

## BAB II LANDASAN TEORI

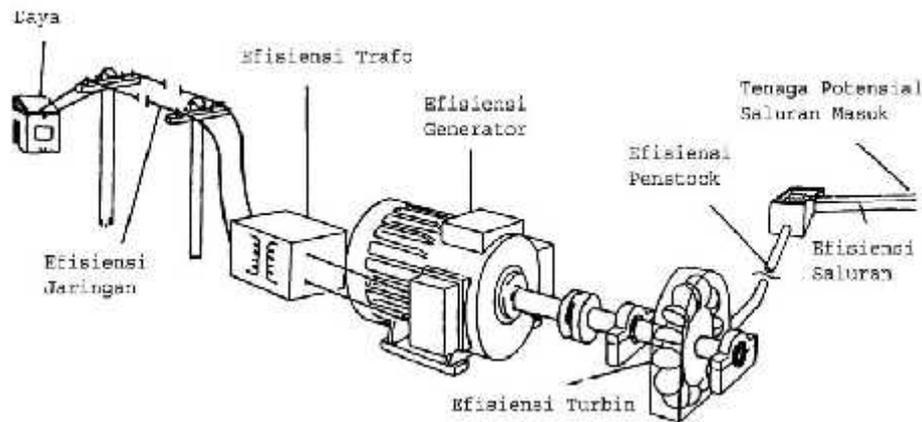
### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro

Minihidro secara umum diartikan sebagai pembangkit energi elektrik dengan sumber energi dari air yang berkapasitas 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 prinsip kerja dari suatu pembangkit PLTM dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Suatu PLTM  
 Sumber: (Tokyo Electric Power Services, 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 Analisa Hidrologi

Analisa hidrologi dilakukan untuk mendapatkan besarnya curah hujan rancangan dan debit andalan.

### 2.2.1 Uji Homogenitas Data Hujan

Data hujan yang diperoleh perlu diuji tingkat homogenitasnya. Hal ini dikarenakan informasi yang diperoleh tentang masing-masing unsur tersebut mengandung ketidaktelitian dan ketidakpastian (Harto, 1993:263).

Dengan alasan tersebut di atas maka perlu dilakukan uji homogenitas data dengan menggunakan metode RAPS (Rescaled Adjusted Partial Sums). Metode ini digunakan untuk menguji data satu stasiun dengan data dari stasiun ini sendiri dengan mendeteksi nilai rata-rata (mean), untuk lebih jelasnya dapat dilihat dalam persamaan berikut:

$$Q = \max |S_k^{**}| \text{ untuk } 0 \leq k \leq n \quad (2-1)$$

$$R = \max S_k^{**} - \min S_k \quad (2-2)$$

$$S_k^* = (x - \bar{x}) \quad (2-3)$$

$$D_y^2 = \frac{S_k^2}{n} \quad (2-4)$$

$$D_y = \sqrt{D_y^2} \quad (2-5)$$

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{D_y} \quad (2-6)$$

dengan:

Q = atribut dari besarnya sebuah nilai statistik, didapat dari perhitungan dengan rumus seperti pada Persamaan (2-1)

R = atribut dari besarnya sebuah nilai statistik, didapat dari perhitungan dengan rumus seperti pada Persamaan (2-2)

$S_k^*$  = data hujan (X) – data hujan rata-rata ( $\bar{X}$ )

$D_y^2$  = nilai kuadrat dari  $S_k^*$  dibagi dengan menjadi data

$S_k^{**}$  = nilai  $S_k^*$  dibagi dengan  $D_y$

n = jumla data

Langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

1. Data hujan yang diperoleh diurutkan berdasarkan tahun
2. Menhitung rata-rata hujan
3. Menghitung nilai  $S_k^*$ , yaitu tiap data hujan dikurangi data hujan rata-rata
4. Menghitung nilai absolut dar  $S_k^*$
5. Menghitung nilai  $D_y^2$ , yaitu  $(S_k^*)^2$  dibagi jumlah data
6. Menghitung jumlah komulatif  $D_y^2$
7. Menghitung  $D_y$ , yaitu akar dari  $D_y^2$
8. Menghitung nilai  $S_k^{**}$ , yaitu  $S_k^*$  dibagi  $D_y$
9. Menghitung nilai absolut dari  $S_k^{**}$
10. Menentukan nilai  $S_k^{**}$  max
11. Menentukan nilai  $S_k^{**}$  min
12. Menghitung nilai  $Q/(n^{0,5})$
13. Menghitung nilai  $R/(n^{0,5})$

Dengan melihat data statistik di atas maka dapat dicari nilai  $Q/(n^{0,5})$  dan  $R/(n^{0,5})$ .

Hasil yang didapat dibandingkan dengan nilai  $Q/(n^{0,5})$  dan  $R/(n^{0,5})$  tabel, syarat analisis diterima (masih dalam batasan konsisten) jika nilai  $Q/(n^{0,5})$  dan  $R/(n^{0,5})$  hitung lebih kecil dari nilai  $Q/(n^{0,5})$  dan  $R/(n^{0,5})$  tabel.

Tabel 2.1 Nilai Q/(n0,5) dan R/(n0,5)

N	Q/n <sup>0,5</sup>			R/n <sup>0,5</sup>		
	90%	95%	99%	90%	95%	99%
10	1,05	1,14	1,29	1,21	1,28	1,38
20	1,10	1,22	1,42	1,34	1,43	1,60
30	1,12	1,24	1,48	1,40	1,50	1,70
40	1,14	1,27	1,52	1,44	1,55	1,78
100	1,17	1,29	1,55	1,50	1,62	1,85
	1,22	1,36	1,63	1,62	1,72	2,00

(Sumber: Harto, 1993:168)

### 2.2.2 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):

$$P(X_m) = \frac{m}{N+1} \quad (2-7)$$

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.

### 2.2.3 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. 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. 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*.

