

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

2.1.1. Potensi Tenaga Air di Indonesia

Potensi tenaga air di Indonesia secara teoritis menurut hasil studi yang dilakukan pemerintah sekitar 77.854,8 MW yang tersebar di seluruh Indonesia, terutama di lima pulau besar, dengan perincian sebagai berikut (Patty, 1995):

- Pulau Jawa: 5 % sebesar 4.421,6 MW
- Pulau Sumatra: 20 % sebesar 15.803,5 MW
- Pulau Kalimantan: 30 % sebesar 23.052,8 MW
- Pulau Sulawesi: 15 % sebesar 11.378,5 MW
- Pulau Irian: 28 % sebesar 22.157,4 MW
- Lain-lain: 2 %.

2.1.2. Definisi PLTA

Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah sistem pembangkit listrik dimana air dengan debit tertentu disalurkan dari sumber air menuju ke turbin air dimana energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik dan energi mekanik dikonversi melalui sebuah generator menjadi sebuah energi listrik.

2.1.3. Klasifikasi PLTA

Klasifikasi pembangkit listrik menurut Dandekar dan Sharma dapat ditentukan dari beberapa faktor yakni (Dandekar, 1991:118):

1. Klasifikasi berdasarkan Tujuan:

- Single Purpose
- Multi Purpose

2. Klasifikasi berdasarkan keadaan hidraulik:

- Pembangkit listrik tenaga air konvensional (*Run of River*)
- Pembangkit listrik dengan pemompaan kembali air ke kolam penampungan.
- Pembangkit listrik tenaga air pasang surut
- Pembangkit listrik tenaga air yang ditekan

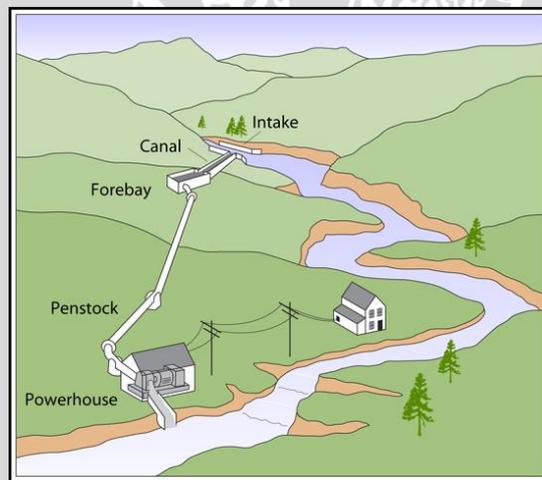
3. Klasifikasi berdasarkan kapasitas PLTA:

- Kapasitas kecil (<5 MW)
- Kapasitas menengah (5-100 MW)
- Kapasitas tinggi (101-1000 MW)

- Kapasitas paling tinggi (>1000 MW)
4. Klasifikasi berdasarkan ketinggian tekanan air:
- Tekanan air rendah (< 15 m)
 - Tekanan air menengah (15-70 m)
 - Tekanan air tinggi (71-250 m)
 - Tekanan air sangat tinggi (> 250m)
5. Klasifikasi berdasarkan bangunan utama:
- Pembangkit listrik pada aliran sungai
 - Pembangkit listrik dengan bendungan di lembah
 - Pembangkit listrik pada pengalihan terusan
 - Pembangkit listrik dengan pengalihan ketinggian tekanan air yang tertinggi

2.1.4. PLTA *Run Of River* (PLTA ROR)

PLTA ROR adalah suatu PLTA dengan sistem penggerak turbin menggunakan aliran sungai langsung, tanpa menggunakan tampungan bulanan (waduk). Aliran sungai dibelokkan dengan menggunakan bendung dan *intake* yang dibangun memotong sungai, air sungai kemudian diarahkan ke *power house* kemudian dikembalikan ke sungai kembali.



Gambar 2.1. Skema PLTA *Run Of River*

Sumber: Manual For Project Developers In Georgia

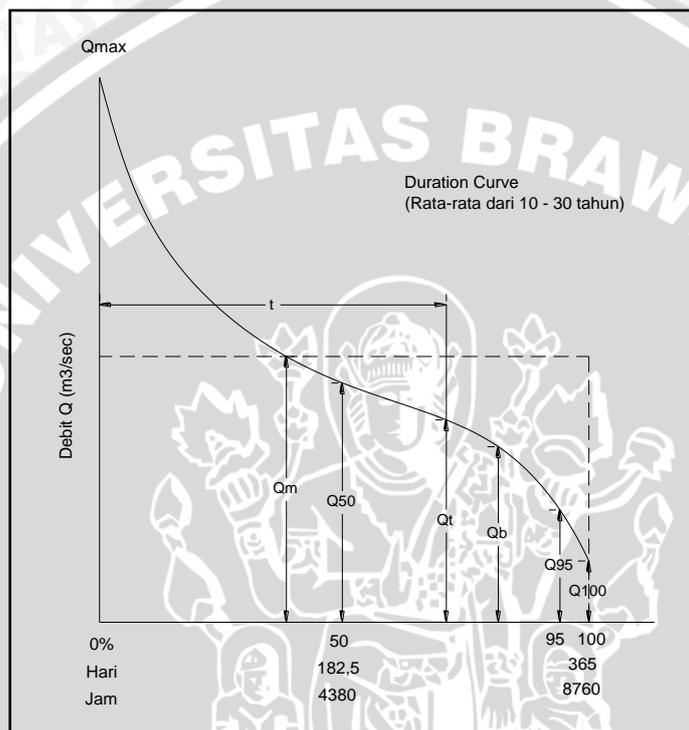
2.2. Analisa Hidrologi

2.2.1. Debit Andalan

Debit andalan adalah besarnya debit yang tersedia sepanjang tahun dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Data dalam periode waktu yang cukup kemudian

dianalisa dengan statistika untuk mengetahui besarnya debit dengan keandalan yang dapat ditentukan.

Dalam penentuan debit desain untuk pembangkit listrik tenaga air biasanya menggunakan metode kurva durasi aliran (*flow duration curve*). Kurva durasi aliran adalah suatu grafik yang memperlihatkan debit sungai dan selama beberapa waktu tertentu dalam setahun tertentu. Sehingga dari kurva tersebut dapat diketahui potensi besarnya sumber air yang dapat dipergunakan untuk pembangkitan listrik.



Gambar 2.2. Kurva Durasi Aliran

Sumber: Patty O.F.,1995:15

Dalam perencanaan debit desain perlu diperhatikan target keluaran energi yang bisa dihasilkan dari debit tersebut (Patty,1995:14). Jika debit direncanakan dengan menggunakan keandalan 100% (debit tersedia selama 365 hari) maka energi listrik akan selalu tersedia dengan daya tertentu namun akan ada debit yang terbuang pada aliran sungai dan hal ini jelas kurang menguntungkan. Dan jika debit didesain dengan keandalan 10% (debit tersedia dalam 36 hari) maka energi yang dihasilkan akan jauh lebih besar namun kemungkinan kejadian terjadi akan menurun dan desain bangunan akan menjadi tidak ekonomis, maka harus dipertimbangkan bagaimana cara memilih desain debit yang akan dipergunakan untuk pembangkitan energi listrik agar didapat hasil yang optimal.

Debit andalan dapat dihitung peluang probabilitasnya dengan menggunakan persamaan weibull (Soemarto,1987:239):

$$P = m / (n+1) \tag{2-1}$$

dengan:

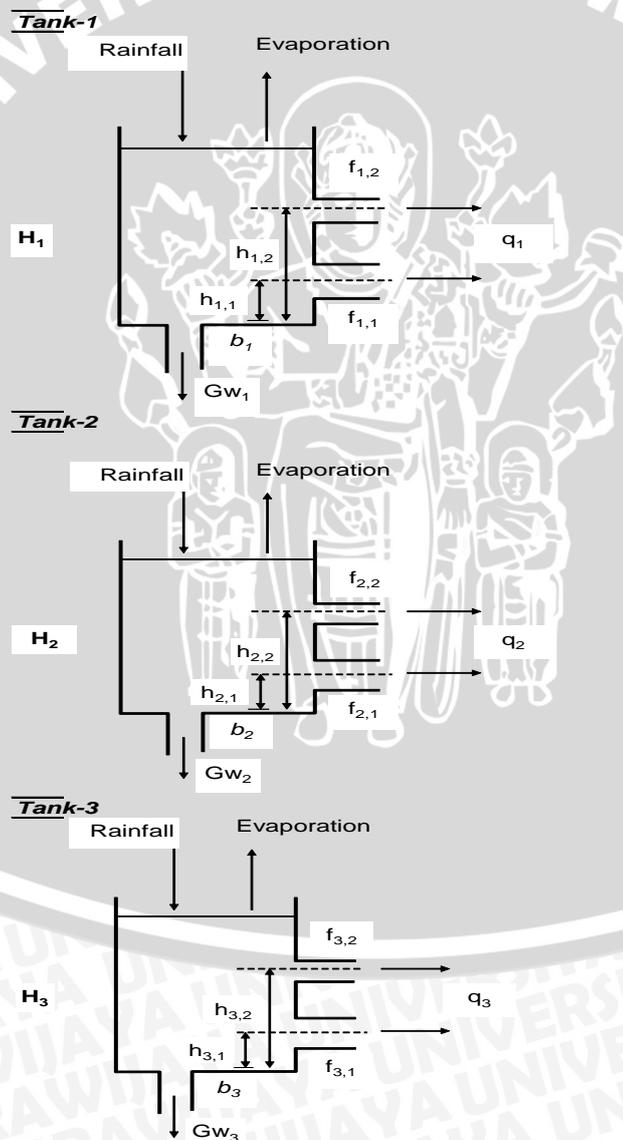
P = peluang kejadian

m = nomer Urut kelas data

n = banyaknya kelas data

2.2.1.1. Simulasi Debit Metode *Tank Model* Sugawara

Konsep dasar dari metode yang dibuat oleh DR. M. Sugawara ini adalah dengan meniru daerah pengaliran sungai dengan menggantikannya oleh sejumlah tampungan yang digambarkan sebagai sederet tangki



Gambar 2.3. Skema Metode *Model Tank* dengan 3 Tangki

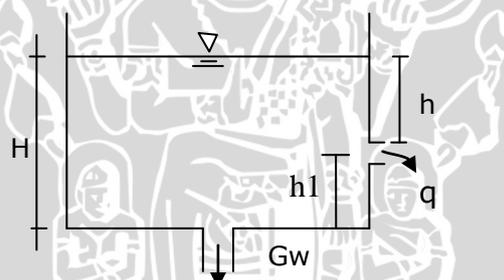
Aliran yang melewati lubang-lubang yang berada di dinding kanan tangki-tangki yang bersangkutan akan menghasilkan limpasan (q), sedangkan aliran yang melewati dasar tangki merupakan infiltrasi (Gw).

Curah hujan (*Rainfall*) yang jatuh pada suatu waktu akan mengisi tangki paling atas (*Tank 1*). Air yang tertampung oleh *Tank 1* mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan atau merembes lewat lubang di dasar tangki dan masuk mengisi *Tank 2* dalam tahap kedua. Air yang tertampung dalam *Tank 2* mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan dan merembes lewat dasar tangki masuk ke *Tank 3* dalam tahap ketiga. Proses ini berulang hingga sampai tangki terakhir.

Jumlah limpasan yang keluar dari lubang-lubang di dinding kanan semua tangki adalah merupakan besarnya limpasan yang dihitung dalam suatu daerah pengaliran dengan masukan hujan tertentu.

2.2.1.1.1. Dasar Teori Model Tangki

Besarnya limpasan (q) yang keluar dari tangki sebanding dengan tinggi muka air dalam tangki (H). Tidak hanya limpasan, infiltrasi (Gw) juga sebanding dengan tinggi muka air dalam tangki.



Gambar 2.4. Limpasan yang keluar dari Model Tangki

Persamaan limpasan (q) dan infiltrasi (Gw) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$q = (H - h_1).f \quad (2-2)$$

$$Gw = H \cdot b \quad (2-3)$$

dimana :

q = limpasan (mm)

H = tinggi muka air pada tangki (mm)

h_1 = tinggi lubang limpasan (mm)

f = koefisien lubang limpasan

Gw = infiltrasi (mm)

b = koefisien lubang infiltrasi

Dengan demikian hasil perhitungan total limpasan (q tot) yang diperoleh adalah mm. Kita dapat merubah menjadi m^3 /detik, sebagai berikut:

$$Q = \frac{qtot.A}{86,4} \quad (2-4)$$

Dimana :

q tot (Limpasan total) = mm

A (Luas DAS) = km^2

Q (debit sungai) = m^3 /detik

2.2.1.1.2. Prosedur Perhitungan Model Tangki

1. Buatlah susunan tangki lengkap dengan karakteristiknya yang diasumsikan bisa mewakili atau menggambarkan karakteristik DAS yang dimodelkan.
2. Perhitungan pertama, tambahkan curah hujan periode ini pada tampungan periode sebelumnya, kemudian dikurangi evaporasi pada periode tersebut. Pengurangan evaporasi hanya dilakukan terhadap tangki teratas saja (tangki 1), tetapi jika pengurangan dari tangki teratas belum cukup maka kekurangan tersebut dipikul oleh tangki dibawahnya.
3. Perhitungan limpasan dan infiltrasi dilakukan menurut tinggi tampungan yang diperoleh dalam langkah dua. Besarnya limpasan dan infiltrasi diperoleh dari perkalian koefisien lubang dengan tinggi tampungan terhadap lubang bersangkutan.
4. Perhitungan sisa tinggi tampungan dengan mengurangi tinggi tampungan yang diperoleh dari langkah dua dengan limpasan dan infiltrasi.
5. Perhitungan untuk tangki yang kedua dan seterusnya prosedurnya hampir sama dengan tangki yang pertama tetapi masukannya diganti dengan tinggi infiltrasi dari tangki sebelumnya
6. Total aliran adalah penjumlahan dari semua keluaran pada lubang kanan (limpasan).

2.2.2. Debit Banjir Rancangan

Debit banjir rancangan adalah debit yang akan direncanakan pada suatu bangunan dengan kala ulang tertentu yang dianalisa statistika dari data-data dalam periode tertentu. Debit banjir rancangan yang dialirkan tidak boleh membahayakan bangunan yang akan dialirkan dengan debit tersebut.

Penentuan debit banjir rancangan dapat dilakukan melalui 2 cara yaitu :

1. Berdasarkan data debit

Data debit banjir yang pernah terjadi merupakan data banjir yang tercatat secara akurat dengan waktu pencatatan data misalnya 20 tahun. Selanjutnya dari seri data

banjir tersebut dilakukan analisis frekuensi dan ditentukan jenis analisisnya, sehingga dihasilkan debit banjir rencana.

2. Berdasarkan data curah hujan

Karena data debit tidak tersedia, maka dipakai cara ini yaitu menghitung debit rencana dengan data hujan. Data hujan yang digunakan harus data yang tersedia dalam waktu yang diperlukan.

2.2.2.1. Curah Hujan Rancangan Metode Gumbel

Curah hujan rancangan adalah hujan yang akan direncanakan dengan suatu kala ulang tertentu. Metode Gumbel dengan pertimbangan bahwa cara ini lebih fleksibel dan dapat dipakai untuk semua sebaran data.

Rumus yang digunakan dalam metode Gumbel adalah:

$$X_T = X + \frac{(Y_t - Y_n)}{S_n} \times S_x \quad (2-5)$$

dengan :

X_T = curah hujan rencana dalam periode ulang T tahun (mm/hari)

X = rata-rata curah hujan (mm/hari)

Y_t = reduced variabel, parameter Gumbel untuk periode T tahun

Y_n = reduced mean, merupakan fungsi dari banyaknya data (n)

S_n = reduced standar deviasi, merupakan fungsi dari banyaknya data (n)

S_x = standar deviasi

$$= \sqrt{\frac{\sum (X_i - X)^2}{n-1}} \quad (2-6)$$

X_i = curah hujan maksimum (mm/hari)

n = lamanya pengamatan

2.2.2.2. Uji Kesesuaian Distribusi

Untuk menentukan apakah distribusi frekuensi yang digunakan dapat dipakai maka distribusi frekuensi tersebut perlu dilakukan pemeriksaan uji kesesuaian.

Pemeriksaan uji kesesuaian ini dimaksudkan untuk mengetahui suatu kebenaran hipotesa distribusi frekuensi. Dengan pemeriksaan uji ini akan diketahui :

1. Kebenaran antara hasil pengamatan dengan model distribusi yang diharapkan atau yang diperoleh secara teoritis
2. Kebenaran hipotesa diterima atau ditolak

2.2.2.2.1. Uji Smirnov Kolmogorov

Uji kesesuaian Smirnov Kolmogorov, sering juga disebut uji kecocokan non parametrik (non parametric test), karena pengujiannya tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu. (Soewarno, 1995 : 198).

Prosedurnya adalah sebagai berikut :

1. Mengurutkan data (dari besar ke kecil atau sebaliknya) dan juga besarnya peluang dari masing-masing data tersebut
2. Menentukan nilai masing-masing peluang teoritis dari hasil penggambaran data (persamaan distribusinya)
3. Dari kedua nilai peluang ditentukan selisih terbesarnya antara peluang pengamatan dengan peluang teoritis
4. Berdasarkan tabel nilai kritis Smirnov Kolmogorov Test, bisa ditentukan harga D_0

Apabila D lebih kecil dari D_0 maka distribusi teoritis yang digunakan untuk menentukan persamaan distribusi dapat diterima, apabila D lebih besar dari D_0 maka distribusi teoritis yang digunakan untuk menentukan persamaan distribusi tidak dapat diterima.

2.2.2.2.2. Uji Chi-Kuadrat

Pada penggunaan Uji Smirnov-Kolmogorov, meskipun menggunakan perhitungan matematis namun kesimpulan hanya berdasarkan bagian tertentu (sebuah variat) yang mempunyai penyimpangan terbesar, sedangkan uji Chi-Kuadrat menguji penyimpangan distribusi data pengamatan dengan mengukur secara matematis kedekatan antara data pengamatan dan seluruh bagian garis persamaan distribusi teoritisnya.

Uji Chi-Kuadrat dapat diturunkan menjadi persamaan sebagai berikut :

$$X^2 = \sum \frac{(E_f - O_f)^2}{E_f} \quad (2-7)$$

dengan:

X^2 = harga Chi-Kuadrat

E_f = frekuensi (banyaknya pengamatan) yang diharapkan, sesuai dengan pembagian kelasnya

O_f = frekuensi yang terbaca pada kelas yang sama

Nilai X^2 yang terhitung ini harus lebih kecil dari harga X^2_{cr} (dari tabel) Derajat kebebasan ini secara umum dapat dihitung sebagai berikut:

$$DK = K - (P + 1) \quad (2-8)$$

dengan :

DK = derajat kebebasan

K = banyaknya kelas

P = banyaknya keterikatan atau sama dengan banyaknya parameter, yang untuk sebaran Chi-Kuadrat adalah sama dengan 2 (dua)

Tabel 2.1. Nilai kritis Do untuk uji Smirnov-Kolmogorov

n	α			
	0,2	0,1	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,3	0,34	0,4
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,2	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,2	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23
n > 50	$1,07/(n)^{0,5}$	$1,22/(n)^{0,5}$	$1,36/(n)^{0,5}$	$1,63/(n)^{0,5}$

Sumber : Limantara, 2010

Tabel 2.2. Nilai Kritis Untuk Distribusi Chi-Kuadrat

Dk	Distribusi (X^2)										
	0,99	0,95	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2	0,05	0,01	0,0001
1	0,0002	0,0039	0,0158	0,0642	0,148	0,455	1,074	1,642	3,841	6,635	10,827
2	0,02	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,408	3,219	5,991	9,211	13,815
3	0,115	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,665	4,642	7,815	11,343	16,268
4	0,297	0,711	1,064	1,649	2,195	3,357	4,878	5,989	9,488	13,277	18,465
5	0,554	1,145	1,611	2,343	3,001	4,351	6,064	7,298	11,071	15,086	20,517
6	0,872	1,635	2,204	3,071	3,828	5,348	7,231	8,558	12,592	16,812	22,457
7	1,872	2,167	2,833	3,822	4,671	6,346	8,838	9,803	14,067	18,475	24,322
8	1,646	2,733	3,291	4,594	5,527	7,344	9,524	11,031	15,507	20,091	26,425
9	2,088	3,325	4,168	5,381	6,393	8,343	10,656	12,242	16,919	21,666	27,877
10	2,558	3,941	5,179	6,179	7,267	9,342	11,781	13,442	18,307	23,201	29,583

Sumber: Sri Harto (1998: 181)

2.2.2.3. Koefisien Pengaliran

Koefisien Pengaliran (C) adalah perbandingan antara jumlah air hujan yang mengalir (limpasan) dengan jumlah air hujan yang turun di daerah tersebut. Besarnya koefisien pengaliran tergantung pada daerah pengaliran dan karakteristik hujan pada suatu daerah.

