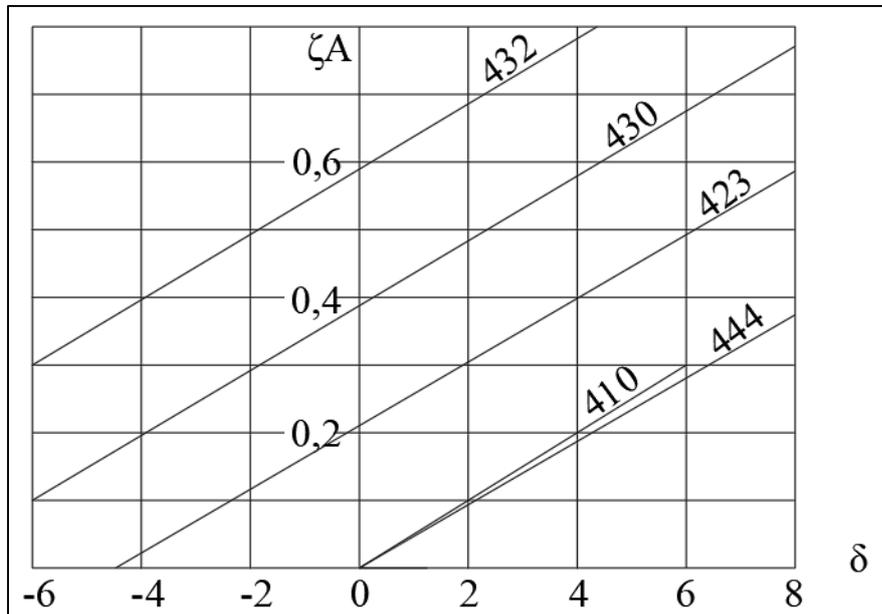
- Langkah 5: Perhitungan Sudut Luncur (λ)

Sudut luncur dihitung untuk menentukan ketebalan dari diameter dalam sudu turbin, digunakan persamaan berikut:

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{\zeta_w}{\zeta_A} \dots\dots\dots (2-53)$$

- Langkah 6: Perhitungan Sudut Serang (δ)

Sudut serang dihitung untuk menentukan ketebalan dari diameter luar sudu turbin, untuk menentukan ketebalan dari sudu turbin maka dapat digunakan dari Gambar (2.26)



Gambar 2.26 Grafik Untuk Menentukan Sudut Serang

Sumber: Anonim, 2015, p.18)

2.5.2 Generator

Generator merupakan komponen yang berfungsi merubah energi mekanik berupa putaran menjadi energi listrik. Generator diputar oleh turbin melalui kopel langsung atau melalui puley dan sabuk (*belt*). Ada dua jenis generator yang banyak digunakan untuk PLTMH yaitu generator sinkron dan motor induksi sebagai generator (generator induksi). (Modul Pelatihan Studi kelayakan Pembangunan Mikrohidro, 2010, p.54)

Tabel 2.13

Pemilihan Generator berdasarkan Daya

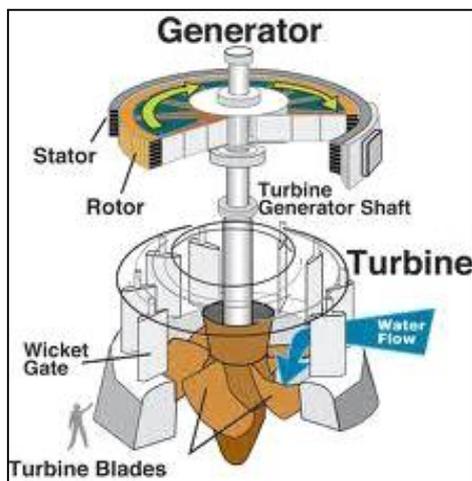
Daya Terpasang	< 10 kW	10 – 30 kW	> 30 kW
Tipe Generator	Sinkron atau asinkron, satu atau tiga fasa	Sinkron atau asinkron 3 fas	Sinkron 3 fasa
Fasa	1 atau 3	3	3

Sumber: Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Buku 2C, 2009, p.25)

Tabel 2.14
Efisiensi .Generator

Rated Power (kW)	Best Efficiency
10	0,91
50	0,94
100	0,95
250	0,955
500	0,96
1000	0,97

Sumber: Ramos (2000, p.187)



Gambar 2.27 Generator

Sumber: wikipedia.org

2.5.3 Perhitungan Daya dan Energi

Keuntungan suatu proyek pembangkit listrik tenaga mikrohidro ditentukan dari besarnya daya yang dibangkitkan dan jumlah energi yang dibangkitkan tiap tahun. Jika tinggi efektif maksimum adalah $H_{eff}(m)$, debit maksimum turbin adalah $Q (m^3/dt)$, efisiensi dari turbin dan generator masing-masing adalah η_t dan η_g maka daya atau tenaga yang dibangkitkan oleh suatu pembangkit listrik tenaga mikrohidro dapat dihitung dengan persamaan (Arismunandar, 2004, p.19):

$$\text{Daya teoritis} = 9,81 \times Q \times H_{eff} \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2-54)$$

$$\text{Daya turbin} = 9,81 \times \eta_t \times Q \times H_{eff} \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2-54)$$

$$\text{Daya generator} = 9,81 \times \eta_g \times \eta_t \times Q \times H_{eff} \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2-55)$$

dengan:

P = Daya yang dihasilkan (kW)

η_g = Efisiensi Turbin

η_t = Efisiensi Generator

P = massa jenis air = 1000 (kg/m³)

Q = debit pembangkit (m³/dt)

H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

Perhitungan produksi energi tahunan dengan memperhitungkan banyaknya daya yang dihasilkan per satuan waktu dalam kurun waktu satu tahun. Perhitungan banyaknya energi yang dihasilkan pembangkit dalam satu tahun menggunakan persamaan berikut:

$$E = P \times 24 \times n \dots \dots \dots (2-56)$$

dengan:

E = Energi yang dihasilkan (kWH)

P = daya yang dihasilkan (kW)

n = Jumlah hari

2.5.4 Perhitungan Energi Listrik

Apabila perhitungan operasi telah selesai, maka besarnya jumlah energi tahunan yang dihasilkan oleh PLTMH dapat dihitung dengan persamaan:

$$E = \sum p \times n_g \times N_s \dots \dots \dots (2-57)$$

dimana:

E = energi listrik (kWH)

$\sum p$ = daya yang dibangkitkan turbin (w)

n_g = efisiensi generator

N_s = jumlah hari dalam setahun = 365

Sedangkan untuk mendapatkan energi andalan yang dapat dibangkitkan dalam setiap operasi, maka energi total yang didapat tersebut harus dikalikan peluang kejadian debit.

2.6 Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Menurut Firmansyah (2011, p.25) dalam buku Rancang Bangun Aplikasi Rencana Anggaran Biaya Dalam Pembangunan Rumah. Rencana Anggaran Biaya (RAB) merupakan perhitungan banyaknya biaya yang diperlukan untuk bahan dan upah, serta biaya-biaya lain yang berhubungan dengan pelaksanaan proyek pembangunan.

Adapun rumus empiris yang digunakan untuk memperkirakan besarnya biaya yaitu sebagai berikut (Anonim dalam RETScreen, 2005, p.42) :

1. Biaya Teknis/Engineering (C1)

Biaya Teknis/engineering merupakan biaya yang diperlukan untuk jasa konsultasi dan jasa konstruksi persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut :

$$C1 = 0,37 \cdot n^{0,1} \cdot E \cdot \left(\frac{MW}{Hg^{0,8}}\right)^{0,54} \cdot 10^6 \dots \dots \dots (2-58)$$

dengan:

C1 = estimasi biaya *engineering* (\$ Kanada)

n = jumlah turbin

E = *engineering cost factor* (0,67 jika ada bendung, 1 jika tidak ada)

MW = total kapasitas terpasang (MegaWatt)

Hg = tinggi jatuh kotor (meter)

2. Biaya peralatan hidromekanik (C2)

Biaya peralatan hidromekanik terdiri dari biaya generator, turbin dan governor, adapun persamaan empiris yang digunakan yaitu sebagai berikut :

$$C2 = CG + CT$$

Generator

$$CG = 0,82 n^{0,98} G \cdot Cg \left(\frac{MW}{Hg^{0,28}} \right)^{0,9} \cdot 10^6 \dots\dots\dots (2-59)$$

Turbin Kaplan

$$CT = 0,27 n^{0,96} \cdot Jt \cdot Kt \cdot d^{1,47} (1,17Hg^{0,12} + 2) \cdot 10^6 \dots\dots\dots (2-60)$$

Turbin Francis

$$CT = 0127 n^{0,96} \cdot Jt \cdot Kt \cdot d^{1,47} ((13 + 0,01Hg^{0,3}) + 3) \cdot 10^6 \dots\dots\dots (2-61)$$

Turbin Propeller

$$CT = 0,125 n^{0,96} \cdot Jt \cdot Kt \cdot d^{1,47} (1,17Hg^{0,12} + 4) \cdot 10^6 \dots\dots\dots (2-62)$$

Turbin turgo atau pelton

$$CG = 3,47 n^{0,96} \left(\frac{MWu}{Hg^{0,5}} \right)^{0,44} \cdot 10^6 \text{ jika } \left(\frac{MWu}{Hg^{0,5}} \right) > 4 \dots\dots\dots (2-63)$$

$$CG = 5,34 n^{0,96} \left(\frac{MWu}{Hg^{0,5}} \right)^{0,91} \cdot 10^6 \text{ jika } \left(\frac{MWu}{Hg^{0,5}} \right) < 4 \dots\dots\dots (2-64)$$