Tabel 2.2 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

#### 2.2.4 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 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):

$$Xh^2 = \sum_{i=1}^G \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2-8)$$

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:

- Urutkan data pengamatan dari besar ke kecil atau sebaliknya.
- Kelompokkan data menjadi G sub grup, tiap-tiap sub grup minimal 4 data pengamatan.
- Menjumlahkan data pengamatan sebesar  $O_i$  tiap-tiap sub grup
- 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 2.3 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	1,0710	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  $\lambda_{maks} < \lambda_{cr}$  (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):

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (2-9)$$

dengan:

P = Peluang (%)

m = Nomor urut data

n = Jumlah data

3. Mencari nilai G

$$G = \frac{(\text{Log}X_i - \text{Log}X)}{S} \quad (2-10)$$

dengan:

G = Koefisien Frekuensi

S = Simpangan Baku

4. Menghitung nilai P(x)

$$P(x) = 100 - Pr \quad (2-11)$$

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

$$Sn(x) = \text{peluang} \left( \frac{\text{rangking}}{\sum \text{data} + 1} \right) \quad (2-12)$$

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

Tabel 2.4 Nilai Kritis Smirnov Kolmogorov

n	0,2	0,1	0,05	0,01
	5	0,45	0,51	0,56
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)

### 2.2.5 Curah Hujan Rancangan

Curah hujan rancangan merupakan perhitungan yang paling penting dalam analisa hidrologi, 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 serta umum digunakan dalam perhitungan maupun analisa dalam perhitungan curah hujan rancangan.

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:

$$\overline{\text{Log}X} = \frac{\sum \text{Log}X_i}{n} \quad (2-13)$$

3. Menghitung harga simpangan baku dengan rumus :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Log}X_i - \overline{\text{Log}X})^2}{n-1}} \quad (2-14)$$

4. Menghitung harga koefisien kemencengan dengan rumus :

$$G = \frac{n \sum (\text{Log}x_i - \text{Log}x)^3}{(n-1).(n-2)s^3} \quad (2-15)$$

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

$$\text{Log}X = \overline{\text{Log}X} + K.s \quad (2-16)$$

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 2.5 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

### 2.2.6 Evapotranspirasi Potensial

Analisis data klimatologi dilakukan untuk mengetahui besarnya potensi penguapan di daerah studi atau yang biasa disebut sebagai besarnya evapotranspirasi potensial (ET<sub>o</sub>).

Besarnya ET<sub>o</sub> 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<sub>o</sub>, diantaranya adalah rumus Blaney-Criddle. Persamaan Blaney-Criddle merupakan salah satu model temperatur untuk memperkirakan evapotranspirasi. Disebut dengan model temperatur karena untuk memperkirakan ET<sub>o</sub>, 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):

$$E_{To} = c \cdot E_{To}^* \quad (2-17)$$

Sedangkan besarnya  $E_{To}^*$  dihitung dengan rumus :

$$E_{To}^* = p \cdot (0,457 \cdot t + 8,13) \quad (2-18)$$

dengan:

$E_{To}$  = evapotranspirasi potensial (mm/hari)

$c$  = angka koreksi sesuai bulan yang ditinjau

$E_{To}^*$  = 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 ( $^{\circ}C$ )

Perhitungan  $E_{To}^*$  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  $E_{To}^*$  dengan metode Blaney-Criddle adalah letak lintang (LL) dan suhu udara ( $t$ ).

Prosedur perhitungan  $E_{To}$  untuk suatu bulan tertentu adalah sebagai berikut :

1. Cari letak lintang daerah yang ditinjau
2. Sesuai dengan letak lintang, cari nilai ( $p$ ) dari tabel 2.6.
3. Cari data suhu rata-rata bulanan ( $t$ )
4. Dengan memakai nilai ( $p$ ) dari tabel I, dan data terukur ( $t$ ), hitung  $E_{To}^*$
5. Sesuai dengan bulan yang ditinjau cari angka koreksi ( $c$ ) dari tabel 2.7.
6. Hitung  $E_{To}$

Tabel 2.6 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

Bulan	Letak Lintang						
	5° LU	2,5°LU	0°LU	2,5°LS	5°LS	7,5°LS	10°LS
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 2.7 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

### 2.2.7 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. (Anonim, 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):

$$Q = (GF + DRF) \cdot A \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2-19)$$

dengan:

$Q$  = total debit sungai ( $m^3/detik$ )

$A$  = luas DAS ( $km^2$ )

$NOM$  =  $100 + 0,2 \times$  hujan rata-rata tahunan (2-20)

$Sr$  = *Storage ratio* (angka tampungan)

$$= \frac{SMS}{NOM} \quad (2-21)$$

$P$  = curah hujan bulanan rata-rata (mm)

$PET$  = *Potensial Evapotranspiration*

= Evapotranspirasi Potensial (mm)

$SMS$  = Soil Moisture Storage

$SMS_n$  = Coba-coba

$SMS_{n+1}$  =  $SMS_n + D_{storage}$  (2-22)

$AET/PET$  = 1; jika  $\frac{P}{PET} > 1$  atau  $Sr > 2$  (2-23)

$$= \left( \frac{P}{PET} \right) \times (1 - 0,5 \times Sr) + 0,5 \times Sr ; \text{ jika } \frac{P}{PET} < 1 \text{ atau } Sr < 2 \quad (2-24)$$

$AET$  = *Actual Evapotranspiration* (evapotranspirasi aktual) (mm)

$$= PET \times (AET/PET) \quad (2-25)$$

$excm$  = *excess soil moisture* / kelebihan kelengasan tanah (mm)

$$= exrat \times (P - AET) \quad (2-26)$$

$exrat$  = *excess moisture ratio* / nilai banding kelengasan tanah

$$= 0,5 \times [1 + tgh(2Sr - 2)], \text{ jika harga } Sr > 0 \quad (2-27)$$

$$= 0, \text{ jika harga } Sr < 0 \quad (2-28)$$

$D_{storage}$  =  $P - AET - excm$ . (2-29)

$Rech$  = infiltrasi atau imbuhan ke tampungan airtanah (mm)

$$= PSUB \times excm \quad (2-30)$$

$GWS_{awal_n}$  = Coba-coba

$GWS_{awal_{n+1}}$  =  $GWS_{akhir} - GF$  (2-31)

$GWS_{akhir}$  = *Ground Water Storage* / tampungan airtanah (mm)

