

BAB II LANDASAN TEORI

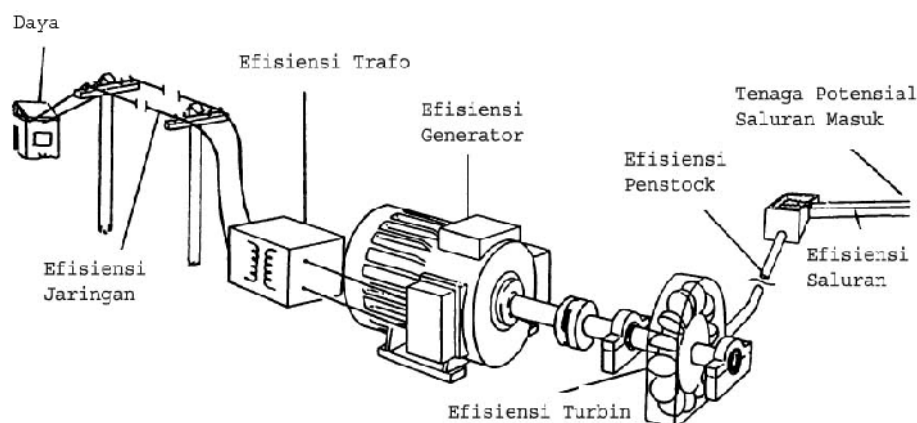
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro

Minihidro secara umum diartikan sebagai pembangkit energi elektrik dengan sumber energi dari air yang bekapasitas antara 100 kW - 1000 kW. Daya yang mampu dibangkitkan dari sebuah pembangkit listrik minihidro tergantung dari beberapa variabel antara lain ketinggian jatuh (*head*) dan debit aliran air. (*Tokyo Electric Power Service*, 2003: 4). Dalam hubungan dengan kolam air maka *head* adalah beda ketinggian antara muka air dalam kolam dengan muka air keluar dari kincir air atau turbin air. Tidak seluruh potensi energi air mampu diubah menjadi energi listrik, karena ada sebagian energi air hilang akibat adanya gesekan, pemanasan, maupun *noise*.

Seperti dikatakan di atas, minihidro hanyalah sebuah istilah. Mini artinya kecil sedangkan hidro artinya air. Dalam prakteknya istilah ini tidak merupakan sesuatu yang baku namun bisa dibayangkan bahwa minihidro, pasti menggunakan air sebagai sumber energinya. Yang membedakan antara istilah minihidro dengan mikrohidro adalah output daya yang dihasilkan. Mikrohidro menghasilkan daya keluaran lebih rendah dari 100 kW, sedangkan untuk minihidro daya keluaran berkisar antara 100 kW sampai 1000 kW. Secara teknis, minihidro memiliki tiga komponen utama yaitu air (sumber energi), turbin dan generator.

Air yang mengalir dengan kapasitas tertentu disalurkan dari ketinggian tertentu menuju rumah instalasi (rumah turbin). Di rumah instalasi air tersebut akan menumbuk turbin dimana turbin sendiri dipastikan akan menerima energi air tersebut dan mengubahnya menjadi energi mekanik berupa berputarnya poros turbin. Poros yang berputar tersebut kemudian ditransmisikan ke generator dengan menggunakan kopling. Dari generator akan dihasilkan energi listrik yang akan masuk ke sistem kontrol arus listrik sebelum dialirkan ke rumah-rumah atau keperluan lainnya (beban). Begitulah secara ringkas proses Minihidro merubah energi aliran dan ketinggian air menjadi energi listrik. (*Tokyo Electric Power Service*, 2003: 3)

Secara singkat perinsip kerja dari suatu pembangkit PLTM dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Suatu PLTM
Sumber: (Tokyo Electric Power Service, 2003: 6)

Dari keterangan di atas maka dapat disimpulkan bahwa suatu pembangkit listrik tenaga minihidro tergantung dengan :

- Debit air
- Ketinggian (jatuh ketinggian) dan
- Efisiensi

2.2. Jenis Sistem Pembangkit Minihidro

2.2.1. Run-off River

Pada umumnya pembangkit minihidro menggunakan sistem “run-off river” artinya tidak memerlukan adanya *reservoir* untuk menampung air sebelum melalui turbin sehingga air langsung melalui pipa kemudian digunakan memutar turbin. Jenis ini merupakan sistem pembangkit tenaga air yang pertama kali diperkenalkan. Pada sistem ini debit aliran air pada sungai tersebut akan sangat berpengaruh terhadap pembangkit sehingga saat saluran atau sungai tersebut memiliki aliran yang rendah maka energi yang dihasilkan akan rendah pula atau bahkan tidak menghasilkan listrik.

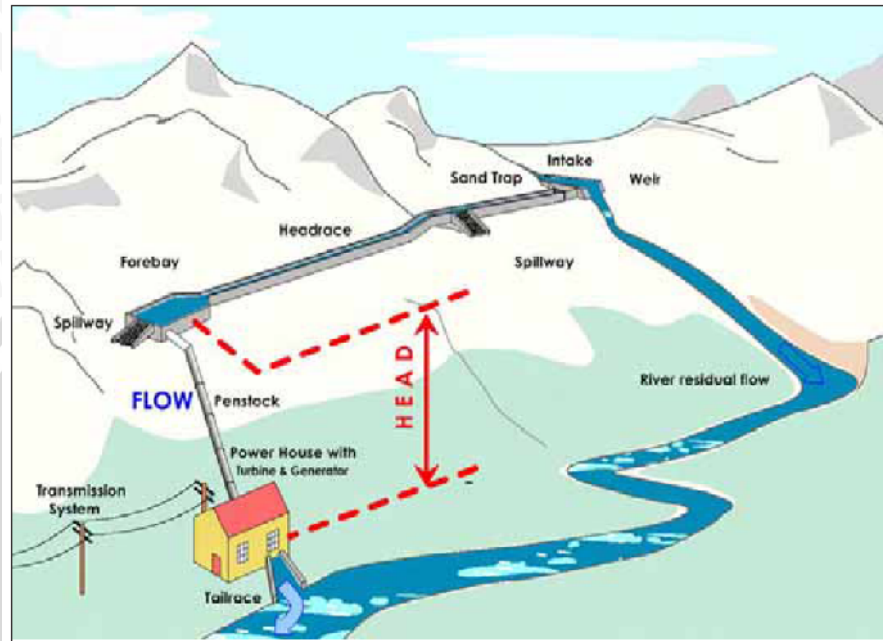
Keuntungan menggunakan sistem tersebut adalah biaya yang diperlukan untuk pembangunan dan dampak terhadap lingkungan akan lebih minim. Namun sistem ini pun memiliki kekurangan yaitu aliran air yang melalui turbin kurang dapat dikendalikan karena tergantung pada debit aliran sungai tersebut.

2.2.2. Reservoir and Dam Based

Pada sistem ini pembangkit memiliki kolam tampung atau *reservoir* sebagai tempat penampungan dan penimbunan. Selanjutnya air dari kolam tersebut dialirkan ke bagian saluran pembangkit untuk kemudian digunakan memutar turbin. Dengan adanya

kolam ini, maka pada saat musim kemarau dimana debit air berkurang, kekurangan ini dapat diatasi dengan mengalirkan air dari kolam penampungan ini.

Adapun komponen-komponen pembangkit listrik tenaga minihidro adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 komponen-komponen Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro
Sumber: Buku Baik dan Buruk dari Mini/Mikro Hidro (2009: 2)

Besarnya daya yang dihasilkan oleh PLTM tergantung dari besarnya *head* dan debit air. Yang dimaksud dengan *head* adalah tinggi jatuh efektif sedangkan debit air adalah debit *outflow* pada *intake*.

2.3. Analisa Hidrologi

Analisis hidrologi adalah suatu analisis yang bertujuan untuk menghitung potensi air yang ada pada daerah tertentu untuk bisa dimanfaatkan, dikembangkan serta mengendalikan potensi air tersebut untuk kepentingan masyarakat di sekitar daerah tersebut.

2.3.1. Curah Hujan Rata-rata

Curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir adalah curah hujan rata-rata di seluruh daerah yang bersangkutan, bukan curah hujan pada satu titik tertentu. Curah hujan ini disebut curah hujan daerah yang dinyatakan dalam millimeter.

Terdapat tiga cara yang dapat digunakan untuk menghitung curah hujan daerah (Soemarto, 1986: 31) yaitu:

1. Cara tinggi rata-rata

Tinggi rata-rata curah hujan didapatkan dengan mengambil harga rata-rata hitung (*arithmetic mean*) dari penakaran pada penakar hujan dalam areal tersebut.

$$d = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n} \quad (2-1)$$

dimana:

d = tinggi curah hujan rata-rata areal

$d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ = tinggi curah hujan pada pos penakar 1, 2, 3, \dots, n

n = banyaknya pos penakar

2. Cara poligon Thiessen

Cara ini didasarkan atas cara rata-rata timbang. Masing-masing penakar mempunyai daerah pengaruh yang dibentuk dengan menggambarkan garis-garis sumbu tegak lurus terhadap garis penghubung antara dua pos penakar seperti pada gambar 2.3.

Perhitungan curah hujan daerah dengan menggunakan poligon *Thiessen* dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$R = P_1 \cdot d_1 + P_2 \cdot d_2 + \dots + P_n \cdot d_n \quad (2-2)$$

$$P = \frac{A_n}{A} \quad (2-3)$$

dimana:

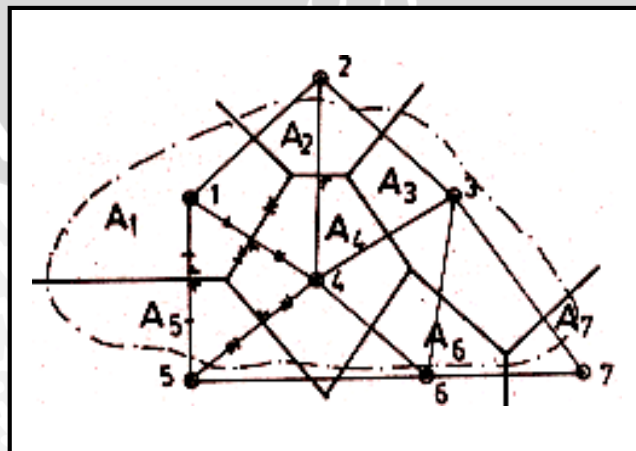
R = curah hujan daerah (mm)

P = koefisien Thiessen

A_n = daerah yang diwakili stasiun-stasiun pengukuran

A = luas daerah keseluruhan

d = tinggi hujan yang diukur di stasiun-stasiun pengukuran



Gambar 2.3 Poligon Thiessen
Sumber: Soemarto (1986: 32)

3. Cara garis-garis *Isohyet*

Cara *Isohyet* diawali dengan penggambaran kontur dengan tinggi hujan yang sama (*Isohyet*), seperti terlihat pada gambar 2.4.

Luas bagian diantara *isohyet-isohyet* yang berdekatan diukur, dan harga rata-ratanya dihitung sebagai harga rata-rata timbang dari nilai kontur.

$$d = \frac{\frac{d_0 + d_1}{2} A_1 + \frac{d_1 + d_2}{2} A_2 + \dots + \frac{d_{n-1} + d_n}{2} A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d_{i-1} + d_i}{2} A_i}{A} \quad (2-4)$$

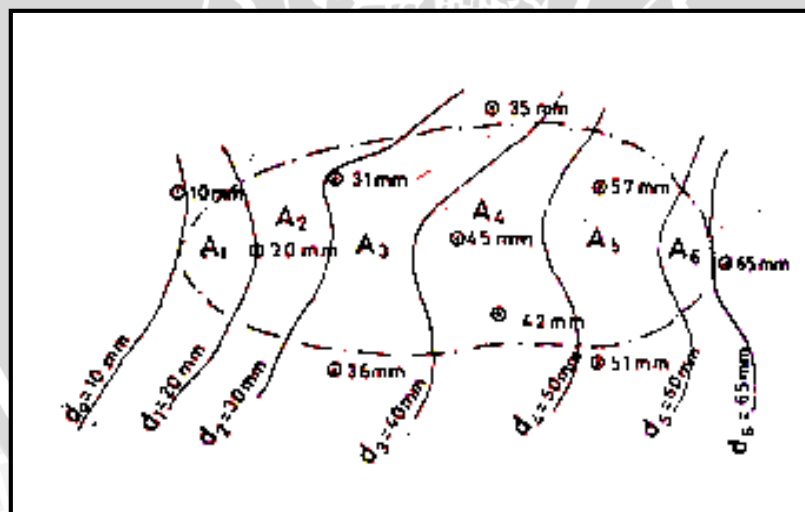
dimana:

A = luas areal

d = tinggi curah hujan rata-rata areal

$d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$ = tinggi curah hujan pada *isohyet* 0, 1, 2 ... n

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ = luas bagian areal yang dibatasi oleh *isohyet-isohyet* yang bersangkutan



Gambar 2.4 Curah Hujan Rerata *Isohyet*

Sumber: Soemarto (1986: 34)

Sedangkan dari (Suripin, 2004: 31), lepas dari kelebihan dan kelemahan ketiga metode yang tersebut diatas, pemilihan metode yang cocok dipakai pada suatu DAS dapat ditentukan dengan pertimbangan tiga faktor berikut :

1. Jaring-jaring pos penakar hujan dalam DAS

Tabel 2.1. Pemilihan Metode analisa Curah Hujan Berdasarkan Jumlah Pos Penakar

Jumlah pos penakar hujan cukup	Metode <i>isohyet</i> , <i>Thiessen</i> atau rata-rata aljabar dapat dipakai
Jumlah pos penakar hujan terbatas	Metode rata-rata aljabar atau <i>Thiessen</i>
Pos penakar hujan tunggal	Metode hujan titik

Sumber: Suripin (2004: 31)

2. Luas DAS

Tabel 2.2. Pemilihan Metode analisa Curah Hujan Berdasarkan Luas DAS

DAS besar (> 5000 km ²)	Metode <i>Isohyet</i>
DAS sedang (500 s/d 5000 km ²)	Metode <i>Thiessen</i>
DAS kecil (< 500 km ²)	Metode rata-rata aljabar

Sumber: Suripin (2004: 32)

3. Topografi DAS

Tabel 2.3. Pemilihan Metode analisa Curah Hujan Berdasarkan Topografi

Pegunungan	Metode rata-rata aljabar
Dataran	Metode <i>Thiessen</i>
Berbukit dan tidak beraturan	Metode <i>Isohyet</i>

Sumber: Suripin (2004: 31)

2.3.2. Hujan Andalan

Setelah didapatkan besarnya curah hujan rata-rata di lokasi studi, maka untuk menentukan ketersediaan air hujan/curah hujan dengan peluang keandalan tertentu (hujan andalan) dapat dilakukan dengan pendekatan analisis peluang dengan **Metode Weibull**. Rumusan peluang yang diberikan adalah: (Soewarno, 1995: 114)

$$P(X_m) = \frac{m}{N+1} \quad (2-5)$$

dengan:

$P(X_m)$ = Peluang terjadinya kumpulan nilai curah hujan yang diharapkan selama periode pengamatan.

N = Jumlah pengamatan dari data hujan.

m = Nomor urut kejadian atau peringkat kejadian.

Rumus ini pada mulanya dikembangkan oleh Weibull (1930), kemudian digunakan oleh Gumbel (1945), Chow (1953), Vels (1952), US Geological Survey dan lain-lain. Metode ini dapat digunakan untuk sekelompok data tahunan atau *partial*,

sehingga Metode Weibull ini yang sering digunakan untuk analisis peluang dan periode ulang. (Soewarno, 1995: 114)

2.3.3. Analisis Frekuensi

Analisis frekuensi digunakan untuk peramalan dalam arti menentukan probabilitas untuk terjadinya suatu peristiwa bagi tujuan perencanaan di masa mendatang, namun waktu atau saat terjadinya peristiwa yang sebenarnya tidak ditentukan. (Subarkah, Imam, 1980: 112). Probabilitas yang ditentukan adalah besarnya besaran hidrologi (*variate-variate*) yang kala ulangnya panjang. Besaran tersebar yang didapatkan dan pengamatan hujan dan banjir, biasanya tidak ada yang sebesar atau lebih besar dari besaran yang besarnya diperkirakan tadi. Sasaran utama analisis frekuensi adalah menentukan kala ulang peristiwa hidrologi yang berharga tertentu yang mencakup juga peristiwa yang diharapkan menyamai atau lebih besar dari reratanya (Subarkah, Imam, 1980: 109). Analisis ini dilakukan untuk memilih salah satu dan beberapa macam sebaran yang paling sesuai dengan sifat-sifat statistik data yang bersangkutan. Sifat-sifat data statistik tersebut adalah Koefisien *Varians* (CV), Koefisien *Skewness* (Cs) dan Koefisien Kurtosis. Dalam memanfaatkan berbagai teknik analisis frekuensi pada pengolahan distribusi, beberapa jenis distribusi yang paling banyak digunakan adalah Distribusi Normal, Log Normal, Log Pearson *Type III* dan Gumbel.

Tabel 2.4. Parameter Perkiraan Distribusi

Parameter	Distribusi			
	Normal	Log Normal	Log Pearson <i>Type III</i>	Gumbel
Koefisien <i>Varians</i> (CV)	Bebas	1	Bebas	Bebas
Koefisien <i>Skewness</i> (Cs)	0	3	+3 s/d -3	1,1396
Koefisien Kurtosis	3	Bebas	Bebas	5,4002

Sumber: Sri Harto, 2000

2.3.4. Uji Kesesuaian Distribusi

Untuk menentukan (*the goodness of fit test*) distribusi frekuensi dari sampel data terhadap fungsi distribusi peluang yang diperkirakan dapat menggambarkan atau mewakili distribusi frekuensi tersebut diperlukan pengujian parameter. Pengujian parameter yang sering dipakai adalah Chi-kuadrat dan Smirnov-Kolmogorov.

