

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah pembangkit listrik berskala kecil (kurang dari 100 kW), yang memanfaatkan tenaga (aliran) air sebagai sumber penghasil energi. Daya yang mampu dibangkitkan dari sebuah pembangkit listrik mikrohidro tergantung dari beberapa variabel antara lain ketinggian jatuh (*head*) dan debit aliran air. 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*. PLTMH termasuk sumber energi terbarukan dan layak disebut *clean energy* karena ramah lingkungan. Dari segi teknologi, PLTMH dipilih karena konstruksinya sederhana, mudah dioperasikan, serta mudah dalam perawatan dan penyediaan suku cadang. Secara ekonomi, biaya operasi dan perawatannya lebih relatif murah, sedangkan biaya investasinya cukup bersaing dengan pembangkit listrik lainnya. Secara sosial, PLTMH mudah diterima masyarakat luas. PLTMH biasanya dibuat dalam skala desa di daerah-daerah terpencil yang belum mendapatkan energi listrik dari PLN.

Seperti dikatakan di atas, mikrohidro hanyalah sebuah istilah. Mikro artinya sangat kecil sedangkan hidro artinya air. Dalam prakteknya istilah ini tidak merupakan sesuatu yang baku namun bisa dibayangkan bahwa mikrohidro, 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, mikrohidro 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 mikrohidro merubah energi aliran dan ketinggian air menjadi energi listrik.

2.2. 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. Analisa hidrologi digunakan untuk mendapatkan besarnya debit banjir rancangan dan debit andalan.

2.2.1. Uji homogenitas data hujan

Data hujan yang diperoleh perlu di uji 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 itu sendiri dengan mendeteksi nilai rata-rata (*mean*), untuk lebih jelasnya dapat dilihat dalam persamaan berikut:

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

$$R = \text{maks } S_k^{**} - S_k \quad (2-2)$$

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

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

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

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

dengan:

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

R = atribut dari besarnya sebuah nilai statistik, diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan 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 jumlah data

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

n = jumlah data

Langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

1. Data hujan yang diperoleh diurutkan berdasarkan tahun
2. Menghitung rata-rata hujan
3. Menghitung nilai S_k^* , yaitu tiap data dikurangi data hujan rata-rata
4. Menghitung nilai absolut dari 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 dari S_k^{**} , yaitu S_k^* dibagi D_y
9. Menghitung nilai absolut dari S_k^{**}
10. Menentukan nilai S_k^{**} maksimal
11. Menentukan S_k^{**} minimal
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 $Q/(n^{0,5})$ dan $R/(n^{0,5})$

N	$Q/n^{0,5}$			$R/n^{0,5}$		
	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	1,13	1,26	1,50	1,42	1,53	1,74
50	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, 1993:60

2.2.2. Uji abnormalitas data

Data yang telah konsisten kemudian perlu diuji lagi dengan uji abnormalitas. Uji ini digunakan untuk mengetahui apakah data maksimum dan minimum dari rangkaian data yang ada layak atau tidak. Uji yang digunakan adalah uji *Inlier-Outlier*. Dimana data yang menyimpang dari dua batas ambang, yaitu ambang bawah (X_L) dan ambang

atas (X_H) akan dihilangkan. Rumus untuk mencari ambang tersebut adalah sebagai berikut:

$$X_H = \text{Exp.} (X_{\text{rerata}} + K_n \cdot S) \quad (2-7)$$

$$X_L = \text{Exp.} (X_{\text{rerata}} - K_n \cdot S) \quad (2-8)$$

dengan:

X_H = nilai ambang atas

X_L = nilai ambang bawah

X_{rerata} = nilai rata-rata

S = simpangan baku dari logaritma terhadap data

K_n = besaran yang tergantung pada jumlah sampel data (**Tabel 2.2**)

n = jumlah sampel data

Adapun langkah perhitungan sebagai berikut:

1. Data diurutkan dari besar ke kecil atau sebaliknya
2. Mencari harga $\text{Log } X$
3. Mencari harga rerata dari $\text{Log } X$
4. Mencari nilai standar deviasi dari $\text{Log } X$
5. Mencari nilai K_n (**Tabel 2.2**)
6. Menghitung nilai ambang atas (X_H)
7. Menghitung nilai ambang bawah (X_L)
8. Menghilangkan data yang tidak layak digunakan