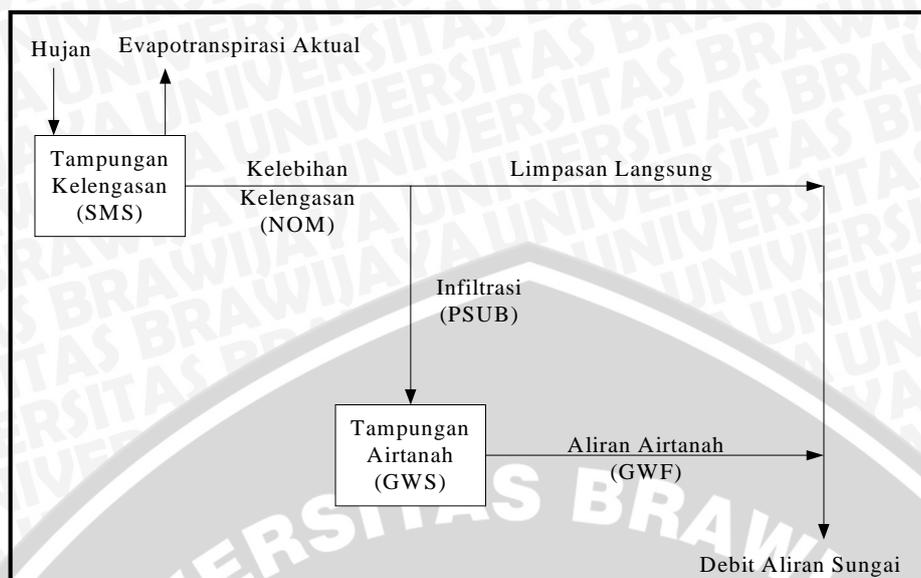
$$= Rech + GWS_{awal} \quad (2-32)$$

$GF$  = *Groundwater Flow* / aliran airtanah (mm)

$$= GWF \times GWS_{akhir} \quad (2-33)$$

$DRF$  = *Direct Runoff* / limpasan langsung (mm)

$$= excm - Rech \quad (2-34)$$



Gambar 2.2 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
- GWS : tidak ada batasan

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 2.2 (Nugroho, 2010: 237).

### 2.2.8 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).

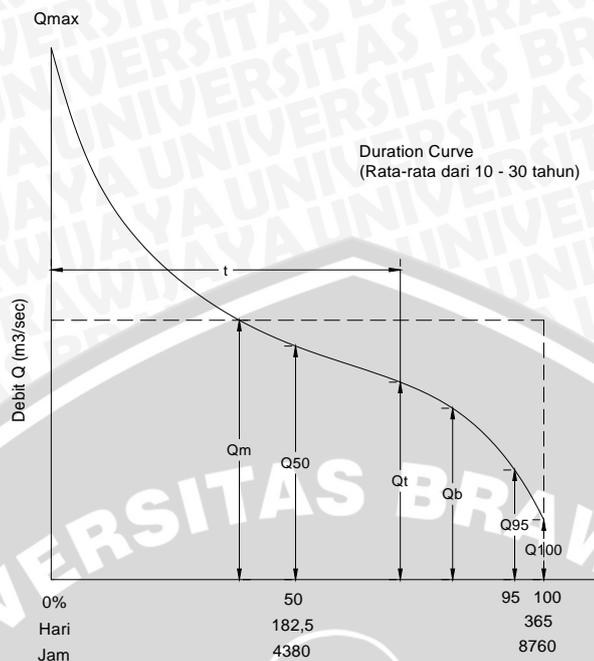
Debit andalan adalah besarnya debit yang dapat tersedia untuk memenuhi kebutuhan air dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Debit andalan dapat dicari dengan membuat terlebih dahulu garis durasi untuk debit-debit yang disamai atau dilampaui. Setelah itu baru ditetapkan frekuensi kejadian 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 (2-7).

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% |

### 2.2.9 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 2.3 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 2.3 Duration Curve  
Sumber: Patty (1995: 15)

**2.2.10 Analisa Intensitas Curah Hujan**

Penentuan besarnya hujan jam-jaman dapat secara langsung diamati dilapangan melalui alat, tetapi jika tidak tersedia data pengamatan sebaran hujan maka penentuan besar sebaran hujan jam-jaman dapat menggunakan rumus empiris Mononobe sebagai berikut (Sosrodarsono,2006 : 145):

$$R_T = \frac{R_{24}}{t} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{2-35}$$

$$R_T = t \times rt - (t-1) \times r_{t-1} \tag{2-36}$$

dengan:

rt = Intensitas curah hujan rata-rata sampai jam ke-T (mm/jam)

T = waktu mulai hujan jam ke T (jam)

t = waktu konsentrasi hujan (jam)

R<sub>24</sub> = Curah hujan harian yaitu curah hujan 24 jam (mm)

R<sub>T</sub> = Intensitas curah hujan jam ke T (mm/jam)

**2.2.11 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):



$$Q_p = \frac{A.R_o}{3,6(0,3T_p + T_{0,3})} \quad (2-37)$$

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:

$$Q_a = Q_p \left( \frac{t}{T_p} \right)^{2,4} \quad (2-38)$$

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

$t$  = waktu (jam)

Bagian lengkung turun hidrograf satuan mempunyai persamaan:

$$Q_{d1} = Q_d > 0,3Q_p : Q_d = Q_p \cdot 0,3^{\left( \frac{t-T_p}{T_{0,3}} \right)} \quad (2-39)$$

$$Q_{d2} = 0,3 Q_p > Q_d > 0,3^2 Q_p : Q_d = Q_p \cdot 0,3^{\left( \frac{t-T_p + 0,5T_{0,3}}{1,5T_{0,3}} \right)} \quad (2-40)$$

$$Q_{d3} = 0,3^2 Q_p > Q_d : Q_d = Q_p \cdot 0,3^{\left( \frac{t-T_p + 1,5T_{0,3}}{2T_{0,3}} \right)} \quad (2-41)$$

$$\text{Tenggang waktu } T_p = t_g + 0,8 t_r \quad (2-42)$$

dengan:

$$L < 15 \text{ km} \longrightarrow t_g = 0,21 L^{0,7} \quad (2-43)$$

$$L > 15 \text{ km} \longrightarrow t_g = 0,4 + 0,058 L \quad (2-44)$$

dengan:

$L$  = panjang alur sungai (km)

$t_g$  = waktu konsentrasi (jam)

$t_r$  = 0,5  $t_g$  sampai 1  $t_g$  (jam) (2-45)

$T_{0,3}$  =  $t_g$  (jam) (2-46)

dengan:

- 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

$$Qb=0,4751A^{0,6444} \cdot D^{0,943} \quad (2-47)$$

dengan:

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

$A$  = luas DAS ( $km^2$ )

$D$  = kerapatan jaringan kurus ( $km^2$ )

## 2.3 Perencanaan Hidrolik

### 2.3.1 Bendung

#### a. Lebar Efektif Bendung

Lebar efektif bendung di sini adalah jarak antar pangkal-pangkalnya (*abutment*), menurut kriteria lebar bendung ini diambil sama dengan lebar rata-rata sungai yang stabil atau lebar rata-rata muka air banjir tahunan sungai yang bersangkutan atau diambil lebar maksimum bendung tidak lebih dari 1,2 kali lebar rata-rata sungai pada ruas yang stabil.