1. Uji Chi-kuadrat

Uji Chi-kuadrat dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi peluang yang telah dipilih dapat mewakili dari distribusi statistik sampel data yang

dianalisis. Pengambilan keputusan uji ini menggunakan parameter X^2 , yang dapat dihitung dengan rumus berikut: (Suripin, 2004: 57)

$$Xh^2 = \sum_{i=1}^G \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2-6)$$

dengan:

- Xh^2 = Parameter chi-kuadrat terhitung
- G = Jumlah sub kelompok
- O_i = Jumlah nilai pengamatan pada sub kelompok i
- E_i = Jumlah nilai teoritis pada sub kelompok i

Tahapan dalam uji ini adalah sebagai berikut:

- a. Urutkan data pengamatan dari besar ke kecil atau sebaliknya.
- b. Kelompokkan data menjadi G sub grup, tiap-tiap sub grup minimal 4 data pengamatan.
- c. Menjumlahkan data pengamatan sebesar O_i tiap-tiap sub grup
- d. Menjumlahkan data dari persamaan distribusi yang digunakan sebesar E_i
- e. Untuk tiap-tiap sub grup hitung nilai : $(O_i - E_i)^2$ dan $\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$
- f. Menjumlah nilai $\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$ pada seluruh G sub grup untuk menentukan nilai Chi kuadrat hitung (X^2 hit).
- g. Menentukan derajat kebebasan, $dk = G - R - 1$
- h. Harga X^2 hit dibandingkan dengan harga X^2_{cr} dari table Chi kuadrat dengan dk dan jumlah data (n) tertentu. Apabila X^2 hit < X^2_{cr} maka hipotesa distribusi dapat diterima.

Parameter Xh^2 merupakan variabel acak. Peluang untuk mencapai nilai Xh^2 sama atau lebih besar dari nilai chi-kuadrat sebenarnya (X^2) dapat dilihat pada tabel.

Interprestasi hasil uji adalah sebagai berikut:

1. Apabila peluang lebih dari 5%, maka persamaan distribusi yang digunakan dapat diterima.
2. Apabila peluang kurang dari 1%, maka persamaan distribusi yang digunakan tidak dapat diterima.
3. Apabila peluang berada diantara 1%-5%, maka tidak mungkin mengambil keputusan, misal perlu data tambahan.

Tabel 2.5. Nilai Kritis Chi-Square (X^2_{cr})

Dk	Distribusi (X^2)										
	0,99	0,95	0,90	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	0,1480	0,4550	1,0740	1,6420	3,8410	6,6350	10,8270
2	0,0200	0,1030	0,2110	0,4460	0,7130	1,3860	2,4080	3,2190	5,9910	9,2110	13,8150
3	0,1150	0,3520	0,5840	1,0050	1,4240	2,3660	3,6650	4,6420	7,8150	11,3430	16,2680
4	0,2970	0,7110	1,0640	1,6490	2,1950	3,3570	4,8780	5,9890	9,4880	13,2770	18,4650
5	0,5540	1,1450	1,6110	2,3430	3,0010	4,3510	6,0640	7,2980	11,0710	15,0860	20,5170
6	0,8720	1,6350	2,2040	3,0710	3,8280	5,3480	7,2310	8,5580	12,5920	16,8120	22,4570
7	1,8720	2,1670	2,8330	3,8220	4,6710	6,3460	8,8380	9,8030	14,0670	18,4750	24,3220
8	1,6460	2,7330	3,2910	4,5940	5,5270	7,3440	9,5240	11,0310	15,5070	20,0910	26,4250
9	2,0880	3,3250	4,1680	5,3810	6,3930	8,3430	10,6560	12,2420	16,9190	21,6660	27,8770
10	2,5580	3,9410	5,1790	6,1790	7,2670	9,3420	11,7810	13,4420	18,3070	23,2010	29,5830

Sumber: Sri Harto (1998: 181)

2. Uji Smirnov-Kolmogorov

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui simpangan horisontal tersebar sebaran teoritis dan sebaran empiris. Simpangan horisontal ini dinyatakan dengan $D_{maks} < D_{cr}$ (didapat dari tabel) untuk derajat nyata tertentu, disimpulkan hipotesa distribusi dapat diterima. Uji kecocokan Smirnov-Kolmogorov sering juga disebut uji kecocokan non parametrik (*non parametric test*), karena pengujiannya tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu. Adapun prosedurnya adalah sebagai berikut: (Suripin, 2004: 58)

1. Data curah hujan diurutkan dari kecil ke besar.
2. Menghitung persamaan empiris dengan persamaan berikut (Sri Harto, 1981: 179) :

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (2-7)$$

dengan:

- P = Peluang (%)
 m = Nomor urut data
 n = Jumlah data

3. Mencari nilai G

$$G = \frac{(\text{Log}X_i - \text{Log}X)}{S} \quad (2-8)$$

dengan:

- G = Koefisien Frekuensi
 S = Simpangan Baku

4. Menghitung nilai P(x)

$$P(x) = 100 - Pr \quad (2-9)$$

5. Menghitung Selisih $Sn(x)$ dan $P(x)$

$$Sn(x) = \text{peluang} \left(\frac{\text{rangking}}{\sum \text{data} + 1} \right) \quad (2-10)$$

6. Bandingkan perbedaan terbesar dari perhitungan selisih terbesar (x_{maks}) dengan x_{cr} dari tabel Smirnov-Kolmogorof. Jika harga $x_{maks} < x_{cr}$, maka penyimpangan masih dalam batas ijin, yang berarti distribusi hujan pengamatan sesuai dengan model distribusi teoritis.

Tabel 2.6. Nilai Kritis Smirnov Kolmogorov

n				
	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	0,30	0,34	0,40
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	0,20	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,20	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: Shahin (1976: 188)

2.3.5. Curah Hujan Rancangan

Dalam studi ini hujan rancangan dipilih cara *Log Pearson Type III* dengan pertimbangan bahwa cara ini lebih fleksibel dan dapat dipakai untuk semua sebaran data. (Sri Harto, 2000). Distribusi *Log Pearson Type III* banyak digunakan dalam analisis hidrologi, terutama dalam analisis data maksimum (banjir) dan minimum (debit minimum) dengan nilai ekstrem. Bentuk distribusi *Log Pearson Type III* merupakan hasil transformasi dari distribusi *Pearson Type III* dengan menggantikan variat menjadi nilai logaritmik. (Soewarno, 1995: 141).

Tahapan untuk menghitung hujan rancangan maksimum dengan metode *Log Pearson Type III* adalah sebagai berikut:

1. Hujan harian maksimum diubah dalam bentuk logaritma.
2. Menghitung harga logaritma rata-rata dengan rumus:

$$\overline{\text{Log}X} = \frac{\sum \text{Log}Xi}{n} \quad (2-11)$$

3. Menghitung harga simpangan baku dengan rumus :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Log}X_i - \overline{\text{Log}X})^2}{n-1}} \quad (2-12)$$

4. Menghitung harga koefisien kemencengan dengan rumus :

$$G = \frac{n \sum (\text{Log}x_i - \text{Log}x)^3}{(n-1).(n-2)s^3} \quad (2-13)$$

5. Menghitung logaritma hujan rancangan dengan kala ulang tertentu dengan rumus :

$$\text{Log}X = \overline{\text{Log}X} + K.s \quad (2-14)$$

dengan:

Log x = Logaritma curah hujan rancangan.

$\overline{\text{Log}x}$ = Logaritma rerata curah hujan.

K = Variabel standar untuk X yang besarnya tergantung koefisien kemencengan G

s = Simpangan baku

6. Mencari antilog dari log X untuk mendapatkan hujan rancangan dengan waktu balik yang dikehendaki T_r

Tabel 2.7. Nilai K untuk distribusi *Log-Pearson Type III*

Koef. G	Interval kejadian (<i>Recurrence interval</i>), tahun (periode ulang)							
	1. 0101	1.2500	2	5	10	25	50	100
	Persentase peluang terlampaui (<i>Percent chance of being exceeded</i>)							
	99	80	50	20	10	4	2	1
3,0	-0,667	-0,636	-0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051
2,8	-0,714	-0,666	-0,384	0,460	1,210	2,275	3,114	3,973
2,6	-0,769	-0,696	-0,368	0,499	1,238	2,267	3,071	2,889
2,4	-0,832	-0,725	-0,351	0,537	1,262	2,256	3,023	3,800
2,2	-0,905	-0,752	-0,330	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705
2,0	-0,990	-0,777	-0,307	0,609	1,302	2,219	2,192	3,605
1,8	-1,087	-0,799	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499
1,6	-1,197	-0,817	-0,254	0,675	1,329	2,163	2,780	3,388
1,4	-1,318	-0,832	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271
1,2	-1,449	-0,844	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149
1,0	-1,588	-0,852	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022
0,8	-1,733	-0,856	-0,132	0,780	1,336	1,993	2,453	2,891
0,6	-1,880	-0,857	-0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755
0,4	-2,029	-0,855	-0,066	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615
0,2	-2,178	-0,850	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472
0,0	-2,326	-0,842	0,000	0,842	1,282	1,751	2,051	2,326
-0,2	-2,472	-0,830	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178
-0,4	-2,615	-0,816	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029
-0,6	-2,755	-0,800	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880
-0,8	-2,891	-0,780	0,132	0,856	1,166	1,448	1,606	1,733
-1,0	-3,022	-0,758	0,164	0,852	1,128	1,366	1,492	1,588
-1,2	-2,149	-0,732	0,195	0,844	1,086	1,282	1,379	1,449
-1,4	-2,271	-0,705	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318
-1,6	-2,388	-0,675	0,254	0,817	0,994	1,116	1,166	1,197
-1,8	-3,499	-0,643	0,282	0,799	0,945	1,035	1,069	1,087
-2,0	-3,605	-0,609	0,307	0,777	0,895	0,959	0,980	0,990
-2,2	-3,705	-0,574	0,330	0,752	0,844	0,888	0,900	0,905
-2,4	-3,800	-0,537	0,351	0,725	0,795	0,823	0,830	0,832
-2,6	-3,889	-0,490	0,368	0,696	0,747	0,764	0,768	0,769
-2,8	-3,973	-0,469	0,384	0,666	0,702	0,712	0,714	0,714
-3,0	-7,051	-0,420	0,396	0,636	0,660	0,666	0,666	0,667

Sumber: Suripin, 2004: 43

2.3.6. Evapotranspirasi Potensial

Analisis data klimatologi dilakukan untuk mengetahui besarnya potensi penguapan di daerah studi atau yang biasa disebut sebagai besarnya evapotranspirasi potensial (ET_o).

Besarnya ET_o sangat dipengaruhi keadaan iklim. Sementara itu diketahui, bahwa iklim di suatu daerah yang sangat erat hubungannya dengan letak lintang daerah. Indonesia yang terletak di sekitar garis khatulistiwa, tentunya mempunyai keadaan iklim yang khas, yang jauh berbeda dengan daerah lain yang terletak jauh dari garis katulistiwa tersebut.

Berbagai rumus telah dikembangkan dalam menghitung harga ET_o, diantaranya adalah rumus Blaney-Criddle. Persamaan Blaney-Criddle merupakan salah satu model temperatur untuk memperkirakan evapotranspirasi. Disebut dengan model temperatur karena untuk memperkirakan ET_o, hanya berbasis satu data iklim yaitu data temperatur. Rumus Blaney-Criddle sering digunakan di Indonesia. Nilai yang ditaksir berdasarkan pada nilai pasokan air yang tidak terbatas (Soewarno, 2000). Blaney-Criddle (1950) mengembangkan rumus empiris guna perhitungan evapotranspirasi potensial sebagai berikut (Suhardjono, 1994):

$$ET_o = c \cdot ET_o^* \quad (2-15)$$

Sedangkan besarnya ET_o* dihitung dengan rumus :

$$ET_o^* = p \cdot (0,457 \cdot t + 8,13) \quad (2-16)$$

dengan:

- ET_o = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- c = angka koreksi sesuai bulan yang ditinjau
- ET_o* = besaran evapotranspirasi potensial sebelum dikoreksi sering pula dinyatakan sebagai evaporasi muka air bebas dan dengan menggunakan notasi E_o atau h E(d)
- p = prosentase rata-rata jam siang hari, yang besarnya tergantung pada letak lintang (LL)
- t = suhu udara (°C)

Perhitungan ET_o* umumnya menggunakan periode waktu bulanan dengan demikian nilai (p) maupun (t), merupakan nilai rata-rata keadaan iklim dari suatu bulan tertentu. Kebutuhan data terukur untuk menghitung ET_o* dengan metode Blaney-Criddle adalah letak lintang (LL) dan suhu udara (t).

Prosedur perhitungan ET_o untuk suatu bulan tertentu adalah sebagai berikut :

1. Cari letak lintang daerah yang ditinjau
2. Sesuai dengan letak lintang, cari nilai (p) dari tabel 2.8.
3. Cari data suhu rata-rata bulanan (t)
4. Dengan memakai nilai (p) dari tabel I, dan data terukur (t), hitung ETo*
5. Sesuai dengan bulan yang ditinjau cari angka koreksi (c) dari tabel 2.9.
6. Hitung Eto

Tabel 2.8. Besaran nilai (p)

Bulan	Letak Lintang						
	5° LU	2,5°LU	0°LU	2,5°LS	5°LS	7,5°LS	10°LS
Januari	0.270	0.270	0.270	0.275	0.280	0.285	0.285
Pebruari	0.270	0.270	0.270	0.275	0.280	0.285	0.285
Maret	0.275	0.275	0.275	0.275	0.280	0.285	0.285
April	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.270	0.270
Mei	0.280	0.280	0.275	0.270	0.270	0.265	0.260
Juni	0.280	0.280	0.275	0.275	0.270	0.270	0.265
Juli	0.285	0.280	0.275	0.275	0.275	0.270	0.265
Agustus	0.285	0.280	0.275	0.275	0.275	0.270	0.265
September	0.280	0.275	0.275	0.275	0.275	0.280	0.275
Oktober	0.275	0.275	0.270	0.275	0.280	0.285	0.285
Nopember	0.270	0.270	0.270	0.275	0.280	0.285	0.285
Desember	0.270	0.270	0.270	0.275	0.285	0.285	0.290

Sumber : Suhardjono, 1994

Tabel 2.9. Besaran angka koreksi (c) Untuk Metode Blaney-Criddle

Bulan	Angka Koreksi (c)
Januari	0.800
Pebruari	0.800
Maret	0.750
April	0.750
Mei	0.700
Juni	0.700
Juli	0.750
Agustus	0.750
September	0.800
Oktober	0.800
Nopember	0.825
Desember	0.825

Sumber : Suhardjono, 1994

2.3.7. Prediksi Debit Sungai Model NRECA

Metode ini dikembangkan untuk menganalisis debit air berdasarkan curah hujan yang bertujuan untuk pembangkit listrik. metode ini diperkenalkan *National Rural Electric Cooperative Association* (NRECA) sehingga metode ini disebut metode NRECA. (Buku 2a Buku Pedoman Studi Kelayakan Hidrologi Pembangunan PLTMH, 2009: 17).

1. Struktur Model NRECA

Struktur model NRECA membagi aliran menjadi dua yaitu aliran langsung (limpasan permukaan dan bawah permukaan) dan aliran dasar. Sedangkan tampungan juga dibagi dua yaitu tampungan kelengasan (*soil moisture storage*) dan tampungan air tanah (*groundwater storage*). Perubahan tampungan diperhitungkan sebagai selisih dari tampungan akhir dan awal. Mengenai tampungan kelengasan itu sendiri ditentukan oleh hujan, evapotranspirasi, kelebihan kelengasan yang menjadi limpasan langsung dan imbuhan atau tambahan air tanah. Namun demikian untuk tampungan air tanah diperhitungkan dari imbuhan air tanah yang masuk dan aliran air tanah yang keluar.