Tabel 2.2 Nilai K_n untuk Uji *Inlier-Outlier*

Jumlah Data	K_n	Jumlah Data	K_n	Jumlah Data	K_n	Jumlah Data	K_n
10	2,036	24	2,467	38	2,661	60	2,837
11	2,088	25	2,468	39	2,671	65	2,866
12	2,134	26	2,502	40	2,682	70	2,893
13	2,175	27	2,519	41	2,692	75	2,917
14	2,213	28	2,534	42	2,7	80	2,94
15	2,247	29	2,549	43	2,71	85	2,961
16	2,279	30	2,563	44	2,719	90	2,981
17	2,309	31	2,577	45	2,727	95	3,000
18	2,335	32	2,591	46	2,736	100	3,017
19	2,361	33	2,604	47	2,744	110	3,049
20	2,385	34	2,616	48	2,753	120	3,078
21	2,408	35	2,628	49	2,76	130	3,104
22	2,429	36	2,639	50	2,768	140	3,129
23	2,448	37	2,650	55	2,804		

Sumber: Chow, 1988:404

2.2.3. Analisa frekuensi

Dalam analisa hidrologi selanjutnya diperlukan besaran curah hujan rancangan yang terjadi di daerah tersebut. Curah hujan rancangan adalah hujan terbesar tahunan dengan suatu kemungkinan periode ulang tertentu.

Dalam analisa curah hujan rancangan dapat dilakukan dengan beberapa cara, misalnya Normal, Gumbel, Log Normal, Log Pearson Tipe III, dan sebagainya. Dalam studi ini dipakai metode Log Pearson tipe III dengan pertimbangan bahwa cara ini lebih fleksibel dan dapat dipakai untuk semua data serta umum digunakan dalam perhitungan maupun analisa curah hujan rancangan.

Parameter-parameter statistik yang digunakan oleh distribusi Log Pearson Tipe III adalah (Soemarto, 1987:243):

- Harga rata-rata
- Standart deviasi
- Koefisien kepencengan

Prosedur untuk menentukan kurva distribusi Log Pearson Tipe III adalah:

1. Mengubah data debit banjir tahunan sebanyak n buah $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ menjadi Log $X_1, \text{Log } X_2, \text{Log } X_3, \dots, \text{Log } X_n$.
2. Menghitung nilai rata-rata menggunakan persamaan:

$$\bar{x} = \frac{\sum \text{Log } X}{n} \quad (2-9)$$

dengan:

n = jumlah data

3. Menghitung nilai standar deviasi dari Log X menggunakan persamaan:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\text{Log } x - \bar{\text{Log } x})^2}{(n-1)}} \quad (2-10)$$

4. Menghitung nilai koefisien kepencengan menggunakan persamaan:

$$C_s = \frac{n \sum (\text{Log } x - \bar{\text{Log } x})^3}{(n-1)(n-2)(s)^3} \quad (2-11)$$

5. Menghitung logaritma curah hujan dengan waktu balik yang dikehendaki menggunakan persamaan:

$$\text{Log } x = \bar{\text{Log } x} + K \cdot S \quad (2-12)$$

dimana:

$\bar{\text{Log } x}$ = Logaritma curah hujan rancangan

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

K = Variabel standar untuk X yang besarnya tergantung koefisien kepengcengan C_s

s = Simpangan baku

Harga rata-rata K dapat dilihat dari **(Tabel 2.3)**, dengan tingkat peluang atau periode tertentu sesuai dengan nilai C_s nya.