Koefisien pengaliran dapat ditentukan dengan menjumlahkan beberapa koefisien C sebagai berikut:

$$C = C_p + C_t + C_0 + C_s + C_c \quad (2-9)$$

dengan:

Cp= komponen C yang disebabkan oleh intensitas hujan yang bervariasi

Ct = komponen C yang disebabkan oleh faktor topografi

Co= komponen C yang disebabkan oleh tampungan permukaan

Cs= komponen C yang disebabkan oleh faktor infiltrasi

Cc= komponen C yang disebabkan oleh penutup lahan

Dimana parameter-parameter tersebut secara kualitatif di kuantitatifkan menjadi komponen nilai koefisien pengaliran sebagai berikut :

Tabel 2.3. Harga Komponen Cp oleh Faktor Intensitas Hujan

Intensitas Hujan (mm/jam)	Cp
< 25	0,05
25 - 50	0,15
50 - 75	0,25
> 75	0,30

Sumber : Pedoman Kriteria Desain Embung Kecil

Tabel 2.4. Harga Komponen Ct oleh Faktor Topografi

Kedaaan Topografi	Kemiringan m/km	Ct
Curam dan tidak rata	200	0,10
Berbukit-bukit	100 - 200	0,05
Landai	50 - 100	0,00
Hampir datar	0 - 50	0,00

Sumber : Pedoman Kriteria Desain Embung Kecil

Tabel 2.5. Harga Komponen Co oleh Faktor Tampungan Permukaan

Tampungan Permukaan	Co
1. Daerah pengaliran curam, sedikit depresi permukaan	0,10
2. Daerah pengaliran yang sempit dengan sistem teratur	0,05
3. Tampungan dan aliran permukaan yang berarti; terdapat kolam;berkontur	0,05
4. Sungai berkelok-kelok dengan usaha pelestarian lahan	0,00

Sumber : Pedoman Kriteria Desain Embung Kecil

Tabel 2.6. Harga Komponen Cs oleh Faktor Infiltrasi

Kemampuan Infiltrasi Tanah	K (cm/dt)	Cs
Infiltrasi besar (tidak terdapat penutup lahan)	< 10^{-5}	0.25
Infiltrasi lambat (lembut)	$10^{-5} - 10^{-6}$	0.20
Infiltrasi sedang (loam)	$10^{-3} - 10^{-4}$	0.10
Infiltrasi cepat (pasir tebal, tanah beragregat baik)	> 10^{-3}	0.05

Sumber : Pedoman Kriteria Desain Embung Kecil

Tabel 2.7. Harga Komponen Cc oleh Penutup Lahan

Penutup Tumbuh-tumbuhan Pada Daerah Pengaliran	Cc
1. Tidak terdapat tanaman yang efektif	0,25
2. Terdapat padang rumput yang baik sebesar 10 %	0,20
3. Terdapat padang rumput yang baik sebesar 50 %, ditanami atau banyak pepohonan	0,10
4. Terdapat padang rumput yang baik sebesar 90 %, hutan	0,05

Sumber : Pedoman Kriteria Desain Embung Kecil

2.2.2.4. Distribusi Hujan Jam-Jaman

Sebaran hujan jam-jaman dihitung dengan menggunakan rumus Mononobe, yaitu:

$$R_t = \frac{R_{24}}{T} \left(\frac{T}{t} \right)^{2/3} \quad (2-10)$$

dengan :

R_t = intensitas hujan rerata dalam T jam (%)

R_{24} = curah hujan efektif dalam 1 (satu) hari (mm)

T = waktu konsentrasi hujan (jam) = 6 jam

t = waktu mulai hujan (jam)

Berdasarkan persentase kejadian hujan terpusat diatas, maka dilakukan distribusi hujan pada setiap jam kejadian hujan tersebut terhadap curah hujan efektif 1 (satu) hari (R_{24}). Pendekatan persamaan tersebut adalah :

$$RT = t.R_t - (t-1)(R_{t-1}) \quad (2-11)$$

dengan:

R_t = persentase intensitas hujan rerata dalam t jam. (mm/jam)

R_{t-1} = persentase intensitas hujan rerata dalam (t - 1) jam. (mm/jam)

2.2.2.5. Hujan Netto Efektif

Hujan netto adalah bagian hujan total yang menghasilkan direct run off (limpasan langsung).

Dengan menganggap bahwa proses transformasi hujan menjadi limpasan langsung mengikuti proses linier dan tidak berubah oleh waktu, maka hujan netto (R_n) dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$R_n = C \times R \quad (2-12)$$

dengan:

R_n = hujan netto (efektif)

C = koefisien limpasan

R = intensitas hujan

2.2.2.6. Aliran Dasar (*Base Flow*)

Hidrograf tersusun dari dua komponen, yaitu aliran permukaan, yang berasal dari aliran langsung air hujan dan aliran dasar (base flow). Aliran dasar berasal dari air tanah yang pada umumnya tidak memberikan respon yang cepat terhadap hujan.

Untuk menentukan aliran dasar pada suatu sungai dapat menggunakan pendekatan Kraijenhoff van der Leur (1967) tentang hidrograf air tanah. Persamaannya sebagai berikut:

$$QB = 0,4751 \cdot A^{0,6444} \cdot D^{0,9430} \quad (2-13)$$

dengan:

QB = aliran dasar (m^3/dt)

A = luas DAS (km^2)

D = kerapatan jaringan sungai, yaitu jumlah panjang sungai semua tingkat tiap satuan luas DAS

2.2.2.7. Hidrograf Satuan Sintetik Metode Nakayasu

Untuk membuat hidrograf banjir pada sungai-sungai yang tidak ada atau sedikit sekali observasi hidrograf banjirnya, maka perlu dicari karakteristik atau parameter daerah aliran tersebut terlebih dahulu, misalnya waktu untuk mencapai puncak hidrograf, lebar dasar, luas, kemiringan, panjang alur terpanjang, koefisien limpasan dan sebagainya. Oleh karena itu, biasanya digunakan hidrograf sintetik yang dikembangkan di negara lain, yang parameternya harus disesuaikan terlebih dahulu dengan karakteristik daerah aliran yang ditinjau (Soemarto, 1987). Di antara beberapa hidrograf sintetik yang biasa digunakan, adalah hidrograf satuan sintetik Nakayasu. Penggunaan metode ini memerlukan beberapa karakteristik parameter daerah alirannya sebagai berikut:

1. Tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak hidrograf (time of peak)
2. Tenggang waktu dari titik berat hujan sampai titik berat hidrograf (time lag)
3. Tenggang waktu hidrograf (time base of hydrograph)
4. Luas daerah tangkapan air
5. Panjang alur sungai utama terpanjang (length of the longest channel)
6. Koefisien pengaliran.

Rumus dari hidrograf satuan sintetik Metode Nakayasu adalah :

$$Qp = \frac{A \cdot R_o}{3,6 \left(0,3T_p + T_{0,3} \right)} \quad (2-14)$$

dengan :

Q_p = debit puncak banjir (m³/det)

R_o = hujan satuan (mm)

T_p = tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak banjir (jam)

$T_{0,3}$ = waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari puncak sampai 30% dari Q_p

A = luas daerah aliran sungai (km²)

Untuk menentukan T_p dan $T_{0,3}$ digunakan pendekatan rumus sebagai berikut :

$$T_p = t_g + 0,8 t_r \quad (2-15)$$

$$T_{0,3} = a t_g \quad (2-16)$$

$$T_r = 0,5 t_g \text{ sampai } t_g$$

t_g adalah time lag yaitu waktu antara hujan sampai debit puncak banjir (jam). t_g dihitung dengan ketentuan sebagai berikut :

- Sungai dengan panjang alur $L > 15$ km :

$$t_g = 0,4 + 0,058 L \quad (2-17)$$

- Sungai dengan panjang alur $L < 15$ km :

$$t_g = 0,21 L^{0,7} \quad (2-18)$$

dengan :

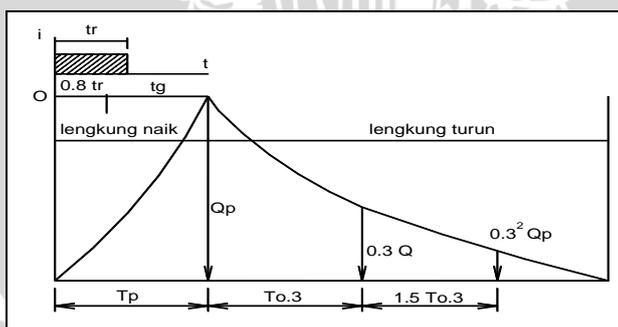
t_r = satuan waktu hujan (jam)

a = parameter hidrograf, untuk

$a = 2$ \Rightarrow Pada daerah pengaliran biasa

$a = 1,5$ \Rightarrow Pada bagian naik hidrograf lambat, dan turun cepat

$a = 3$ \Rightarrow Pada bagian naik hidrograf cepat, turun lambat



Gambar 2.5. Hidrograf Satuan Sintetik Metode Nakayasu

Sumber: Limantara/Hidrologi Praktis, 2010:150

Pada waktu naik : $0 < t \leq T_p$

dengan:

$Q(t)$ = limpasan sebelum mencari debit puncak (m³/dt)

t = waktu (jam)

Pada kurva turun (decreasing limb)

a. Selang nilai : $T_p < t \leq (T_p + T_{0,3})$

$$Q_{(t)} = Q_p \cdot 0,3^{\frac{(t-T_p)}{T_{0,3}}} \quad (2-19)$$

b. Selang nilai: $(T_p + T_{0,3}) < t \leq (T_p + T_{0,3} + 1,5 T_{0,3})$

$$Q_{(t)} = Q_p \cdot 0,3^{\frac{(t-T_p+0,5T_{0,3})}{1,5 \cdot T_{0,3}}} \quad (2-20)$$

c. Selang nilai : $t > (T_p + T_{0,3} + 1,5 T_{0,3})$

$$Q_{(t)} = Q_p \cdot 0,3^{\frac{(t-T_p+1,5 \cdot T_{0,3})}{2,0 \cdot T_{0,3}}} \quad (2-21)$$

2.3. Analisa Hidrolika dan Dimensi Bangunan

Dalam perencanaan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) maka harus direncanakan bangunan air untuk berjalannya sistem PLTA, dalam studi ini dimulai dari bangunan utama, bangunan tengah, bangunan pembawa air, bangunan pembangkitan listrik, bangunan pembuang dan bangunan pelengkap. Bangunan air dirancang berdasarkan prinsip hidrolika sehingga didapatkan perencanaan bangunan yang ekonomis dan aman.

2.3.1. Perencanaan Bangunan Utama

Bangunan utama adalah bangunan yang posisinya terletak pada awal formasi bangunan PLTA. Peran dari bangunan utama sangatlah penting. Bangunan utama berfungsi untuk menyadap debit yang digunakan untuk pembangkitan. Dalam studi ini bangunan utama meliputi bendung, pembilas, kolam olak, dan intake.

Menurut standar tata cara perencanaan umum bendung, yang diartikan dengan bendung adalah suatu bangunan air dengan kelengkapan yang dibangun melintang sungai atau sudetan yang sengaja dibuat untuk meninggikan taraf muka air atau mendapatkan tinggi terjun, sehingga air dapat disadap dan dialirkan secara gravitasi ke tempat yang membutuhkannya. Sedangkan bangunan air adalah setiap pekerjaan sipil yang dibangun di badan sungai untuk berbagai keperluan.

Bendung sebagai pengatur tinggi muka air sungai dapat dibedakan menjadi bendung pelimpah dan bendung gerak. Bendung pelimpah yang dibangun melintang di sungai, akan memberikan tinggi air minimum kepada bangunan intake. Merupakan penghalang selama terjadi banjir dan dapat menyebabkan genangan di udik bendung.

Bendung pelimpah terdiri dari tubuh bendung dan mercu bendung. Tubuh bendung merupakan ambang tetap yang berfungsi untuk meninggikan taraf muka air sungai. mercu bendung berfungsi untuk mengatur tinggi air minimum, melewati debit banjir, dan untuk membatasi tinggi genangan yang akan terjadi di udik bendung.

Lokasi bangunan bendung dan pemilihan tipe yang paling cocok dipengaruhi oleh banyak faktor, yaitu:

- Tipe, bentuk dan morfologi sungai
- Kondisi hidrolis antara lain elevasi yang diperlukan untuk irigasi
- Topografi pada lokasi yang direncanakan,
- Kondisi geologi teknik pada lokasi,
- Metode pelaksanaan
- Aksesibilitas dan tingkat pelayanan

Aspek yang mempengaruhi dalam pemilihan lokasi bendung adalah :

1. Pertimbangan topografi
2. Kemantapan geoteknik fondasi bendung
3. Pengaruh hidraulik
4. Pengaruh regime sungai
5. Tingkat kesulitan saluran induk
6. Ruang untuk bangunan pelengkap bendung
7. Luas layanan irigasi
8. Luas daerah tangkapan air
9. Tingkat kemudahan pencapaian
10. Biaya pembangunan
11. Kesepakatan stakeholder

2.3.1.1. Lebar Efektif Mercu

Lebar bendung, yaitu jarak antara pangkal-pangkalnya (*abutment*), sebaiknya sama dengan lebar rata-rata sungai pada bagian yang stabil. Di bagian ruas bawah sungai, lebar rata-rata ini dapat diambil pada debit penuh (*bankful discharge*): di bagian ruas atas mungkin sulit untuk menentukan debit penuh. 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, dengan persamaan berikut (KP-02,1986:49):

$$B_e = B - 2(n.K_p + K_a) H_1 \quad (2-22)$$

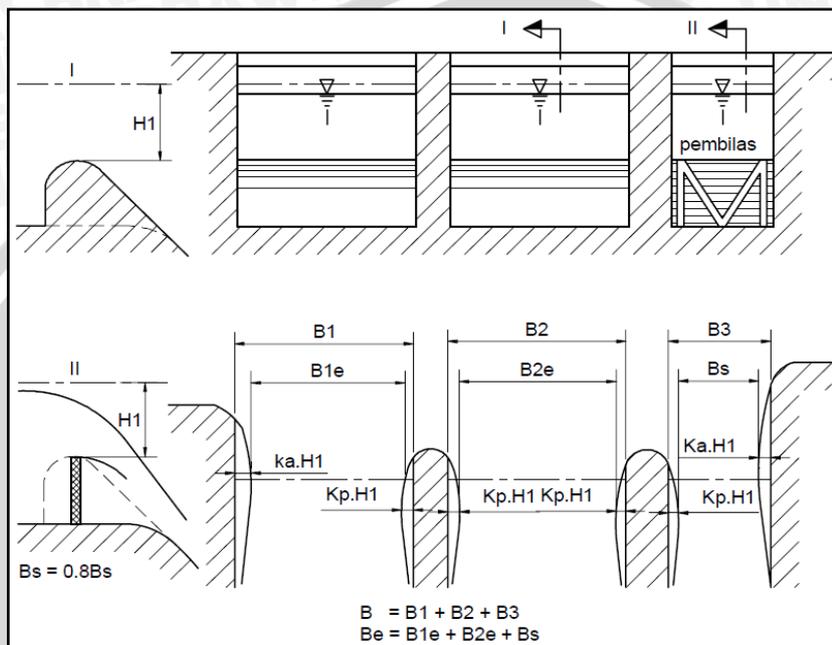
dengan:

n = jumlah pilar

K_p = koefisien kontraksi pilar

K_a = koefisien kontraksi pangkal bendung

H_1 = tinggi energi (m)



Gambar 2.6. Lebar Efektif Mercu

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 49

Harga – harga koefisien K_a dan K_p diberikan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8. 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 di mana $r > 0,5 H_1$ dan tembok hulu tidak lebih dari 450 ke arah aliran	0

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 165

2.3.1.2. Mercu Bendung

Mercu bendung adalah bagian teratas tubuh bendung dimana aliran dari udik dapat melimpah ke hilir. Fungsinya sebagai penentu tinggi muka air minimum di sungai bagian udik bendung, sebagai pengempang sungai dan sebagai pelimpah aliran sungai. Letak mercu bendung bersama-sama tubuh bendung diusahakan tegak lurus arah aliran sungai agar aliran yang menuju bendung terbagi rata (Masrevaniah, 2012)

Berikut ini adalah persamaan untuk menghitung debit yang melewati mercu:

$$Q = Cd.Be.He^{1.5} \quad (2-23)$$

$$Cd = 2,200 - 0,0416.(He/P)^{0,99} \quad (2-24)$$

$$C = 1,6. \frac{1+2a \frac{Hd}{He}}{1+a \frac{Hd}{He}} \quad (2-25)$$

$$He = Hd + V^2/2.g \quad (2-26)$$

$$V = \frac{Q}{Be.(P+Hd)} \quad (2-27)$$

Dengan:

Q = debit diatas mercu (m^3/dt)

Cd= koefisien debit limpahan untuk tinggi tekan rencana

C = koefisien debit limpahan untuk semua tinggi tekan

a = konstanta (diperoleh saat $Hd = He$ dan kemudian $C = Cd$)

Be= lebar efektif mercu (m)

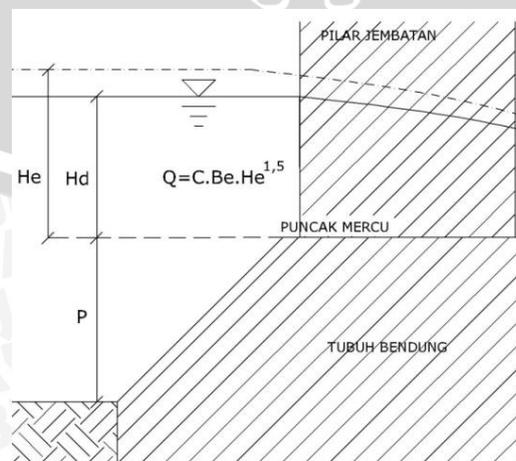
He= tinggi energi tekan (m)

P = tinggi mercu (m)

Hd= tinggi muka air (m)

V = kecepatan aliran (m/det)

g = percepatan gravitasi (m/dt^2)



Gambar 2.7. Sketsa Aliran Diatas Mercu Bendung

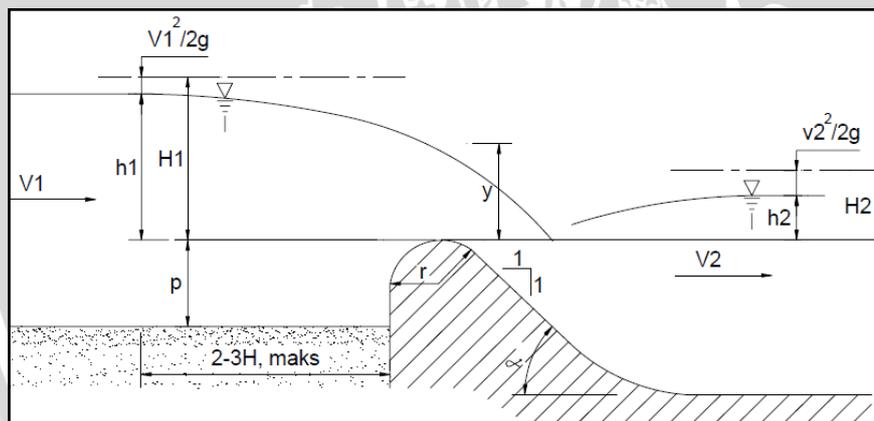
Koefisien debit ditentukan berdasarkan rumus empiris metode Iwasaki. Rumus ini hanya berlaku untuk tipe standar dan dinding hulu ambang tegak, karena tidak dicantumkan pengaruh dinding miring bagian hulu (Aniek, 2012).

Di Indonesia pada umumnya digunakan dua tipe mercu untuk bendung pelimpah : tipe Ogee dan tipe bulat. Kedua bentuk mercu tersebut dapat dipakai baik untuk konstruksi beton maupun pasangan batu atau bentuk kombinasi dari keduanya.

2.3.1.2.1. Mercu Bulat

Bendung dengan mercu bulat memiliki harga koefisiensi debit yang jauh lebih tinggi (44%) dibandingkan dengan koefisiensi bendung ambang lebar. Pada sungai, ini akan banyak memberikan keuntungan karena bangunan ini akan mengurangi tinggi muka air hulu selama banjir. Harga koefisiensi debit menjadi lebih tinggi karena lengkung streamline dan tekanan negatif pada mercu.

Tekanan pada mercu adalah fungsi perbandingan antara H_1 dan r (H_1/r) (lihat Gambar 4.4). Untuk bendung dengan dua jari-jari (R_2) (lihat Gambar 2.8.), jari-jari hilir akan digunakan untuk menemukan harga koefisien debit.



Gambar 2.8. Bendung Mercu Bulat

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 52

Untuk menghindari bahaya kavitasi lokal, tekanan minimum pada mercu bendung harus dibatasi sampai -4 m tekanan air jika mercu terbuat dari beton; untuk pasangan batu tekanan subatmosfir sebaiknya dibatasi sampai -1 m tekanan air.

Agar mercu tidak mengalami bahaya kavitasi lokal, maka jari-jari mercu bendung pasangan batu akan berkisar antara 0,3 sampai 0,7 kali H_{1maks} dan untuk mercu bendung beton dari 0,1 sampai 0,7 kali H_{1maks} .

2.3.1.2.2. Mercu Ogee

Mercu Ogee berbentuk tirai luapan bawah dari bandung ambang tajam aerasi. Oleh karena itu mercu ini tidak akan memberikan tekanan subatmosfir pada permukaan

mercu sewaktu bendung mengalirkan air pada debit rencana. Untuk debit yang lebih rendah, air akan memberikan tekanan ke bawah pada mercu.