Total debit aliran sungai dihitung dengan persamaan berikut (Nugroho, 2010: 239):

$$Q = (GF + DRF).A \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2-17)$$

dengan:

Q = total debit sungai (m³/detik)
 A = luas DAS (km²)
 NOM = 100 + 0,2 x hujan rata-rata tahunan (2-18)

Sr = *Storage ratio* (angka tampungan)

$$= \frac{SMS}{NOM}$$
 (2-19)

P = curah hujan bulanan rata-rata (mm)

PET = *Potensial Evapotranspiration*
 = Evapotranspirasi Potensial (mm)

SMS = Soil Moisture Storage

SMS_n = Coba-coba

SMS_{n+1} = SMS_n + D_{storage} (2-20)

AET/PET = 1; jika $\frac{P}{PET} > 1$ atau Sr > 2 (2-21)

= $\left(\frac{P}{PET}\right) \times (1 - 0,5 \times Sr) + 0,5 \times Sr$; jika $\frac{P}{PET} < 1$ atau Sr < 2 (2-22)

AET = *Actual Evapotranspiration* (evapotranspirasi aktual) (mm)
 = PET x (AET/PET) (2-23)

excm = *excess soil moisture* / kelebihan kelengasan tanah (mm)
 = exrat x (P - AET) (2-24)

exrat = *excess moisture ratio* / nilai banding kelengasan tanah
 = 0,5 x [1 + tgh(2Sr - 2)], jika harga Sr > 0 (2-25)

= 0, jika harga Sr < 0 (2-26)

D_{storage} = P - AET - excm. (2-27)

Rech = infiltrasi atau imbuhan ke tampungan airtanah (mm)
 = PSUB x excm (2-28)

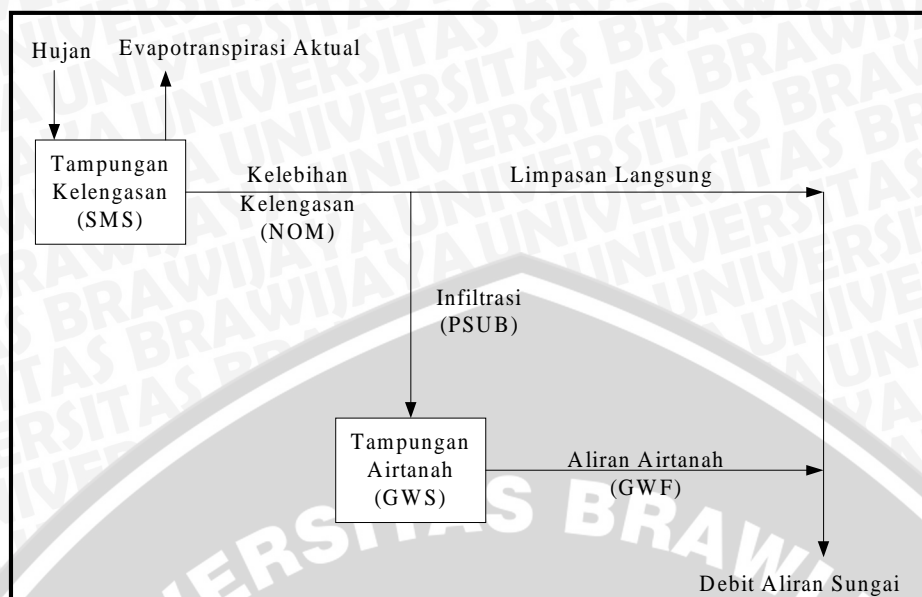
GWS awal_n = Coba-coba

GWS awal_{n+1} = GWS akhir - GF (2-29)

GWS_{akhir} = *Ground Water Storage* / tampungan airtanah (mm)
 = Rech + GWS_{awal} (2-30)

GF = *Groundwater Flow* / aliran airtanah (mm)
 = GWF x GWS_{akhir} (2-31)

DRF = *Direct Runoff* / limpasan langsung (mm)
 = excm - Rech (2-32)



Gambar 2.5 Struktur Model NRECA

Sumber: Nugroho (2010: 235)

2. Parameter Model NRECA

Parameter yang digunakan dalam Model NRECA adalah PSUB (*Percent Sub Surface*), GWF (*Ground Water Flow*), NOM (Nominal), SMS (*Soil Moisture Storage*), dan GWS (*Ground Water Storage*). PSUB merupakan parameter model yang menggambarkan bagian dari kelebihan air yang menjadi imbuhan. Sisanya mengalir sebagai aliran langsung yang terdiri dari aliran permukaan dan aliran bawah permukaan. Tampungan air tanah menampung air imbuhan tersebut yang dikeluarkan menjadi aliran dasar di sungai. Besarnya aliran dasar yang dikeluarkan adalah GWF kali jumlah tampungan, dengan demikian GWF nilainya lebih kecil dari satu. Makin besar GWF makin banyak air yang dikeluarkan dari tampungan sehingga air tampungan akan cepat habis, begitu pula sebaliknya. Sehingga dapat didefinisikan bahwa GWF adalah persentase limpasan tampungan airtanah yang menuju ke sungai. NOM merupakan indeks atau petunjuk dari kapasitas tampungan kelengasan tanah (*soil moisture storage*) pada DAS. SMS merupakan nilai awal dari tampungan kelengasan tanah sedangkan GWS merupakan nilai awal dari tampungan airtanah. Batasan-batasan untuk parameter Model NRECA adalah sebagai berikut (Nugroho, 2010: 236):

- PSUB : $0,3 \leq \text{PSUB} \leq 0,9$
- GWF : $0,2 \leq \text{GWF} \leq 0,8$
- SMS : tidak ada batasan (*unbounded*)
- GWS : tidak ada batasan (*unbounded*)

Kombinasi parameter PSUB dan GWF memegang peranan penting dalam menentukan hidrograf aliran di sungai yang merupakan penjumlahan antara debit limpasan langsung (*direct runoff*) dan aliran dasar (*baseflow*). Diagram Model NRECA ini dapat dilihat pada gambar 2.5 (Nugroho, 2010: 237).

2.3.8. Debit Andalan

Dalam perencanaan proyek-proyek Pusat Listrik Tenaga Air terlebih dahulu harus dicari debit andalan (*dependable discharge*), yang tujuannya adalah menentukan debit perencanaan yang diharapkan selalu tersedia di sungai (Soemarto, 1987:213).

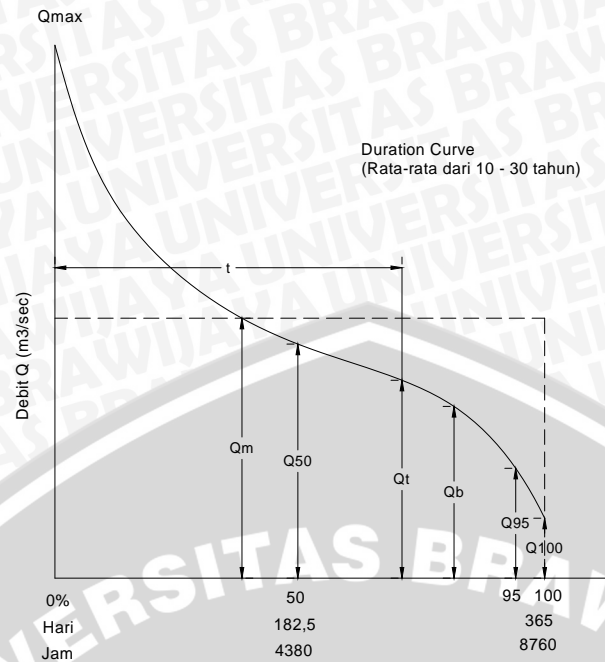
Debit andalan adalah besarnya debit yang dapat tersedia untuk memenuhi kebutuhan air dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Debit andalan dapat dicari dengan membuat terlebih dahulu garis durasi untuk debit-debit yang disamai atau dilampaui. Setelah itu baru ditetapkan frekuensi kejadian yang didalamnya terdapat paling sedikit satu kegagalan. Dengan data cukup panjang dapat digunakan analisis statistika untuk mengetahui gambaran umum secara kuantitatif besaran jumlah air. Metode yang digunakan dalam analisis distribusi peluang adalah **Metode Weibull** dengan persamaan seperti ditunjukkan pada persamaan (2-5).

Beberapa debit andalan untuk berbagai tujuan, antara lain: (Soemarto, 1987:214).

- | | |
|-----------------------------------|---------|
| 1. Penyediaan air minum | 99% |
| 2. Penyediaan air industri | 95%-98% |
| 3. Penyediaan air irigasi untuk | |
| • Daerah beriklim setengah lembab | 70%-85% |
| • Daerah beriklim kering | 80%-95% |
| 4. Pusat Listrik Tenaga Air | 85%-90% |

2.3.9. Duration Curve

Duration curve adalah suatu grafik yang memperlihatkan debit sungai dan selama beberapa waktu tertentu dalam satu tahun, debit ini terdapat pada sungai. Pada gambar 2.6 jelas bahwa debit minimum terdapat selama setahun penuh, debit maksimum (banjir) hanya terdapat selama beberapa jam. *Duration curve* digambarkan dari data-data debit, sekurang-kurangnya selama 10 tahun, agar dapat memberikan informasi yang bisa digunakan.



Gambar 2.6 *Duration Curve*
Sumber: Patty (1995: 15)

2.3.10. Analisa Intensitas Curah Hujan

Distribusi hujan (agihan hujan) jam-jaman ditetapkan dengan cara pengamatan langsung terhadap data pencatatan hujan jam-jaman pada stasiun yang paling berpengaruh pada DAS. Bila tidak ada maka bisa menirukan perilaku hujan jam-jaman yang mirip dengan daerah setempat pada garis lintang yang sama. Distribusi tersebut diperoleh dengan pengelompokan tinggi hujan ke dalam range dengan tinggi tertentu. Dari data yang telah disusun dalam range tinggi hujan tersebut dipilih distribusi tinggi hujan rancangan dengan berdasarkan analisis frekuensi dan frekuensi kemunculan tertinggi pada distribusi hujan jam-jaman tertentu. Selanjutnya prosentase hujan tiap jam terhadap tinggi hujan total pada distribusi hujan yang ditetapkan.

Pemilihan durasi hujan kritis (Critical Storm Duration), pada prinsipnya tergantung pada luas DPS dan pengaruh-pengaruh lain seperti luas genangan waduk dan konfigurasi bangunan pelimpah, sehingga untuk setiap bendungan walaupun memiliki luas DPS yang sama belum pasti durasi hujan kritisnya sama.

Pemilihan durasi hujan dengan pola distribusinya sangat berpengaruh pada hasil banjir desain yang diperhitungkan. Curah hujan yang sama yang terdistribusi dengan dengan curah hujan yang panjang akan menghasilkan puncak banjir yang lebih rendah dibanding dengan yang terdistribusi dengan durasi yang pendek.

Bila data hidrograf banjir dari pos duga air otomatis dan data distribusi hujan jam-jaman dari stasiun hujan otomatis tidak tersedia, pola distribusi hujan dapat ditetapkan dengan mengacu dari PSA-007.

Tabel 2.10. Intensitas Hujan Dalam % Yang Disarankan PSA 007

Durasi Hujan (jam)	Kala Ulang						
	CMB	1000	100	50	25	10	5
0.5	20	25	26	27	28	30	32
0.75	27	32	34	35	36	38	41
1	34	39	41	42	43	45	48
2	45	49	52	53	55	57	59
3	52	57	60	61	63	64	66
6	64	69	72	73	75	76	78
12	88	88	88	88	88	88	88
24	100	100	100	100	100	100	100

Sumber : Panduan Perencanaan Bendungan Urugan

Untuk mendapatkan curah hujan kritis selanjutnya sesuai dengan PSA 007, distribusi hujan disusun dalam bentuk genta, dimana hujan tertinggi ditempatkan di tengah, tertinggi kedua di sebelah kiri, tertinggi ketiga di sebelah kanan dan seterusnya.

Tabel 2.11. Distribusi Hujan Untuk Durasi 6 Jam

Durasi Hujan		(Jam)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Curah Hujan	T 5 Thn	(%)	59	71	78	82	85	88	90	92	94	96	98	100
	T 10 Thn	(%)	57	69	76	81	85	88	90	92	94	96	98	100
	T 25 Thn	(%)	55	68	75	80	85	88	91	93	94	96	98	100
	T 50 Thn	(%)	53	66	73	79	85	88	91	93	95	96	98	100
	T 100 Thn	(%)	52	65	72	79	84	88	91	94	95	96	98	100
	T 1000 Thn	(%)	49	62	69	77	84	88	91	94	95	96	98	100
CMB		(%)	45	56	64	74	83	88	91	94	95	96	98	100

Sumber : Panduan Perencanaan Bendungan Urugan

Tabel 2.12. Distribusi Hujan Netto Jam-jaman Metode PSA 007

No	Jam Ke	Distribusi Hujan						
		T 5 Th	T 10 Th	T 25 Th	T 50 Th	T 100 Th	T 1000 Th	CMB
1	0.5	2	2	2	2	2	2	2
2	1.0	2	2	2	2	3	3	3
3	1.5	3	3	3	3	4	4	5
4	2.0	4	5	5	6	7	7	9
5	2.5	12	12	13	13	13	13	11
6	3.0	59	57	55	53	52	49	45
7	3.5	7	7	7	7	7	8	10
8	4.0	3	4	5	6	5	7	8
9	4.5	2	2	3	3	3	3	3
10	5.0	2	2	2	2	2	2	2
11	5.5	2	2	2	2	1	1	1
12	6.0	2	2	1	1	1	1	1

Sumber : Panduan Perencanaan Bendungan Urugan

Hujan netto DPS diperoleh dari hujan jam-jaman dikalikan dengan faktor reduksi. Faktor reduksi ditetapkan dari kurva hubungan antara kedalaman-luas-durasi hujan atau dikenal sebagai depth area duration.

2.3.11. Debit Banjir Rancangan dengan Metode HSS Nakayasu

Banjir rancangan merupakan suatu banjir dengan kala ulang tertentu. Debit banjir rancangan dalam perencanaan PLTM ini dianalisis dengan pendekatan Model Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu. Rumusan yang dikemukakan oleh Nakayasu ialah: (Soemarto,1987:168)

$$Q_p = \frac{A.R_o}{3,6(0,3T_p + T_{0,3})} \quad (2-33)$$

dengan:

Q_p = debit puncak banjir ($m^3/detik$)

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 debit puncak sampai menjadi 30% dari debit puncak (jam)

Bagian lengkung naik hidrograf satuan mempunyai persamaan:

$$Q_a = Q_p \left(\frac{t}{T_p} \right)^{2,4} \quad (2-34)$$

Q_a = limpasan sebelum mencapai debit puncak ($m^3/detik$)

t = waktu (jam)

Bagian lengkung turun hidrograf satuan mempunyai persamaan:

$$Q_{d1} = Q_d > 0,3Q_p : Q_d = Q_p \cdot 0,3^{\left(\frac{t - T_p}{T_{0,3}} \right)} \quad (2-35)$$

$$Q_{d2} = 0,3 Q_p > Q_d > 0,3^2 Q_p : Q_d = Q_p \cdot 0,3^{\left(\frac{t - T_p + 0,5T_{0,3}}{1,5T_{0,3}} \right)} \quad (2-36)$$

$$Q_{d3} = 0,3^2 Q_p > Q_d : Q_d = Q_p \cdot 0,3^{\left(\frac{t - T_p + 1,5T_{0,3}}{2T_{0,3}} \right)} \quad (2-37)$$

$$\text{Tenggang waktu } T_p = t_g + 0,8 t_r \quad (2-38)$$

dimana untuk:

$$L < 15 \text{ km} \longrightarrow t_g = 0,21 L^{0,7} \quad (2-39)$$

$$L > 15 \text{ km} \longrightarrow t_g = 0,4 + 0,058 L \quad (2-40)$$

dengan:

L = panjang alur sungai (km)

t_g = waktu konsentrasi (jam)

t_r = 0,5 t_g sampai 1 t_g (jam) (2-41)

$$T_{0,3} = tg \text{ (jam)} \quad (2-42)$$

dimana:

- Untuk daerah pengaliran biasa $= 2$
- Untuk bagian naik hidrograf yang lambat dan bagian menurun yang cepat $= 1,5$
- Untuk bagian naik hidrograf yang cepat dan bagian menurun yang lambat $= 3$

$$Qb = 0,4751A^{0,6444} \cdot D^{0,943} \quad (2-43)$$

dengan:

Qb = debit aliran dasar (*base flow*) ($m^3/detik$)

A = luas DAS (km^2)

D = kerapatan jaringan kurus (km^2)

2.4. Perencanaan Hidrolik

2.4.1. Bendung

a. Pemilihan Lokasi Bendung

Lokasi bendung dipilih atas pertimbangan beberapa aspek, yaitu: (Mawardi, 2006: 26).

1. Dari kondisi topografi harus mempertimbangkan beberapa hal, antara lain
 - Ketinggian bendung tidak terlalu tinggi
 - *Trace* sluran induk terletak di tempat yang baik.
 - Penempatan lokasi *intake* yang tepat dilihat dari segi hidraulik dan angkutan sedimen.
2. Dari kondisi hidraulik dan morfologi sungai, termasuk angkutan sedimennya adalah faktor yang harus dipertimbangkan pula dalam pemilihan lokasi bendung yang meliputi:
 - Pola aliran sungai, kecepatan, dan arahnya pada waktu debit banjir, sedang, dan kecil.
 - Kedalaman dan lebar muka air pada waktu debit banjir, sedang, dan kecil.
 - Tinggi muka air dan debit banjir rencana.
 - Potensi dan distribusi angkutan sedimen.
3. Kondisi tanah pondasi harus cukup baik sehingga bangunan akan stabil.
4. Biaya pelaksanaan harus mempertimbangkan cara pelaksanaannya, peralatan dan tenaga.
5. Faktor – faktor lain yang harus dipertimbangkan dalam memilih lokasi bendung yaitu penggunaan lahan di sekitar bendung.

b. Bentuk mercu

Bentuk mercu bendung yang lazim digunakan di Indonesia yaitu bentuk mercu bulat. Hal ini dikarenakan: (Mawardi, 2006:41).

1. Bentuknya sederhana sehingga mudah dalam pelaksanaannya.
2. Mempunyai bentuk mercu besar, sehingga lebih tahan terhadap benturan batu.
3. Tahan terhadap goresan atau abrasi, karena mercu bendung diperkuat oleh pasangan batu candi atau beton.
4. Pengaruh kavitasasi hampir tidak ada atau tidak begitu besar asalkan radius mercu bendung memenuhi syarat minimum yaitu $0,7 h < R < h$.

c. Tinggi mercu

Dalam menentukan tinggi mercu bendung (P), belum ada rumus atau ketentuan yang pasti. Hanya berdasarkan pengalaman dan pertimbangan stabilitas bendung. Pertimbangan tersebut antara lain:

1. Kebutuhan penyadapan untuk memperoleh debit aliran dan tinggi tekan
2. Kebutuhan tinggi energi untuk pembilasan
3. Tinggi muka air genangan yang akan terjadi
4. Kesempurnaan aliran pada bendung
5. Kebutuhan pengendalian angkutan sedimen yang terjadi di bendung

d. Lebar mercu

Lebar mercu bendung atau disebut pula lebar bentang bendung yang merupakan jarak antara dua tembok pangkal bendung (*abutment*), termasuk lebar bangunan pembilas dan pilar – pilarnya. Ini disebut lebar mercu bruto.