Turbin crossflow

$$CT = \frac{\text{biaya turbin pelton}}{\text{biaya turbin turgo}} \times 0,5 \dots\dots\dots (2-65)$$

dengan,

C2 = estimasi biaya hidromekanik (\$ Kanada)

CG = biaya generator (\$ Kanada)

CT = biaya turbin dan governor (\$ Kanada)

G = faktor koneksi grid (0,9 untuk central grid)

Cg = faktor motor generator kecil (0,75 jika MW < 10, 1 jika MW > 10)

Jt = faktor peningkatan tinggi jatuh (1 jika H < 25 meter, 1,1 jika H > 25 meter)

Kt = faktor penurunan diameter kecil (0,9 jika d < 1,8 meter, 1 jika d > 1,8 meter)

d = diameter runner turbin (meter)

Mwu = kapasitas daya tiap turbin (Megawatt)

3. Biaya instalasi peralatan hidromekanik (C3)

Dalam pemasangan peralatan hidromekanik diperlukan biaya khusus, persamaan empiris dalam menentukan biaya tersebut adalah sebagai berikut:

$$C3 = C2 \times 0,15 \dots\dots\dots(2-66)$$

dengan:

C3 = estimasi biaya instalasi hidromekanik (\$kanada)

C2 = biaya peralatan hidromekanik (\$kanada)

4. Biaya instalasi peralatan hidromekanik (C4)

Dalam pembangunan PLTM/PLTMH terdapat pula pembangunan jaringan transmisi listrik, persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut :

$$C4 = 0,0011 D P l t^{0,95} V \times 10^6 \dots\dots\dots(2-67)$$

dengan:

C4 = estimasi biaya instalasi transmisi jaringan (\$kanada)

D = koefisien tingkat kesulitan wilayah (*terrain*) (1-2)

V = voltase jaringan transmisi (kV)

P = faktor biaya tiang listrik (0,85 jika $V < 69$, 1 jika $V > 69$)

lt = panjang jaringan (km)

5. Biaya substansi dan travo (C5)

Biaya substansi dan travo juga diperhitungkan dalam suatu perencanaan PLTM/PLTMH, persamaan estimasi biaya untuk komponen tersebut adalah

$$C5 = \left(0,025 n^{0,95} + 0,002 (n + 1) \left(\frac{MW}{0,95} \right)^{0,9} \times V^{0,3} \right) \times 10^6 \dots\dots\dots(2-68)$$

dengan:

C5 = estimasi biaya travo dan substansi (\$kanada)

6. Biaya pemasangan substansi dan travo (C6)

Selain biaya komponen substansi dan travo biaya pemasangan juga perlu diperhitungkan, rumus empiris untuk pemasangan substansi dan travo adalah sebagai berikut :

$$C6 = 0,15 \cdot C5 \dots\dots\dots(2-69)$$

dengan:

C6 = estimasi biaya pemasangan substansi dan travo (\$kanada)

7. Biaya pekerjaan sipil (C7)

Dalam pembangunan PLTM/PLTMH biaya pekerjaan sipil seperti galian, timbunan,

pembongkaran, dan lain-lain juga patut diperhitungkan, rumus empirisnya adalah sebagai berikut :

$$C7 = 1,97 n^{-0,04} \cdot C \cdot R \left(\frac{MW}{Hg^{0,5}} \right)^{0,82} (1 + 0,001Lb)(1 + 0,005 \frac{Ld}{Hg}) \times 10^6 \dots\dots\dots (2-70)$$

dengan:

C7 = estimasi biaya pekerjaan sipil (\$kanada)

C = koefisien pekerjaan sipil (0,44 jika terdapat bendungan/bendung existing, 1 jika tidak ada bendungan/bendung existing)

R = faktor batuan (1 jika terdapat batuan, 1,05 jika tidak terdapat batuan)

Lb = jarak menuju *borrow area* (meter)

Ld = panjang bendungan/bendung (meter)

8. Pipa pesat (C8)

Berdasarkan harga pipa terbaru Maret 2018, pipa besi seharga Rp 1.035.000,-/meter.

9. Biaya pekerjaan lain-lain (C8)

Pekerjaan lain-lain adalah konstruksi lain yang tidak tergolong utama, dapat dikatakan konstruksi ini hanya pelengkap dari PLTM/PLTMH. Persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut :

$$C8 = 0,25 \cdot i \cdot Qd^{0,35} \times 1,1 \sum C1: C7 + 0,1 \sum C1: C7 \dots\dots\dots (2-71)$$

dengan,

C8 : estimasi biaya pekerjaan lain-lain (\$kanada)

i : suku bunga

Kemudian hasil estimasi biaya langsung dikonversikan dari \$kanada ke dalam mata uang rupiah (IDR) adapun kurs \$kanada ke rupiah per 19 Desember 2017 adalah Rp. 10.556,11,00. Sehingga biaya yang dapat diestimasi adalah dihitung dari jumlah keseluruhan C1 sampai dengan C7 yang di konversikan ke nilai rupiah.

Halaman ini sengaja dikosongkan