6. Mencari anti Log x untuk mendapatkan debit banjir dengan waktu balik yang dikehendaki.



Tabel 2.3 Nilai K Distribusi Log Pearson Tipe III

Cs	Probabilitas Terjadi (%)												
	99	95	90	80	50	20	10	5	4	2	1	0,5	0,1
	Kala ulang												
	1,01010101	1,052631579	1,111111111	1,25	2	5	10	20	25	50	100	200	1000
-3,0	-4,051	-2,003	-1,180	-0,420	0,396	0,636	0,660	0,665	0,666	0,666	0,667	0,667	0,668
-2,9	-4,013	-2,007	-1,195	-0,440	0,390	0,651	0,681	0,688	0,689	0,689	0,690	0,690	0,691
-2,8	-3,973	-2,010	-1,210	-0,460	0,384	0,666	0,702	0,710	0,712	0,714	0,714	0,714	0,715
-2,7	-3,932	-2,012	-1,224	-0,479	0,376	0,681	0,724	0,736	0,738	0,740	0,740	0,741	0,743
-2,6	-3,889	-2,013	-1,238	-0,499	0,368	0,696	0,747	0,761	0,764	0,768	0,769	0,769	0,771
-2,5	-3,845	-2,012	-1,250	-0,518	0,360	0,711	0,771	0,789	0,793	0,798	0,799	0,800	0,800
-2,4	-3,800	-2,011	-1,262	-0,537	0,351	0,725	0,795	0,818	0,823	0,830	0,832	0,833	0,835
-2,3	-3,753	-2,009	-1,274	-0,555	0,341	0,739	0,819	0,849	0,855	0,864	0,867	0,869	0,872
-2,2	-3,705	-2,006	-1,284	-0,574	0,330	0,752	0,844	0,881	0,888	0,900	0,905	0,907	0,910
-2,1	-3,656	-2,001	-1,294	-0,592	0,319	0,765	0,869	0,914	0,923	0,939	0,946	0,949	0,953
-2,0	-3,605	-1,996	-1,302	-0,609	0,307	0,777	0,895	0,948	0,959	0,980	0,990	0,995	1,000
-1,9	-3,553	-1,989	-1,310	-0,620	0,294	0,788	0,920	0,983	0,996	1,023	1,037	1,044	1,062
-1,8	-3,499	-1,981	-1,318	-0,643	0,282	0,799	0,945	1,020	1,035	1,069	1,087	1,097	1,130
-1,7	-3,444	-1,972	-1,324	-0,660	0,268	0,808	0,970	1,058	1,075	1,116	1,140	1,155	1,203
-1,6	-3,388	-1,962	-1,329	-0,675	0,254	0,817	0,994	1,096	1,116	1,166	1,197	1,216	1,280
-1,5	-3,330	-1,951	-1,333	-0,690	0,240	0,825	1,018	1,134	1,157	1,217	1,256	1,282	1,370
-1,4	-3,271	-1,938	-1,337	-0,705	0,225	0,832	1,041	1,172	1,198	1,270	1,318	1,351	1,465
-1,3	-3,211	-1,925	-1,339	-0,719	0,210	0,838	1,064	1,211	1,240	1,324	1,383	1,424	1,543
-1,2	-3,149	-1,910	-1,340	-0,732	0,195	0,844	1,086	1,249	1,282	1,379	1,449	1,501	1,625
-1,1	-3,087	-1,894	-1,341	-0,745	0,180	0,848	1,107	1,288	1,324	1,435	1,518	1,581	1,711
-1,0	-3,022	-1,877	-1,340	-0,758	0,164	0,852	1,128	1,326	1,366	1,492	1,588	1,664	1,800
-0,9	-2,957	-1,858	-1,339	-0,769	0,148	0,854	1,147	1,364	1,407	1,549	1,660	1,749	1,910
-0,8	-2,891	-1,839	-1,336	-0,780	0,132	0,856	1,166	1,401	1,448	1,606	1,733	1,837	2,035
-0,7	-2,824	-1,819	-1,333	-0,790	0,116	0,857	1,183	1,404	1,448	1,663	1,806	1,926	2,150
-0,6	-2,755	-1,797	-1,328	-0,800	0,099	0,857	1,200	1,473	1,528	1,720	1,880	2,016	2,275
-0,5	-2,686	-1,774	-1,323	-0,808	0,083	0,856	1,216	1,509	1,567	1,777	1,955	2,108	2,400
-0,4	-2,615	-1,750	-1,317	-0,816	0,066	0,855	1,231	1,544	1,606	1,834	2,029	2,201	2,540
-0,3	-2,544	-1,726	-1,309	-0,824	0,050	0,853	1,245	1,577	1,643	1,890	2,104	2,294	2,675
-0,2	-2,472	-1,700	-1,301	-0,830	0,033	0,850	1,258	1,610	1,680	1,945	2,178	2,388	2,810