Berkaitan hal - hal di atas, lebar mercu dapat diperkirakan sama dengan lebar rata – rata sungai stabil atau pada debit penuh alur (*bank full discharge*). Umumnya diambil sebesar 1,2 kali lebar sungai rata – rata, pada ruas sungai yang telah stabil (Mawardi, 2006: 43).

Lebar mercu bendung efektif (B_e), yaitu lebar mercu bendung bruto, B_b , dikurangi dengan lebar pilar dan pintu pembilas. Artinya lebar mercu bendung yang efektif melewati debit banjir desain.

Penentuan lebar mercu bendung efektif dengan persamaan: (KP.02, 1986: 38) :

$$B_e = B - 2 (n \cdot K_p + K_a) H_1 \quad (2-44)$$

$$B = b - p - \sum t \quad (2-45)$$

dengan:

B_e = lebar mercu efektif dalam meter

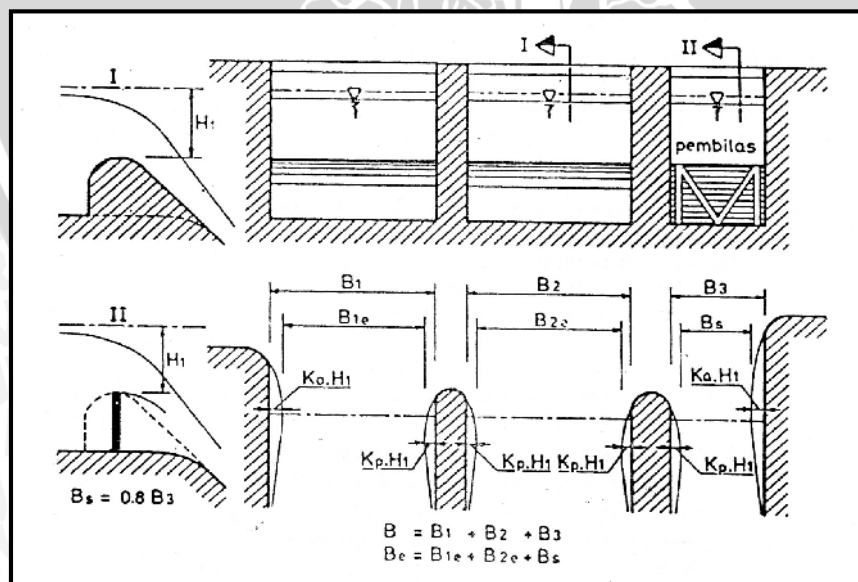
B_b = lebar mercu bruto dalam meter

- n = jumlah pilar
- b = lebar bendung (lebar sungai)
- p = lebar pintu penguras
- $\sum t$ = jumlah lebar pilar
- Kp = koefisien kontraksi pilar
- Ka = koefisien kontraksi pangkal bendung
- H₁ = Tinggi energi, yaitu h + k; h = tinggi air, k = v²/2g

Tabel 2.13. Harga-harga koefisien kontraksi

Uraian	Kp
<ul style="list-style-type: none"> Untuk pilar berujung segi empat dengan sudut-sudut yang dibulatkan pada jari-jari yang hampir sama dengan 0,1 dari tebal pilar Untuk pilar berujung bulat Untuk pilar berujung runcing 	 0,02 0,01 0
Uraian	Ka
<ul style="list-style-type: none"> Untuk pangkal tembok segi empat dengan tembok hulu pada 90° ke arah aliran Untuk pangkal tembok bulat dengan tembok hulu pada 90° ke arah aliran dengan 0,5 H₁ > r > 0,15 H₁ Untuk pangkal tembok bulat dimana r > 0,5 H₁ dan tembok hulu tidak lebih dari 45° ke arah aliran 	 0,20 0,10 0

Sumber: KP.02 (1986: 40)



Gambar 2.7 Lebar efektif mercu

Sumber: KP.02 (1986: 39)



e. Tinggi muka air di atas mercu

Tinggi muka air di atas mercu bendung dapat dihitung dengan persamaan tinggi energi – debit, untuk ambang bulat dan pengontrol segi empat yaitu :

$$Q_d = C_d \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g} \cdot B_e \cdot H_1^{1.5} \quad (2-46)$$

dengan:

Q_d = debit desain ($m^3/detik$), debit yang digunakan yaitu debit banjir rancangan (Q_{50th})

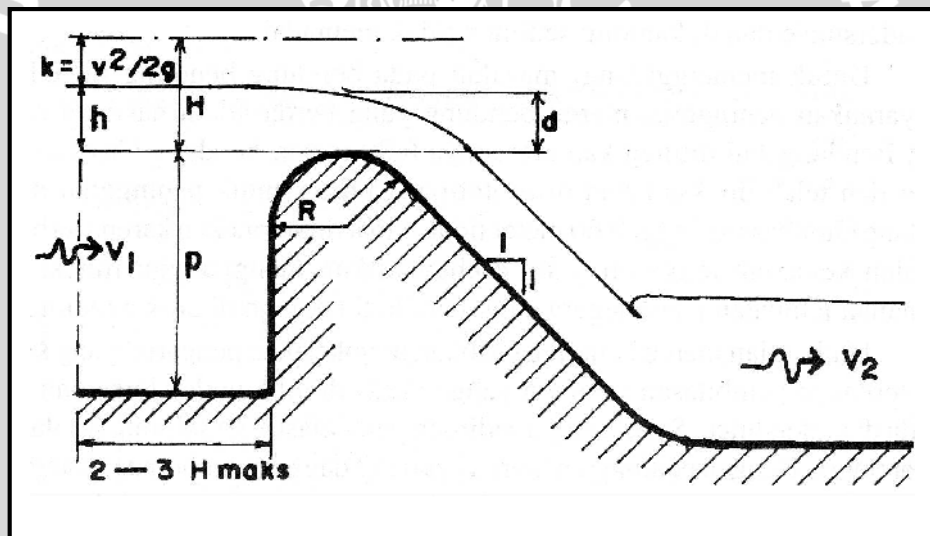
C_d = koefisien debit menurut Iwasaki untuk *type* standar dan dinding hulu ambang tegak.

$$C_d = 2,200 - 0,0416 \left(\frac{H_1}{P} \right)^{0,99} \quad (2-47)$$

g = percepatan gravitasi bumi ($m/detik^2$)

B_e = panjang mercu efektif (m)

H_1 = tinggi energi di atas mercu (m)



Gambar 2.8 Tinggi muka air di atas mercu

Sumber: Mawardi (2006: 42)

2.4.2. Kolam Loncat Air

Awal loncatan dapat ditemukan dari: (KP.02: 56)

$$V_1 = \sqrt{2g \left(\frac{1}{2} H_1 + z \right)} \quad (2-48)$$

Debit persatuan lebar:

$$q = \frac{Q}{B_e} \quad (2-49)$$

Kedalaman air di awal loncatan air:

$$Y_u = \frac{q}{V_1} \quad (2-50)$$

Kedalaman konjugasi dalam loncat air adalah:

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{gY_u}} \quad (2-51)$$

$$Y_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1 \right) Y_u \quad (2-52)$$

dengan:

V_1 = kecepatan awal loncatan (m/detik)

g = Percepatan gravitasi 9,8 (m/dt²)

H_1 = tinggi energi di atas ambang (m)

z = tinggi jatuh (m)

Y_2 = kedalaman air di atas ambang ujung (m)

Y_u = kedalaman air di awal loncatan air (m)

Fr = bilangan *Froude*

Ambang yang berfungsi untuk memantapkan aliran ini umumnya ditempatkan pada jarak

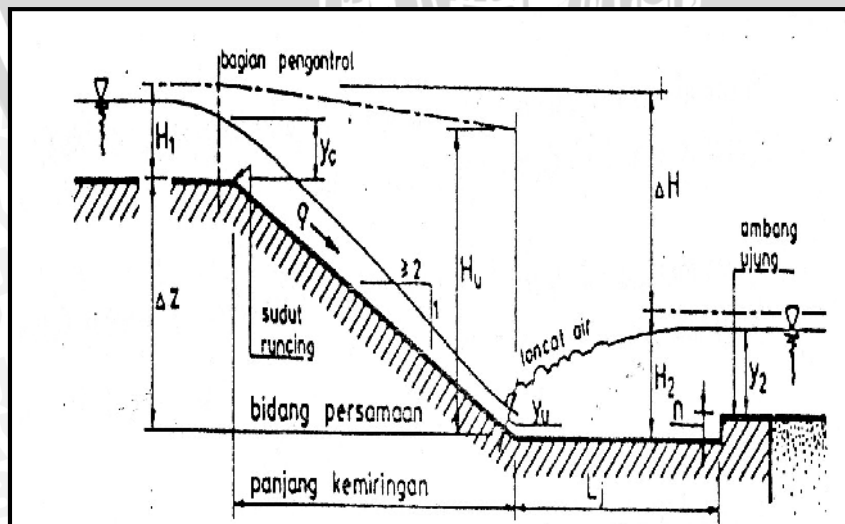
$$L_j = 5(n + y_2) \quad (2-53)$$

dengan:

L_j = panjang kolam, m

n = tinggi ambang ujung, m

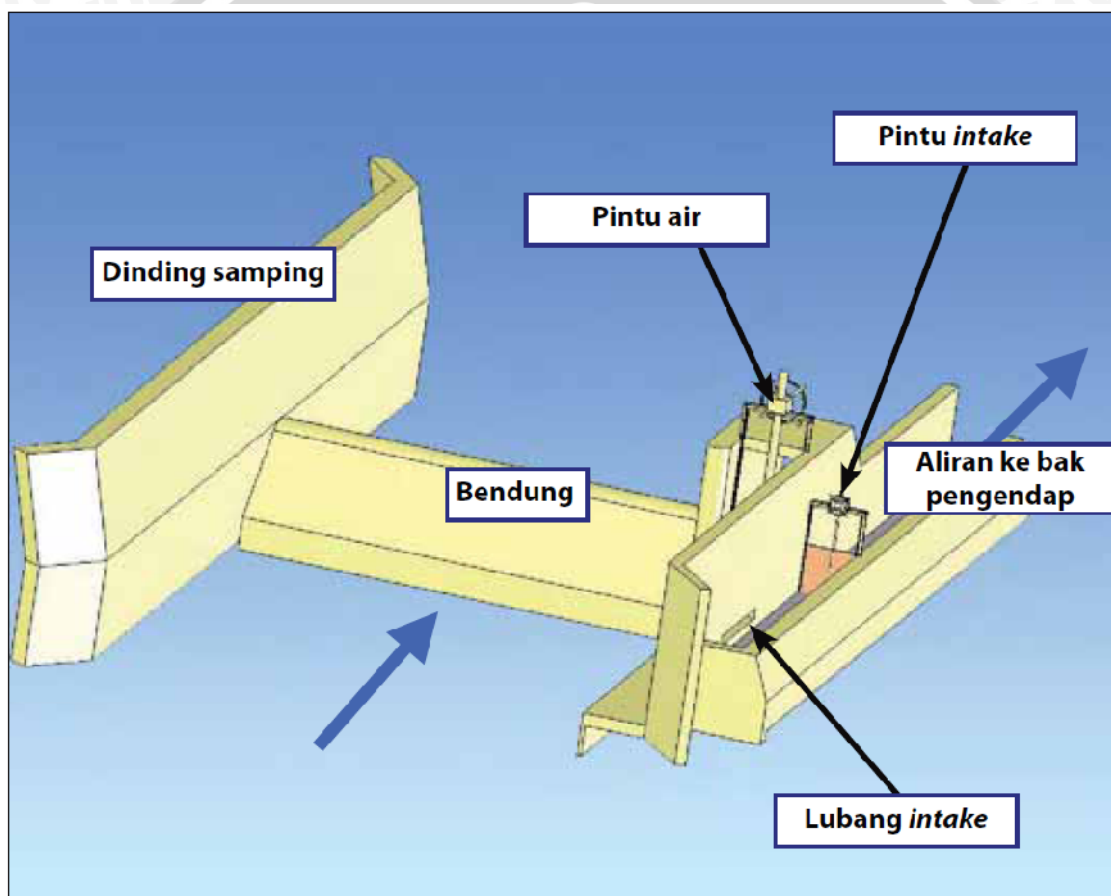
y_2 = kedalaman air di atas ambang, m



Gambar 2.9 Parameter-parameter loncat air
Sumber: KP.02 (1986: 58)

2.4.3. Bangunan ambil air (*Intake*)

Intake adalah fasilitas yang dipakai untuk mengambil air langsung dari sungai ke dalam saluran air. *Intake* harus mampu mengalihkan air sungai ke dalam saluran pembawa pada debit tertentu setiap saat. Lokasi *intake* sebaiknya di sisi luar belokan sungai untuk meminimalisasi pengendapan di saluran pembawa. Fungsi utama dari *intake* adalah untuk mengalirkan air dalam jumlah tertentu ke dalam bak pengendap dan saluran pembawa serta menjaga saluran pembawa bersih dari sedimen dan sampah. Kelebihan air harus dialirkan kembali ke sungai. (Buku 2b Buku Pedoman Studi Kelayakan Sipil Pembangunan PLTMH, 2009: 44)

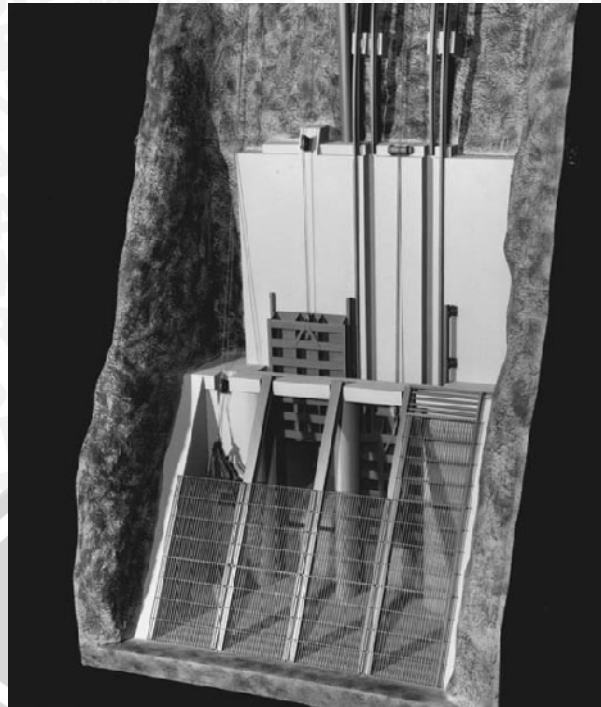


Gambar 2.10 Bendung dan *Intake*

Sumber: Buku Baik dan Buruk dari Mini/Mikro Hidro (2009: 45)

2.4.4. *Trash rack*

Trash rack dipasang pada bangunan intake dan terbuat dari pipa besi dan dipasang seperti bentuk pagar. Fungsinya untuk mencegah benda-benda padat seperti sampah jerami dan lainnya masuk ke *intake*. (Buku Baik dan Buruk dari Mini/Mikro Hidro, 2009: 75)



Gambar 2.11 *Trash rack*

Sumber: http://www.raudascalemodels.com/engr/images/trash_rack.jpg

2.4.5. Bak pengendap (*Sand trap*)

Digunakan untuk memindahkan partikel-partikel pasir dari air. Fungsi dari bak pengendap adalah sangat penting untuk melindungi komponen-komponen berikutnya dari dampak pasir. Setelah melalui bak pengendap, air tidak boleh mengandung bahan endapan dengan diameter tertentu. Untuk PLTM diameter maksimum yang diijinkan lolos dari bak pengendap adalah butiran dengan diameter 0,2 – 0,5 mm (Patty, 1995:42)

Ukuran dasar bak pembersih diantaranya adalah lebar bak (B), tinggi air dalam bak (h), kecepatan air dalam bak (V) dan panjang bak (L).

$$Q = B \cdot h \cdot V \tag{2-54}$$

$$L = V \cdot t \tag{2-55}$$

$$t = \frac{h}{V} \tag{2-56}$$

$$V_c = a\sqrt{d} \tag{2-57}$$

dengan :

Q = debit (m³/detik), debit yang digunakan yaitu debit andalan 90%

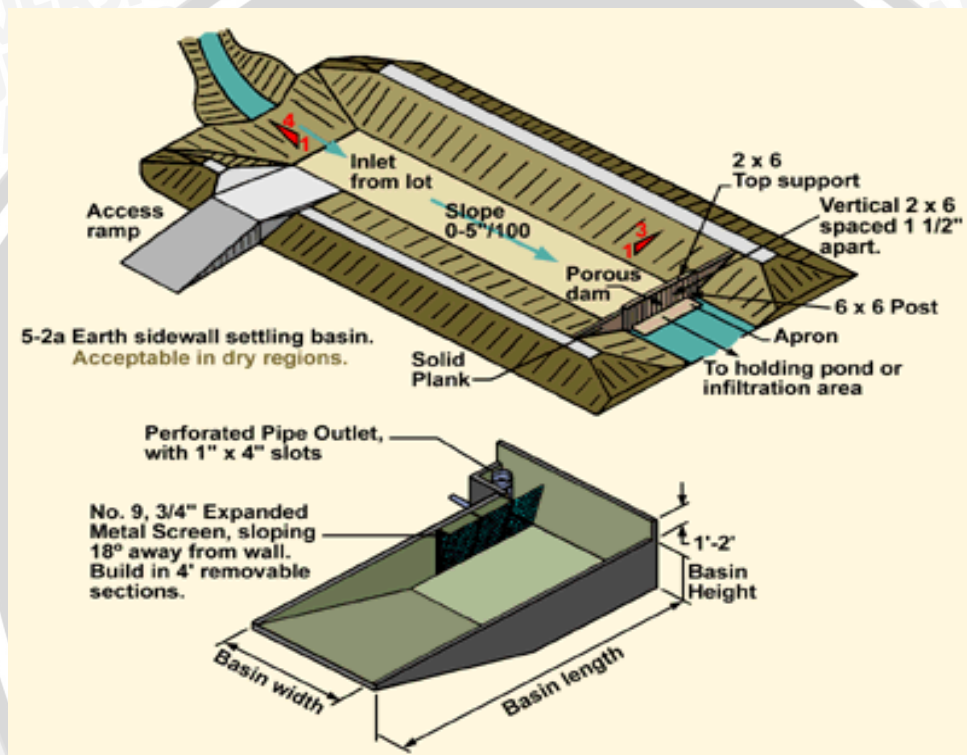
B = lebar bak (m)

h = tinggi air dalam bak (m)