Untuk merencanakan permukaan mercu Ogee bagian hilir, U.S. Army Corps of Engineers telah mengembangkan persamaan berikut:

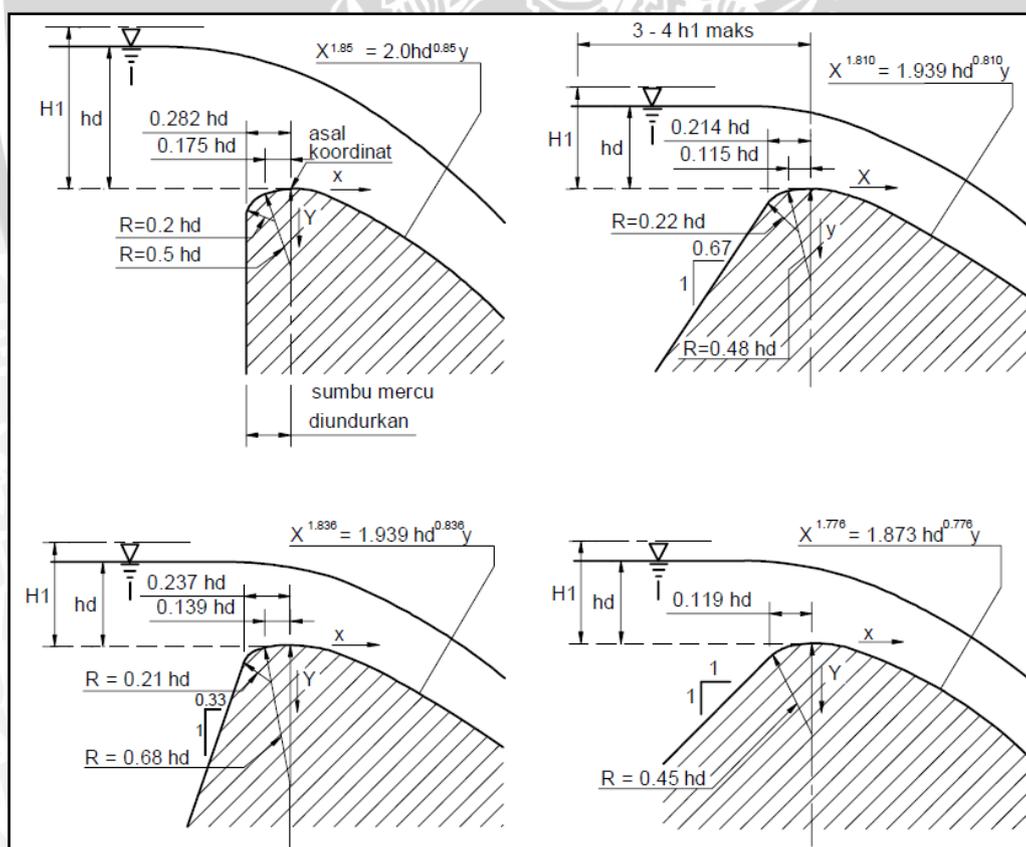
$$\frac{Y}{Hd} = \frac{1}{K} \cdot \left(\frac{X}{Hd}\right)^n \quad (2-28)$$

Di mana X dan Y adalah koordinat-koordinat permukaan hilir (lihat Gambar 2.9) dan Hd adalah tinggi energi rencana di atas mercu. Harga-harga K dan n adalah parameter. Harga-harga ini bergantung kepada kecepatan dan kemiringan permukaan belakang.

Tabel 2.9. Harga-harga K dan n

Kemiringan permukaan hilir	K	n
vertikal	2.000	1,850
3 : 1	1,936	1,836
3 : 2	1,939	1,810
1 : 1	1,873	1,776

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 57



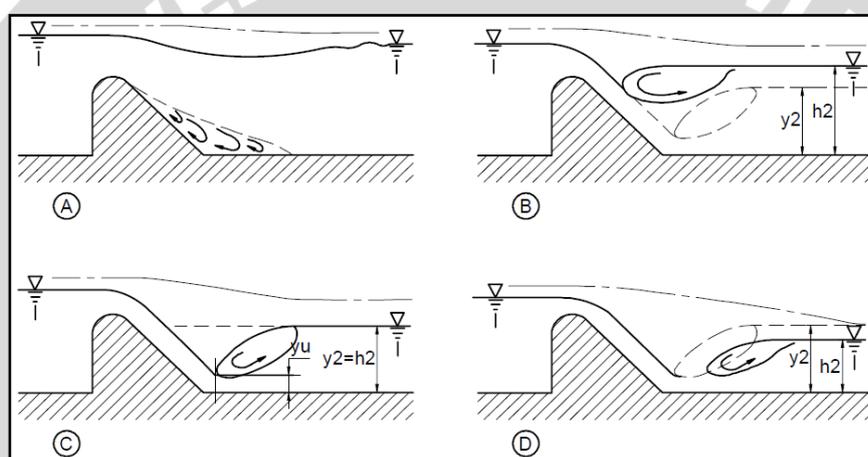
Gambar 2.9. Bentuk Mercu Tipe Ogee

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 57

2.3.1.3. Kolam Olak

Aliran di atas bendung di sungai dapat menunjukkan berbagai perilaku di sebelah bendung akibat kedalaman air (h_2). Gambar 2.10 menyajikan kemungkinan-kemungkinan yang terjadi dari pola aliran di hilir bendung.

Kasus A menunjukkan aliran tenggelam yang menimbulkan sedikit saja gangguan di permukaan berupa timbulnya gelombang. Kasus B menunjukkan loncatan tenggelam yang lebih diakibatkan oleh kedalaman air hilir yang lebih besar, daripada oleh kedalaman konjugasi. Kasus C adalah keadaan loncat air di mana kedalaman air hilir sama dengan kedalaman konjugasi loncat air tersebut. Kasus D terjadi apabila kedalaman air hilir kurang dari kedalaman konjugasi; dalam hal ini loncatan akan bergerak ke hilir (KP-02, 1986: 65).



Gambar 2.10. Kasus-kasus Aliran di Kolam Olak

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 66

Kasus D adalah keadaan yang tidak boleh terjadi, karena loncatan air akan menghempas bagian sungai yang tak terlindungi dan umumnya menyebabkan penggerusan luas. Untuk mengatasi kasus D maka diperlukan bangunan kolam peredam energi.

Tipe kolam olak yang akan direncanakan di sebelah hilir bangunan bergantung pada energi air yang masuk, yang dinyatakan dengan bilangan Froude pada saat awal loncatan, dan pada bahan konstruksi kolam olak (KP-04, 1986: 152).

Berdasarkan bilangan Froude, dapat dibuat pengelompokan-pengelompokan berikut dalam perencanaan kolam (KP-04, 1986: 152):

- Untuk $Fr \leq 1,7$ tidak diperlukan kolam olak; pada saluran tanah, bagian hilir harus dilindungi dari bahaya erosi; saluran pasangan batu atau beton tidak memerlukan perlindungan khusus.
- Bila $1,7 < Fr \leq 2,5$ maka kolam olak diperlukan untuk meredam energi secara efektif.

Pada umumnya kolam olak dengan ambang ujung mampu bekerja dengan baik. Untuk penurunan muka air $\Delta Z < 1,5$ m dapat dipakai bangunan terjun tegak.

- c. Jika $2,5 < Fr \leq 4,5$ maka akan timbul situasi yang paling sulit dalam memilih kolam olak yang tepat. Loncatan air tidak terbentuk dengan baik dan menimbulkan gelombang sampai jarak yang jauh di saluran. Cara mengatasinya adalah mengusahakan agar kolam olak untuk bilangan Froude ini mampu menimbulkan olakan (turbulensi) yang tinggi dengan blok halangnya atau menambah intensitas pusaran dengan pemasangan blok depan kolam. Blok ini harus berukuran besar (USBR tipe IV) atau tipe lain.
- d. Kalau $Fr \geq 4,5$ ini akan merupakan kolam yang paling ekonomis. karena kolam ini pendek. Tipe ini, termasuk kolam olak USBR tipe III yang dilengkapi dengan blok depan dan blok halang. Kolam loncat air yang sama dengan tangga di bagian ujungnya akan jauh lebih panjang dan mungkin harus digunakan dengan pasangan batu.

Untuk merencanakan elevasi dasar kolam olak perlu dihitung profil aliran pada punggung mercu bendung dan profil aliran pada sungai hilir bendung. Perhitungan elevasi dasar kolam olak dilakukan dengan cara coba-coba sehingga keadaan muka air pada kolam olak sama seperti kasus c pada Gambar 2.13. yaitu muka air pada kolam olak sama dengan muka air pada sungai hilir bendung.

Berikut ini adalah cara untuk menghitung profil aliran pada punggung mercu:

Langkah perhitungan

1. Tentukan harga z (tinggi interval dari mercu bendung ke dasar kolam)
2. Dengan coba-coba didapat nilai Y_z
3. Hitung V_z dan F_z
4. Elevasi lereng bendung = elevasi mercu bendung – z
5. Elevasi muka air = elevasi lereng bendung + Y_z

Rumus perhitungan

$$V_{z1} - V_{z2} = 0 \quad (2-29)$$

$$V_{z1} = (2g(z + Hd - Y_z))^{1/2} \quad (2-30)$$

$$V_{z2} = \frac{Q}{B.Y_z} \quad (2-31)$$

$$F_z = \frac{V_z}{\sqrt{9,81.Y_z}} \quad (2-32)$$

Dengan:

- g = percepatan gravitasi (m/dt^2)
 z = tinggi interval dari mercu bendung ke dasar kolam (m)
 H_d = tinggi muka air di atas mercu (m)
 Y_z = kedalaman muka air pada z yang ditinjau (m)
 B = lebar mercu (m)
 Q = debit (m^3/dt)
 V_z = kecepatan aliran pada z yang ditinjau (m/dt)
 F_z = bilangan froude pada z yang ditinjau

Berikut ini adalah persamaan untuk menghitung elevasi muka air di kolam olak:

$$Y_2 = 0,5 \cdot Y_1 \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot F_1} - 1 \quad (2-33)$$

$$\text{Elv } Y_2 = \text{Elv dasar lantai hulu bendung} - \Delta Z + Y_2 \quad (2-34)$$

Dengan:

Y_2 = tinggi muka air di kolam olak (m)

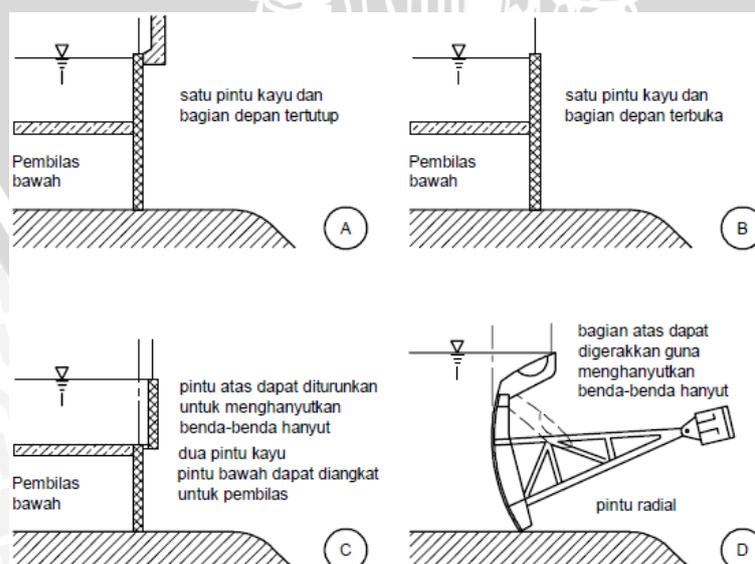
Y_1 = tinggi muka air saat awal loncatan (m)

F_1 = bilangan froude saat awal loncatan (m)

2.3.1.4. Pembilas Sedimen Hulu Bendung

Lantai dasar pada hulu bendung merupakan tempat mengendapnya butiran kasar karena kecepatan pada saat aliran normal tidak mampu membawa butiran kasar. Sedimen yang terkumpul dapat dibilas dengan jalan membuka pintu pembilas secara berkala.

Ada bermacam-macam pintu bilas yang bisa digunakan, Gambar 2.11. menjelaskan 4 tipe pintu pembilas.



Gambar 2.11. Tipe-tipe Pintu Bilas

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-04, 1986: 128

Pintu dengan bagian depan terbuka memiliki keuntungan-keuntungan berikut:

- ikut mengatur kapasitas debit bendung, karena air dapat mengalir melalui pintu-pintu yang tertutup selama banjir.
- pembuangan benda-benda terapung lebih mudah, khususnya bila pintu dibuat dalam dua bagian dan bagian atas dapat diturunkan.

Kelemahan-kelemahannya:

- sedimen akan terangkut ke pembilas selama banjir; hal ini bisa menimbulkan masalah, apalagi kalau sungai mengangkut banyak bongkah. Bongkah-bongkah ini dapat menumpuk di depan pembilas dan sulit disingkirkan.
- benda-benda hanyut bisa merusakkan pintu.
- karena debit di sungai lebih besar daripada debit di pengambilan, maka air akan mengalir melalui pintu pembilas; dengan demikian kecepatan menjadi lebih tinggi dan membawa lebih banyak sedimen.

Apabila selama banjir aliran air akan lewat di atas pintu, maka bagian atas pintu harus direncana sedemikian rupa, sehingga tidak ada getaran dan tirai luapannya harus diaerasi secukupnya.

Bagian atas pemisah berada di atas muka air selama pembilasan berlangsung. Untuk menemukan elevasi ini, eksploitasi pembilas tersebut harus dipelajari. Selama eksploitasi biasa dengan pintu pengambilan terbuka, pintu pembilas secara berganti-ganti akan dibuka dan ditutup untuk mencegah penyumbatan.

Pada waktu mulai banjir pintu pengambilan akan ditutup (tinggi muka air sekitar 0,50 m sampai 1,0 m di atas mercu dan terus bertambah), pintu pembilas akan dibiarkan tetap tertutup. Pada saat muka air surut kembali menjadi 0,50 sampai 1,0 m di atas mercu dan terus menurun, pintu pengambilan tetap tertutup dan pintu pembilas dibuka untuk menggelontor sedimen.

Karena tidak ada air yang boleh mengalir di atas dinding pemisah selama pembilasan (sebab aliran ini akan mengganggu), maka elevasi dinding tersebut sebaiknya diambil 0,50 atau 1,0 m di atas tinggi mercu.

Jika pembilasan harus didasarkan pada debit tertentu di sungai yang masih cukup untuk itu muka dinding pemisah. Biasanya lantai pembilas pada kedalaman rata-rata sungai. Namun demikian, jika hal ini berarti terlalu dekat dengan ambang pengambilan,

maka lantai itu dapat ditempatkan lebih rendah asal pembilasan dicek sehubungan dengan muka air hilir (tinggi energi yang tersedia untuk menciptakan kecepatan yang diperlukan).

Dianjurkan agar aliran pada pembilas direncanakan sebagai aliran bebas selama pembilasan berlangsung. Dengan demikian pembilasan tidak akan terpengaruh oleh tinggi muka air di hilir pembilas.

Kondisi pengaliran bebas dicapai bila aliran didepan pintu adalah subkritis dan dibelakang pintu adalah superkritis. Untuk kondisi pengaliran tenggelam akan dicapai apabila kedalaman air di belakang pintu $h_1 > C_c \cdot a$ dengan $C_c =$ koefisien kontraksi (0,61) dan $a =$ tinggi bukaan pintu.

Desain pintu pembilas dihitung dengan persamaan (KP-04,1986:55):

Untuk aliran bebas (*free flow*):

$$Q = \mu \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} \quad (2-35)$$

Untuk aliran tenggelam (*submerged flow*):

$$Q = \mu \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad (2-36)$$

$$V = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (2-37)$$

Dengan:

$Q =$ debit (m^3/det)

$K =$ faktor aliran tenggelam

$\mu =$ koefisien debit (0,5 – 0,7)

$a =$ bukaan pintu (m)

$b =$ lebar pintu (m)

$g =$ percepatan gravitasi (m/det^2)

$h_1 =$ kedalaman air di hulu pintu (m)

$h_2 =$ kedalaman air di hilir pintu (m)

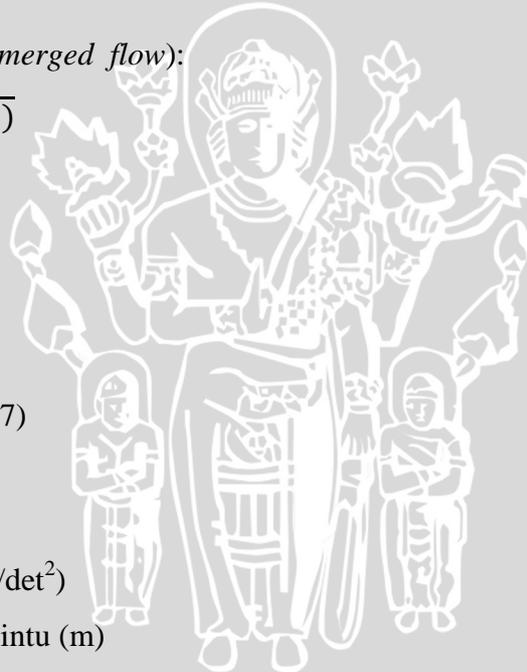
$V =$ kecepatan air di intake (m/d)

Besarnya bukaan pintu bergantung kepada kecepatan aliran masuk yang diizinkan. Kecepatan ini bergantung kepada ukuran butir bahan yang dapat diangkut (KP-02,1986:113):

$$v^2 \geq 32 \left(\frac{h}{d}\right)^{1/3} \cdot d \quad (2-38)$$

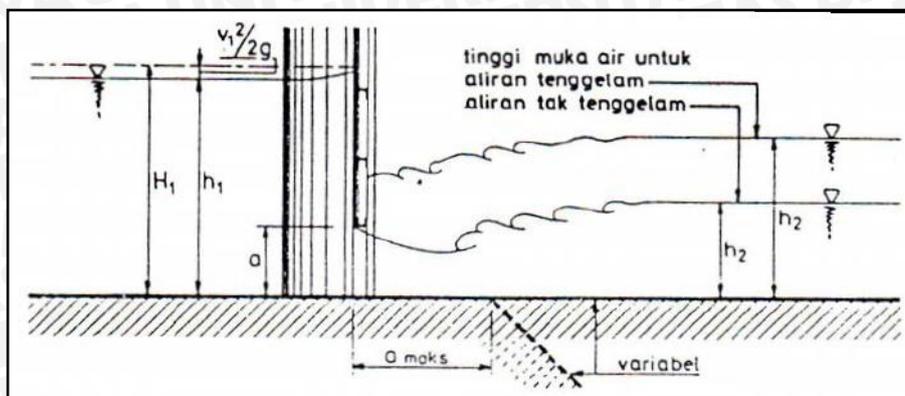
dengan:

$v =$ kecepatan rata-rata (m/dt)



h = kedalaman air (m)

d = diameter butir (m)



Gambar 2.12. Jenis Aliran Pada Pintu

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-04, 1986: 56

2.3.1.4.1. Pembilas Bawah

Jika kehilangan tinggi energi bangunan pembilas kecil, maka hanya diperlukan satu pintu, dan jika dibuka pintu tersebut akan memberikan kehilangan tinggi energi yang lebih besar di bangunan pembilas. Bagian depan pembilas bawah biasanya direncanakan di bawah sudut dengan bagian depan pengambilan.

Dimensi-dimensi dasar pembilas bawah adalah:

- tinggi saluran pembilas bawah hendaknya lebih besar dari 1,5 kali diameter terbesar sedimen dasar di sungai
- tinggi saluran pembilas bawah sekurang-kurangnya 1,0 m,
- tinggi sebaiknya diambil 1/3 sampai 1/4 dari kedalaman air di depan pengambilan selama debit normal.

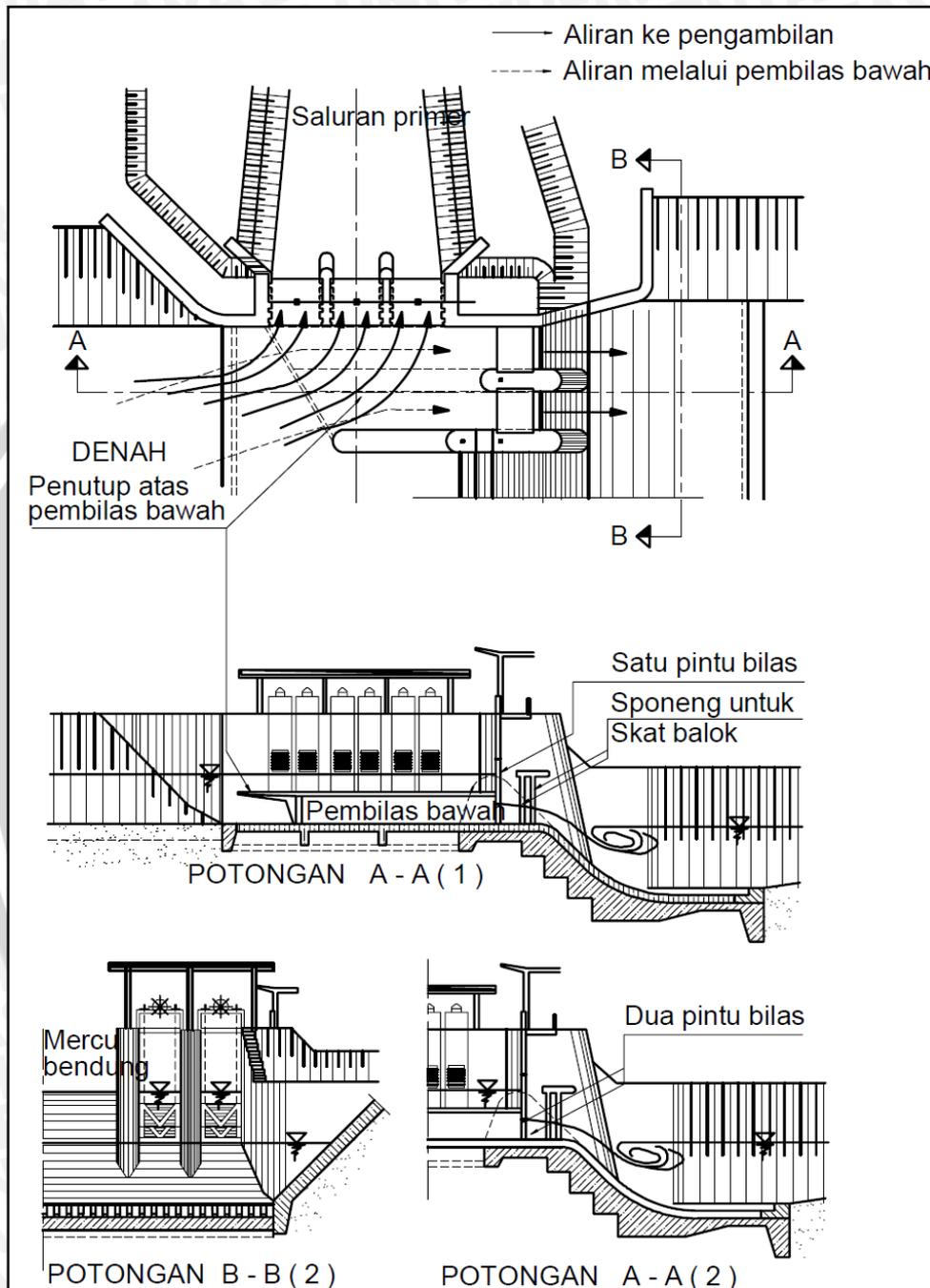
Dimensi rata-rata dari pembilas bawah yang direncanakan berkisar dari:

- 5 sampai 20 m untuk panjang saluran pembilas bawah
- 1 sampai 2 m untuk panjang tinggi saluran pembilas bawah
- 0,20 sampai 0,35 m untuk tebal beton bertulang.