-0,1	-2,400	-1,673	-1,292	-0,836	0,017	0,846	1,270	1,642	1,716	2,000	2,252	2,482	3,950
0,0	-2,326	-1,645	-1,282	-0,842	0,000	0,842	1,282	1,673	1,751	2,054	2,326	2,576	3,090
0,1	-2,252	-1,616	-1,270	-0,846	-0,017	0,836	1,292	1,703	1,785	2,107	2,400	2,670	3,235
0,2	-2,178	-1,586	-1,258	-0,850	-0,033	0,830	1,301	1,732	1,818	2,159	2,472	2,763	3,380
0,3	-2,104	-1,555	-1,245	-0,853	-0,050	0,824	1,309	1,759	1,849	2,211	2,544	2,856	3,525
0,4	-2,029	-1,524	-1,231	-0,855	-0,066	0,816	1,317	1,786	1,880	2,261	2,515	2,949	3,670
0,5	-1,955	-1,491	-1,216	-0,856	-0,083	0,808	1,323	1,812	1,910	2,311	2,686	3,041	3,815
0,6	-1,880	-1,458	-1,200	-0,857	-0,099	0,800	1,328	1,837	1,939	2,359	2,755	3,132	3,960
0,7	-1,806	-1,423	-1,183	-0,857	-0,116	0,790	1,333	1,861	1,967	2,407	2,824	3,232	4,105
0,8	-1,733	-1,388	-1,166	-0,856	-0,132	0,780	1,336	1,884	1,993	2,453	2,891	3,312	4,250
0,9	-1,660	-1,353	-1,147	-0,854	-0,148	0,769	1,339	1,905	2,018	2,498	2,957	3,401	4,395
1,0	-1,588	-1,317	-1,128	-0,852	-0,164	0,758	1,340	1,926	2,043	2,542	3,022	3,489	4,540
1,1	-1,518	-1,280	-1,107	-0,848	-0,180	0,745	1,341	1,945	2,066	2,585	3,087	3,575	4,680
1,2	-1,449	-1,243	-1,086	-0,844	-0,195	0,732	1,340	1,963	2,087	2,626	3,149	3,661	4,820
1,3	-1,383	-1,206	-1,064	-0,838	-0,210	0,719	1,339	1,980	2,108	2,666	3,211	3,745	4,966
1,4	-1,318	-1,168	-1,041	-0,832	-0,225	0,705	1,337	1,996	2,128	2,706	3,271	3,828	5,110
1,5	-1,256	-1,131	-1,018	-0,825	-0,240	0,690	1,333	2,011	2,146	2,743	3,330	3,910	5,252
1,6	-1,197	-1,093	-0,994	-0,817	-0,254	0,675	1,329	2,024	2,163	2,780	3,388	3,990	5,390
1,7	-1,140	-1,056	-0,970	-0,808	-0,268	0,660	1,324	2,037	2,179	2,815	3,444	4,069	5,526
1,8	-1,087	-1,020	-0,945	-0,799	-0,282	0,643	1,318	2,047	2,193	2,848	3,499	4,147	5,660
1,9	-1,037	-0,984	-0,920	-0,788	-0,294	0,627	1,310	2,058	2,207	2,881	3,553	4,223	5,736
2,0	-0,990	-0,949	-0,895	-0,777	-0,307	0,609	1,302	2,066	2,219	2,912	3,605	4,398	5,910
2,1	-0,946	-0,914	-0,869	-0,765	-0,319	0,592	1,294	2,074	2,230	2,942	3,656	4,372	5,746
2,2	-0,905	-0,882	-0,844	-0,752	-0,330	0,574	1,284	2,081	2,240	2,970	3,705	4,444	6,200
2,3	-0,867	-0,850	-0,819	-0,739	-0,341	0,555	1,274	2,086	2,248	2,997	3,753	4,515	6,337
2,4	-0,832	-0,819	-0,795	-0,725	-0,351	0,537	1,262	2,090	2,256	3,023	3,800	4,584	6,469
2,5	-0,799	-0,790	-0,771	-0,711	-0,360	0,518	1,250	2,093	2,262	3,048	3,845	4,652	6,600
2,6	-0,769	-0,762	-0,747	-0,696	-0,368	0,499	1,238	2,096	2,267	3,071	3,889	4,718	6,735
2,7	-0,740	-0,736	-0,724	-0,681	-0,376	0,479	1,224	2,097	2,272	3,093	3,932	4,783	6,868
2,8	-0,714	-0,711	-0,702	-0,666	-0,384	0,460	1,210	2,098	2,275	3,114	3,973	4,847	6,999
2,9	-0,690	-0,688	-0,681	-0,651	-0,390	0,440	1,195	2,097	2,277	3,134	4,013	4,909	7,125
3,0	-0,667	-0,665	-0,660	-0,636	-0,396	0,420	1,180	2,095	2,278	3,152	4,015	4,970	7,250