L = panjang bak (m)

t = waktu untuk butir untuk tiba di dasar bak (detik)

- = kecepatan turun dari butir tertentu
- = 7 cm/detik untuk butiran dengan diameter 0,5 mm
- V = kecepatan dalam bak (m/detik), kecepatan ini tidak boleh melebihi kecepatan kritis (V_c)
- V_c = kecepatan kritis (m/detik)
- h = tinggi air dalam bak, umumnya 1,5 sampai 4 m
- d = diameter butir (mm)
- a = 44 apabila $1 \text{ mm} > d > 0,1 \text{ mm}$

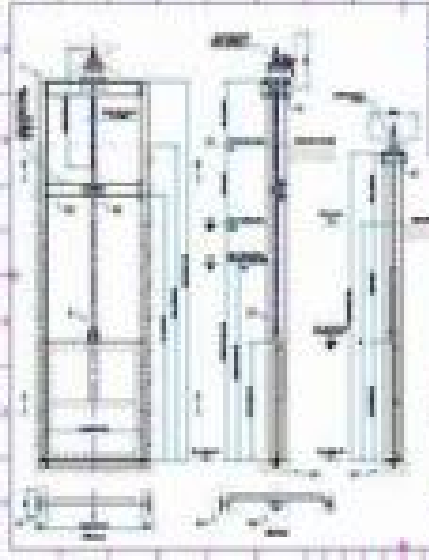


Gambar 2.12 Bak pengendap (*Sand trap*)

Sumber: Buku Baik dan Buruk dari Mini/Mikro Hidro (2009: 53)

2.4.6. Pintu pembilas (Pintu Sorong)

Pintu pembilas yang digunakan adalah jenis pintu sorong. Pintu ini digunakan dengan tinggi maksimum sampai 3 m dan lebar tidak lebih dari 3 m. Pintu tipe ini hanya digunakan untuk bukaan kecil, karena untuk bukaan yang lebih besar alat-alat angkatnya akan terlalu berat untuk menanggulangi gaya gesekan pada sponeng. Lebar pintu pembilas sebesar $1/6 - 1/10$ dari lebar bersih bendung. (KP-02, 1986: 88).



Gambar 2.13 Pintu pembilas (Pintu Sorong)

Sumber: <http://www.google.co.id/search?q=pintu+sorong&btnG=Telusuri&hl=id&biw=1280&bih=649&tbm=isch>

2.5. Perencanaan Hidromekanikal

2.5.1. Saluran *Headrace* (Saluran Pembawa)

Bangunan saluran pembawa air (*headrace channel*) adalah untuk mengalirkan air dari intake/settling basin ke bak penenang (*forebay*) dan untuk mempertahankan kestabilan debit air. (Buku 2b Buku Pedoman Studi Kelayakan Sipil Pembangunan PLTMH, 2009: 12).



Gambar 2.14 Konstruksi Saluran Pembawa (*Headrace Channel*)

Sumber: Buku 2b Pedoman Studi Kelayakan Sipil Pembangunan PLTMH (2009: 12)

Saluran air untuk sebuah pembangkit skala kecil, cenderung untuk memiliki bangunan yang terbuka. Ketika sebuah saluran terbuka dibangun pada sebuah lereng bukit maka beberapa hal penting yang perlu diperhatikan adalah:

a. Topografi Rute Saluran (Trase)

Rute saluran air yang melalui tebing yang curam perlu memperhatikan gradient kemiringan dan tingkat petensi longsornya. *Gradient* aliran yang dilewati tidak tinggi sehingga dapat mengalirkan kecepatan air melebihi kecepatan maksimal yang dapat mengakibatkan erosi pada dinding saluran.

b. Stabilitas Tanah Trase Saluran

Terdapat banyak kejadian penimbunan saluran air karena longsornya lereng bukit sehingga perlu diteliti/diperiksa kestabilan tanahnya.

c. Penggunaan Infrastruktur Eksisting

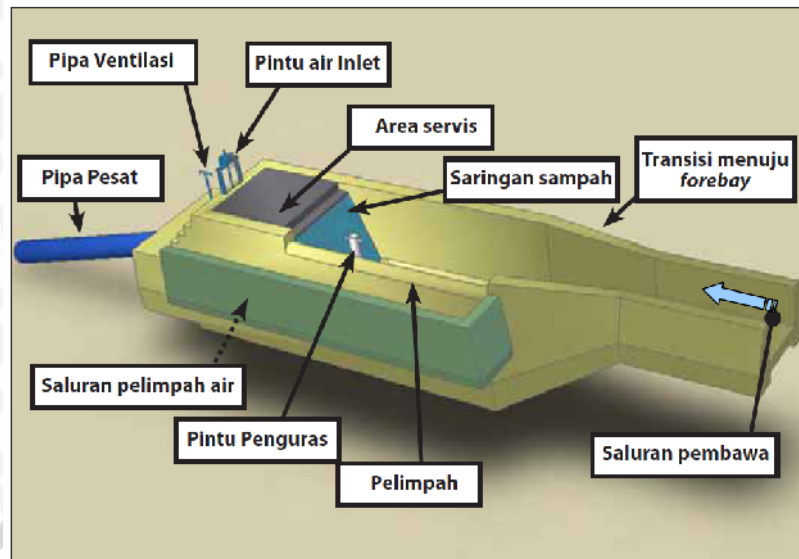
Pemilihan saluran air di sepanjang jalan yang telah tersedia dan saluran irigasi eksisting memberikan banyak keuntungan. Selain memperingan biaya, juga mempermudah pemeliharaan dan pengawasan kualitas dan penggunaan air.

d. Geometri Saluran

Bentuk saluran yang baik adalah setengah lingkaran yang akan memberikan efisiensi dalam menyalurkan debit air ke kolam penenang.

2.5.2. Bak Penenang (*Forebay*)

Forebay bekerja hampir sama dengan bak pengendap. Aliran air menjadi pelan sehingga ada pengendapan. Bagian transisi pada ujung *forebay* dan lebar *forebay* mempunyai fungsi yang sangat penting untuk memperlambat laju air. Pengendapan hanya terjadi pada aliran air yang tenang. Saringan sampah mencegah potongan kayu dan sampah masuk ke pipa pesat. *Forebay* mencegah udara masuk ke dalam pipa pesat karena pipa inlet terendam. Pelimpah mengalirkan debit air berlebih kembali ke sungai terutama saat terjadi *rapid shut down* (matinya pembangkit) karena adanya *load rejection* (penolakan beban). Pintu penguras sangat penting untuk membersihkan *forebay* dari endapan.



Gambar 2.15 Bak Penenang (*Forebay*)

Sumber: Buku Baik dan Buruk dari Mini/Mikro Hidro (2009: 71)

2.5.3. Pipa Pesat (*Penstock*)

Penstock (Pipa pesat) adalah saluran yang menyalurkan dan mengarahkan air ke cerobong turbin. Salah satu ujung pipa pesat dipasang pada bak penenang minimal 10 cm di atas lantai dasar bak penenang. Sedangkan ujung yang lain diarahkan pada cerobong turbin.

Pada bagian pipa pesat yang keluar dari bak penenang, dipasang *air vent* (pipa udara) setinggi 1 m di atas permukaan air bak penenang. Pemasangan pipa udara ini dimaksudkan untuk mencegah terjadinya *low pressure* (tekanan rendah) apabila bagian ujung pipa pesat tersumbat. *Low pressure* mengakibatkan pecahnya pipa pesat. Pipa udara juga berfungsi untuk membantu mengeluarkan udara dari dalam pipa pesat pada saat PLTM mulai dioperasikan. Diameter pipa udara biasanya $\pm \text{Ø} \frac{1}{2}$ inch.

Pipa pesat biasanya dilengkapi dengan *surge tank* (tangki peredam) yang berfungsi untuk menyerap pukulan air serta menyimpan air cadangan untuk mengatasi peningkatan beban yang tiba-tiba.

Namun untuk pipa pesat yang pendek biasanya lebih ekonomis bila pengamanan tidak disandarkan pada tangki peredam, tetapi pada dinding pipa yang lebih tebal serta pada katup yang penutupnya lebih lambat (Linsley, 1986:166).



Gambar 2.16 Pipa Pesat (*Penstock*)

Sumber: Buku 2b Pedoman Studi Kelayakan Sipil Pembangunan PLTMH (2009: 17)

2.5.3.1. Diameter Pipa Pesat

Pada umumnya diameter pipa pesat ditentukan berdasarkan perbandingan dengan biaya pipa pesat dan biaya kehilangan *head* pipa pesat. Diameter pipa pesat dapat ditentukan berdasarkan sudut rata-rata pipa pesat dan debit pembangkitan rata-rata. (*Tokyo Electric Power Services, 2003: 24*)

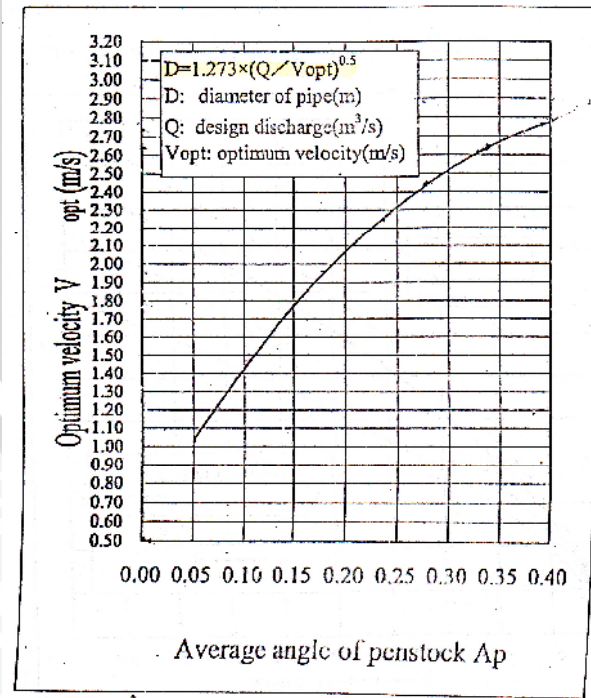
Diameter minimum pipa pesat dapat dihitung dengan persamaan :

$$D = 1,273 \times (Q/V_{opt})^{0,5} \tag{2-58}$$

dengan:

Q = debit pembangkitan rerata, m³/s

V_{opt} = kecepatan aliran air optimum, m/s



Gambar 2.17 Hubungan sudut rata-rata dan kecepatan aliran optimum

Sumber: *Tokyo Electric Power Services, (2003: 25)*



2.5.3.2. Tebal Pipa Pesat

Perhitungan tebal pipa pesat menggunakan *Barlow's Formulae* (Varshney,1971:412) sebagai berikut:

$$H = \frac{0,002 + \sigma x t}{D + 0,002 t} \quad (2-59)$$

dengan:

H = Tinggi tekan maksimum (m)
 = tekanan statis + tinggi tekan akibat pukulan air
 = tegangan baja yang digunakan (ton/m²)

D = diameter pipa pesat (m)

t = tebal pipa pesat (m)

2.5.3.3. Koefisien Kehilangan Tinggi Tekan pada Pipa Pesat

Perhitungan besarnya kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat digunakan persamaan:

$$h = k \frac{v^2}{2g} \quad (2-60)$$

Sedangkan perhitungan jumlah koefisien kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat adalah sebagai berikut.

a. Penyempitan

Koefisien kehilangan tinggi tekan pada penyempitan tergantung perbandingan diameter antra pipa yang satu dengan yang lainnya. (Linsley, 1985:311)

Tabel 2.14. Koefisien Tinggi Tekan pada Penyempitan

D2/D1	K
0	0,5
0,4	0,4
0,6	0,3
0,8	0,1
1	0

Sumber: Linsley (1985: 274)

b. Katup

Koefisien kehilangan tinggi tekan untuk katup tergantung dari besar bukaan katupnya (Dake, 1985:78).

Tabel 2.15. Koefisien Tinggi Tekan pada Katup

Jenis Katup	K
Katup Pintu Terbuka Penuh	0,19
Katup Pintu 3/4 Terbuka	1,15
Katup Pintu 1/2 Terbuka	5,6
Katup Pintu 1/4 Terbuka	24

Sumber: Dake (1985: 78)

c. Gesekan/kekasaran pipa

Koefisien kehilangan tinggi tekan karena faktor kekasaran pipa Darcy-Weisbach (Varshney, 1977:353) adalah:

$$k_s = \frac{\lambda L}{D} \tag{2-61}$$

dengan:

L = panjang pipa (m)

D = diameter pipa (m)

= faktor gesekan yang harganya terantung pada jenis aliran.

Harga untuk aliran turbulen adalah berbeda-beda menurut kekasaran pipanya.

Berdasarkan Karman-Prandtl (Weber, 1978:109) sebagai berikut:

a. Untuk pipa dengan kekasaran halus :

$$\lambda^{-\frac{1}{2}} = 2 \log \frac{R\lambda^{\frac{1}{2}}}{2,51} \tag{2-62}$$

b. Untuk pipa dengan kekasaran kasar :

$$\lambda^{-\frac{1}{2}} = 2 \log \frac{3,7 D}{k} \tag{2-63}$$

Sedangkan untuk pipa dengan kekasaran transisi, berdasarkan rumus Colebrook – White (Weber, 1978 : 109) adalah :

$$\lambda^{-\frac{1}{2}} = -2 \log \left[\frac{k}{3,7 D} + \frac{2,51}{R\lambda^{\frac{1}{2}}} \right] \tag{2-64}$$

dengan :

R = bilangan Reynold

D = diameter pipa (m)

k = koefisien kekasaran bahan pipa (m)

Harga untuk aliran laminar adalah (Weber, 1978 : 82):

$$= \frac{64}{R} \tag{2-65}$$

Bilangan Reynold untuk masing-masing tipe aliran (Weber, 1978 : 82) adalah :



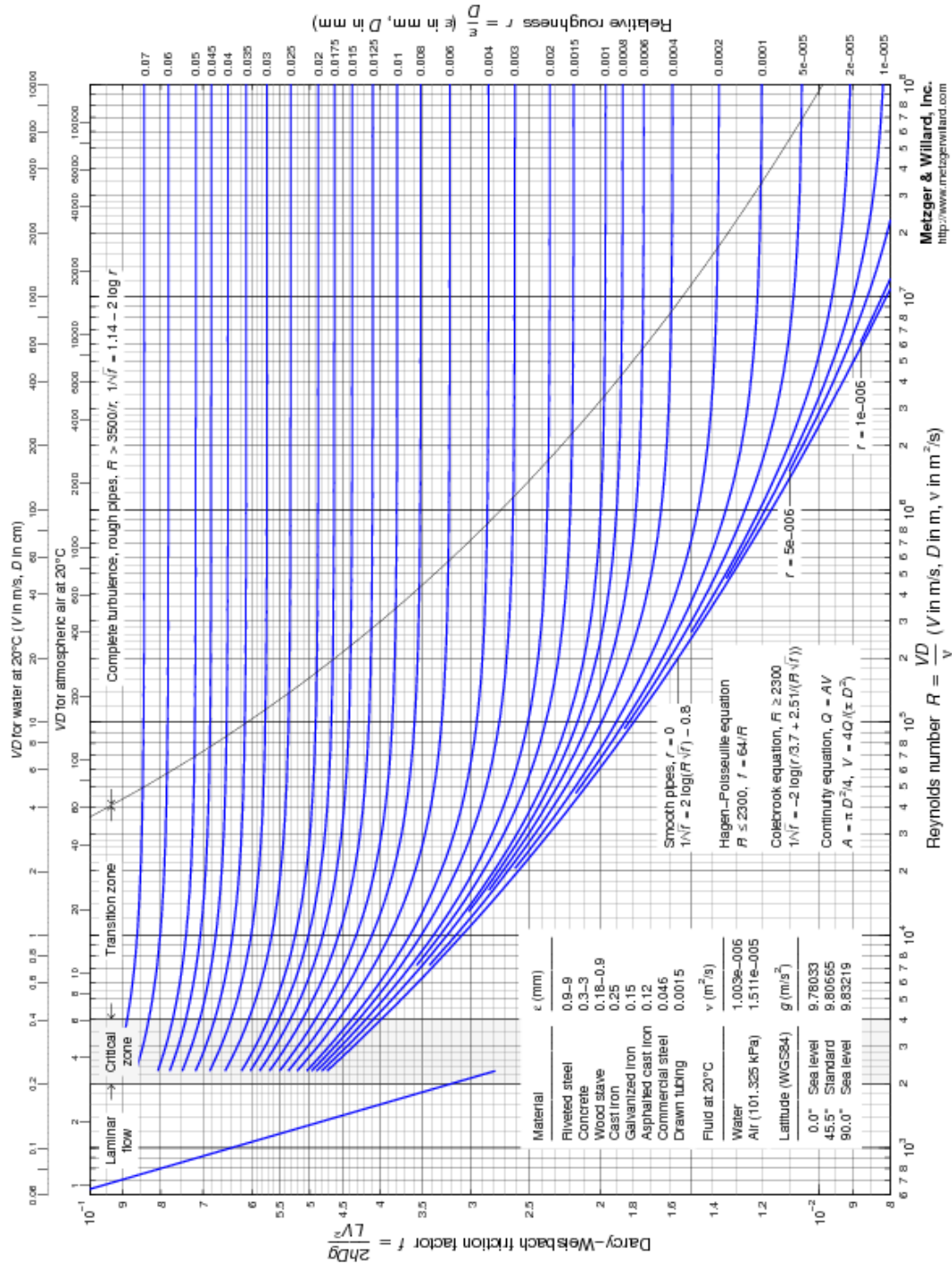
a. Aliran Laminer

$$R = \frac{DV}{\mu} < 2000 \tag{2-66}$$

b. Aliran turbulen

$$R = \frac{DV}{\mu} > 4000 \tag{2-67}$$

Selain menggunakan rumusan diatas, nilai juga dapat diperoleh dari diagram Moody.