Luas saluran pembilas bawah (lebar kali tinggi) harus sedemikian rupa sehingga kecepatan minimum dapat dijaga ($v = 1,0 - 1,5$ m/dt). Tata letak saluran pembilas bawah harus direncanakan dengan hati-hati untuk menghindari sudut mati (dead corner) dengan kemungkinan terjadinya sedimentasi atau terganggunya aliran.

Sifat tahan gerusan dari bahan dipakai untuk lining saluran pembilas bawah membatasi kecepatan maximum yang diizinkan dalam saluran bawah, tetapi kecepatan minimum bergantung kepada ukuran butir sedimen yang akan dibiarkan tetap bergerak.

Karena adanya kemungkinan terjadinya pusaran udara, di bawah penutup atas saluran pembilas bawah dapat terbentuk kavitasi, lihat Gambar 5.8. Oleh karena itu, pelat baja bertulang harus dihitung sehubungan dengan beton yang ditahannya.



Gambar 2.13. Pembilas Bawah

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-04, 1986: 56

2.3.1.5. Pintu Intake

Pintu *intake* adalah pintu yang berfungsi untuk mengatur jumlah air yang masuk dari saluran pengumpul ke saluran pengantar. Pintu *intake* direncanakan berdasarkan atas

debit yang akan digunakan pembilasan dan kebutuhan pembangkitan. Perencanaan pintu *intake* sama seperti perencanaan pintu pembilas, maka dari itu untuk menghitung dimensi pintu digunakan persamaan pada subbab 2.3.1.4.

2.3.2. Perencanaan Bangunan Tengah

Bangunan tengah adalah bangunan yang posisinya terletak pada tengah formasi bangunan PLTA. Dalam studi ini bangunan tengah meliputi saluran pengantar, kantong lumpur, pembilas, pelimpah, penyaring dan pintu *power intake*, dan bak penenang.

2.3.2.1. Perencanaan Saluran Pengantar

Saluran pengantar adalah saluran yang membawa debit yang disadap oleh bangunan pengambilan dan kemudian dibawa ke kantong lumpur. Dalam studi ini saluran pengantar berupa saluran terbuka.

Untuk merencanakan dimensi saluran pengantar digunakan persamaan 2-50 sampai persamaan 2-54. Saluran pengantar direncanakan dengan pertimbangan di dalam saluran tidak boleh terjadi pengendapan sedimen dan dapat menghayutkan diameter sedimen maksimum yang tersadap pada bangunan pengambilan.

2.3.2.2. Perencanaan *Sandtrap*/Kantong Lumpur

Fungsi bangunan *Sandtrap*/Kantong Lumpur adalah untuk mencegah agar sedimen tidak masuk ke dalam turbin dan menyebabkan kerusakan pada turbin dengan cara mengendapkannya di dasar kantong lumpur.

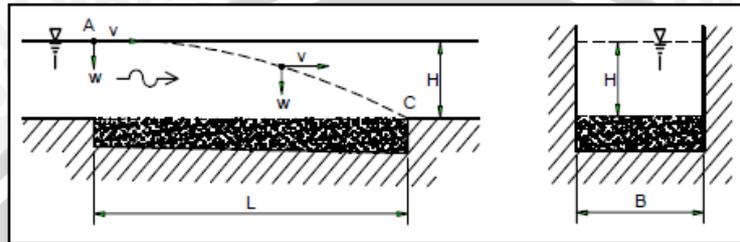
Kantong lumpur merupakan pembesaran potongan melintang saluran sampai panjang tertentu untuk mengurangi kecepatan aliran dan memberi kesempatan kepada sedimen untuk mengendap. Untuk menampung endapan sedimen ini, dasar bagian saluran tersebut diperdalam atau diperlebar. Tampungan ini dibersihkan tiap jangka waktu tertentu (kurang lebih sekali seminggu atau setengah bulan) dengan cara pembilas sedimennya kembali ke sungai dengan aliran terkonsentrasi yang berkecepatan tinggi (KP-02,1986:162).

Faktor-faktor lain yang akan dipertimbangkan dalam pemilihan dimensi kantong lumpur adalah (KP-02,1986:168):

- kecepatan aliran dalam kantong lumpur hendaknya cukup rendah, sehingga partikel yang telah mengendap tidak menghambur lagi.
- turbulensi yang mengganggu proses pengendapan harus dicegah.
- kecepatan hendaknya tersebar secara merata di seluruh potongan melintang, sehingga sedimentasi juga dapat tersebar merata.

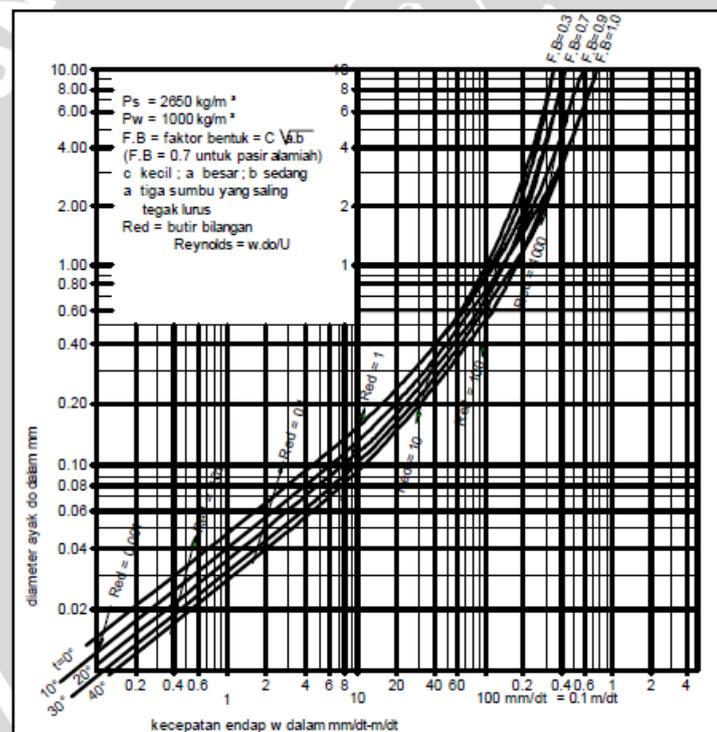
- kecepatan aliran tidak boleh kurang dari 0,30 m/dt, guna mencegah tumbuhnya vegetasi.

Pada Gambar 2.14. dimensi-dimensi L (panjang) dan B (lebar) kantong lumpur dapat ditentukan dengan memperhatikan gambar tersebut. Partikel yang masuk ke kolam pada A, dengan kecepatan endap partikel w dan kecepatan air v harus mencapai dasar pada C. Ini berakibat bahwa, partikel, selama waktu (H/w) yang diperlukan untuk mencapai dasar, akan berjalan (berpindah) secara horisontal sepanjang jarak L dalam waktu L/v .



Gambar 2.14. Skema Pengendapan Partikel Sedimen

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 166



Gambar 2.15. Hubungan Antara Diameter Saringan Dan Kecepatan Endap

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 169

Rumus yang digunakan untuk menghitung dimensi (KP-02,1986:166).

$$V = 5.10^{-4} \cdot Q \cdot T \quad (2-39)$$

$$V = H \cdot B \cdot L + 0,5 \cdot (I_s - I_n) \cdot (L^2) \cdot B \quad (2-40)$$

$$\frac{H}{w} = \frac{L}{v} \quad (2-41)$$

$$L \cdot B = \frac{Q}{w} \quad (2-42)$$

dengan:

V = volume kantong lumpur (m^3)

Q = debit saluran (m^3/det)

T = jarak waktu pembilasan (det)

H = kedalaman aliran saluran (m)

I_s = slope pembilasan

I_n = slope normal

w = kecepatan endap partikel sedimen (m/det)

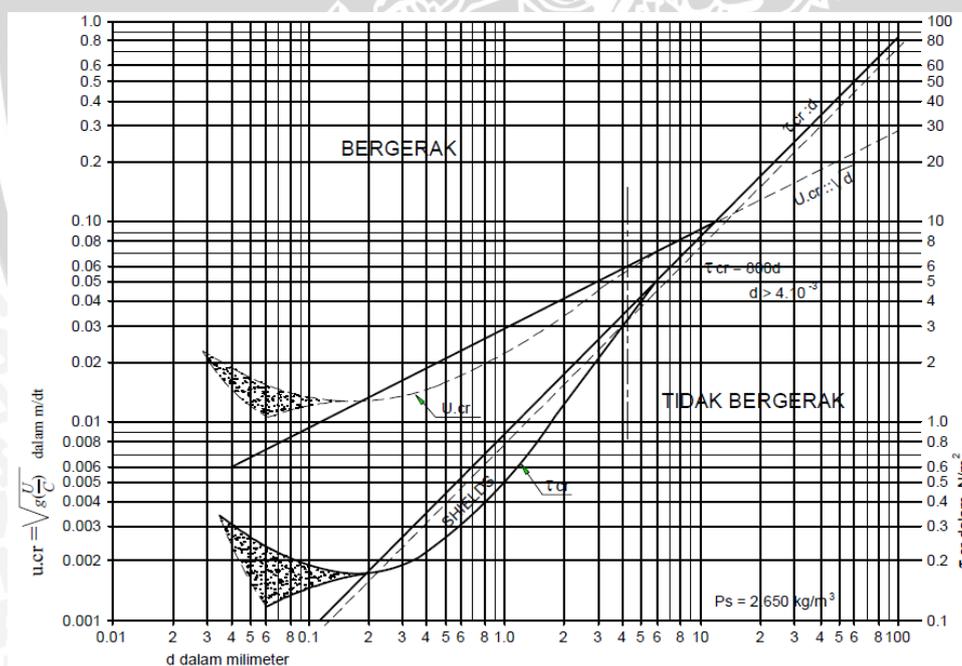
L = panjang kantong lumpur (m)

v = kecepatan aliran air (m/det)

$$= \frac{Q}{L.B} \quad (2-43)$$

B = lebar kantong lumpur (m)

Untuk menghitung slope pembilasan dan slope normal menggunakan persamaan 2-50 sampai 2-54. Untuk mengontrol bahwa slope pembilasan berfungsi untuk membilas sedimen yang mengendap maka digunakan grafik pada Gambar 2.16.



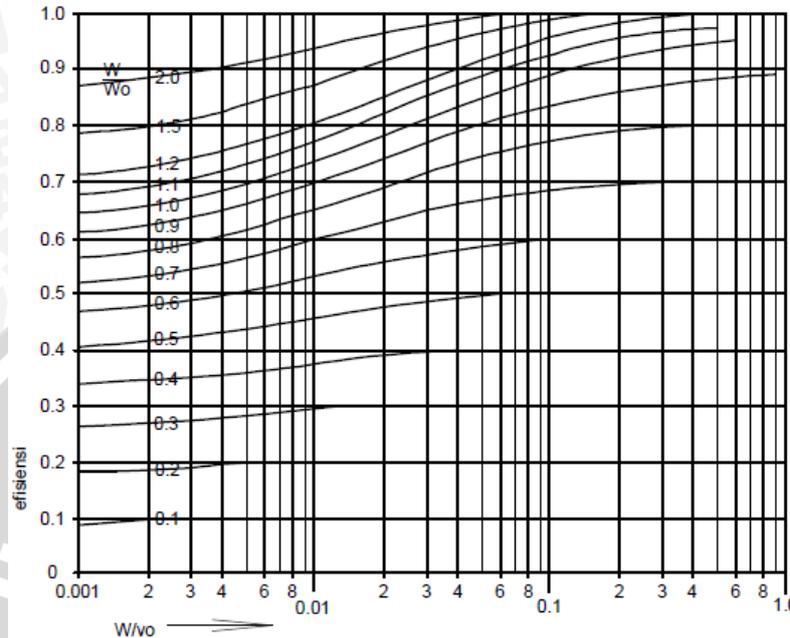
Gambar 2.16. Hubungan Kecepatan dan Tegangan Geser Kritis Dengan Besarnya Butiran Untuk $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ (Pasir)

Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 173

Untuk mengecek apakah pengendapan dalam kantong lumpur efisien maka menggunakan persamaan berikut:

$$W_o = (h_n \cdot V_n) / L \quad (2-44)$$

Setelah mendapatkan nilai W_o kemudian dicari nilai W/W_o dan W/V_o . Setelah mendapatkan nilai kedua parameter tersebut kemudian dicari nilai efisiensi dengan bantuan Gambar 2.17 (grafik efisiensi)



Gambar 2.17. Efisiensi Pengendapan Kantong Lumpur Untuk Aliran Turbulensi
Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 151

2.3.2.3. Pelimpah

Bangunan pelimpah harus direncanakan untuk tinggi muka air maksimum di saluran yang akan dilindungi dan dapat melimpahkan debit maksimum yang akan dibuang. Tinggi muka air yang merupakan dasar kerja bangunan pelimpah adalah faktor yang sudah tertentu di dalam perencanaan.

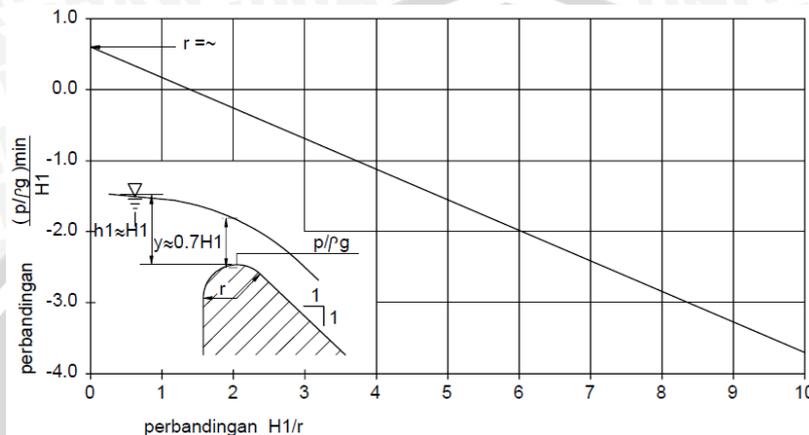
Debit rencana untuk bangunan pelimpah harus diperhitungkan dengan hati-hati berdasarkan keadaan di lapangan. Keadaan-keadaan darurat yang mungkin timbul harus dianalisis dan akibat-akibat tidak berfungsinya bangunan dan peluapan harus pula ditinjau.

2.3.2.3.1. Mercu Pelimpah

Perhitungan profil aliran pada pelimpah sama seperti bendung. Untuk menghitung lebar pelimpah dapat menggunakan persamaan 2-23 pada perencanaan bendung. Untuk menentukan elevasi dari mercu pelimpah maka perlu dihitung profil aliran pada kantong lumpur agar mendapatkan elevasi muka air yang akan dibuang.

Tekanan di atas mercu, untuk pelimpah dengan tinggi tekan sedang, dan tekanan negatif yang diijinkan sekitar $-1,5$ m. Sedangkan untuk pelimpah dengan tinggi tekan besar, U.S.B.R. menetapkan tekanan negatif yang diijinkan $-4,8$ m. Tekanan negatif perlu diwaspadai karena menyebabkan beberapa hal yang kurang menguntungkan :

- Menambah momen guling
- Menambah gaya akibat beban berguna pada pintu
- Mengurangi kapasitas peralatan yang dikontrol secara otomatis
- Menimbulkan getaran pada seluruh konstruksi
- Menimbulkan getaran pada lapisan selimut yang menyebabkan retaknya bangunan



Gambar 2.18. Tekanan pada mercu bendung bulat sebagai fungsi perbandingan $H1/r$
 Sumber: Dirjen Pengairan/KP-02, 1986: 53

2.3.2.3.2. Saluran Samping Pelimpah

Saluran samping pelimpah adalah saluran terbuka yang berfungsi untuk mengalirkan debit yang terlimpah oleh mercu untuk dibuang ke sungai/saluran lain. Saluran samping didesain mampu mengalirkan debit yang terlimpah dengan cepat agar pelimpahan air di mercu pelimpah tidak terganggu.

Pada bangunan pelimpah yang kecil, biasanya lebar dasar sepanjang dasar saluran samping dibuat seragam. Akan tetapi untuk saluran samping pada bangunan pelimpah yang besar biasanya dasar kolam akan semakin besar ke hilir, sehingga pada saat melewati debit banjir rencana permukaan air di dalam saluran samping membentuk bidang yang hampir datar dengan penampang basah paling efektif.

Di dalam saluran samping akan terjadi proses peredaman energi, maka saluran tersebut akan menerima beban hidrodinamis berupa hampasan aliran dan gaya-gaya vibrasi, sehingga saluran ini harus dibangun diatas pondasi batuan yang kukuh.

Berikut ini adalah persamaan untuk perencanaan dimensi saluran samping:

$$Q_x = q \cdot x \tag{2-45}$$

$$Q_x = V \cdot A \tag{2-46}$$

$$V = a \cdot x^n \tag{2-47}$$

$$A = b \cdot x \cdot d \tag{2-48}$$

$$hv = V^2/2g \quad (2-49)$$

$$y = \frac{n+1}{n} hv \quad (2-50)$$

$$D = d + y \quad (2-51)$$

$$Z = D + H_f \quad (2-52)$$

Dengan:

Q_x = debit pada jarak x dari titik tinjau (m^3/det)

q = debit yang disadap per meter lebar mercu pelimpah ($m^3/det/m$)

x = jarak dari titik tinjau (m)

V = kecepatan aliran (m/det)

a = koefisien yang berhubungan dengan kecepatan aliran di saluran samping.

n = eksponen untuk kecepatan aliran di saluran samping

A = luas penampang saluran (m^2)

b_x = lebar dasar saluran samping saat jarak x (m)

d = kedalaman aliran (m)

h_v = tinggi tekanan kecepatan aliran (m)

y = perbedaan elv. antara mercu pelimpah dengan muka air di saluran samping (m)

D = perbedaan elv. antara mercu pelimpah dengan dasar saluran samping (m)

H_f = kehilangan tinggi tekan akibat gesekan (m)

Z = tinggi total saluran samping (m)

2.3.2.4. Pembilas Kantong Lumpur

Sedimen yang mengendap di kantong lumpur dibilas dengan cara membuka pintu pembilas pada hilir kantong lumpur. Sedimen-sedimen tersebut kemudian dialirkan kembali menuju sungai melalui saluran pembilas. Dalam merencanakan pembilas persyaratannya adalah bangunan-bangunan tersebut harus bisa menghayutkan diameter sedimen maksimum yang mengendap di kantong lumpur.

Perencanaan pintu dan saluran pembilas kantong lumpur sama seperti perencanaan pembilas dan saluran pembilas hulu bendung pada subbab 2.3.1.4. Maka persamaan untuk menghitung dimensi pintu dapat dilihat pada subbab tersebut.

2.3.2.5. Pintu Power Intake

Pintu *power intake* adalah pintu yang berfungsi untuk mengatur jumlah air yang masuk dari kantong lumpur ke terowongan. Pintu *power intake* direncanakan berdasarkan atas debit yang akan digunakan untuk pembangkitan. Perencanaan pintu *power intake*

sama seperti perencanaan pintu *intake*, maka dari itu untuk menghitung dimensi pintu digunakan persamaan pada subbab 2.3.1.7.

2.3.2.6. Penyaring (*Trashrack*)

Penyaring (*Trashrack*) dipergunakan untuk menyaring aliran air sebelum masuk kedalam terowongan agar sampah-sampah yang terbawa aliran air tidak masuk kedalam turbin. Penyaring diletakkan pada pintu *power intake*. Penyaring biasanya menggunakan bahan keras yang disusun secara sejajar.