Penentuan lebar mercu bendung efektif dengan persamaan (KP.02, 1986: 49):

$$Be = B - 2(n \cdot Kp + Ka) H_1 \quad (2-48)$$

$$B = b - p - \sum t \quad (2-49)$$

dengan:

$Be$  = lebar mercu efektif dalam meter

$Bb$  = 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

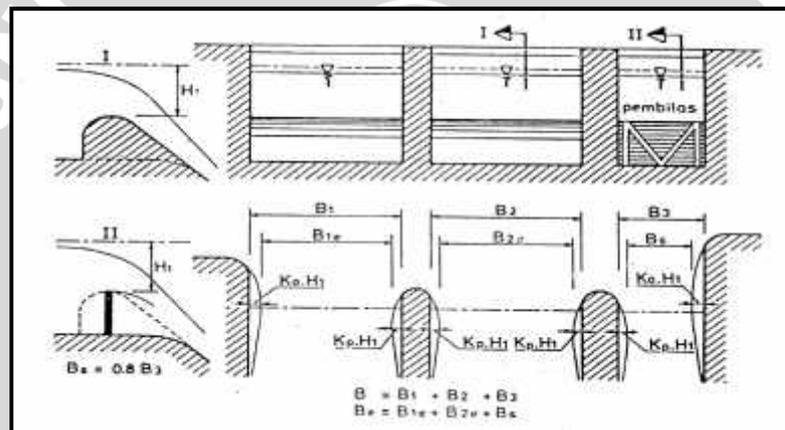
$Ka$  = koefisien kontraksi pangkal bendung

$H_1$  = Tinggi energi, yaitu  $h + k$ ;  $h$  = tinggi air,  $k = v^2/2g$

Tabel 2.8 Harga-harga koefisien kontraksi

Uraian	Kp
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untuk pilar berujung segi empat dengan sudut-sudut yang dibulatkan pada jari-jari yang hampir sama dengan 0,1 dari tebal pilar</li> </ul>	0,02
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untuk pilar berujung bulat</li> </ul>	0,01
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untuk pilar berujung runcing</li> </ul>	0
Uraian	Ka
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untuk pangkal tembok segi empat dengan tembok hulu pada 90° ke arah aliran</li> </ul>	0,20
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untuk pangkal tembok bulat dengan tembok hulu pada 90° ke arah aliran dengan <math>0,5 H_1 &gt; r &gt; 0,15 H_1</math></li> </ul>	0,10
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untuk pangkal tembok bulat dimana <math>r &gt; 0,5 H_1</math> dan tembok hulu tidak lebih dari 45° ke arah aliran</li> </ul>	0

Sumber: KP.02 (1986: 50)



Gambar 2.4 Lebar efektif mercu

Sumber: KP.02 (1986: 49)

### b. 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 :

$$Q_d = C_d \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2/3 \cdot g} \cdot B_e \cdot H_1^{1.5} \quad (2-50)$$

dengan:

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

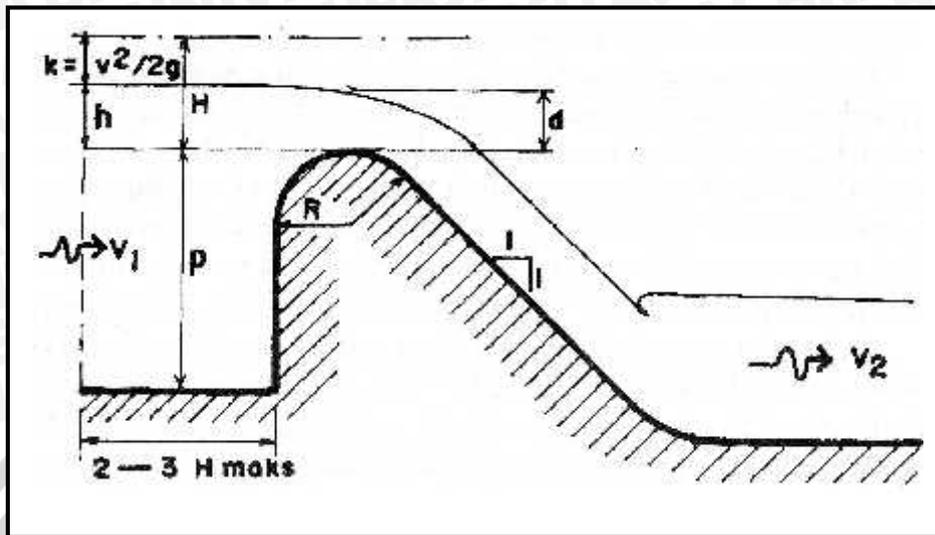
$C_d$  = koefisien debit menurut Iwasaki untuk *type* standar dan dinding hulu ambang tegak.

$$C_d = 2,200 - 0,0416 \left( \frac{H_1}{P} \right)^{0,99} \quad (2-51)$$

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

$Be$  = panjang mercu efektif (m)

$H_1$  = tinggi energi di atas mercu (m)



Gambar 2.5 Tinggi muka air di atas mercu  
Sumber: KP.02 (1986: 42)

### 2.3.2 Kolam Loncat Air

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

$$V_1 = \sqrt{2g\left(\frac{1}{2}H_1 + z\right)} \quad (2-52)$$

Debit persatuan lebar:

$$q = \frac{Q}{Be} \quad (2-53)$$

Kedalaman air di awal loncatan air:

$$Y_u = \frac{q}{V_1} \quad (2-54)$$

Kedalaman konjugasi dalam loncat air adalah:

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{gY_u}} \quad (2-55)$$

$$Y_2 = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr^2} - 1 \right) Y_u \quad (2-56)$$

dengan:

$V_1$  = kecepatan awal loncatan (m/detik)

$g$  = Percepatan gravitasi 9,8 (m/dt<sup>2</sup>)

$H_1$  = tinggi energi di atas ambang (m)

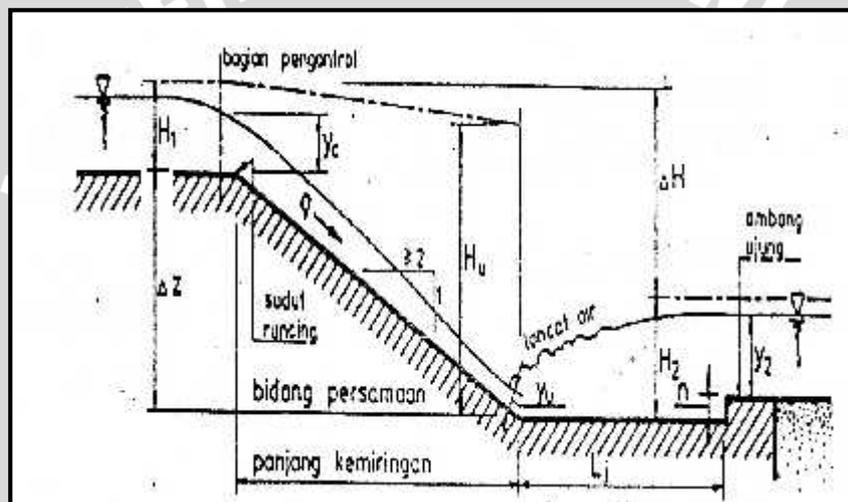
- $z$  = tinggi jatuh (m)  
 $Y_2$  = kedalaman air di atas ambang ujung (m)  
 $Y_u$  = kedalaman air di awal loncatan air (m)  
 $Fr$  = bilangan *Froude*

Ambang yang berfungsi untuk memantapkan aliran ini umumnya ditempatkan pada jarak

$$L_j = 5(n + y_2) \quad (2-57)$$

dengan:

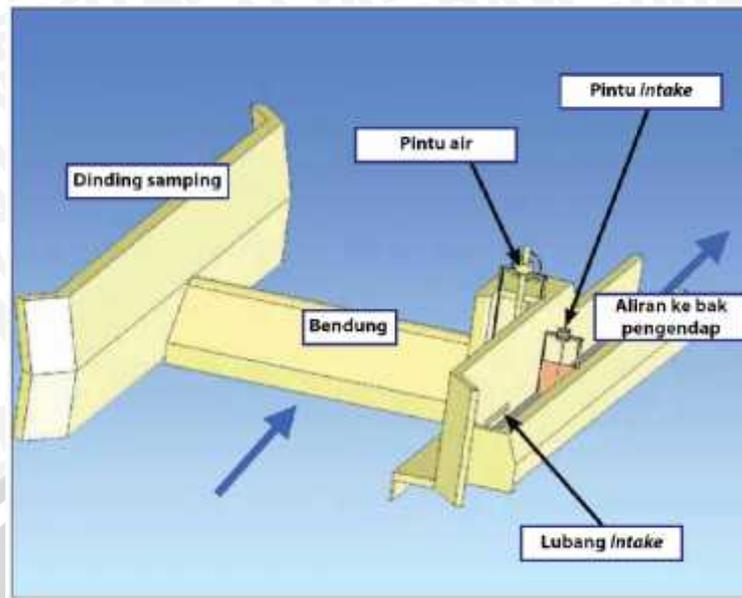
- $L_j$  = panjang kolam, m  
 $n$  = tinggi ambang ujung, m  
 $y_2$  = kedalaman air di atas ambang, m



Gambar 2.6 Parameter-parameter loncat air  
 Sumber: KP.02 (1986: 58)

### 2.3.3 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. (Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi, 2009: 44)



Gambar 2.7 Bendung dan Intake  
 Sumber: Anggraeni (2009: 45)

### 2.3.4 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*. (Anggraeni, 2009: 75)

### 2.3.5 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).

$$Q = B \cdot h \cdot V \tag{2-58}$$

$$L = V \cdot t \tag{2-59}$$

$$t = \frac{h}{V} \tag{2-60}$$

$$V_c = a \sqrt{d} \tag{2-61}$$

dengan :

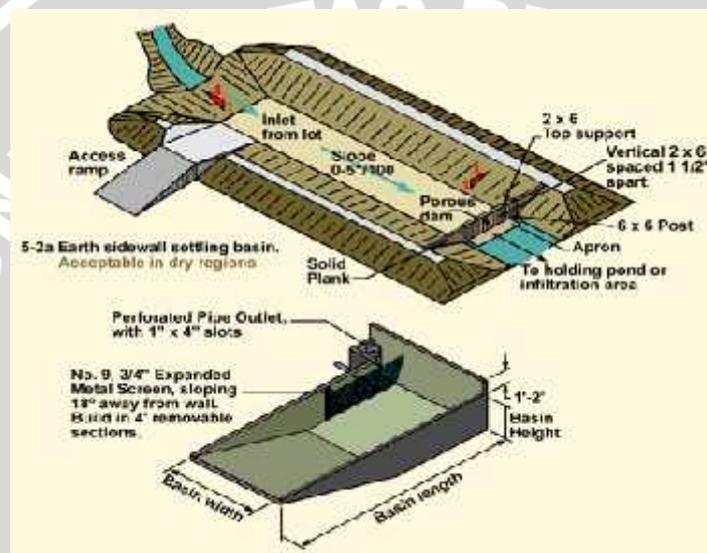
Q = debit (m<sup>3</sup>/detik), debit yang digunakan yaitu debit andalan 90%

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 2.8 Bak pengendap (*Sand trap*)

Sumber: Anggraeni (2009: 53)

### 2.3.6 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).

## 2.4 Perencanaan Hidromekanikal

### 2.4.1 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. (Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi, 2009: 12).