Sumber: Soetopo, 2011:80

2.2.4. Uji kesesuaian distribusi

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

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

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.

2.2.4.1. Uji Chi Kuadrat (*Chi Square*)

Uji Chi Kuadrat dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi peluang yang telah dipilih dapat mewakili dari distribusi statistik sampel data yang dianalisis. Adapun langkah-langkah dari uji adalah sebagai berikut (Soewarno, 1995:194):

$$Xh^2 = \sum_{i=1}^G \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2-13)$$

dengan:

X_h^2 = parameter chi kuadrat hitung

G = jumlah sub - kelompok

E_i = jumlah nilai teoritis pada sub kelompok ke i

O_i = jumlah nilai pengamatan pada sub kelompok ke i

Nilai Xh^2 yang terhitung ini harus lebih kecil dari harga Xh^2 tabel, yang didapat dari (tabel 2.4).

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

Derajat kebebasan ini secara umum dapat dihitung dengan:

$$d_k = k - (P + 1) \quad (2-14)$$

dengan:

d_k = derajat kebebasan

k = banyaknya kelas

P = banyaknya keterikatan atau sama dengan banyaknya parameter

h. Harga X^2 hit dibandingkan dengan harga X^2_{cr} dari tabel Chi kuadrat dengan d_k 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 2.4 Nilai Kritis *Chi-Square* (X^2 cr)

dk	(derajat kepercayaan)							
	$t_{0,995}$	$t_{0,99}$	$t_{0,975}$	$t_{0,95}$	$t_{0,05}$	$t_{0,025}$	$t_{0,01}$	$t_{0,005}$
1	0,039	0,016	0,098	0,393	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,100	0,201	0,506	0,103	5,991	0,738	9,210	10,597
3	0,717	0,115	0,216	0,352	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	11,070	12,832	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,646	2,180	2,733	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,603	3,053	3,816	4,575	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,074	3,571	4,404	5,226	21,026	23,337	26,217	28,300
13	3,565	4,107	5,009	5,892	22,362	24,736	27,688	29,819
14	4,075	4,660	5,629	6,571	23,685	26,119	29,141	31,319
15	4,601	5,229	6,262	7,261	24,996	27,488	30,578	32,801
16	5,142	5,812	6,908	7,962	26,296	28,845	32,000	34,267
17	5,697	6,408	7,564	8,672	27,587	30,191	33,409	35,718
18	6,265	7,015	8,231	9,390	28,869	31,526	34,805	37,156
19	6,884	7,633	8,907	10,117	30,144	32,852	36,191	38,582
20	7,434	8,260	9,591	10,851	31,410	34,170	37,566	39,997
21	8,034	8,897	10,283	11,591	32,671	35,479	38,932	41,401
22	8,643	9,542	10,982	12,338	33,924	36,781	40,289	42,796
23	9,260	10,196	11,689	13,091	36,172	38,076	41,638	44,181
24	9,886	10,856	12,401	13,848	36,415	39,364	42,980	45,558
25	10,520	11,524	13,120	14,611	37,652	40,646	44,314	46,958
26	11,160	12,198	13,844	15,379	38,885	41,923	45,642	48,290
27	11,808	12,879	14,573	16,151	40,113	43,194	46,963	49,645
28	12,461	13,565	15,308	16,928	41,337	44,461	48,278	50,993
29	13,121	14,256	16,047	17,708	42,557	45,722	49,588	52,336
30	13,787	14,953	16,791	18,493	43,773	46,979	50,892	53,672

Sumber: Montarich, 2009:77

2.2.4.2. Uji Smirnov-Kolmogorov

Uji kesesuaian Smirnov-Kolmogorov, sering juga disebut uji kecocokan non parametik (*non parametric test*), karena pengujiannya tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu (Soewarno, 1995:198). Prosedurnya adalah sebagai berikut:

1. Mengurutkan data yang ada dari kecil ke besar.
2. Menghitung besarnya probabilitas untuk lebih kecil dari data yang ada (P_t).