Kecepatan melalui penyaring dihitung dengan persamaan (Mosonyi,1963:537):

$$V = 1,5 - 2. V_0. \frac{t+b}{b} \quad (2-53)$$

dengan:

V = kecepatan melalui penyaring (m/det)

V_0 = kecepatan datang (m/det)

t = tebal jeruji (mm)

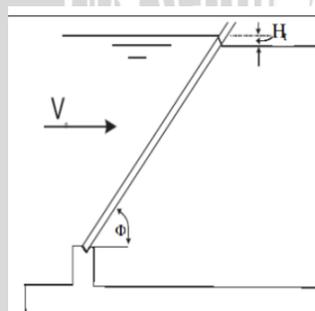
b = jarak antar jeruji (mm)

Varshney,1977:285 menyarankan penyaring yang lebih rapat untuk inlet pipa pesat atau inlet turbin dengan jarak antara 15 mm – 100 mm dan penyaring yang lebih besar untuk intake pengambilan dengan jarak antara 100 mm – 500 mm, selain itu kecepatan yang diijinkan untuk melewati penyaring berkisar antara (Varshney,1977:284):

0,6 – 2,5 m/det untuk tinggi jatuh rendah

1,25 – 2,0 m/det untuk tinggi jatuh sedang

2,0 – 6,0 m/det untuk tinggi jatuh besar



Gambar 2.19. Parameter Fisik *Trashrack*

Sumber: Penche,2004:24

2.3.2.7. Bak Penenang (*Forebay*)

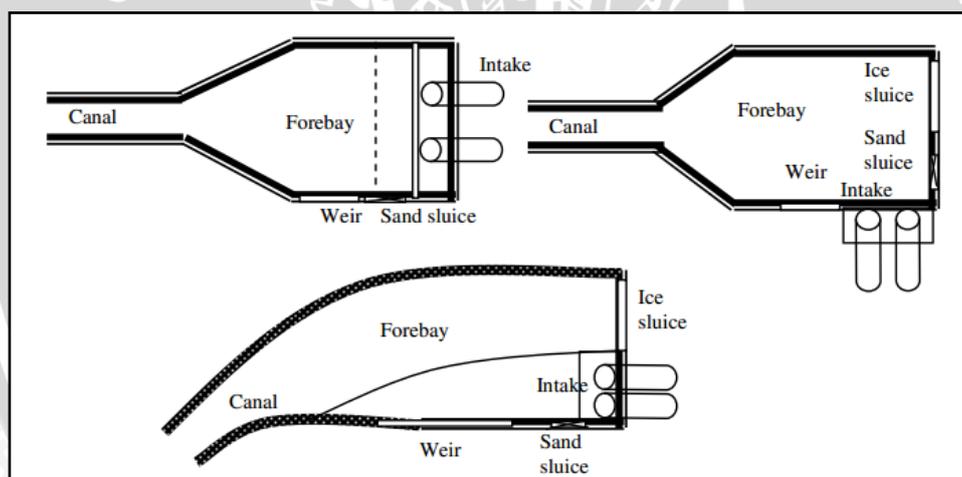
Perubahan mendadak pada debit yang masuk pada turbin dapat menyebabkan ketidakstabilan muka air pada saluran pengalih. Bak penampung (*forebay*) dapat berfungsi

sebagai kolam pengatur aliran untuk mengurangi perubahan muka air pada saluran pengalih dan juga berfungsi sebagai pelindung turbin dari endapan lumpur dan sampah.

Bak penampung biasanya diletakkan pada hilir saluran tenaga dengan faktor pertimbangan menurut PINHEIRO dalam (Ramos, 2000:69):

- Untuk memastikan kondisi untuk memasang pipa pesat dengan kelengkapannya (penyaring, alat pengukur, pintu intake) dengan kriteria tertentu.
- Untuk mengendalikan besarnya aliran yang masuk kedalam turbin.
- untuk memastikan adanya regulasi aliran kedalam pipa pesat sesuai dengan regulasi yang telah ditentukan.

Menurut AHEC,2011 bak penampung diusahakan untuk memiliki tampungan sebesar debit operasi dikalikan dengan waktu 2 menit atau 120Qp untuk menjaga kestabilan turbin akibat *governor*, untuk *governor* model terbaru volume tampungan dapat diturunkan lagi namun keterbatasan informasi tentang parameter kontrol tampungan maka 120Qp sudah mewakili.



Gambar 2.20. Tipe tipe bentuk dari bak penampung (forebay)

Sumber: Ramos,2000:70

2.3.3. Bangunan Pembawa

Bangunan pembawa merupakan bangunan yang berfungsi untuk mengantarkan air atau membawa air mulai dari bangunan tengah menuju ke rumah pembangkit. Dalam studi ini bangunan pembawa terdiri dari terowongan, pipa pesat, dan tangki gelombang.

2.3.3.1. Terowongan (Tunnels)

Secara umum terowongan adalah bangunan yang berada di bawah permukaan tanah. Fungsi terowongan adalah membawa air dari intake menuju penstock dan akhirnya ke turbin pembangkit. Aliran dalam terowongan diusahakan aliran tertutup, dikarenakan

untuk menjaga tekanan pada air. Macam-macam penampang terowongan menurut (Varshney, 1977:347)

- Penampang Lingkaran

Penampang jenis ini paling banyak digunakan dan sangat cocok untuk mempertimbangkan *hydraulic* dan struktur dari terowongan. Tetapi penampang jenis ini tidak terlalu cocok digunakan pada jenis tanah yang mayoritas batuan.

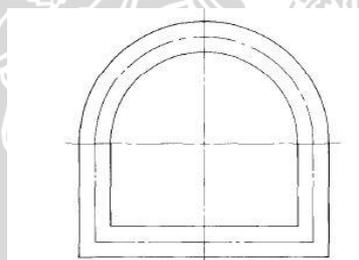


Gambar 2.21. Penampang lingkaran

Sumber: Varshney, 1997: 347

- Penampang berbentuk D

Penampang jenis ini biasanya digunakan di daerah pegunungan api dan jenis tanah yang berbatu dan hasil dari sedimentasi.

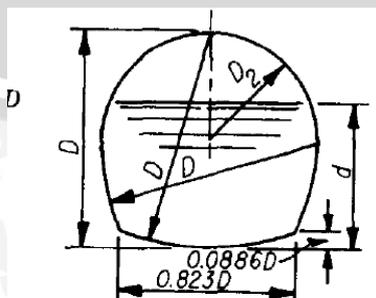


Gambar 2.22. Penampang berbentuk D

Sumber: Varshney, 1997: 347

- Penampang berbentuk tapal kuda

Penampang jenis ini merupakan gubahan dari penampang lingkaran dan penampang D. Penampang jenis ini sangat kuat menahan tekanan dari luar. Kualitas dan jenis batuan mempengaruhi tekanan didalam terowongan.



Gambar 2.23. Penampang Tapal Kuda

Sumber: Varshney, 1997: 347

- Penampang berbentuk telur

Penampang ini digunakan pada batuan yang berlapis-lapis dan dimana batuan yang jatuh menyebabkan meningkatnya tekanan eksternal pada terowongan

Menurut Mosonyi kecepatan ideal pada terowongan adalah 2 – 4,5 m/dt. Untuk menentukan diameter terowongan dapat digunakan berbagai macam rumus empiris dan dengan menggunakan batas kecepatan izin terowongan. Berikut ini adalah persamaan untuk menghitung diameter terowongan:

$$\text{Persamaan Mosonyi, } D = 0,62 \cdot Q^{0,48} \quad (2-54)$$

$$\text{Persamaan Sarkaria, } D = 0,62 \cdot (P^{0,43} / H^{0,65}) \quad (2-55)$$

$$\text{Persamaan Fahlbush, } D = 0,52 \cdot H^{-0,17} \cdot (P/H)^{0,43} \quad (2-56)$$

$$Q = V \cdot A \quad (2-57)$$

$$A = 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \quad (2-58)$$

Dengan:

D = diameter terowongan (m)

Q = debit dalam pipa (m³/det)

P = daya yang dibangkitkan (KW)

H = tinggi jatuh bruto (m)

V = kecepatan aliran (m/det)

A = luas penampang pipa (m²)

Agar dalam pipa tidak mengalami gangguan pengaliran akibat *vorticity*, maka perlu dihitung kedalaman aliran tekan pada inlet terowongan. Berikut ini adalah persamaan untuk menghitung kedalaman aliran tekan:

$$\text{Persamaan Gordon, } ht > 0,725 \cdot V \cdot D^{0,5} \quad (2-59)$$

$$\text{Persamaan Knauss, } ht > \frac{1+2,3 \cdot V}{(gD)^{0,5}} \quad (2-60)$$

$$\text{Persamaan Rohan, } ht > 1,474 \cdot V^{0,48} \cdot D^{0,76} \quad (2-61)$$

Dengan:

ht = kedalaman aliran tekan (m)

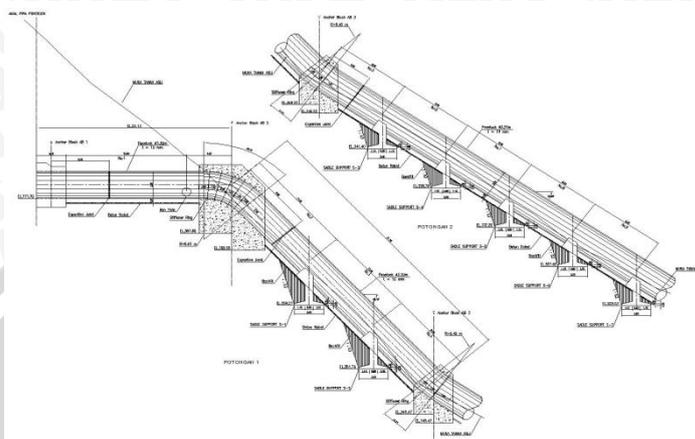
V = kecepatan aliran (m/det)

D = diameter terowongan (m)

2.3.3.2. Pipa Pesat (*Penstock*)

Pipa pesat adalah saluran yang menyalurkan dan mengarahkan air dari tangki gelombang ke turbin. Diameter pipa pesat dipilih dengan pertimbangan keamanan,

kemudahan proses pembuatan, ketersediaan material dan tingkat rugi (*friction losses*) seminimal mungkin. Pipa pesat biasanya dilengkapi dengan tangki peredam (*surge tank*) yang berfungsi untuk menyerap pukulan air serta menyimpan air cadangan untuk mengatasi peningkatan beban yang tiba-tiba.



Gambar 2.24. Pipa Pesat Dan Kelengkapannya

Sumber : <http://mohab.wordpress.com>

Hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan pipa pesat untuk PLTA adalah diameter pipa. Dalam perencanaan diameter perlu diperhatikan beberapa faktor antara lain: harga pipa pesat, kecepatan aliran dalam pipa pesat dan kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat. Diameter pipa yang besar akan membuat kecepatan aliran menurun sehingga kehilangan tinggi tekan akan menurun sehingga energi meningkat namun akan dibutuhkan biaya yang mahal begitu pula sebaliknya diameter yang kecil akan membuat biaya lebih murah namun akan menurunkan besarnya hasil pembangkitan energi dikarenakan peningkatan kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat akibat kecepatan yang tinggi.

kecepatan ijin pada pipa pesat sangat bergantung pada jenis material bahan pipa pesat, kecepatan ijin pipa pesat adalah sebagai berikut (Mosonyi 2A,1963: 91):

Pipa dari beton 2 m/dt – 4 m/dt

Pipa dari baja 2,5 m/dt – 7 m/dt

Sedangkan kecepatan potensial yang dapat dicapai oleh suatu pipa dikarenakan tinggi jatuh zat cair dihitung dengan persamaan:

$$V = \sqrt{2gh} \quad (2-62)$$

dimana:

V = kecepatan jatuh potensial (m/dt)

g = percepatan gravitasi (m/dt²)

h = tinggi jatuh zat cair (m)

Untuk menentukan diameter pipa pesat yang ekonomis dapat ditentukan dengan beberapa persamaan empiris sebagai berikut:

$$\text{Persamaan Sarkaria's, } D = 3,55 \cdot \left(\frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot H} \right)^{0,25} \quad (2-63)$$

$$\text{Persamaan ESHA, } D = \left(\frac{10,3n^2 Q^2}{hf} \right)^{0,1875} \quad (2-64)$$

$$\text{Persamaan Dolands, } D = 0,176 \cdot (P/H)^{0,466} \quad (2-65)$$

Dengan:

D = diameter penstock (m)

Q = debit pada penstock (m³/det)

P = tenaga (HP)

H = tinggi jatuh (m)

n = koef kekasaran pipa

hf = kehilangan tinggi tekan total pada pipa (m)

Perhitungan tebal pipa pesat dapat menggunakan beberapa persamaan, antara lain:

$$\text{Persamaan ASME, } t = 2,5 D + 1,2 \quad (2-66)$$

$$\text{Persamaan USBR, } t = \frac{D+500}{400} \quad (2-67)$$

$$\text{Persamaan PG\&E, } t = D/288 \quad (2-68)$$

Dengan:

t = tebal pipa pesat (m)

D = diameter pipa pesat (m)

Sifat material bahan untuk pipa pesat ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 2.10. Karakteristik Bahan Material Pipa Pesat

Material	Young's modulus of elasticity E(N/m ²)E9	Coefficient of linear expansion a (m/m °c)E6	Ultimate tensile strength (N/m ²)E6	n
Welded Steel	206	12	400	0.012
Polyethylene	0.55	140	5	0.009
Polyvinyl Chloride (PVC)	2.75	54	13	0.009
Asbestos Cement	n/a	8.1	n/a	0.011
Cast iron	78.5	10	140	0.014
Ductile iron	16.7	11	340	0.013

Sumber: *Penche,2004:137*

Perhitungan tekanan hidrostatik untuk pipa perlu memperhatikan pengaruh pukulan air terhadap pipa, dimana kenaikan air akibat pukulan air dapat merusak pipa. Rumus *Water Hammer* sebagai berikut (Chaudhry, 2014):

$$\alpha = \sqrt{\frac{K}{\rho [1 + (\frac{K}{E})\psi]}} \quad (2-69)$$

$$P = \frac{\alpha \cdot V_0}{2 \cdot g \cdot H_0} \quad (2-70)$$

$$\theta = \frac{\alpha \cdot T}{2 \cdot L_0} \quad (2-71)$$

$$n = \frac{P}{\theta} \quad (2-72)$$

dimana untuk turbin Francis rumusnya adalah sebagai berikut :

$$\frac{h_0}{H_0} = \left(\frac{0,75}{\theta \sqrt{\theta}} + 1,25 \right) n \quad (2-73)$$

dimana:

α = kecepatan gelombang

K = modulus air (N/m^2)

ρ = tekanan hidrostatik akibat tinggi jatuh (kg/m^3)

E = modulus elastis bahan (N/m^2)

Ψ = konstanta fleksibilitas

P = konstanta Allievi pipeline

V_0 = kecepatan aliran (m/dt)

g = percepatan gravitasi (m^2/s)

H_0 = Tinggi tekanan saat masuk dan keluar katup di turbin (m)

θ = konstanta waktu penutupan katup

T = waktu penutupan katup (detik)

L_0 = Panjang saluran pipa (m)

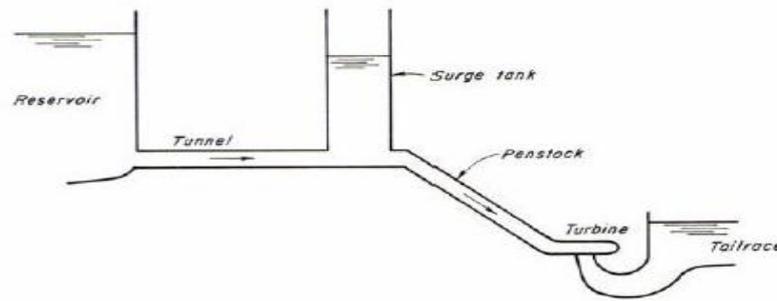
h_0 = tinggi pukulan air terhadap katup (m)

2.3.3.3. Tangki Gelombang (*Surge Tanks*)

Tangki gelombang adalah pipa tegak di ujung hilir saluran air tertutup untuk menyerap kenaikan tekanan mendadak serta dengan cepat memberikan air selama penurunan singkat dalam tekanan. Surge tanks biasanya disediakan pada PLTA besar atau menengah ketika ada jarak yang cukup jauh antara sumber air dengan unit daya, sehingga diperlukan sebuah penstock panjang. Fungsi utama dari Surge tanks :

- Ketika beban berkurang, air bergerak mundur dan akan disimpan di dalamnya

- Bila beban meningkat, tambahan pasokan air akan disediakan oleh surge tanks



Gambar 2.25. Surge Tanks

Sumber: Varshney,1997: 456

Tangki gelombang dibutuhkan untuk melindungi pipa pesat dari bahaya tekanan yang terlalu besar pada pipa pesat, menurut AHEC,2009:50 Pipa pesat membutuhkan tangki gelombang bila:

$$L > 4H \quad (2-74)$$

dengan:

L = panjang total pipa pesat (m)

H = tinggi jatuh (m)

Berikut ini adalah persamaan untuk menghitung luas *Surge Tanks* (Thoma):

$$A_{st} = \frac{At.Lt}{2.g.c.H} \quad (2-75)$$

$$D_{st} = \sqrt{\frac{A_{st}}{0,25.\pi}} \quad (2-76)$$

Dengan :

A_{st} = Luas *Surge Tanks* (m²)

D_{st} = Diameter *Surge Tanks* (m)

Lt = panjang terowongan (m)

A_t = Luas penampang Terowongan (m²)

H = *Gross Head* (m)

g = percepatan gravitasi (m²/s)

c = koefisien thoma

Sedangkan rumus menghitung ketinggian air dalam *Surge Tanks* (Permakian):

$$Z_{st} = v \left(\frac{Lt At}{g A_{st}} \right)^{0,5} \quad (2-77)$$

Dengan :

Z_{st} = Tinggi muka air didalam *surge tanks* (m)

v = kecepatan air didalam terowongan (m/s)

L_t = panjang terowongan (m)

A_t = Luas penampang Terowongan (m^2)

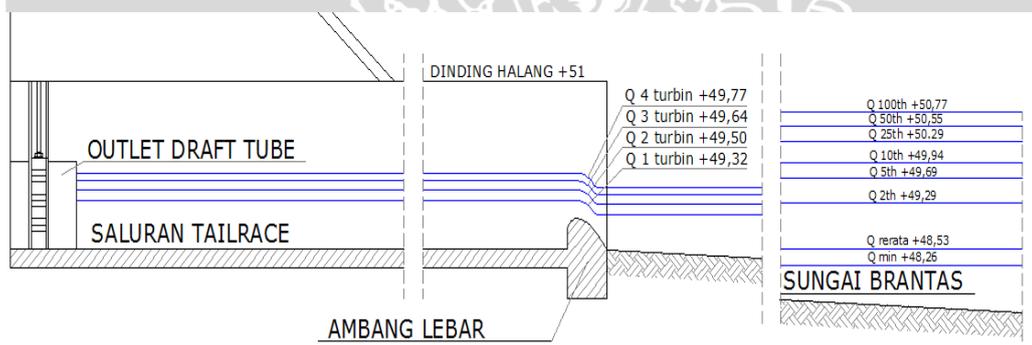
g = gravitasi (m^2/s)

A_{st} = Luas *Surge Tanks* (m^2)

2.3.3.4. Saluran Pembuang (*Tailrace Cannal*)

Saluran pembuang difungsikan untuk membuang aliran debit dari *draft tube* menuju area pembuangan (sungai). Bentuk desain dari saluran pembuang bisa bermacam macam tergantung dari kondisi topografi dan dengan memperhatikan aspek penempatan titik pusat turbin, apakah turbin ditempatkan lebih tinggi dari *tail water level* atau lebih rendah dari *tail water level*.

Saluran pembuang dapat direncanakan dengan menggunakan tipe saluran terbuka atau dengan menggunakan tipe saluran tertutup, untuk saluran terbuka perencanaan saluran pembuang menggunakan persamaan manning strickler, sementara untuk saluran tertutup direncanakan dengan menggunakan persamaan untuk aliran bertekanan (*pressured flow*).



Gambar 2.26. Saluran Tailrace

2.3.3.5. Tinggi Jatuh Efektif (*Net Head*)

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, 2000:57). Persamaan tinggi jatuh efektif adalah:

$$H_{\text{eff}} = \text{EMAW} - \text{TWL} - h_l \quad (2-78)$$

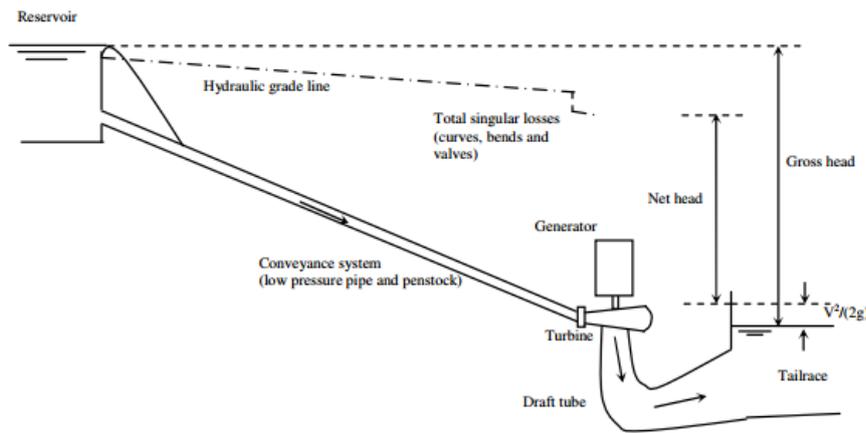
dengan:

H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

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

TWL = *tail water level* (m)

h_l = total kehilangan tinggi tekan (m)



Gambar 2.27. Sketsa Tinggi Jatuh Effektif

Sumber : Ramos,2000:61

2.3.3.5.1. Kehilangan Tinggi Tekan (Head Loss)

Kehilangan tinggi energi adalah menurunnya besarnya energi akibat gesekan maupun kontraksi yang terjadi selama proses pengaliran, berdasarkan hukum kekekalan energi pada persamaan Bernoulli besarnya energi adalah sama namun terjadi penurunan energi atau kehilangan energi pada kisi atau section setelah mengalami gesekan, perubahan bentuk dan hambatan.