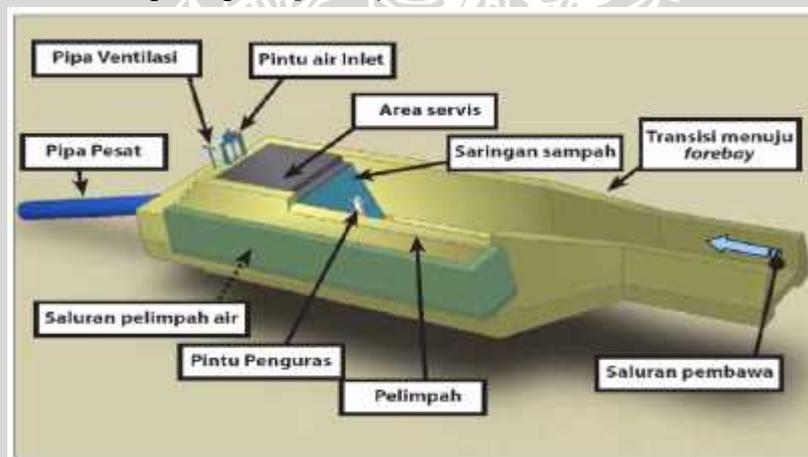


Gambar 2.9 Konstruksi Saluran Pembawa (*Headrace Channel*)

Sumber: Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi (2009: 12)

#### 2.4.2 Bak Penenang (*Forebay*)

*Forebay* bekerja hampir sama dengan bak pengendap. Bak penenang berfungsi untuk mengontrol perbedaan debit dalam pipa pesat (*penstock*) dan saluran pembawa karena fluktuasi beban, disamping itu juga sebagai pemindah sampah terakhir (tanah, pasir, kayu yang mengapung) dalam air yang mengalir. Bak penenang dilengkapi saringan (*trashrack*) dan pelimpas (*spillway*)



Gambar 2.10 Bak Penenang (*Forebay*)

Sumber: Anggraeni (2009: 71)

#### 2.4.3 Pipa Pesat (*Penstock*)

Pipa pesat merupakan pipa yang direncanakan untuk dapat menahan tekanan tinggi dan berfungsi untuk mengalirkan air dari kolam penampungan menuju turbin



Gambar 2.11 Pipa Pesat (*Penstock*)

Sumber: Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi (2009: 17)

#### 2.4.3.1 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)

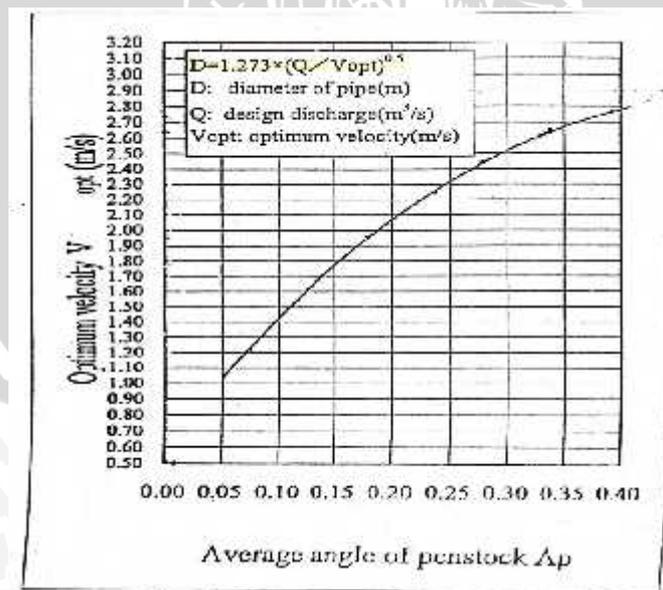
Diameter minimum pipa pesat dapat dihitung dengan persamaan :

$$D = 1,273 \times (Q/V_{opt})^{0,5} \quad (2-62)$$

dengan:

$Q$  = debit pembangkitan rerata,  $m^3/s$

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



Gambar 2.12 Hubungan sudut rata-rata dan kecepatan aliran optimum

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

### 2.4.3.2 Tebal Pipa Pesat

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

$$H = \frac{0,002 + t \times t}{D + 0,002 \times t} \quad (2-63)$$

dengan:

H = Tinggi tekan maksimum ( m )  
 = tekanan statis + tinggi tekan akibat pukulan air  
 = tegangan baja yang digunakan ( ton/m<sup>2</sup> )

D = diameter pipa pesat ( m )

t = tebal pipa pesat ( m )

### 2.4.3.3 Koefisien Kehilangan Tinggi Tekan pada Pipa Pesat

Perhitungan besarnya kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat digunakan persamaan:

$$h = k \frac{V^2}{2g} \quad (2-64)$$

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 2.9 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 2.10 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:

$$k_s = \frac{\lambda L}{D} \quad (2-65)$$

dengan:

L = panjang pipa (m)

D = diameter pipa (m)

$\lambda$  = faktor gesekan yang harganya tergantung pada jenis aliran.

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

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

- a. Untuk pipa dengan kekasaran halus :

$$\lambda^{-\frac{1}{2}} = 2 \log \frac{R\lambda^{\frac{1}{2}}}{2,51} \quad (2-66)$$

- b. Untuk pipa dengan kekasaran kasar :

$$\lambda^{-\frac{1}{2}} = 2 \log \frac{3,7 D}{k} \quad (2-67)$$

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

$$\lambda^{-\frac{1}{2}} = -2 \log \left[ \frac{k}{3,7 D} + \frac{2,51}{R\lambda^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (2-68)$$

dengan :

R = bilangan Reynold

D = diameter pipa (m)

k = koefisien kekasaran bahan pipa (m)