Apabila diketahui P_r (probabilitas terjadi), maka:

$$P_t = 100\% - P_r \quad (2-15)$$

3. Menghitung besarnya peluang data yang ada dengan menggunakan metode Weibull, maka digunakan persamaan:

$$P_w = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (2-16)$$

4. Menghitung selisih nilai D yang dinyatakan dengan persamaan:

$$D = \max \frac{|P_t - P_w|}{100} \quad (2-17)$$

Apabila besarnya nilai D yang diperoleh lebih kecil dari D_0 (dari tabel) maka hipotesa yang dilakukan diterima (memenuhi syarat distribusi yang diuji), jika nilai D yang diperoleh lebih besar dari D_0 maka hipotesa yang dilakukan tidak diterima (tidak memenuhi syarat distribusi yang diuji).

Tabel 2.5 Nilai Kritis D_0 untuk Uji *Smirnov-Kolmogorov*

ukuran sampel n	Derajat Kepercayaan (α) (%)				
	20	15	10	5	1
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,829
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,734
5	0,446	0,474	0,510	0,563	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,404	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,409	0,486
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,293	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,391
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,380
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,370
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,361
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,352
rumus asimtotik	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,14}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

Sumber: Montarcih, 2009:73

2.3. Distribusi 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. Untuk menentukan

debit banjir rencana (*design flood*), perlu didapatkan harga suatu intensitas curah hujan. Intensitas curah hujan adalah ketinggian curah hujan yang terjadi pada suatu kurun waktu di mana air tersebut berkonsentrasi. Analisis intensitas curah hujan ini dapat diproses dari data curah hujan yang telah terjadi pada masa lampau.

Untuk menghitung intensitas curah hujan dapat digunakan beberapa metode antara lain yaitu :

1. Menurut Dr. Mononobe (1975)
2. Menurut Sherman
3. Menurut Talbot
4. Menurut Ishiguro

Dari keempat metode tersebut pada perencanaan hidrolis PLTMH Tumbang Atei menggunakan metode Dr. Mononobe karena $t > 24$ jam dan memperhitungkan curah hujan maksimum selama 24 jam. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$I = \frac{R_{24}}{t} \cdot \left[\frac{t}{24} \right]^{2/3} \quad (2-18)$$

dengan:

I = intensitas curah hujan untuk lama hujan t (mm/jam)

t = lamanya curah hujan (jam)

R_{24} = curah hujan maksimum selama 24 jam (mm)

2.4. Koefisien Pengaliran

Koefisien pengaliran (C) adalah perbandingan antara jumlah air yang mengalir di suatu daerah akibat turunnya hujan dengan jumlah air hujan yang turun di daerah tersebut. Besarnya koefisien pengaliran tergantung pada daerah pengaliran dan karakteristik hujan pada suatu daerah yang meliputi: keadaan hujan, luas dan bentuk daerah pengaliran, kemiringan daerah pengaliran, daya infiltrasi dan perkolasi tanah, kebasahan tanah, suhu, udara, angin, evaporasi dan tata guna lahan.

Tabel 2.6 Harga Koefisien (oleh Dr. Mononobe) (Koefisien Pengaliran)

Kondisi Daerah Pengaliran dan Sungai	Nilai C
Daerah pegunungan yang curam	0,75 - 0,90
Daerah pegunungan tersier	0,70 - 0,80
Tanah bergelombang dan hutan	0,50 - 0,75
Tanah dataran yang ditanami	0,45 - 0,60
Persawahan yang diairi	0,70 - 0,80
Sungai di daerah pegunungan	0,75 - 0,85
Sungai kecil di daratan	0,45 - 0,75
Sungai besar yang lebih dari setengah daerah pengalirannya terdiri dari dataran	0,50 - 0,75