A. Kehilangan tinggi pada inlet saluran tertutup

Kehilangan tinggi pada inlet dihitung sebagai berikut (patty,1995):

$$hf = f \frac{V^2}{2g} \tag{2-79}$$

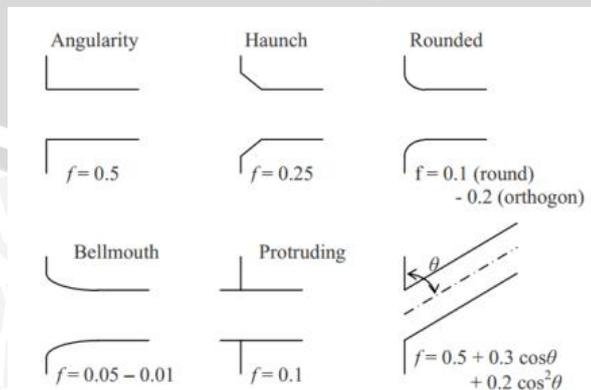
dengan:

hf = kehilangan tinggi pada inlet pengambilan (m)

V = kecepatan masuk (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

f = koefisien kehilangan tinggi, lihat gambar 2.21



Gambar 2.28. Nilai f Berdasarkan Bentuk Inlet

Sumber : MHP-1,2009:5-13

B. Kehilangan tinggi pada saluran tertutup

Perhitungan kehilangan pada saluran tertutup dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu kehilangan tinggi mayor (*major losses*) dan kehilangan tinggi minor (*minor losses*), kehilangan tinggi mayor disebabkan oleh gesekan yang terjadi didalam pipa akibat kekasaran dari pipa itu sendiri, besarnya kehilangan tinggi mayor pada saluran tertutup dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Penche,2004:33):

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (2-80)$$

$$hf = \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \quad (2-81)$$

dengan:

V = kecepatan aliran (m/s)

R = Jari-jari hidraulik

S = kemiringan saluran

n = koefisien kekasaran manning

L = Panjang saluran (m)

hL = *Head Loss*

nilai koefisien kekasaran manning

Sangat kasar = 0,040 – 0,060

Permukaan kasar = 0,025 – 0,035

Permukaan keras = 0,020 – 0,030

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

$$hf = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (2-82)$$

dengan:

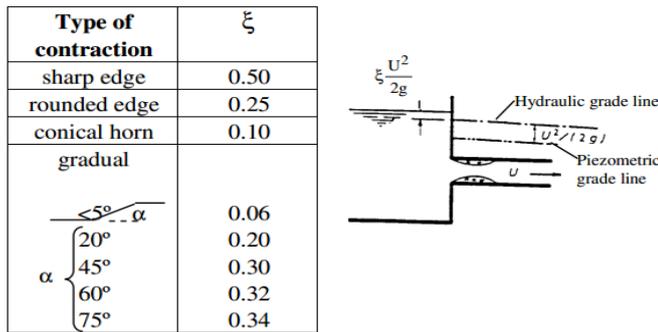
ξ = keofisien berdasarkan jenis kontraksi

V = kecepatan masuk (m/dt)

g = percepatan gravitasi (m/dt²)

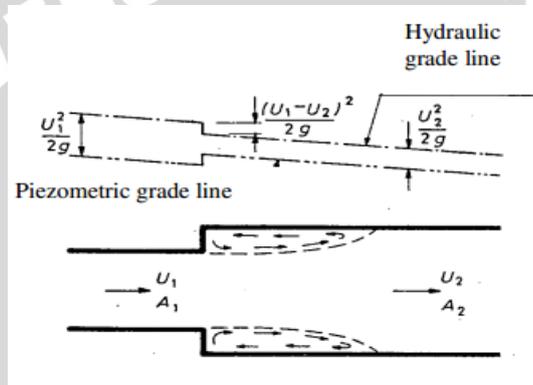
nilai ξ dapat ditentukan berdasarkan jenis kontraksi atau hambatan yang terjadi pada pengaliran, berikut jenis kontraksi dan hambatan yang diperhitungkan (Ramos,2000:64):

- Kontraksi



Gambar 2.29. Kisaran nilai ξ Berdasarkan Tipe Kontraksi
 Sumber : Ramos,2000:64

- Penyempitan / pelebaran



Gambar 2.30. Sketsa Situasi Kehilangan Tinggi Akibat Penyempitan Dan Pelebaran
 Sumber : Ramos,2000:64

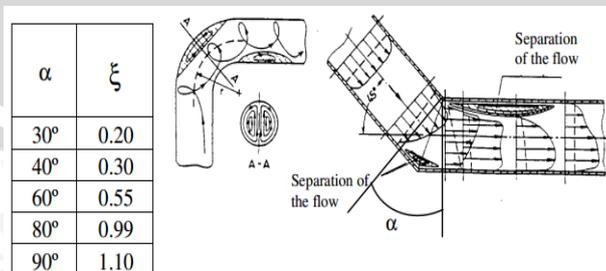
$$\xi = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \tag{2-83}$$

dengan:

ξ = koefisien

A = luas penampang (m^2)

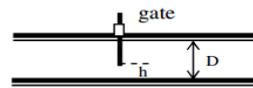
- Tikungan / belokan



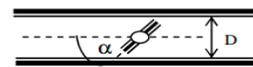
Gambar 2.31. Kisaran Nilai ξ Akibat Belokan
 Sumber : Ramos,2000:65

- Pintu dan katup

h/D	ξ
0.20	31.4
0.50	3.3
0.70	0.8



α	ξ
5°	0.24
20°	1.54
40°	10.8
60°	118



Gambar 2.32. Kisaran Nilai ξ Akibat Pintu dan Katup

Sumber : Ramos,2000:65

- Penyaring

besarnya kehilangan tinggi akibat penyaring (*trashrack*) dihitung dengan persamaan berikut :

$$h_i = k_t \frac{v^2}{2g} \quad (2-84)$$

Dengan :

V = kecepatan aliran (m/s)

g = gravitasi (m^2/s)

$$k_t = \text{koefisien kehilangan di saringan} = 1,45 - 0,45 \frac{a_n}{a_g} - \left(\frac{a_n}{a_g}\right)^2 \quad (2-85)$$

a_n = luas area bersih saringan

a_g = luas area saringan keseluruhan

2.3.3.6. Turbin Hidraulik

Menurut M.M. Dandekar (1991:391) turbin-turbin hidraulik, berhubungan erat dengan generator, fungsi utamanya adalah mengubah energi air menjadi energi listrik. Air mengalir melalui turbin, memberi tenaga pada *runner* (penggerak) dari turbin dan membuatnya berputar (energi mekanis). Energi mekanis diubah dengan generator listrik menjadi tenaga listrik.

2.3.3.6.1. Klasifikasi Turbin

Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis, turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin impuls dan turbin reaksi. Perbedaan pokok kedua golongan turbin tersebut adalah :

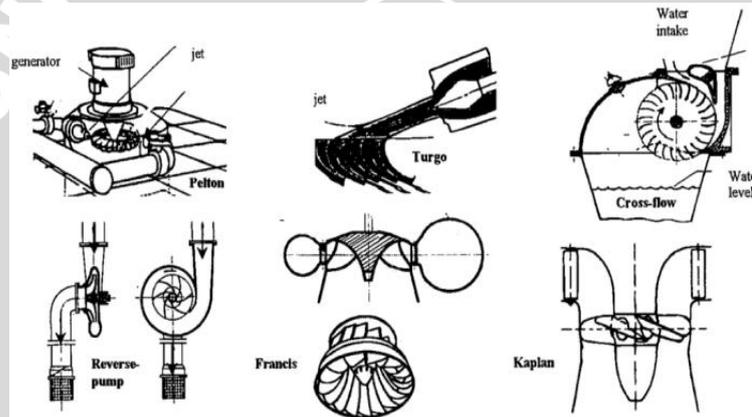
1. Runner turbin impuls berputar di udara karena mendapat pancaran air. Dengan demikian maka seluruhnya (atau hampir seluruhnya) diubah menjadi energi kinetik untuk memutar *runner*.
2. Runner turbin reaksi berputar didalam air oleh energi dalam bentuk tekanan dan kinetik.

Untuk memudahkan pemakaian jenis turbin, maka turbin-turbin tersebut diklasifikasikan sebagai berikut:

Tabel 2.11. Klasifikasi dan Kapasitas Turbin

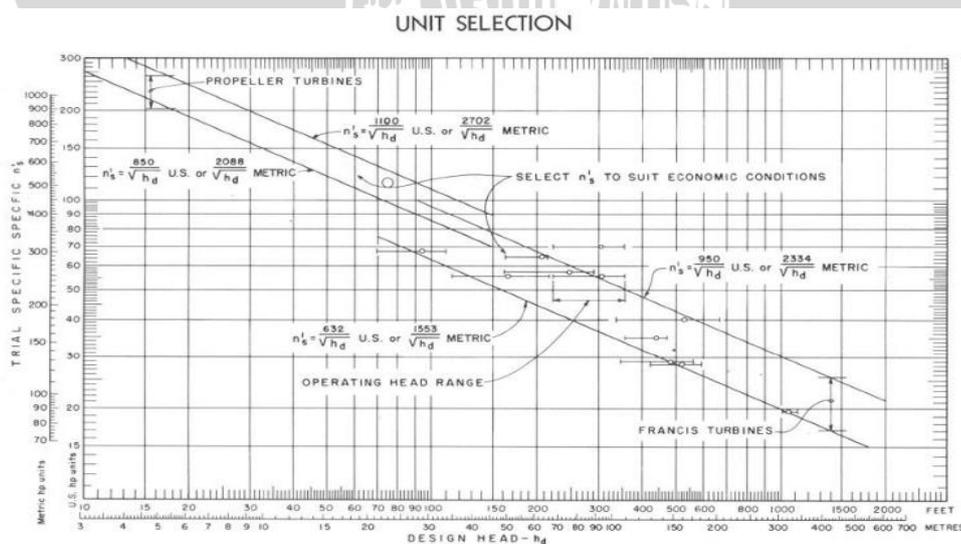
turbin hidrolik		H (m)	Q (m ³ /s)	P (kW)	n (r.p.m)
Reaksi:	bulb	2 -10	3 - 40	100 - 2500	200 - 450
	kaplan dan baling - baling dengan aliran axial	2 -20	3 - 50	50 - 5000	250 - 700
	francis dengan aliran diagonal	10 - 40	0,7 - 10	100 -5000	100 -250
	francis dengan aliran radial	40 -200	1 - 20	500 - 15000	30 -100
impuls:	pelton	60 - 1000	0,2 - 5	200 -15000	< 30
	turgo	30 -200		100 - 6000	
	cross flow	2 - 50	0.01 - 0.12	2 -15	

Sumber: Ramos,2000:82



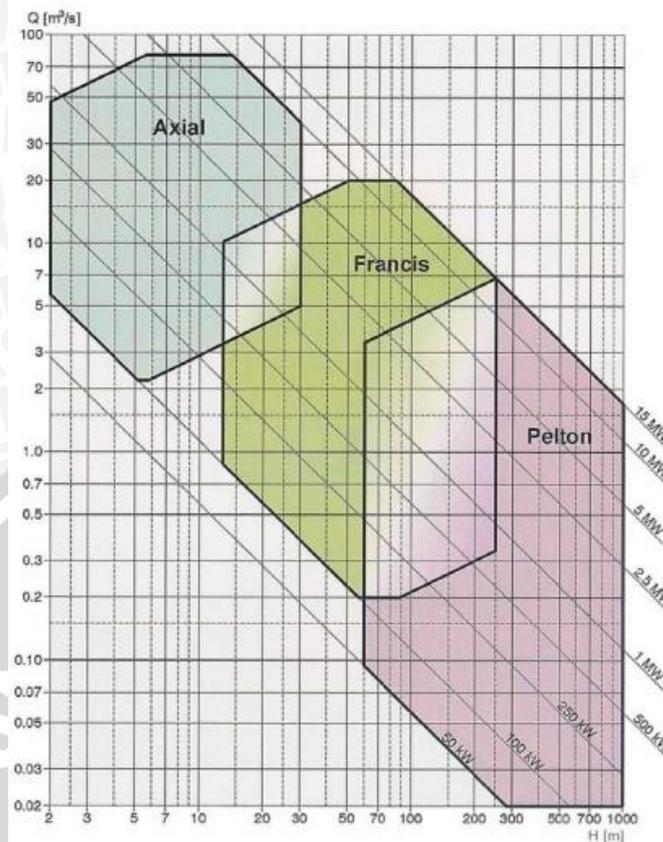
Gambar 2.33. Jenis Turbin Untuk Pembangkitan Tenaga Air

Sumber: Ramos,2000:83



Gambar 2.34. Jenis Turbin Berdasarkan Kecepatan Spesifik Dan Tinggi Jatuh

Sumber: USBR,1976:15



Gambar 2.35. Grafik Pemilihan Tipe Turbin Menurut ESHA
 Sumber: Penche,2004

Dalam pemilihan harus diperhatikan karakteristik dari masing masing turbin, turbin reaksi biasa digunakan untuk pembangkit listrik dengan tinggi jatuh sedang – kecil sedangkan turbin impuls digunakan untuk tinggi jatuh besar, faktor lain yang perlu diperhatikan adalah tentang putaran dan kecepatan spesifik turbin, karena kecepatan spesifik turbin merupakan karakteristik yang mendasari dalam perencanaan turbin.

2.3.3.6.2. Karakteristik Turbin

Karakteristik turbin adalah parameter yang mendasari perencanaan turbin hidrolis, karakteristik turbin meliputi kecepatan spesifik turbin (N_s), kecepatan putar turbin atau kecepatan sinkron generator (n). dalam perencanaan karakteristik turbin dapat digunakan metode yang diterapkan oleh *European small hydropower association* (ESHA).

ESHA menggunakan standar internasional IEC 60193 dan 60041 untuk menentukan besarnya nilai kecepatan spesifik turbin, Formula untuk menghitung besarnya kecepatan spesifik adalah (Penche,2004:168):

$$N_{QE} = n \frac{\sqrt{Q}}{E^{3/4}} \tag{2 -86}$$

dengan:



- N_{QE} = kecepatan spesifik (tak berdimensi)
 Q = debit desain (m^3/dt)
 E = enegi hidraulik spesifik didapat dari ($E = H \times g$) (j/kg) (2-87)
 n = Putaran dasar turbin (t/s)

Hubungan atau kesetaraan dari nilai N_{QE} dengan nilai parameter turbin dengan menggunakan metode lain seperti: kecepatan spesifik (N_s), faktor kecepatan (ϕ) dan putaran satuan (N_Q) adalah sebagai berikut (Penche,2004:168):

$$N_s = 995 N_{QE} \quad (2-88)$$

$$N_Q = 333 N_{QE} \quad (2-89)$$

$$\phi = 2,11 N_{QE} \quad (2-90)$$

Dalam perhitungan kecepatan spesifik turbin nilai putaran dasar turbin harus di coba coba terlebih dahulu untuk memperkirakan besarnya putaran dasar turbin maka digunakan persamaan empiris untuk mengetahui nilai kecepatan spesifik turbin (N_{QE}') dengan persamaan berikut (Penche,2004:169):

$$\text{Turbin Pelton} \quad N_{QE}' = 0.0859 / H^{0.243} \quad (2-91)$$

$$\text{Turbin Francis} \quad N_{QE}' = 1.924 / H^{0.512} \quad (2-92)$$

$$\text{Turbin Kaplan} \quad N_{QE}' = 2.294 / H^{0.486} \quad (2-93)$$

$$\text{Turbin Propeller} \quad N_{QE}' = 2.716 / H^{0.5} \quad (2-94)$$

$$\text{Turbin Bulb} \quad N_{QE}' = 1.528 / H^{0.2837} \quad (2-95)$$

Setelah itu maka putaran dasar turbin (n) dan jumlah kutub generator (p) bisa direncanakan berdasarkan kecepatan spesifik coba – coba (N_{QE}'), ESHA memberikan kisaran nilai kecepatan spesifik untuk tiap turbin adalah sebagai berikut (Penche,2004:169):

$$\text{turbin francis} \quad = 0,05 \leq N_{QE} \leq 0,33 \quad (2-96)$$

$$\text{turbin propeller, Kaplan dan bulb} \quad = 0,19 \leq N_{QE} \leq 1,55 \quad (2-97)$$

$$\text{turbin pelton} \quad = 0,005 \leq N_{QE} \leq 0,025 \quad (2-98)$$

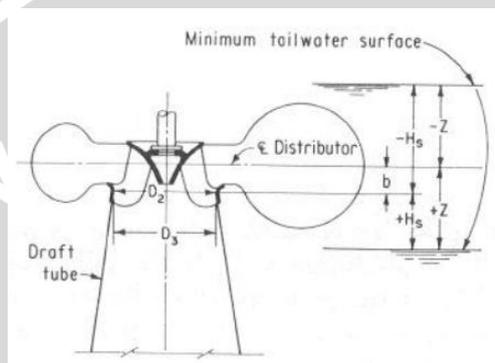
$$\text{turbin pelton dengan (n) nozzle} \quad = 0,005 n^{0,5} \leq N_{QE} \leq 0,025 n^{0,5} \quad (2-99)$$

2.3.3.6.3. Kavitasasi dan Titik Pusat Turbin

Kavitasasi adalah suatu kejadian yang timbul dalam aliran dengan kecepatan yang besar, sehingga tekanan air menjadi lebih kecil daripada tekanan uap air maksimum di temperatur itu. Proses ini menimbulkan gelembung-gelembung uap air yang dapat menimbulkan erosi pada turbin (Patty, 1995:99). Untuk menghindarkan bertambahnya kavitasasi perlu (Arismunandar, 2004:70):

- Memilih sudu rotor yang tepat bentuknya,
- Memasang rotor pada posisi yang rendah terhadap permukaan air sebelah bawah (*tail water*),
- Memilih kecepatan jenis yang kecil,
- Memberi udara dalam jumlah yang tepat pada bagian atas dari pipa lepas,
- Melapisi sudu rotor dengan bahan yang tahan terhadap kavitasi.

Untuk menghindari terjadinya kavitas maka turbin harus diletakkan pada posisi yang aman yakni titik dari tinggi hisap (H_s) sampai titik pusat turbin.