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

$$\lambda = \frac{64}{R} \quad (2-69)$$

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

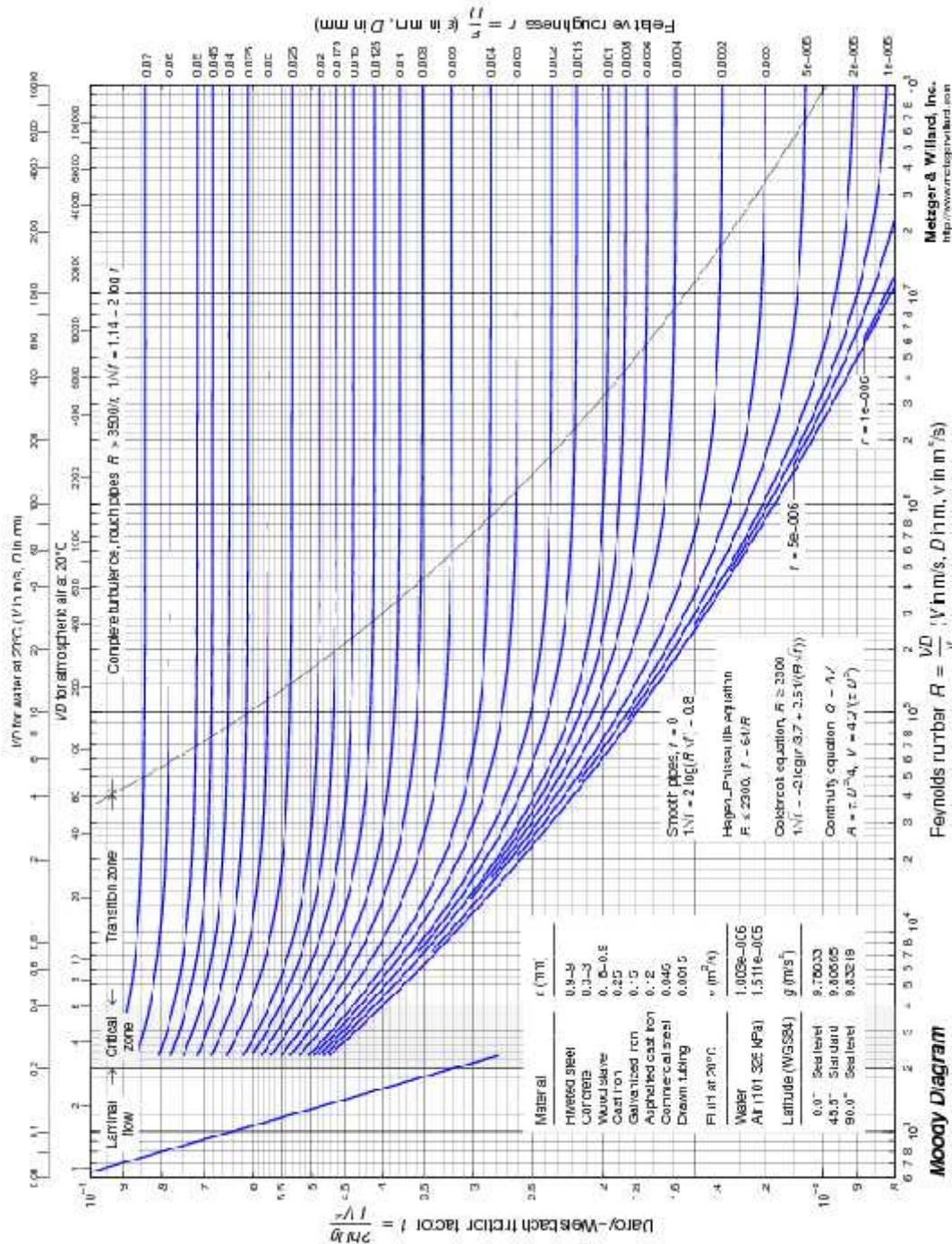
- a. Aliran Laminar

$$R = \frac{DV}{\mu} < 2000 \quad (2-70)$$

- b. Aliran turbulen

$$R = \frac{DV}{\mu} > 4000 \quad (2-71)$$

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



Gambar 2.13 Diagram Moody

#### 2.4.3.4 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  $T < \frac{2L}{r}$  menurut Joukovsky:

$$h = \frac{r}{g} \times V_m \quad (2-72)$$

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

$$h = \frac{N \times H}{2} \pm \frac{H}{2} \sqrt{(N^2 + 4N)} \quad (2-73)$$

dengan:

T = waktu yang digunakan untuk menutup katup,

L = panjang pipa pesat

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

g = percepatan gravitasi (m/det<sup>2</sup>)

h = tekanan statis (m)

$$N = \left[ \frac{L \times V_m}{g \times T \times H} \right]^2 \quad (2-74)$$

V<sub>m</sub> = kecepatan aliran rerata (m/det)

Apabila garis tengah pipa pesat berbeda, maka:

$$V_m = \frac{Q}{L} \sum \frac{L_n}{A_n} \quad (2-75)$$

dengan :

Q = debit pembangkitan maksimum (m<sup>3</sup>/det)

A<sub>n</sub> = luas penampang dari setiap bagian pipa (m<sup>2</sup>)

L<sub>n</sub> = panjang setiap bagian pipa dengan garis tengah tertentu (m)

#### 2.4.4 Tinggi Jatuh Efektif (H<sub>eff</sub>)

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:

$$H_{\text{eff}} = \text{EFB} - \text{TWL} - h_l \quad (2-76)$$

dengan:

H<sub>eff</sub> = tinggi jatuh efektif (m)

EFB = elevasi muka air *forebay* (m)

TWL = tail water level (m)

h<sub>l</sub> = total kehilangan tinggi tekan (m)

### 2.4.5 Turbin

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

#### 2.4.5.1 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 2.11 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 2.12 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: Dandekar dan Sharma (1991: 394)

## b. Berdasarkan Arah Aliran

Tabel 2.13 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 2.14 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



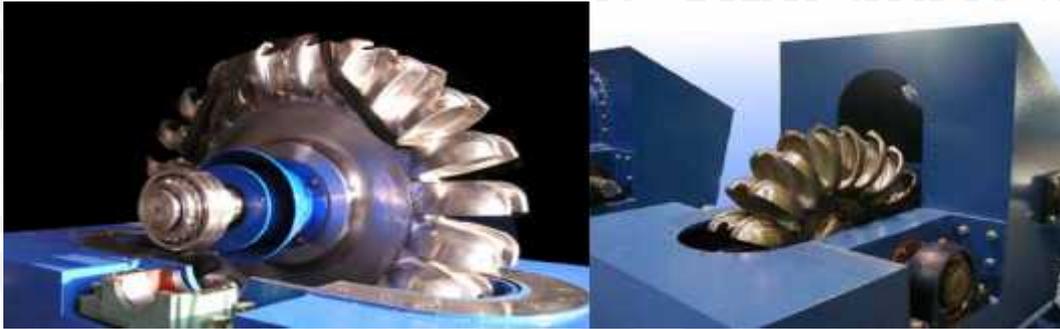
Gambar 2.14 Turbin Francis

Sumber: [http://www.google.com/images/turbin+ Francis](http://www.google.com/images/turbin+Francis)