Sumber: Sosrodarsono, 1989:145

2.5. Aliran Dasar

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

Aliran dasar dapat diperoleh dengan persamaan debit aliran dasar (Q_B), dengan variabel luas DAS dan kerapatan jaringan sungai, dengan persamaan berikut (Harto, 1993:168):

$$Q_B = 0,4751 \times A^{0,6444} \times D^{0,9430} \quad (2-19)$$

$$D = L_N / A \quad (2-20)$$

dengan:

Q_B = aliran dasar

A = luas DAS

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

L_N = panjang sungai semua tingkat

2.6. Hidrograf Satuan

Hidrograf satuan suatu DAS adalah suatu limpasan langsung yang diakibatkan oleh satu satuan hujan efektif, yang terbagi rata dalam waktu dan ruang. Dalam studi ini metode penentuan debit banjir rencana akan dilakukan dengan metode hidrograf satuan sintetik Nakayasu. Persamaan umum hidrograf satuan sintetik adalah sebagai berikut (Soemarto, 1987:168):

$$Q_p = \left(\frac{C \times A \times R_0}{3,6 (0,3 T_p + T_{0,3})} \right) \quad (2-21)$$

dengan:

Q_p = Q_{maks} , merupakan debit puncak banjir (m^3/dt)

A = luas DAS (sampai ke *outlet*) (km^2)

R_o = hujan satuan (mm)

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

$T_{0,3}$ = waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari debit puncak sampai menjadi 30% dari debit puncak (jam)

Bagian lengkung naik hidrograf satuan mempunyai persamaan:

$$Q_a = Q_p \left(\frac{t}{T_p} \right)^{2,4} \quad (2-22)$$

dengan:

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

t = waktu (jam)

Parameter-parameter perhitungan yang diperlukan adalah sebagai berikut:

1. Karakteristik DAS, meliputi:

- Luas daerah aliran sungai (A)
- Panjang sungai utama (L)
- Koefisien karakteristik fisik DAS ()
 - = 2 \longrightarrow pada daerah pengaliran biasa
 - = 1,5 \longrightarrow pada bagian naik hidrograf lambat, dan turun cepat
 - = 3 \longrightarrow pada bagian naik hidrograf cepat, turun lambat
- Hujan netto satuan (R_e)

2. Parameter-parameter hidrograf

- Waktu konsentrasi (T_g)

dengan $L > 15$ km, maka $T_g = 0,4 \times 0,058 L$

$$T_g = 0,4 \times 0,058 L \quad (2-23)$$

dengan $L < 15$ km, maka $T_g = 0,21 \times L^{0,70}$

$$T_g = 0,21 \times L^{0,70} \quad (2-24)$$

- Satuan waktu hujan (T_r)

$$T_r = 0,75 T_g \quad (2-25)$$

- Tenggang waktu (T_p)

$$T_p = T_g + 0,80 T_r \quad (2-26)$$

- Waktu penurunan debit, dari debit puncak sampai dengan menjadi 0,30 Q_{max}

$$T_{0,30} = x T_g \quad (2-27)$$

3. Durasi waktu yang diperlukan

- Waktu lengkung naik ($0 \leq t \leq T_p$)

Persamaan lengkung hidrograf unit satuan yang digunakan adalah:

$$Q_t = Q_p \times \left(\frac{t}{T_p}\right)^{2,4} \quad (2-28)$$

- Waktu lengkung turun 1 ($T_p \leq t \leq T_p + T_{0,3}$)

Persamaan lengkung hidrograf unit satuan yang digunakan adalah:

$$Q_t = Q_p \times 0,30 \left(\frac{t-T_p}{T_{0,30}}\right) \quad (2-29)$$

- Waktu lengkung turun 2 ($T_p + T_{0,3} \leq t \leq T_p + 1,5 T_{0,3}$)

Persamaan lengkung hidrograf unit satuan yang digunakan adalah:

$$Q_t = Q_p \times 0,30 \left(\frac{t-T_p+0,50 T_{0,30}}{1,50 T_{0,30}}\right) \quad (2-30)$$

- Waktu lengkung turun 3 ($t \geq T_p + 1,5 T_{0,3}$)

Persamaan lengkung hidrograf unit satuan yang digunakan adalah:

$$Q_t = Q_p \times 0,30 \left(\frac{t-T_p+1,50 T_{0,30}}{2 T_{0,30}}\right) \quad (2-31)$$

2.7. Debit Andalan

Debit andalan didefinisikan sebagai debit yang tersedia guna keperluan tertentu misalnya untuk keperluan irigasi, PLTA, air baku dan lain-lain sepanjang tahun dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan.