Gambar 2.36. Skema Pemasangan Turbin Untuk Analisa Kavitasi

Sumber: USBR,1976:23

Penentuan titik berat turbin atau elevasi pusat turbin dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$Z = TWL + H_s + b \quad (2-100)$$

Dengan:

Z = titik pusat turbin (m)

TWL = elevasi *tail water level* (m)

H_s = Tinggi hisap turbin (m)

b = perbedaan tinggi antar pusat turbin dengan outlet runner

Untuk menghitung tinggi hisap (H_s) dapat dihitung dengan menggunakan metode ESHA (Penche,2004:169):

$$H_s = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} - \sigma H \quad (2-101)$$

Dengan:

H_s = tinggi hisap (m)

P_{atm} = tekanan atmosfer (Pa)

P_v = tekanan uap air (Pa)

H = tinggi jatuh efektif (m)

- σ = koef thoma
 ρ = berat jenis air (kg/m^3)
 g = percepatan gravitasi (m/dt^2)
 V = kecepatan aliran (m/dt) (Penche,2004: 178 menyarankan 2 m/dt sebagai pendekatan awal)

Untuk mengontrol kavitasi digunakan koefisien thoma kritis (σ_c) dihitung dengan menggunakan fungsi kecepatan spesifik dengan persamaan berikut (Penche,2004:169):

$$\text{Turbin Kaplan } \sigma_c = 1,5241 N_{QE}^{1,46} + \frac{V^2}{2gH} \quad (2-102)$$

$$\text{Turbin Francis } \sigma_c = 1,2715 N_{QE}^{1,41} + \frac{V^2}{2gH} \quad (2-103)$$

dimana:

- σ_c = koefisien kritis thoma
 N_s = kecepatan spesifik (m kW) (metode USBR)
 N_{QE} = kecepatan spesifik (metode ESHA)

Tabel 2.12. Nilai Tekanan Atmosfer

Altitude Above Sea Level		Absolute Barometer		Absolute Atmospheric Pressure		
feet	meters	inches Hg	mm Hg	psia	kg/cm ²	kPa
-5000	-1524	35.7	908	17.5	1.23	121
-4500	-1372	35.1	892	17.2	1.21	119
-4000	-1219	34.5	876	16.9	1.19	117
-3500	-1067	33.9	861	16.6	1.17	115
-3000	-914	33.3	846	16.4	1.15	113
-2500	-762	32.7	831	16.1	1.13	111
-2000	-610	32.1	816	15.8	1.11	109
-1500	-457	31.6	802	15.5	1.09	107
-1000	-305	31.0	788	15.2	1.07	105
-500	-152	30.5	774	15.0	1.05	103
0 ¹⁾	0	29.9	760	14.7	1.03	101
500	152	29.4	746	14.4	1.01	99.5
1000	305	28.9	733	14.2	0.997	97.7
1500	457	28.3	720	13.9	0.979	96.0
2000	610	27.8	707	13.7	0.961	94.2
2500	762	27.3	694	13.4	0.943	92.5
3000	914	26.8	681	13.2	0.926	90.8
3500	1067	26.3	669	12.9	0.909	89.1
4000	1219	25.8	656	12.7	0.893	87.5
4500	1372	25.4	644	12.5	0.876	85.9
5000	1524	24.9	632	12.2	0.860	84.3
6000	1829	24.0	609	11.8	0.828	81.2
7000	2134	23.1	586	11.3	0.797	78.2
8000	2438	22.2	564	10.9	0.768	75.3
9000	2743	21.4	543	10.5	0.739	72.4
10000	3048	20.6	523	10.1	0.711	69.7
15000	4572	16.9	429	8.29	0.583	57.2
20000	6096	13.8	349	6.75	0.475	46.6
25000	7620	11.1	282	5.45	0.384	37.6
30000	9144	8.89	226	4.36	0.307	30.1
35000	10668	7.04	179	3.46	0.243	23.8
40000	12192	5.52	140	2.71	0.191	18.7
45000	13716	4.28	109	2.10	0.148	14.5
50000	15240	3.27	83	1.61	0.113	11.1

Sumber: http://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d_462.html

Tabel 2.13. Nilai Tekanan Uap Air

Temperature (°C)	Vapour pressure (kPa)	Vapour pressure (mmHg)
0	0.6	4.5
3	0.8	6.0
5	0.9	6.8
8	1.1	8.3
10	1.2	9.0
12	1.4	10.5
14	1.6	12.0
16	1.8	13.5
18	2.1	15.8
19	2.2	16.5
20	2.3	17.5
21	2.5	18.7
22	2.6	19.8
23	2.8	21.1
24	3.0	22.4
25	3.2	23.8
26	3.4	25.2
27	3.6	26.7
28	3.8	28.4
29	4.0	30.0
30	4.2	31.5
32	4.8	36.0
35	5.6	42.0
40	7.4	55.5
50	12.3	92.3
60	19.9	149.3
70	31.2	234.1
80	47.3	354.9
90	70.1	525.9
100	101.3	760.0

Sumber: http://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water

Kavitasi akan terjadi pada $\sigma = \sigma_{crit}$. Besar kavitasi aktual dapat dihitung dengan persamaan berikut (Patty, 1995:100):

$$\sigma = \frac{H_a - H_w - H_s}{H} \tag{2-104}$$

dimana:

σ = kavitasi

H_a = tekanan atmosfer (m)

H_w = tekanan uap air disebelah bawah sudu rotor atau pada bagian atas pipa lepas (m)

H_s = tinggi hisap atau draft head (m)

H_{eff} = tinggi jatuh air efektif (m)



2.3.3.6.4. Dimensi Turbin

Dalam perencanaan dimensi turbin maka harus ditentukan terlebih dulu jenis turbin yang akan digunakan apakah turbin impuls atau turbin reaksi, dalam perencanaan pembangkit listrik tenaga air dengan tinggi jatuh maka jenis turbin yang digunakan adalah turbin reaksi. Menurut Ramos (2000:94) turbin reaksi terdiri atas bagian sebagai berikut:

1. Rumah Siput (*Spiral Case*)

Rumah Siput berfungsi untuk mengubah energi tekanan menjadi energi kinetik aliran air yang masuk menuju ruang turbin.

2. *Wicket Gate* atau *Guide Vane*

Wicket gate berfungsi untuk mengarahkan air menuju runner turbin dengan aliran seragam.

3. Pemutar (*Runner*)

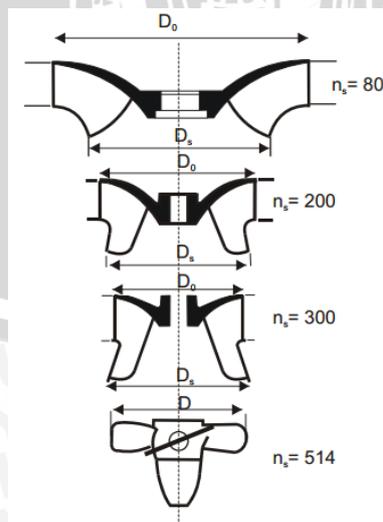
Runner berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik untuk ditransformasikan menjadi energi listrik oleh generator. Pemutar memiliki 2 jenis yaitu runner axial dan runner radial, dengan atau tidak menggunakan movable blade.

4. Pipa pembuang (*Draft tube*)

Pipa pembuang yang berfungsi untuk menghantarkan aliran dari turbin menuju saluran *tailrace*.

- **Diameter Runner**

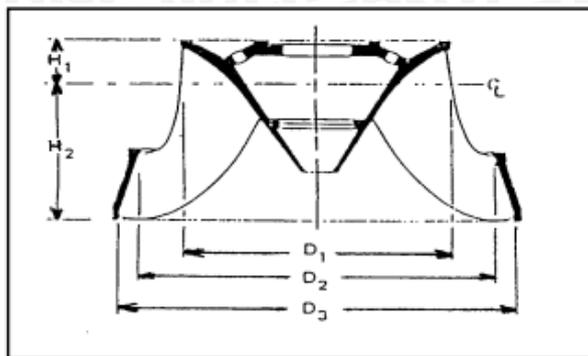
Diameter *runner* untuk turbin reaksi ditentukan atas besarnya kecepatan spesifik, tinggi jatuh dan juga perbedaan kecepatan tangensial pada turbin. Runner turbin biasanya didesain berdasarkan kecepatan spesifik turbin tersebut.



Gambar 2.37. Pemilihan Bentuk Runner Berdasarkan Kecepatan Spesifik

Sumber: Penche, 2004:169.

Untuk turbin francis dimensi runner dihitung dengan persamaan berikut (Ramos,2000:97):



Gambar 2.38. Skema Runner Untuk Turbin Francis
Sumber: Ramos,2000:97

$$D_3 = 84.5 K_u \frac{\sqrt{H_0}}{n} \quad (2-105)$$

$$K_u = 0.31 + 2.5 \times 10^{-3} N_s \quad (2-106)$$

$$D_1 = D_3 \left(0.4 + \frac{94.5}{N_s} \right) \quad (2-107)$$

$$D_2 = \frac{D_3}{0.96 + 0.00038 N_s} \quad (2-108)$$

$$H_1 = D_3 (0.094 + 0.00025 N_s) \quad (2-109)$$

$$H_2 = D_3 \left(-0.05 + \frac{42}{N_s} \right) \quad (2-110)$$

Dengan:

D = diameter *runner* (m)

n = kecepatan dasar turbin (rpm)

N_s = kecepatan spesifik turbin (kW m)

K_u = perbedaan kecepatan tangensial

- **Guide Vane**

Karakteristik dimensi *guide vane* dihitung dengan persamaan:

$$B_g = (0.45 - 31.8/N_s) D_M \quad (2-111)$$

$$H_g = 0.2 D_M \quad (2-112)$$

Dengan:

B_g = tinggi *guide vane* (m)

H_g = lebar ruang whirl (m)

N_s = Kecepatan spesifik (mkW)

D_m = diameter *runner* turbine (m)

- **Rumah Siput (Spiral Case)**

Rumah siput digunakan untuk mengubah energi tekanan menjadi energi kinetik dan sebagai pengarah aliran menuju ruang pemutar turbin. Dimensi rumah siput dinyatakan sebagai berikut (Ramos,2000:98):

$$A = D_3 (1,2 - 19.56 / N_s) \quad (2-113)$$

$$B = D_3 (1,1 + 54.8 / N_s) \quad (2-114)$$

$$C = D_3 (1,32 + 49.25 / N_s) \quad (2-115)$$

$$D = D_3 (1,5 + 48.8 / N_s) \quad (2-116)$$

$$E = D_3 (0.98 + 63.6 / N_s) \quad (2-117)$$

$$F = D_3 (1 + 131.4 / N_s) \quad (2-118)$$

$$G = D_3 (0.89 + 96.5 / N_s) \quad (2-119)$$

$$H = D_3 (0.79 + 81.75 / N_s) \quad (2-120)$$

$$I = D_3 (0,1 + 6.5 \times 10^{-4} N_s) \quad (2-121)$$

$$L = D_3 (0,88 + 4,9 \times 10^{-4} N_s) \quad (2-122)$$

$$M = D_3 (0,6 + 1.5 \times 10^{-5} N_s) \quad (2-123)$$

Kecepatan dalam rumus siput dihitung dengan persamaan:

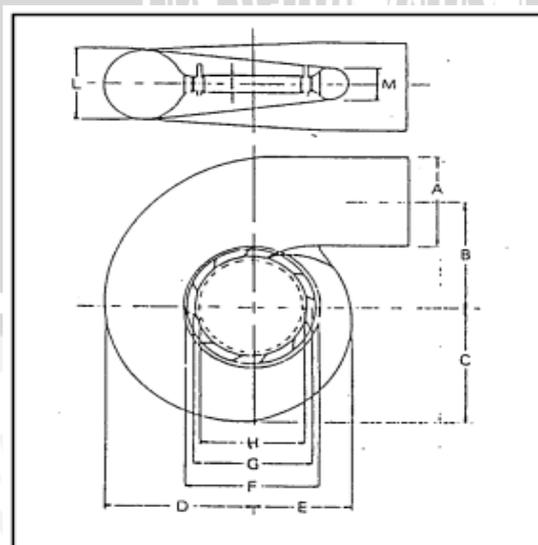
$$V = 488/N_s^{0.44} \quad (2-124)$$

Dimana:

D_m = diameter *runner* (m)

V = kecepatan (m/s)

N_s = kecepatan spesifik (mkW)



Gambar 2.39. Skema Rumah siput (Spiral Case)

Sumber: Ramos,2000:99

- **Pipa Pelepas (*Draft tube*)**

Pipa pelepas adalah pipa yang meneruskan air dari turbin ke saluran pembuangan. Pipa ini mempunyai 2 tujuan yaitu (Patty, 1995:99) :

- Menggunakan tinggi jatuhnya air dari tempat keluar turbin ke muka air saluran pembuangan atau menggunakan tinggi statis.
- Menggunakan energi kinetik air yang keluar dari turbin atau menggunakan tinggi dinamis.

Untuk perencanaan dimensi dari draft tube dapat menggunakan persamaan (Ramos,2000:98) sebagai berikut:

$$N = D_3 (1,54 + 203,5 / N_s) \quad (2-125)$$

$$O = D_3 (0,83 + 140,7 / N_s) \quad (2-126)$$

$$P = D_3 (1,37 - 5,6 \times 10^{-4} N_s) \quad (2-127)$$

$$Q = D_3 (0,58 + 22,6 / N_s) \quad (2-128)$$

$$R = D_3 (1,6 - 0,0013 N_s) \quad (2-129)$$

$$S = N_s / (-9,28 + 0,25 N_s) \quad (2-130)$$

$$T = D_3 (1,5 + 1,9 \times 10^{-4} N_s) \quad (2-131)$$

$$Z = D_3 (2,63 + 33,8 / N_s) \quad (2-132)$$

Kecepatan pada inlet *draft tube* dihitung dengan persamaan :

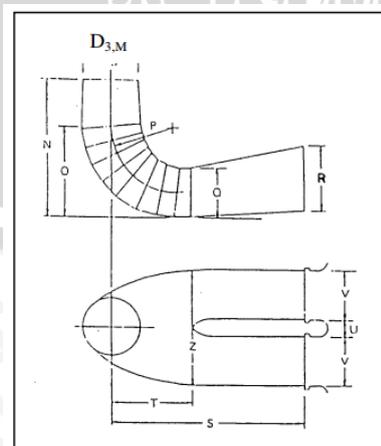
$$V = 8,74 + 2,48 / N_s \quad (2-133)$$

Dimana:

D_m = diameter *runner* (m)

V = kecepatan (m/s)

N_s = kecepatan spesifik (mkW)



Gambar 2.40. Dimensi Draft Tube Untuk Turbin Kaplan

Sumber: Ramos,2000:99

2.3.3.6.5. Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin adalah perbandingan antara energi yang keluar dari turbin dan energi yang masuk turbin yang diberikan aliran air. (Patty, 1995:92) Turbin air moderen dioperasikan pada efisiensi mekanis lebih dari 90% (tidak terpengaruh efisiensi termodinamika), efisiensi turbin dinyatakan dalam persamaan (Ramos,2000:89):

$$\eta = \frac{P}{\gamma Q H_0} \quad (2-134)$$

dengan

η = efisiensi turbin

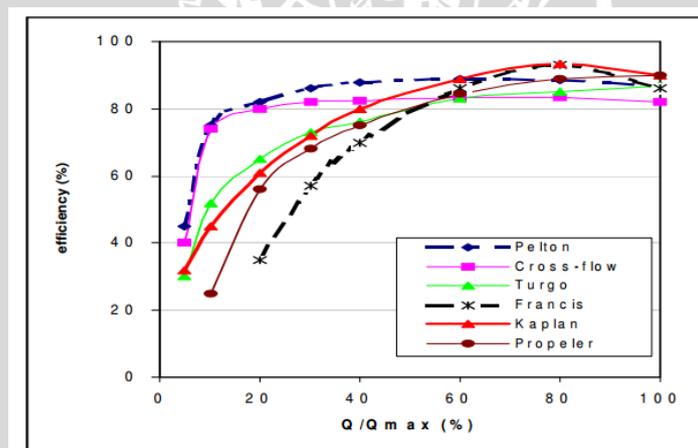
P = daya (watt)

γ = berat jenis fluida (kg/m^3)

Q = debit (m^3/dt)

H_0 = tinggi jatuh (m)

Besaran efisiensi untuk tiap turbin berbeda beda, kisaran efisiensi diperlihatkan dengan gambar berikut:



Gambar 2.41. Kisaran Nilai Efisiensi Untuk Tiap Jenis Turbin

Sumber: Ramos,2000:99

2.3.3.7. Peralatan dan Fasilitas Listrik

Peralatan Listrik merupakan komponen sistem pembangkit listrik yang berfungsi sebagai pengatur daya bangkitan dari turbin untuk disalurkan melalui grid atau jaringan distribusi listrik, tujuan lainnya adalah sebagai pengaman dari sistem pengaturan dan pembangkitan energi listrik.

Perencanaan peralatan elektrik meliputi: perencanaan generator, pengatur kecepatan (*governor*), peningkat kecepatan (*speed increaser*), transformer (travo), peralatan pengatur elektrik (*switch gear equipment*), dan aksesoris kelengkapan elektrik (*electric auxiliary*).

2.3.3.7.1. Generator

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energy listrik dari sumber energi mekanikal, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik Generator memiliki dua bagian yaitu *rotor* dan *stator*.

Daya keluar generator dapat dihitung dengan persamaan (Penche,2004:187):

$$P_g = \frac{P_t \eta_g}{P_f} \quad (2-135)$$

Dengan:

P_g = rating keluaran generator (kVA)

P_t = rating keluaran turbin (kW)

η_g = efisiensi generator

P_f = faktor tenaga

Menurut Penche, generator yang digunakan untuk PLTA adalah generator dengan 3 fasa dan jenis generator dibedakan menjadi 2 yakni:

1. generator sinkron

generator sinkron dilengkapi dengan listrik DC atau permanen magnet eksitasi sistem (berputar atau statis) terkait dengan regulator tegangan untuk mengontrol tegangan output sebelum generator terhubung ke grid. Generator ini menyediakan energi reaktif yang dibutuhkan oleh kekuatan sistem saat generator terhubung ke grid. Generator sinkron dapat menjalankan sistem terisolasi dari grid dan menghasilkan listrik karena eksitasi tidak tergantung-grid

2. generator tak sinkron

generator ini adalah motor induksi sederhana tanpa kemungkinan regulasi tegangan dan berjalan pada kecepatan berkaitan langsung dengan frekuensi sistem. mereka menarik eksitasi mereka dari grid, menyerap energi reaktif oleh magnet mereka sendiri. Menambahkan bank kapasitor dapat mengimbangi energi reaktif diserap. Mereka tidak bisa menghasilkan ketika terputus dari grid karena tidak mampu menyediakan eksitasi saat ini mereka sendiri. Namun, mereka digunakan dalam aplikasi yang berdiri sendiri yang sangat kecil sebagai solusi murah bila kualitas yang dibutuhkan dari pasokan listrik tidak terlalu tinggi.

Selain itu generator juga memiliki efisiensi sama seperti turbin, efisiensi generator dapat dibedakan berdasarkan keluaran energi yang dihasilkan (Penche,2004:187).

Tabel. 2.14. Hubungan Antara Daya Generator Dengan Effisiensi

Rated Power (kW)	Best efficiency
10	0,910
50	0,940
100	0,950
250	0,955
500	0,960
1000	0,970

Sumber: (Penche,2004:187).

Tabel 2.15. Nilai Kecepatan Generator Untuk Generator Sinkron

jumlah pole	frekuensi		jumlah pole	frekuensi	
	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz
2	3000	3600	16	375	450
4	1500	1800	18	333	400
6	1000	1200	20	300	360
8	750	900	22	272	327
10	600	720	24	250	300
12	500	600	26	231	277
14	428	540	28	214	257

Sumber: (Penche,2004:180).

Untuk mengatur tegangan yang keluar dari generator agar dapat distabilkan maka perlu direncanakan pengatur tegangan (*exciter*), terdapat 2 jenis *exciter* yang biasanya digunakan untuk generator yaitu (Penche,2004:188):

- *Static type exciters*
- *Brushless type exciter*
- *Rotating type exciter*

2.3.3.7.2. Pengatur Kecepatan

Pengatur kecepatan dibutuhkan untuk pengaturan kecepatan pada turbin dengan mengatur guide vane sehingga didapatkan kecepatan yang masih diijinkan oleh turbin untuk beroperasi, pengatur kecepatan memiliki tiga jenis tipe yakni: hidro – mekanik, mekanik – elektrik dan hidro – elektrik.

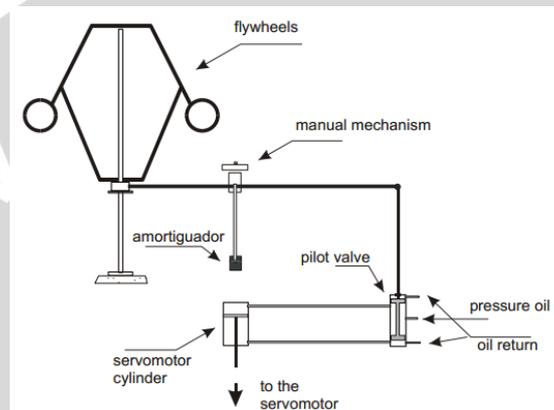
Analisa kestabilan pada governor, Penche merekomendasikan bahwa $t_m/t_w > 4$ dimana t_w adalah karakteristik aliran pada pipa pesat dan t_m adalah bagian inersia yang berputar. Analisa kestabilan governor adalah sebagai berikut(Penche,2004:192):

$$T_m = \frac{\Omega R^2 n^2}{5086P} \quad (2-136)$$

$$T_w = \frac{\sum LV}{gH} \quad (2-137)$$

Dengan:

- T_m = waktu bagian inersia yang berputar (*machine time constant*) (detik)
 T_w = waktu mulai aliran (detik)
 Ω_R = keseluruhan bagian unit yang berputar (rpm)
 n = kecepatan sinkron turbin (rpm)
 P = daya keluaran turbin (kW)
 L = panjang jalan aliran (pipa pesat) (m)
 V = kecepatan aliran (m/dt)
 H = tinggi jatuh (m)



Gambar 2.42. Pengatur Kecepatan (Governor) Tipe Mekanik

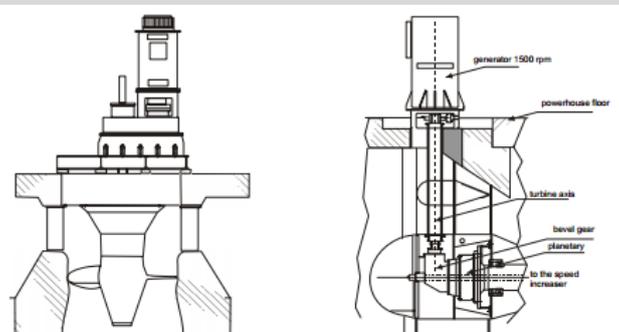
Sumber: Penche,2004:190

2.3.3.7.3. Peningkat Kecepatan (*Speed Increaser*)

Peningkat kecepatan dibutuhkan oleh turbin dengan kondisi tinggi jatuh rendah seperti turbin Kaplan, turbular dan bulb. Peningkat kecepatan agar kecepatan pada turbin bisa stabil dan berjalan maksimal.