Gambar 2.18 Diagram Moody

2.5.3.4. Water Hammer (Pukulan Air)

Pukulan air adalah berubahnya energi dinamik menjadi energi elastik karena terhentinya aliran air didalam pipa secara tiba-tiba karena adanya suatu katup sehingga serangkaian gelombang tekanan positif dan negatif akan bergerak maju mundur di dalam pipa sampai terhenti oleh gesekan.

Untuk menentukan besarnya kenaikan tekanan air akibat *water hammer* (pukulan air) digunakan persamaan (Arismunandar,1992:32) sebagai berikut :

- a. Untuk $T < \frac{2L}{a}$, menurut Joukovsky:

$$h = \frac{a}{g} \times Vm \quad (2-68)$$

- b. Untuk $T > \frac{2L}{a}$,

$$h = \frac{N \times H}{2} \pm \frac{H}{2} \sqrt{(N^2 + 4N)} \quad (2-69)$$

dengan:

T = waktu yang digunakan untuk menutup katup,

L = panjang pipa pesat

a = kecepatan rambatan tekanan, untuk air = 1440 m/det

g = percepatan gravitasi (m/det²)

h = tekanan statis (m)

$$N = \left[\frac{L \times Vm}{g \times T \times H} \right]^2 \quad (2-70)$$

Vm = kecepatan aliran rerata (m/det)

Apabila garis tengah pipa pesat berbeda, maka:

$$Vm = \frac{Q}{L} \sum \frac{Ln}{An} \quad (2-71)$$

dengan :

Q = debit pembangkitan maksimum (m³/det)

An = luas penampang dari setiap bagian pipa (m²)

Ln = panjang setiap bagian pipa dengan garis tengah tertentu (m)

2.5.4. Tinggi Jatuh Efektif (H_{eff})

Tinggi jatuh efektif adalah selisih antara elevasi muka air kolam (*forebay*) dengan tail water level (TWL) dikurangi dengan total kehilangan tinggi tekan (Varshney, 1977:562).Persamaan tinggi jatuh efektif adalah:

$$H_{eff} = EFB - TWL - hl \quad (2-72)$$

dengan:

- H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)
 EFB = elevasi muka air *forebay* (m)
 TWL = tail water level (m)
 hl = total kehilangan tingi tekan (m)

2.5.5. Turbin

Menurut M.M. Dandekar (1991:391) turbin-turbin hidrolik, 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.

2.5.5.1. 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 (Fritz, 1993: 6).

Tabel 2.16. Pengelompokan Turbin

Jenis	High Head	Medium Head	Low Head
Turbin Impuls	Pelton Turgo	Cross Flow/Banki Multi-Jet Pelton Turgo	Cross Flow/Banki
Turbin Reaksi		Francis	Propeller Kaplan

Sumber: Fritz (1993: 14)

Perbedaan pokok kedua golongan turbin tersebut adalah (Fritz, 1993: 14):

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:

- a. Berdasarkan Tinggi Tekan

Tabel 2.17. Jenis Turbin Berdasar Tinggi Tekan

Jenis Turbin	Karakteristik	Tinggi Tekan (m)
Baling/Kaplan/Banki	Rendah	2-15
Kaplan dan Francis	Sedang	16-70
Francis atau Pelton	Tinggi	71-500
Pelton	Sangat Tinggi	>500

Sumber: Danddenkar dan Sharma (1991: 394)

b. Berdasarkan Arah Aliran

Tabel 2.18. Jenis Turbin Berdasar Arah Aliran

Jenis Turbin	Arah Aliran
Francis	Radial atau Gabungan
Pelton	Tangensial
Baling-baling/Kaplan	Aksial
Deriaz	Diagonal

Sumber: Danddenkar dan Sharma, 1991: 396

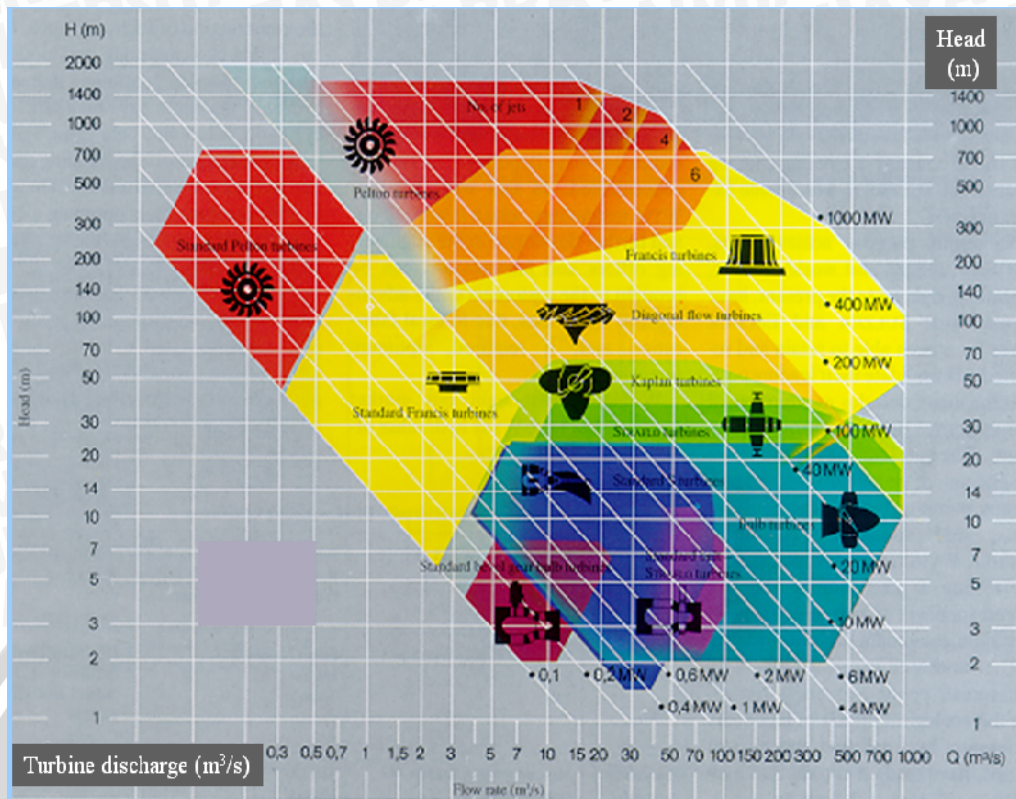
c. Berdasarkan Kecepatan Tertentu

Tabel 2.19. Jenis Turbin Berdasar Kecepatan Tertentu

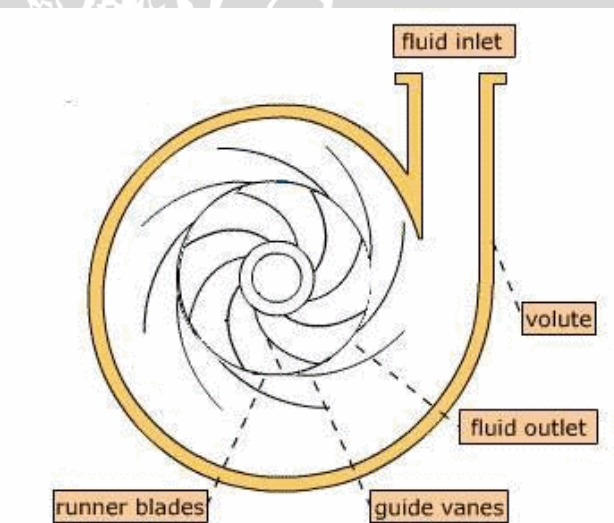
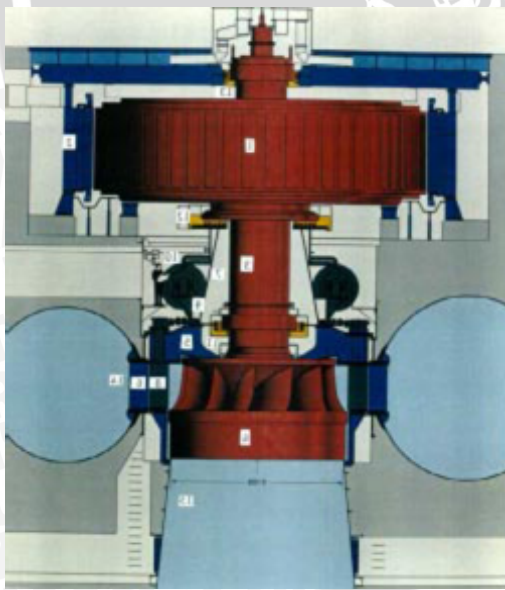
Jenis Turbin	Kecepatan Khusus (Putaran dalam Semenit, rpm)		
	Lambat	Sedang	Cepat
Pelton	4-15	16-30	31-70
Banki	20-480		
Francis	60-150	151-250	251-400
Kaplan	300-450	451-700	701-1100

Sumber: Danddenkar dan Sharma, 1991: 398

Selain berdasarkan klasifikasi tersebut, pemilihan jenis turbin juga bisa ditentukan berdasarkan Gambar 2.19

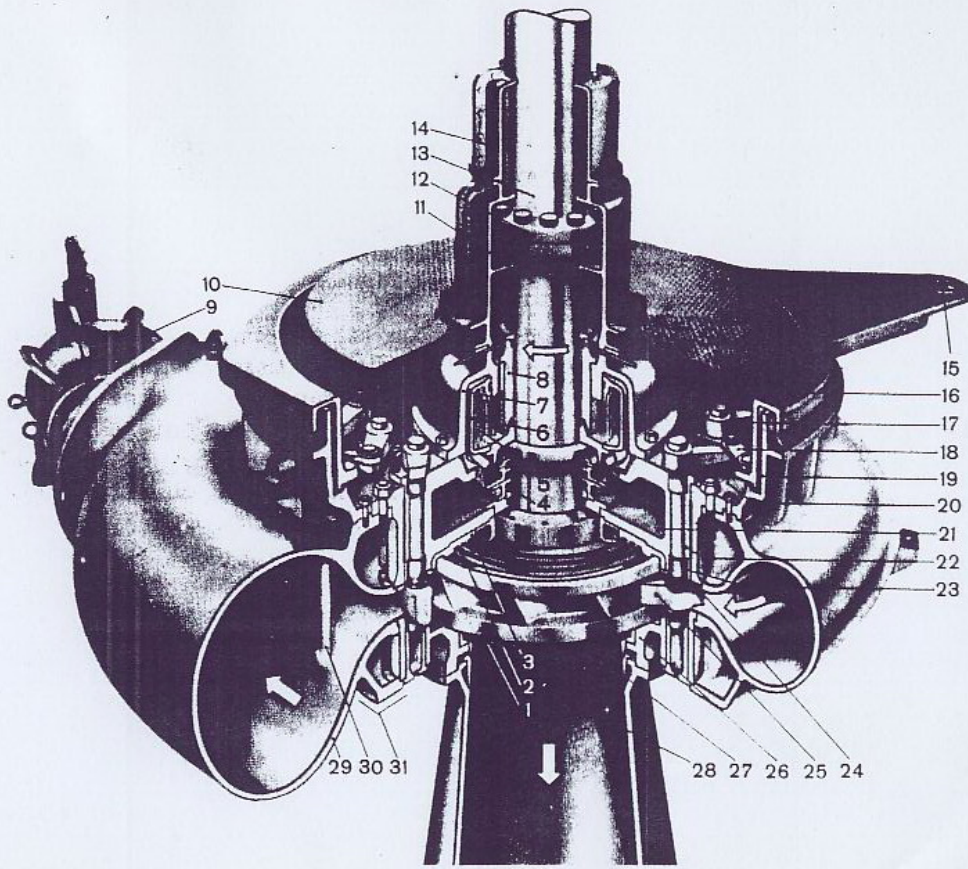


Gambar 2.19 Grafik Pemilihan Jenis Turbin
 Sumber: <http://agungchynta.files.wordpress.com/2007/03/turbin-air.ppt>.



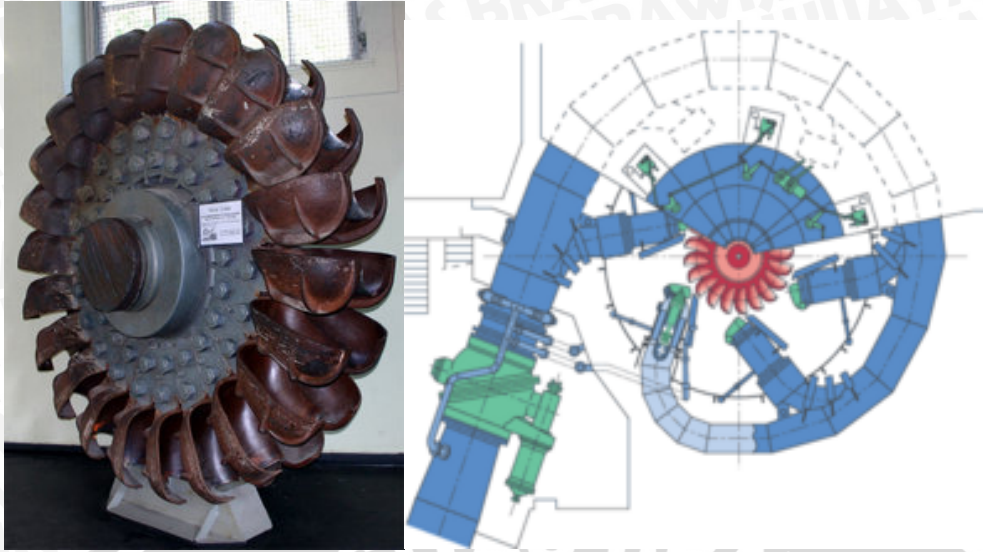
Gambar 2.20 Turbin Francis
 Sumber: <http://www.google.co.id/search?q=turbin+francis&btnG=Telusuri&hl=id&biw=1280&bih=649&tbm=isch>





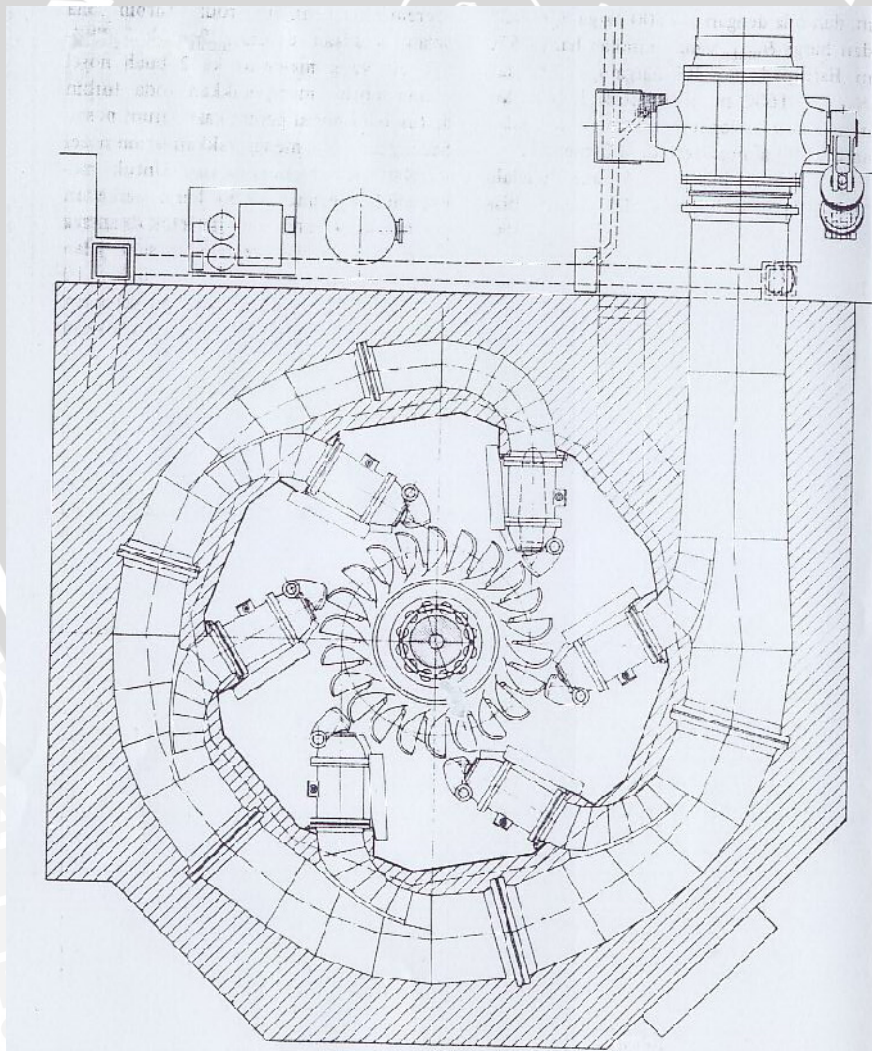
- | | |
|----------------------------------|---|
| 1 Roda jalan | 17 Tuas |
| 2 Cincin labirin | 18 Batang penggerak |
| 3 Cincin labirin kontra | 19 Cincin hantaran |
| 4 Cincin jat arang | 20 Roda penghantar |
| 5 Pipa kurus | 21 Tutup turbin |
| 6 Pengumpul minyak yang berputar | 22 Tabung blok bantalan atas |
| 7 Blok bantalan | 23 Cincin penutup roda bantalan tengah |
| 8 Bantalan penghantar | 24 Cincin penutup roda pengarah |
| 9 Saluran aliran kompensator | 25 Daun sudu pengarah |
| 10 Bordes pelayanan | 26 Tutup turbin bawah atau cincin roda pengarah |
| 11 Poros turbin | 27 Saluran udara pipa isap |
| 12 Kopling | 28 Pipa isap |
| 13 Poros hantar | 29 Rumah keong |
| 14 Tabung penutup poros | 30 Sudu penyangga |
| 15 Titik tangkap servomotor | 31 Cincin sudu penyangga |