Gambar 2.15 Turbin Kaplan

Sumber: [http://www.google.com/images/turbin+ kaplan](http://www.google.com/images/turbin+kaplan)



Gambar 2.16 Turbin Pelton

Sumber: [http://www.google.com/images/turbin+ pelton](http://www.google.com/images/turbin+pelton)

#### 2.4.5.2 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

$$D = 60 \times \frac{v}{\pi N} \quad (2-77)$$

$$v = K_u \times \sqrt{2gH} \quad (2-78)$$

$K_u$  = 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 :

$$\begin{aligned} D &= 60 \times \frac{K_u \times \sqrt{2gH}}{N} \\ &= 60 \times \frac{0,46 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times H}}{3,14 \times N} \\ D &= 38,93 \times \frac{\sqrt{H}}{N} \end{aligned} \quad (2-79)$$

dengan:

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

##### b. Diameter Runner Bagian Dalam

$$D_2 = \frac{D_1 [2 \sin (1 - \sin c)]^{0.5}}{\cos c} \quad (2-80)$$

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/detik<sup>2</sup>)
- $H_{\text{eff}}$  = 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  $15^\circ - 16^\circ$

#### c. Lebar dan Tinggi Nozzle

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

$$s = \frac{\pi}{360} f \cdot D_1 \cdot \sin \alpha \quad (2-81)$$

$$W = \frac{Q}{s \cdot c \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{eff}}} \quad (2-82)$$

dengan :

$W$  = lebar runner/nozzle (m)

$c$  = konstanta (0,95)

$s$  = tinggi lorong nozzle (m)

= sudut sembur  $90^\circ$

#### d. Jari-jari kelengkungan Sudu

$$= 0,326 \cdot r_1 \quad (2-83)$$

dengan :

= jari-jari kelengkungan sudu (m)

$r_1$  = jari-jari runner bagian luar (m)

#### e. Jarak antar sudu

$$t_1 = \frac{f \cdot D_1}{Z} \quad (2-84)$$

$$t_2 = \frac{f \cdot D_2}{Z} \quad (2-85)$$

dengan:

$t_1$  = Jarak antar sudu bagian luar (m)

$t_2$  = Jarak antar sudu bagian dalam (m)

$Z$  = jumlah sudu (buah)

### 2.4.6 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
2. 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.

3. 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)

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2-86)$$

dengan:

n = banyaknya putaran setiap menit (rpm)

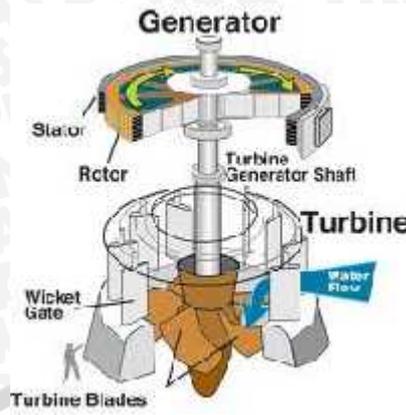
f = frekuensi (50 Hz)

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:

$$\text{Daya nyata (kW)} = \text{daya semu (kVA)} \times \text{faktor daya} \quad (2-87)$$

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 2.17 Generator

Sumber: [http://id.wikipedia.org/wiki/Turbin\\_air](http://id.wikipedia.org/wiki/Turbin_air)

#### 2.4.7 Saluran bawah (*Tailrace*)

Saluran bawah (*Tailrace*) adalah sebuah saluran yang dilalui oleh air yang keluar dari turbin air, terus ke sungai. Tinggi TWL tergantung dari debit air yang keluar dari turbin, jenis penampang serta dimensi penampang saluran pembuang.



Gambar 2.18 Saluran Bawah (*Tailrace*)

Sumber: Anggraeni (2009: 97)

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).

$$Q = V \times A \tag{2-7}$$

$$V = 1/n \cdot (A/P)^{2/3} \cdot S^{1/2} \tag{2-89}$$

dengan:

Q = debit air yang keluar dari turbin (m<sup>3</sup>/dt)

V = kecepatan air (m/dt)

R = jari-jari hidrolis (m)

P = keliling basah saluran (m)

- A = luas penampang saluran (m<sup>2</sup>)  
 S = kemiringan saluran atau slope  
 n = koefisien manning

Tabel 2.15 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)

## 2.5 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<sub>eff</sub> = Tinggi jatuh efektif ( m )

Q = Debit outflow (m<sup>3</sup>/dtk), debit outflow yang digunakan yaitu debit andalan 90%  
 = Efisiensi turbin

## 2.6 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 (m<sup>3</sup>/dtk), debit outflow yang digunakan yaitu debit andalan 90%  
 = efisiensi turbin  
 n = jumlah hari dalam satu periode

## 2.7 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>).

## 2.8 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).

### 2.8.1 Benefit (Komponen Manfaat)

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

### 2.8.2 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 Tunggalgeni, 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)

H<sub>ef</sub> : tinggi jatuh efektif (m)

Q<sub>p</sub> : debit pembangkit maksimum (m<sup>3</sup>/det)

N : jumlah unit pembangkit

#### 3. Instalasi Pembangkit

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

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 :
  - a. Biaya/pengeluaran yang mungkin timbul, tetapi tidak pasti.
  - b. Biaya yang mungkin timbul, namun belum terlihat.
  - c. 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).

### 2.8.3 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*)

#### 2.8.3.1 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.

#### 2.8.3.2 NPV (Net Present Value)

Komponen *cost* dan *benefit* dihitung *present value*nya 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  $NPV > 0$ .

### 2.8.3.3 IRR (*Internal Rate of Return*)

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

### 2.8.3.4 *Payback Period*

*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*

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

dengan,  $I$  : Besarnya biaya investasi yang diperlukan

$A_b$ : Benefit bersih yang dapat diperoleh pada setiap tahun.