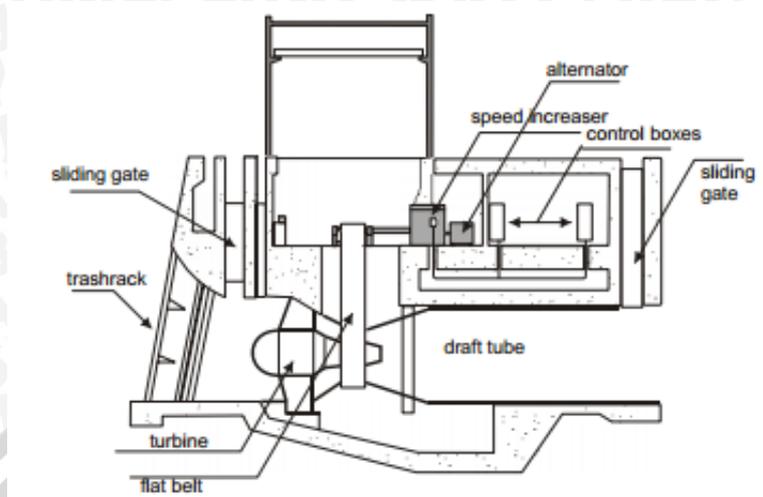
Menurut Penche,2004:184 peningkat kecepatan memiliki beberapa jenis yaitu:

- *Parallel Shaft*
- *Bevel Gears*
- *Belt speed increaser*



Gambar 2.43. Peningkat Kecepatan Tipe Parallel Shaft Dan Bevel Gears

Sumber: Penche,2004:185



Gambar 2.44. Peningkat Kecepatan Tipe Belst Speed Increaser

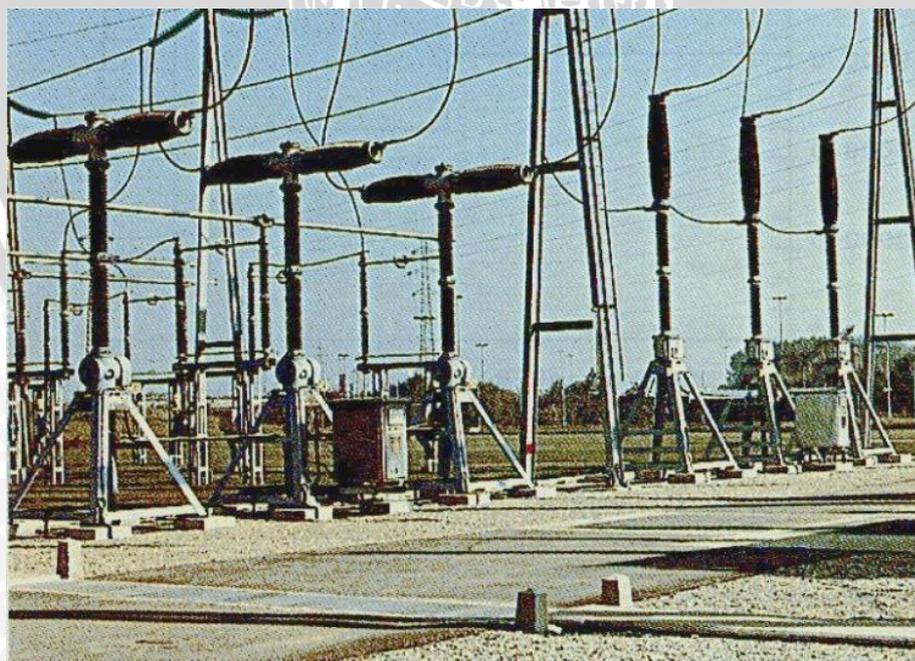
Sumber: Penche,2004:185

2.3.3.7.4. Transformer (*Travo*)

Sebelum masuk ke jaringan transmisi arus listrik masuk melalui transformer untuk menurunkan intensitas arus yang dihasilkan dan meningkatkan voltase listrik untuk selanjutnya diatur sesuai dengan keperluan domestik.

2.3.3.7.5. Peralatan Pengatur (*Switchgear*)

Switchgear merupakan kombinasi antara saklar pemutus, *fuse* dan pemutus aliran (*circuit breaker*). *Switchgear* difungsikan untuk melindungi generator dan transformator utama dari bahaya kelebihan kapasitas (*overcapacity*).



Gambar 2.45. Switchgears

Sumber: <http://en.wikipedia.org/Switchgear>



2.3.3.7.6. Aksesoris Kelengkapan (*Auxiliary Equipment*)

Aksesoris kelengkapan pada sistem pembangkit listrik memiliki peranan sebagai pelengkap dan peralatan bantu untuk sistem pengoperasian dan perawatan sistem pembangkit tenaga listrik.

2.4. Energi

Tenaga yang dihasilkan dari debit pembangkitan maksimum (debit puncak = plant peak discharge) disebut kapasitas terpasang atau installed Capacity. Tenaga yang dihasilkan berupa produksi energi tahunan

Produksi energi tahunan dihitung berdasarkan tenaga andalan. Tenaga andalan dihitung berdasarkan debit andalan yang tersedia untuk pembangkitan energi listrik yang berupa debit outflow dengan periode n harian. (arismunandar,2005:19)

$$E = 9,8 \times H \times Q \times \eta_g \times \eta_t \times 24 \times n \quad (2-138)$$

dengan:

E = Energi tiap satu periode (kWh)

H = Tinggi jatuh efektif (m)

Q = Debit outflow (m^3/dtk)

η_g, η_t = efisiensi turbin dan generator

n = jumlah hari dalam satu periode.

Faktor Dalam Pembangkitan PLTA

- **Faktor Beban**

Faktor beban adalah perbandingan antara besarnya beban rata-rata untuk selang waktu tertentu terhadap beban puncak tertinggi dalam selang waktu yang sama (misalnya satu hari atau satu bulan). Sedangkan beban rata-rata untuk suatu selang waktu tertentu adalah jumlah produksi kwh dalam selang waktu tersebut dibagi dengan jumlah jam dari selang waktu tersebut.

$$\text{Faktor beban} = \frac{\text{beban rata-rata}}{\text{beban puncak}}$$

Faktor beban tahunan sistem berkisaran 60%-80%

- **Faktor Kapasitas**

Faktor kapasitas sebuah unit pembangkit menggambarkan seberapa besar sebuah unit pembangkit itu dimanfaatkan. Faktor kapasitas tahunan (8760 jam) didefinisikan sebagai :

$$\text{Faktor kapasitas} = \frac{\text{Produksi kwh setahun}}{\text{daya terpasang Mw} \times 8760 \text{ jam}}$$

Dalam prakiraannya faktor kapasitas tahunan berkisar 30%-50%, hal ini karena berkaitan dengan ketersediaan air.

- **Faktor Penggunaan (Utilitas)**

Faktor ini sesungguhnya sama dengan faktor kapasitas, tetapi disini menyangkut daya.

Faktor utilitas sebuah alat dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\text{Faktor Utilitas} = \frac{\text{Beban alat yang tertinggi}}{\text{kemampuan alat}}$$

2.4.1. Sistem Operasi PLTA

Sistem operasi PLTA dilakukan dengan 2 metode yaitu: sistem operasi terpusat (*central grid*) dan sistem operasi terisolasi (*isolated grid*).

Sistem terpusat (*central grid*) adalah sistem pengoperasian PLTA yang dikelola secara terpusat oleh perusahaan distributor listrik dalam hal ini adalah PT PLN sehingga tidak ada regulasi khusus yang harus dilakukan dikarenakan pengaturan listrik dilakukan secara terpusat dari tiap tiap transmisi jadi PLTA bisa beroperasi terus menerus. Operasi sistem terpusat biasanya dilakukan oleh PLTA tanpa tandon dikarenakan tidak adanya tampungan untuk memenuhi kebutuhan beban puncak (*peak load*).

Sistem terisolasi (*isolated grid*) adalah sistem pengoperasian PLTA yang tidak melalui jaringan distribusi perusahaan distributor listrik (PT PLN), jadi harus direncanakan adanya sistem pengaturan operasi berdasarkan kebutuhan beban tiap jam untuk memenuhi kebutuhan layanan, biasanya sistem terisolasi digunakan untuk PLTA dengan tandon atau PLTA yang terletak jauh dari transmisi grid PLN.

2.5. Analisa Stabilitas

Berdasarkan dari fungsi dan manfaat yang akan diperoleh maka pembangunan bendung harus juga memperhatikan usia gunanya. Usia guna bendung tidak akan sesuai dengan yang direncanakan apabila dampak akibat banjir, sifat-sifat hidrolis air, sifat mekanis tanah serta dampak akibat kondisi alam terutama gempa tidak dapat dikendalikan. Untuk itu konstruksi bendung harus dibuat cukup aman dan stabil.

2.5.1. Gaya Yang Bekerja

Salah satu persyaratan keamanan bendung yaitu harus stabil terhadap geser, guling, piping, dan daya dukung tanah. Untuk itu harus dihitung gaya-gaya yang bekerja pada bangunan dan kemudian dikontrol stabilitasnya terhadap faktor-faktor tersebut.

2.5.1.1. Tekanan Air

Gaya tekanan air dapat dibagi menjadi gaya hidrostatis dan gaya hidrodinamik. Tekanan hidrostatis adalah fungsi kedalaman di bawah permukaan air. Tekanan air akan selalu bekerja tegak lurus terhadap muka bangunan. Oleh sebab itu agar perhitungannya lebih mudah, gaya horisontal dan vertikal dikerjakan secara terpisah. Tekanan hidrodinamik adalah tekanan air yang terjadi saat keadaan gempa. Berikut ini adalah persamaan untuk menghitung tekanan air:

$$\text{Gaya hidrostatis} = A \cdot \gamma_w \quad (2-139)$$

$$\text{Gaya hidrodinamik} = 7/12 \cdot \gamma_w \cdot K_h \cdot H^2 \quad (2-140)$$

Dengan:

A = luas bidang air (m²)

γ_w = berat jenis air = 1 t/m³

K_h = koefisien gempa = 0,15

H = tinggi bendung (m)

2.5.1.2. Tekanan Air pori (*Up Lift*)

Bangunan bendung mendapat tekanan air bukan hanya pada permukaan luarnya, tetapi juga pada dasar / pondasi bangunan itu yang bergerak vertikal ke atas. Gaya tekan ke atas, yakni istilah umum untuk tekanan air pori, menyebabkan berkurangnya berat efektif bangunan di atasnya. Berikut ini persamaan menghitung tekanan air pori (KP-2, 1986: 116)

$$P_x = H_x - (L_x/L) \cdot \Delta H \quad (2-141)$$

Dengan:

P_x = tekanan angkat pada titik tinjau (t/m²)

ΔH = beda tinggi energi (m)

H_x = tinggi energi pada titik tinjau (m)

L = panjang total jalur rembesan (m)

2.5.1.3. Berat Bangunan

Berat bangunan adalah gaya-gaya yang bekerja vertikal ke bawah dimana garis kerjanya melewati titik berat konstruksi tersebut. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Berat bangunan (G)} = A \cdot \gamma_b \quad (2-142)$$

Dengan:

A = luas bidang bangunan (m²)

γ_b = berat jenis bahan bangunan (t/m³)

2.5.1.4. Tekanan Tanah

Tekanan tanah dibagi menjadi dua, yaitu tekanan tanah aktif dan tekanan tanah pasif. Tekanan tanah aktif adalah tekanan tanah yang bekerja di depan bangunan sedangkan tekanan tanah pasif adalah tekanan tanah yang bekerja di belakang bangunan.

Berikut ini adalah persamaan untuk menghitung tekanan tanah:

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma t \cdot K_a \cdot H^2 \quad (2-143)$$

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma t \cdot K_p \cdot H^2 \quad (2-144)$$

Dengan:

P_a = tekanan tanah aktif (t)

P_p = tekanan tanah pasif (t)

γt = berat jenis tanah (t/m^3)

H = tinggi tanah (m)

K_a = koefisien tekanan tanah aktif

$$= \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \quad (2-145)$$

K_p = koefisien tekanan tanah pasif

θ = sudut geser dalam tanah

Untuk kondisi gempa sebagai berikut:

$$\theta' = \theta - \tan^{-1} \cdot K_h \quad (2-146)$$

K_h = koefisien gempa = 0,15

2.5.1.5. Tekanan Lumpur (Sedimen)

Tekanan lumpur yang bekerja sepanjang muka hulu bendung dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot K_a \cdot H^2 \quad (2-147)$$

Dengan:

γ_s = berat jenis lumpur = 1,6 t/m^3

K_a = koefisien tekanan tanah aktif

H = tinggi bendung (m)

2.5.1.6. Gaya Gempa

Harga-harga gaya gempa diberikan dalam bagian Parameter Bangunan. Harga-harga tersebut didasarkan pada peta Indonesia yang menunjukkan berbagai daerah dan risiko. Faktor minimum yang akan dipertimbangkan adalah 0,1 g perapatan gravitasi sebagai harga percepatan. Faktor ini hendaknya dipertimbangkan dengan cara

mengalikannya dengan massa bangunan sebagai gaya horisontal menuju ke arah yang paling tidak aman, yakni arah hilir (KP-2, 1986: 142).

2.5.2. Kontrol Stabilitas

Dalam analisa stabilitas bendung pada studi ini digunakan 4 kontrol kestabilan.

Berikut ini adalah kontrol - kontrol stabilitas dalam studi ini:

1. Stabilitas terhadap erosi bawah bendung (piping)
2. Stabilitas terhadap guling
3. Stabilitas terhadap geser
4. Stabilitas terhadap daya dukung tanah

Tekanan air harus dianalisa dalam dua kondisi, yaitu kondisi normal dan kondisi banjir. Kondisi normal adalah kondisi dimana muka air hanya setinggi mercu bendung, air di hilir bangunan dianggap kosong. Kondisi banjir adalah kondisi dimana muka air setinggi debit banjir rencana, di hilir bendung muka air juga setinggi debit banjir rencana. Setiap kondisi dibagi lagi menjadi sub-keadaan. Berikut ini adalah sub-kondisi yang dimaksud:

1. Kondisi air normal
 - Tanpa gempa dan tanpa lumpur
 - Tanpa gempa dan penuh lumpur
 - Gempa dan penuh lumpur
2. Kondisi air banjir
 - Tanpa gempa dan tanpa lumpur
 - Tanpa gempa dan penuh lumpur
 - Gempa dan penuh lumpur

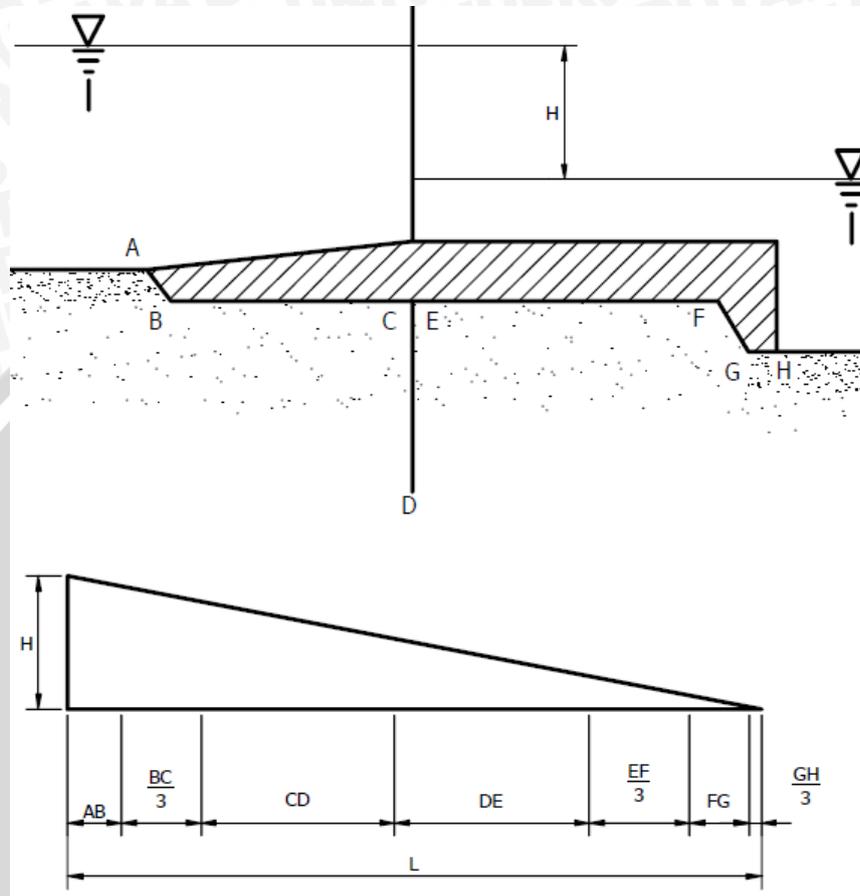
2.5.2.1. Stabilitas Terhadap Erosi Bawah Bendung (Piping)

Bangunan-bangunan utama seperti bendung dan bendung gerak harus dicek stabilitasnya terhadap erosi bawah tanah dan bahaya runtuh akibat naiknya dasar galian (heave) atau rekahnya pangkal hilir bangunan.

Bahaya terjadinya erosi bawah tanah dapat dianjurkan dicek dengan jalan membuat jaringan aliran/flownet. Dalam hal ditemui kesulitan berupa keterbatasan waktu pengerjaan dan tidak tersedianya perangkat lunak untuk menganalisa jaringan aliran, maka perhitungan dengan beberapa metode empiris dapat diterapkan, seperti metode lane..

Metode Lane, disebut metode angka rembesan Lane (weighted creep ratio method), adalah yang dianjurkan untuk mengecek bangunan-bangunan utama untuk mengetahui

adanya erosi bawah tanah. Metode ini memberikan hasil yang aman dan mudah dipakai. Untuk bangunan-bangunan yang relatif kecil, metode-metode lain mungkin dapat memberikan hasil-hasil yang lebih baik, tetapi penggunaannya lebih sulit.



Gambar 2.46. Ilustrasi Rembesan Metode Lane

Sumber: KP-2, 1986: 150

Di sepanjang jalur perkolasi ini, kemiringan yang lebih curam dari 45° dianggap vertikal dan yang kurang dari 45° dianggap horizontal. Jalur vertikal dianggap memiliki daya tahan terhadap aliran 3 kali lebih kuat daripada jalur horizontal.

Oleh karena itu, rumusnya adalah:

$$CL = \frac{\sum LV + 1/3.LH}{H} \quad (2-148)$$

Dengan:

CL = angka rembesan lane

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

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

H = beda tinggi muka air (m)

Tabel 2.16. Harga Minimum Angka Rembesan Lane (CL)

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-2, 1986: 150

2.5.2.2. Stabilitas Terhadap Guling

Untuk menentukan stabilitas terhadap guling dihitung dengan persamaan (sosrodarsono, 1986: 88):

Keadaan normal:

$$SF = \sum Mt / \sum Mg > 1,5 \tag{2-149}$$

Keadaan gempa:

$$SF = \sum Mt / \sum Mg > 1,1 \tag{2-150}$$

Dengan:

SF= faktor keamanan

Mt= momen tahan (t.m)

Mg= momen guling (t.m)

2.5.2.3. Stabilitas Terhadap Geser

Untuk menentukan stabilitas terhadap geser dihitung dengan persamaan (sosrodarsono, 1986: 88):

Keadaan normal:

$$SF = f \frac{\sum V+c.A}{\sum H} > 1,5 \tag{2-151}$$

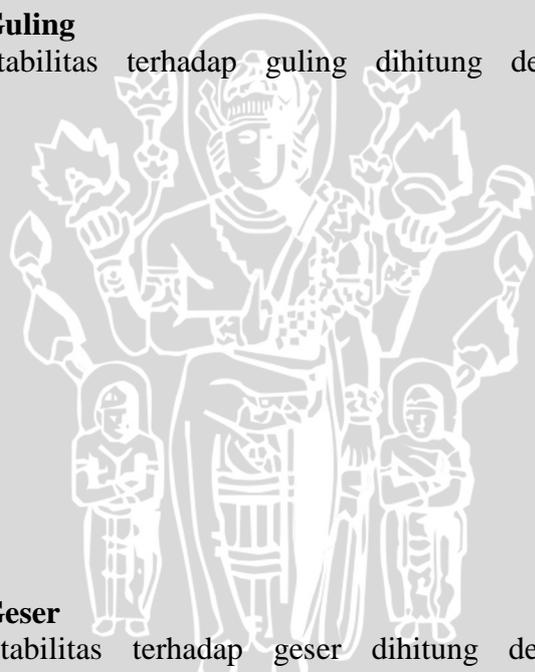
Keadaan gempa:

$$SF = f \frac{\sum V+c.A}{\sum H} > 1,1 \tag{2-152}$$

Dengan:

SF = faktor keamanan

$\sum V$ = jumlah gaya vertikal (t)



- ΣH = jumlah gaya horizontal (t)
 f = koefisien gesekan antar pondasi = $\tan \theta$
 c = kekuatan geser bahan (tm/m^3)
 A = luas dasar yang dipertimbangkan (m^2)

2.5.2.4. Stabilitas Terhadap Daya Dukung Tanah

Untuk menentukan stabilitas terhadap daya dukung tanah dihitung dengan persamaan (sosrodarsono, 1986: 88):

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\Sigma Mt - \Sigma Mg}{\Sigma V} < B/6 \quad (2-153)$$

$$6 = \frac{\Sigma V}{L} \cdot \left(1 + \frac{6e}{L}\right) \quad (2-154)$$

dengan:

e = eksentrisitas

B = lebar bangunan (m)

Mt = momen tahan (t.m)

Mg = momen guling (t.m)

ΣV = jumlah gaya vertikal (t)

6 = tegangan tanah maksimum (t/m^2)

L = panjang bangunan (m)

Tabel 2.17. Daya Dukung Ijin

Jenis	daya dukung	
	kN/m ²	kgf/cm ²
1. batu sangat keras	10,000	100
2. batu kapur/batu pasir keras	4,000	40
3. kerikil berkerapatan sedang atau pasir dan kerikil	200 – 600	2- 6
4. pasir berkerapatan sedang	100 – 300	1-3
5. lempung kenyal	150 – 300	1,5-3
6. lempung teguh	75 – 150	0,75-1,5
7. lempung lunak dan lumpur	1 < 75	< 0,75

Sumber: KP-2, 1986: 135