Gambar 2.21 Irisan Perspektif Suatu Turbin Francis
 Sumber: Fritz (1993: 45)



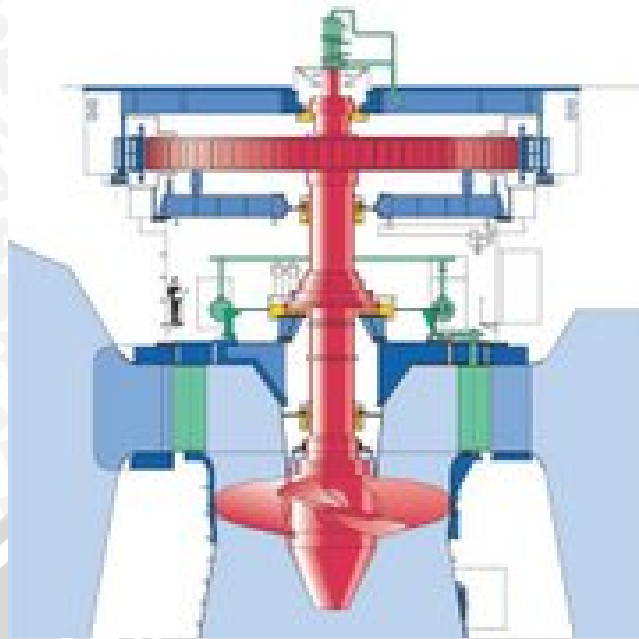
Gambar 2.22 Turbin Pelton

Sumber: <http://www.google.co.id/search?q=turbin+pelton&btnG=Telusuri&hl=id&biw=1280&bih=649&tbm=isch>



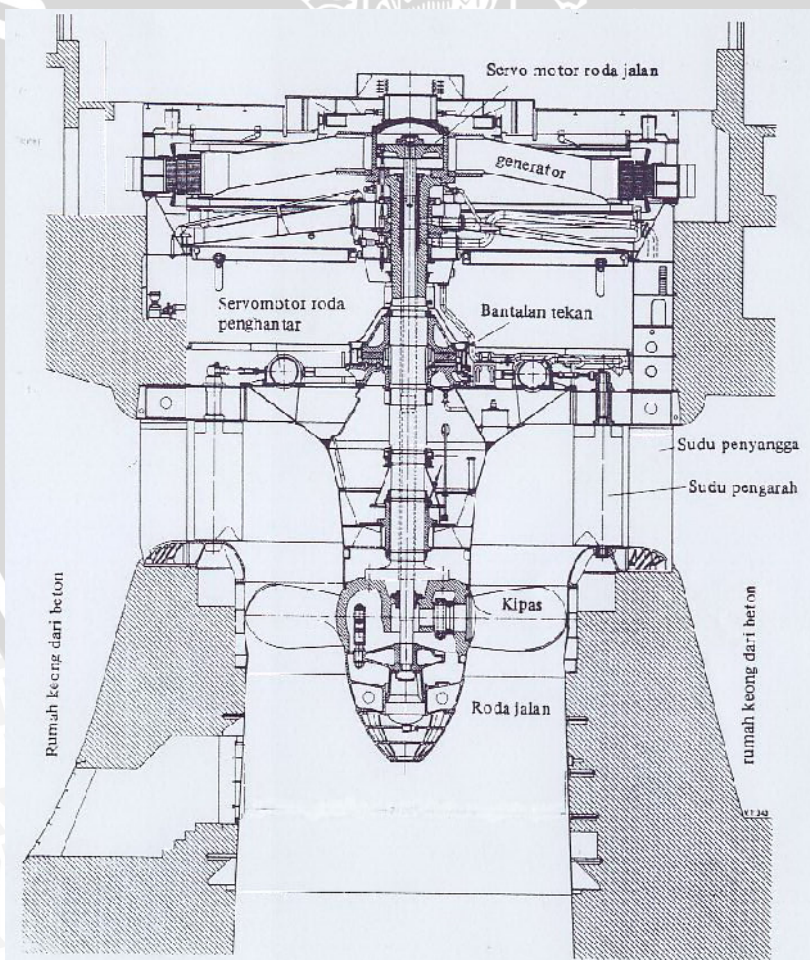
Gambar 2.23 Turbin Pelton Poros Vertikal dengan 6 Buah Nosel

Sumber: Fritz (1993: 32)



Gambar 2.24 Turbin Kaplan

Sumber: <http://www.google.co.id/search?q=turbin+kaplan&btnG=Telusuri&hl=id&biw=1280&bih=649&tbm=isch>



Gambar 2.25 Turbin Kaplan dengan 4 Buah Kipas

Sumber: Fritz (1993: 57)

2.5.5.2. Karakteristik Turbin

1. Kecepatan Spesifik (Ns)

Kecepatan Spesifik adalah besarnya putaran turbin yang geometris serupa sehingga pada $H = 1$ menghasilkan daya 1 kW (Patty, 1995:94).

Kecepatan spesifik turbin diberikan oleh perusahaan (dengan penilaian yang lainnya) dan selalu dapat diartikan sebagai titik efisiensi maksimum. Perhitungan tepat ini menghasilkan performa turbin dalam jangkauan *head* dan debit tertentu.

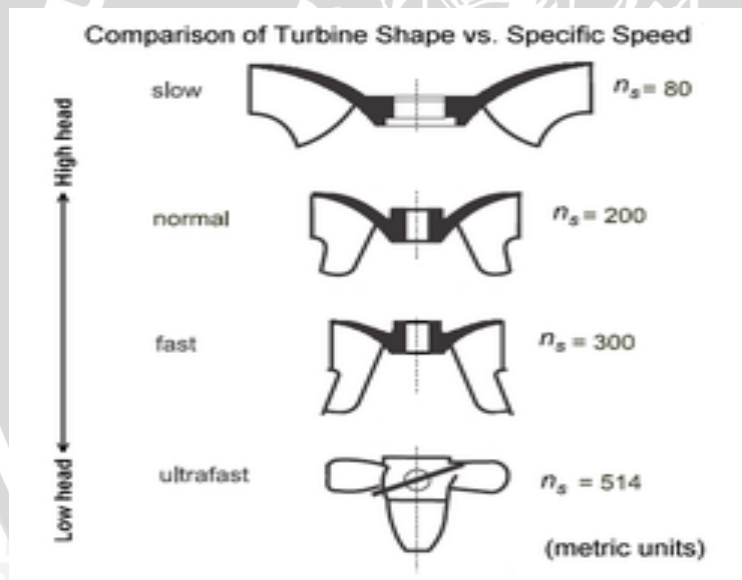
Formula untuk menghitung besarnya kecepatan spesifik adalah (Varshney, 1977: 614).

$$N_s = \frac{3470}{Hd^{0,625}} \quad (2-73)$$

dengan:

N_s = kecepatan spesifik

Hd = Tinggi jatuh efektif (m)



Gambar 2.26 Perbandingan bentuk sudu turbin berdasarkan kecepatan spesifik
Sumber: Waluyo (2011: 56)

2. Efisiensi

Efisiensi turbin adalah perbandingan antara energi yang keluar dari turbin dan energi yang masuk turbin (Patty, 1995:92).

Turbin air modern dioperasikan pada efisiensi mekanis lebih dari 90% (tidak terpengaruh efisiensi termodinamika).

3. Kecepatan Liar

Kecepatan liar turbin air adalah kecepatan saat debit maksimum dengan tanpa beban poros. Turbin didesain untuk bertahan dari gaya mekanis dengan kecepatan ini.

2.5.5.3. Dimensi Turbin

Dimensi turbin meliputi diameter runner bagian luar dan dalam dan jarak antar sudu turbin. Perhitungan dimensi runner turbin digunakan persamaan sebagai berikut.

a. Diameter Runner Bagian Luar

$$D = 60 \times \frac{v}{\pi N} \quad (2-74)$$

$$v = K_u \times \sqrt{2gH} \quad (2-75)$$

K_u = perbandingan kecepatan antara kecepatan tangensial dan kecepatan aliran
= 0,46 (Dandekar dan Sharma, 1991:406)

Dari Persamaan (2-75) dan (2-76) diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} D &= 60 \times \frac{K_u \times \sqrt{2gH}}{\pi N} \\ &= 60 \times \frac{0,46 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times H}}{3,14 \times N} \\ D &= 38,93 \times \frac{\sqrt{H}}{N} \end{aligned} \quad (2-76)$$

dengan:

- D = diameter runner (m)
- H = tinggi jatuh efektif (m)
- N = kecepatan putaran turbin (rpm)

b. Diameter Runner Bagian Dalam

$$D_2 = \frac{D_1 [2 \sin (1 - \sin c)]^{0.5}}{\cos} \quad (2-77)$$

dengan:

- D_1 = diameter runner bagian luar (m)
- D_2 = diameter runner bagian dalam (m)
- c = konstanta (0,95)
- g = percepatan gravitasi (9,8 m/detik²)
- H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)
- n = kecepatan putar runner direncanakan 380 rpm
- = sudut serang masuknya air pada sudu-sudu turbin dalam derajat, nilai yang paling menguntungkan 15° - 16°

c. Lebar dan Tinggi Nozzle

Lebar runner adalah sama dengan lebar nozzle, dan dengan mengabaikan kebocoranyang terjadi karena adanya gab antara runner dan nozzle maka lebar runner dan nozzle dinyatakan:

$$s = \frac{\theta}{360} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \sin \alpha \quad (2-78)$$

$$W = \frac{Q}{s \cdot c \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{eff}}} \quad (2-79)$$

dengan :

W = lebar runner/nozzle (m)

c = konstanta (0,95)

s = tinggi lorong nozzle (m)

= sudut sembur 90°

d. Jari-jari kelengkungan Sudu

$$= 0,326 \cdot r_1 \quad (2-80)$$

dengan :

= jari-jari kelengkungan sudu (m)

r_1 = jari-jari runner bagian luar (m)

e. Jarak antar sudu

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z} \quad (2-81)$$

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z} \quad (2-82)$$

dengan:

t_1 = Jarak antar sudu bagian luar (m)

t_2 = Jarak antar sudu bagian dalam (m)

Z = jumlah sudu (buah)

2.5.5.4. Kavitasasi

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 mengontrol kavitasasi pada turbin, digunakan rumus Thoma (Patty, 1995:100):

$$= \frac{H_a - H_w - H_s}{H} \quad (2-83)$$

dengan:

h_v : kavitasi

H_a : tekanan atmosfer (m)

Tabel 2.20 Hubungan Antara Elevasi dan Tekanan Atmosfir

Tinggi m	Tekanan atmosfer (m kolom air)	Tinggi m	Tekanan atmosfer (m kolom air)
0	10.01	600	9.30
100	9.89	700	9.18
200	9.78	800	9.07
300	9.63	900	8.96
400	9.53	1000	8.85
500	9.40		

Sumber: Arismunandar dalam Juwono,1992:58

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

Tabel 2.21 Hubungan Antara Suhu Air dan Tekanan Uap

No	Suhu (°C)	Tekanan Uap (m kolom air)
1	0	0.06
2	10	0.12
3	20	0.24
4	30	0.44
5	40	0.76
6	50	1.26
7	60	2.03
8	70	3.2
9	80	4.86
10	90	7.18
11	100	10.33

Sumber: Patty,1995:101

H_s : tinggi hisap atau *draft head* (m)

H : rerata tinggi jatuh air efektif (m)

Kavitasi akan terjadi pada $\sigma = \sigma_{crit}$. Besar σ_{crit} dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Dandekar dan Sharma,1991:440)

$$\sigma_{crit} = 1,1 \left[0,28 + \frac{1}{660} + \left(\frac{N_s}{100} \right)^3 \right] \quad (2-84)$$

dengan:

N_s : kecepatan spesifik

2.5.6. Generator

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

Berdasarkan sistem pembangkitannya generator AC dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Generator 1 Phasa

Generator yang dalam sistem melilitnya hanya terdiri dari satu kumpulan kumparan yang hanya dilukiskan dengan satu garis dan dalam hal ini tidak diperhatikan banyaknya lilitan. Ujung kumparan atau phasa yang satu dijelaskan dengan huruf besar X dan ujung yang satu lagi dengan huruf U.

2. Generator 3 Phasa

Generator yang dimana dalam sistem melilitnya terdiri dari tiga kumpulan kumparan yang mana kumparan tersebut masing-masing dinamakan lilitan phasa. Jadi pada statornya ada lilitan phasa yang ke satu ujungnya diberi tanda U-X, lilitan phasa yang kedua ujungnya diberi tanda dengan huruf V-Y dan akhirnya ujung lilitan phasa yang ketiga diberi tanda dengan huruf W-Z.

Generator yang dipakai pada PLTM pada umumnya adalah 3 fasa dengan frekuensi 50 Hz. Pemilihan putaran generator digunakan rumus sebagai berikut: (*Tokyo Electric Power Services*, 2003: 12)

$$n = \frac{120xf}{p} \quad (2-85)$$

dengan:

n = banyaknya putaran setiap menit (rpm)

f = frekuensi (50 Hz)

p = pasang kutub

Menurut Linsley, daya generator arus bolak-balik diukur dalam kilovolt ampere (kVA) untuk suatu kenaikan suhu tertentu, dimana dengan kenaikan suhu tersebut masih aman terhadap bahan-bahan isolasi. Daya semu dari suatu generator berbeda dari daya nyatanya menurut persamaan sebagai berikut:

$$\text{Daya nyata (kW)} = \text{daya semu (kVA)} \times \text{faktor daya} \quad (2-86)$$

Dengan faktor daya tidak mungkin lebih besar dari satu. Nilai faktor daya tergantung pada sambungan antara induktansi dan tahanan beban. Suatu beban dengan induktansi yang sangat kecil akan mempunyai faktor daya mendekati satu. Beban jaringan yang umum mempunyai faktor daya antara 0,80 sampai 0,90 (Linsley, 1986:170).



Gambar 2.27 Generator

Sumber: <http://www.google.co.id/search?q=generator&btnG=Telusuri&hl=id&biw=1280&bih=649&tbn=isch>

2.5.7. Draft-Tube (Pipa Pelepas Air)

Pipa pelepas adalah pipa yang meneruskan air dari turbin ke saluran pembuangan (Patty, 1995:97).

Pipa ini mempunyai 2 tujuan (Patty, 1995:99) yaitu:

- 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.

Tujuan ini tercapai dengan memberi suatu bentuk pada pipa pelepas air yang penampangnya makin besar.

2.5.8. Saluran bawah (*Tailrace*)

Tailrace adalah bagian dari sistem hidrolis PLTM dan berfungsi sama seperti saluran pembawa. *Tailrace* tidak boleh mampat dan penuh dengan tumbuhan dan sampah. Biasanya *tailrace* dibuat pendek namun ada juga PLTM dengan *tailrace* panjang sampai dengan ratusan meter bahkan kilometer. Semua tergantung dari situasi setempat dan topografi.



Gambar 2.28 Saluran Bawah (*Tailrace*)

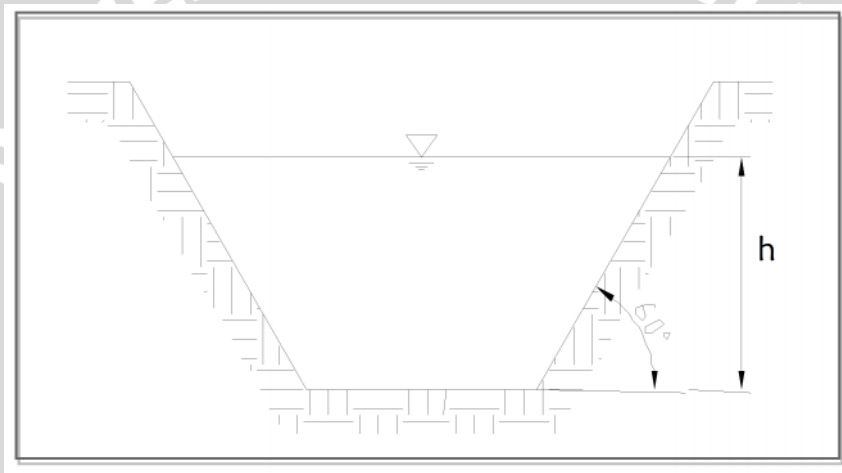
Sumber: Buku Baik dan Buruk dari Mini/Mikro Hidro (2009: 97)

2.5.9. Tail Water Level (TWL)

Tail Water Level (TWL) adalah elevasi muka air bawah. Tinggi TWL tergantung dari debit air yang keluar dari turbin, jenis penampang serta dimensi penampang saluran pembuang.

Jenis penampang saluran ada tiga yaitu (Dermawan, dalam diktat kuliah hidrolika saluran terbuka): saluran segi empat, trapesium dan segitiga. Namun menurut Patty dalam Tenaga Air (1995:47) penampang saluran yang paling baik adalah penampang trapesium dengan jari-jari hidrolik, $R = \frac{1}{2}h$ dan kemiringan dinding saluran (m) dapat diambil sebesar:

- saluran tanah; 1:1,5 hingga 1:2
- saluran pasangan batu/beton; 1:1 hingga 1:2



Gambar 2.29 Penampang Saluran yang Paling Baik
Sumber : Patty (1995:47)

Debit air yang keluar dari turbin yang berfluktuasi mengakibatkan perubahan tinggi air dalam saluran. Perubahan tinggi air tersebut dihitung dengan menggunakan rumus Manning-Strickler (Patty, 1995:46)

$$Q = v \times A \quad (2-87)$$

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2-88)$$

dengan:

Q = debit air yang keluar dari turbin (m^3/dtk)

v = kecepatan air (m/dtk)

R = Jari-jari hidrolik (m)

$$= \frac{P}{A} \quad (2-89)$$

P = Keliling basah saluran (m)

A = Luas penampang saluran (m^2)

Tabel 2.22. Keliling Basah dan Luas Penampang Saluran

Saluran	Keliling Basah Saluran	Luas Penampang Saluran
Saluran segi empat	$b + 2h$	Bh
Saluran trapesium	$b + 2h\sqrt{1 + m^2}$	$(b + 2h)h$
Saluran segi tiga	$2h\sqrt{1 + m^2}$	mh^2

Sumber: Diktat Kuliah Hidrolika Saluran Terbuka

Dengan:

b = lebar saluran

m = kemiringan dinding saluran,

h = tinggi saluran

S = kemiringan saluran atau slope

n = koefisien manning

Tabel 2.23. Koefisien Manning

No.	Bahan Saluran	n
1	Plastik, kaca, karet halus	0,009
2	Semen halus, logam halus	0,010
3	Kayu halus, pipa asbes	0,011
4	Besi tempa, baja las, kanvas	0,012
5	Beton biasa, besi tuang beraspal	0,013
6	Kayu kasar, lempung halus	0,014
7	Pipa besi tuang	0,015
8	Baja dikeling, batu bata	0,016
9	Pasangan batu	0,017
10	Tanah halus	0,018
11	Pipa logam bergelombang	0,022
12	Kerikil padat	0,023
13	Alur alamiah dalam keadaan baik	0,025
14	Alur alamiah berbatu dan bergulma	0,035
15	Alur alamiah yang sangat halus	0,060

Sumber: Linsley (1985: 279)

2.6. Daya

Daya merupakan energi tiap satuan waktu, besarnya daya yang dihasilkan dihitung dengan persamaan (Patty,1995:14) sebagai berikut:

$$P = 9,8 \times H_{\text{eff}} \times Q \times \eta \quad (2-90)$$

dengan:

P = Daya (kW)

H_{eff} = Tinggi jatuh efektif (m)

Q = Debit outflow (m³/dtk), debit outflow yang digunakan yaitu debit andalan 90%
= Efisiensi turbin

2.7. Energi

Tenaga yang dihasilkan dari debit pembangkitan maksimum (debit puncak = *plant peak discharge*) disebut kapasitas terpasang atau *installed Capacity*. Penentuan debit pembangkitan untuk kapasitas terpasang menggunakan debit dengan keandalan 90%. Tenaga yang dihasilkan berupa produksi energi tahunan.

Produksi energi tahunan dihitung berdasarkan tenaga andalan. Tenaga andalan dihitung berdasarkan debit andalan yang tersedia untuk PLTM yang berupa debit outflow dengan periode n harian.

$$\begin{aligned} E &= 9,8 \times H \times Q \times \eta \times 24 \times n \\ &= P \times 24 \times n \end{aligned} \quad (2-91)$$

dengan:

E = Energi tiap satu periode (kWH)

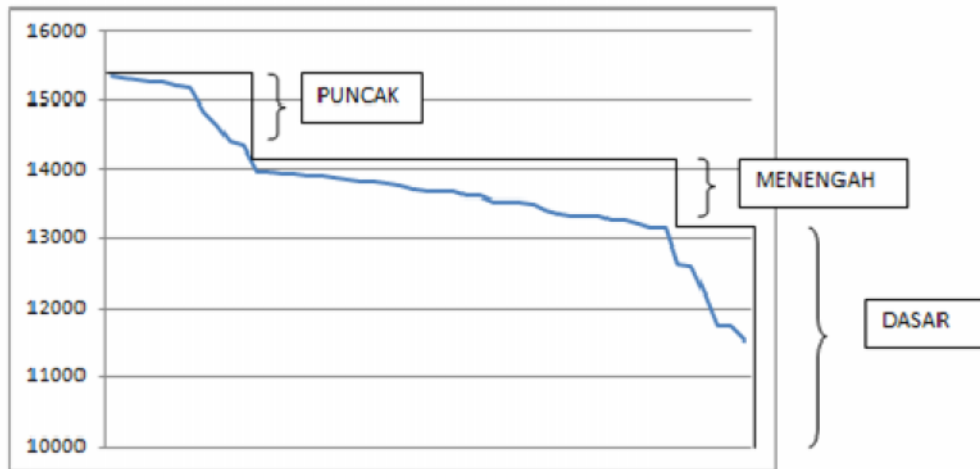
H = Tinggi jatuh efektif (m)

Q = Debit outflow (m³/dtk), debit outflow yang digunakan yaitu debit andalan 90%
= efisiensi turbin

n = jumlah hari dalam satu periode

2.8. Kurva Beban

Kurva beban secara sederhana dapat diartikan sebagai kurva yang menggambarkan penggunaan beban (listrik) dalam satuan waktu. Dikatakan dalam suatu waktu karena selangnya itu dapat berupa tahunan, mingguan, bahkan harian. Namun, penggunaan yang paling umum adalah kurva beban harian.



Gambar 2.30 Jenis-jenis beban

Sumber:<http://watergius.wordpress.com/2011/03/02/kurva-beban-dan-alasan-memiliki-beragam-pembangkit/>

Secara sederhana, kurva beban yang ada dapat dibagi menjadi tiga bagian: beban puncak, beban menengah, dan beban dasar. Pengelompokan beban inilah yang menyebabkan perlunya diatur jenis-jenis pembangkit yang perlu dinyalakan. Untuk beban dasar (*base load*) pembangkit yang digunakan adalah pembangkit dengan sistem *run off river* dan standby operasinya lama (waktu penyalaan pembangkit sampai dapat memproduksi listrik). Karenanya, pembangkit yang digunakan untuk jenis beban ini adalah PLTM. Untuk beban puncak pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang standby operasinya cepat. Maksudnya, saat dibutuhkan tambahan pasokan daya, pembangkit dapat langsung menyuplai tambahan daya tersebut. Jenis pembangkit yang sesuai untuk beban ini misalnya PLTA.

2.9. Kebutuhan Listrik Masyarakat

Kebutuhan listrik masyarakat, khususnya pada program pelistrikan desa sangat dibatasi. Hal ini didasarkan ketersediaan potensi sumber daya air, kemampuan memelihara dan membiayai penggunaan listrik, serta besaran biaya pembangunan.

Daya yang dapat digunakan untuk setiap sambungan instalasi rumah rata-rata sebesar 110 W. Penggunaan listrik masyarakat perdesaan dengan PLTM ini, khusus untuk penerangan digunakan pada malam hari dengan pertimbangan pada siang hari sebagian besar masyarakat bekerja. (sumber: <http://www.alpensteel.com>).

2.10. Analisa Kelayakan Ekonomi

Analisa ekonomi dilakukan untuk mengetahui kelayakan suatu proyek dari segi ekonomi. Dalam melakukan analisa ekonomi dibutuhkan dua komponen utama yaitu: *cost* (komponen biaya) dan *benefit* (komponen manfaat).

2.10.1. Benefit (Komponen Manfaat)

Manfaat Pusat Listrik Tenaga Minihidro didasarkan pada tenaga listrik yang dihasilkan tiap tahun dan tarif dasar listrik yang berlaku.

2.10.2. Cost (Komponen Biaya)

Pada pelaksanaan pembangunan, mulai dari ide, studi kelayakan, perencanaan, pelaksanaan, sampai pada operasi dan pemeliharaan membutuhkan bermacam-macam biaya. Pada analisis kelayakan ekonomi biaya-biaya tersebut dikelompokkan menjadi dua yaitu biaya modal dan biaya tahunan (Kodoatie,1995:71).

A. Biaya Modal

Biaya modal (*Capital Cost*) adalah jumlah semua pengeluaran yang dibutuhkan mulai dan pra studi sampai proyek selesai dibangun. Semua pengeluaran yang termasuk biaya modal dibagi menjadi dua bagian yaitu biaya langsung dan biaya tak langsung

- **Biaya Langsung**

Biaya ini merupakan biaya yang diperlukan untuk pelaksanaan pembangunan atau biaya konstruksi. Biaya konstruksi PLTM sebagai fungsi cost yang diperhitungkan adalah:

- a. *Penstock* (Pipa Pesat)
- b. *Power House* (Rumah Pembangkit)
- c. *Power Equipment* (Instalasi Pembangkit)

Rumus-rumus yang digunakan untuk perhitungan biaya konstruksi tersebut adalah (anonim dalam Tunggulgeni, 1988:98).

1. Pipa Pesat

$$\text{CPS} = 800 \times \text{DP}^{1,66} \times \text{LPT} \times \text{N} \quad (2-92)$$

dengan:

CPS : Penstock Cost (US\$)

DP : Diameter Penstock (m)

LPT : Panjang Penstock (m)

2. Rumah Pembangkit

$$\text{CHP} = \text{CHP1} + \text{CHP2} \quad (2-93)$$

$$\text{CHP1} = 3,9 \times 10^3 \times (\text{P}/\text{H}_{\text{ef}}^{1/2})^{0,71} \quad (2-94)$$

$$\text{CHP2} = 6,0 \times 10^3 \times (\text{Qp} \times \text{H}_{\text{ef}}^{2/3} \times \text{N}^{1/2})^{0,85} \quad (2-95)$$

dengan:

CHP : power house cost (US\$)

CHP1: biaya untuk gedung power house (US\$)

CHP2: biaya untuk pondasi power house (US\$)

P : installed capacity (kW)

Hef : tinggi jatuh efektif (m)

Qp : debit pembangkit maksimum (m³/det)

N : jumlah unit pembangkit

3. Instalasi Pembangkit

$$CPE = 5,9 \times 10^3 \times (P/H_{ef}^{1/2})^{0,90} \quad (2-96)$$

dengan:

CPE : power equipment cost (US\$)

• **Biaya Tak Langsung**

Biaya ini dibagi menjadi tiga komponen, yaitu:

1. Kemungkinan/hal yang tidak diduga (*contingencies*) dari biaya langsung.

Kemungkinan/hal yang tidak pasti ini bila dikelompokkan dapat dibagi menjadi tiga, yaitu :

- Biaya/pengeluaran yang mungkin timbul, tetapi tidak pasti.
- Biaya yang mungkin timbul, namun belum terlihat.
- Biaya yang mungkin timbul, akibat tidak tetapnya pada waktu yang akan datang (misal adanya kenaikan harga) atau disebut eskalasi. Biasanya biaya untuk ini merupakan suatu angka prosentase dari biaya langsung, misalnya 5%, 10%, 15%. Hal ini sangat tergantung pada pihak pemilik dan perencana. Semakin berpengalaman pemilik atau perencana, besarnya prosentase ini lebih kecil.

2. Biaya teknik/*engineering cost* adalah biaya untuk pembuatan desain mulai dari studi awal (*preliminary study*), pra studi kelayakan, studi kelayakan, biaya perencanaan, biaya pengawasan selama waktu pelaksanaan konstruksi.

3. Bunga (*interest*), periode waktu dari ide sampai pelaksanaan fisik, bunga berpengaruh terhadap biaya langsung, biaya kemungkinan dan biaya teknik.

B. Biaya Tahunan

Biaya tahunan adalah biaya yang masih diperlukan sepanjang umur proyek.

Biaya tahunan (A) terdiri dari tiga komponen, yaitu:

- a. Bunga, biaya ini merupakan penyebab terjadinya perubahan biaya modal karena adanya tingkat suku bunga selama umur proyek. Besarnya bisa berbeda dengan bunga selama waktu dari ide sampai pelaksanaan sifat fisik selesai. Bunga merupakan komponen terbesar yang diperhitungkan terhadap biaya modal.
- b. Depresiasi atau amortisasi, dua istilah ini hampir sama tetapi berbeda fungsi. Depresiasi adalah turunnya/penyusutan suatu harga/nilai dari sebuah benda karena pemakaian dan kerusakan atau keusangan benda itu. Amortisasi adalah pembayaran dalam suatu periode tertentu (tahunan misalnya) sehingga hutang yang ada akan terbayar lunas pada akhir periode tersebut.
- c. Biaya operasi dan pemeliharaan, untuk dapat memenuhi umur proyek sesuai dengan yang direncanakan pada detail desain, maka diperlukan biaya untuk operasi dan pemeliharaan proyek tersebut yang harus dikeluarkan setiap tahunnya. Besarnya biaya O&P diperkirakan dari prosentase biaya modal. Pada proyek kecil biaya O&P sebesar 3% dari biaya modal (*Renewable Energy Technologies* 2012: 24).

2.10.3. Indikator Kelayakan Ekonomi

Suatu proyek dikatakan layak secara ekonomi apabila memenuhi indikator-indikator kelayakan ekonomi. Menurut Suyanto (2001:39), indikator yang sering dipakai dalam analisa ekonomi, yaitu:

- Perbandingan manfaat dan biaya (*BCR*)
- Selisih manfaat dan biaya (*Net Present Value*)
- Tingkat pengembalian internal (*Internal Rate of Return*)

2.10.3.1. BCR (*Benefit Cost Ratio*)

Benefit Cost Ratio (BCR) adalah perbandingan antara nilai sekarang (*present value*) dari manfaat (*benefit*) dengan nilai sekarang (*present value*) dari biaya (*cost*).

Secara umum rumus untuk perhitungan BCR ini adalah (Suyanto, 2001:39):

$$BCR = \frac{PV \text{ dari manfaat}}{PV \text{ dari biaya}} \quad (2-97)$$

dengan :

PV = *Present value*

BCR = *Benefit Cost Ratio*

Sebagai ukuran dari penilaian suatu kelayakan proyek dengan metode BCR ini adalah jika $BCR > 1$ maka proyek dikatakan layak dikerjakan dan sebaliknya jika nilai $BCR < 1$ proyek tersebut secara ekonomi tidak layak untuk dibangun.

2.10.3.2. NPV (*Net Present Value*)

Komponen *cost* dan *benefit* dihitung *present valuenya* berdasarkan *discount rate/interest rate* yang telah ditentukan. Harga *Net Present Value* diperoleh dari pengurangan *present value* komponen *benefit* dengan *present value* komponen *cost* (Suyanto, 2001:39).

$$NPV = PV \text{ komponen } Benefit - PV \text{ komponen } Cost \quad (2-98)$$

dengan :

PV = *Present value*

NPV = *Net Present Value*

Suatu proyek dikatakan ekonomis dan layak dibangun apabila *NPV* bernilai + (positif) atau $NPV > 0$.

2.10.3.3. IRR

Internal Rate of Return merupakan nilai suku bunga yang diperoleh jika *BCR* bernilai sama dengan 1, atau nilai suku bunga jika *NPV* bernilai sama dengan 0. *IRR* dihitung atas dasar penerimaan bersih dan total nilai untuk keperluan investasi. Nilai *IRR* sangat penting diketahui untuk melihat sejauh mana kemampuan proyek ini dapat dibiayai dengan melihat nilai suku bunga pinjaman yang berlaku. Perhitungan nilai *IRR* ini dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut (Kodoatie, 1995:112):

$$IRR = I' + \frac{NPV'}{NPV' - NPV''} (I'' - I') \quad (2-99)$$

Dimana :

I' = suku bunga memberikan nilai NPV positif

I'' = suku bunga memberikan nilai NPV negatif

NPV = selisih antara present value dari manfaat dari present value dari biaya

NPV' = NPV positif

NPV'' = NPV negative

2.10.3.4. Payback Periode

Payback Period merupakan jangka waktu periode yang diperlukan untuk membayar kembali (mengembalikan) semua biaya-biaya yang telah dikeluarkan dalam investasi suatu proyek. *Payback Period* ini akan dipilih yang paling cepat dapat mengembalikan biaya investasi, makin cepat pengembaliannya makin baik dan kemungkinan besar akan dipilih.

Kelemahan-kelemahan metode Payback (Pujawan, 2004:113):

1. Diabaikannya nilai waktu uang
2. Diabaikannya aliran kas setelah periode Payback

$$\text{Payback Periode} = \frac{I}{A_b} \quad (2-100)$$

dengan, I : Besarnya biaya investasi yang diperlukan

A_b : Benefit bersih yang dapat diperoleh pada setiap tahun.