Besarnya debit andalan yang diambil untuk menyelesaikan optimum penggunaan air di beberapa macam pekerjaan di bidang pengairan adalah sebagai berikut:

Tabel 2.7 Prosentase Debit dan Jenis Perencanaan

No	Jenis Perencanaan	Prosentase Debit
1	Penyediaan Air Minum	99%
2	Penyediaan Air Industri	95-98%
3	Penyediaan Air Irigasi	
	a. Daerah beriklim setengah lembab	70-85%
	b. Daerah beriklim kering	80-95%
4	Pembangkit Listrik Tenaga Air	85-90%

Sumber: Soemarto, 1987:214

2.7.1. Metode F. J. Mock

Secara umum analisis debit berdasarkan data curah hujan yang sering dilakukan di Indonesia adalah menggunakan metode empiris dari Dr. F.J. Mock (1973). Prinsip metode Mock menyatakan bahwa hujan yang jatuh pada daerah tangkapan air, sebagian

akan hilang akibat evapotranspirasi, sebagian akan langsung menjadi *direct runoff*, dan sebagian lagi akan masuk ke dalam tanah atau terjadi infiltrasi. Infiltrasi ini mula-mula akan menjenuhkan permukaan tanah, kemudian terjadi perkolasi ke air tanah dan akan keluar sebagai *base flow*. (Anonim, 2009a:15)

Persamaan untuk menghitung aliran permukaan terdiri dari:

- Evapotranspirasi Terbatas (E_t)

$$E_t = E_{t0} - E \quad (2-32)$$

$$E = E_{t0} \cdot (m/20) \cdot (18-h) \quad (2-33)$$

- Keseimbangan Air

$$s = P - E_t \quad (2-34)$$

Aliran Permukaan

Jika: $s \geq E_t$ maka aliran permukaan = 0

$$s < E_t \text{ maka aliran permukaan} = PF \times P \quad (2-35)$$

Kandungan Air Tanah

Jika: $SS = 0$ maka kapasitas kelembaban air tanah (SMC)

$$SS > 0 \text{ maka kapasitas kelembaban air tanah} = SS \quad (2-36)$$

$$WS = s - SS \quad (2-37)$$

- Aliran dan Simpanan Air Tanah

$$I = i \cdot WS \quad (2-38)$$

$$V_n = [0,5 (I+k) \times I] + [k \times V_{(n-1)}] \quad (2-39)$$

$$V_n = V_n - V_{(n-1)} \quad (2-40)$$

$$BF = I - V_n \quad (2-41)$$

$$DR = WS + \text{Aliran Permukaan} - I \quad (2-42)$$

$$T_{Ro} = BF + DR \quad (2-43)$$

- Debit Aliran Sungai

$$Q = \frac{A \cdot T_{Ro}}{10 \text{ hari (detik)}} \quad (2-44)$$

dengan:

E_t = evapotranspirasi terbatas (mm)

E_{t0} = evapotranspirasi potensial (mm)

E = perbedaan antara evapotranspirasi potensial dan evapotranspirasi terbatas (mm)

d = jumlah hari kering/tidak hujan (hari)

h = jumlah hari hujan (hari)

s = keseimbangan air di permukaan tanah (mm)

- P = hujan (mm)
 PF = faktor aliran hujan lebat (%)
 SS = kandungan air tanah (mm)
 SMC = kelembaban tanah, diambil antara 50-250 mm (mm)
 WS = kelebihan air (mm)
 I = infiltrasi (mm)
 i = koefisien infiltrasi (diambil 0,2-0,5)
 k = faktor resesi aliran air tanah (diambil 0,4-0,7)
 V_n = perubahan volume air tanah bulan ke-n
 $V_{(n-1)}$ = volume air tanah bulan bulan ke (n-1)
 V_n = perubahan volume (mm)
 BF = aliran air tanah (mm)
 DR = aliran langsung (mm)
 T_{Ro} = total limpasan (*runoff*)
 Q = debit aliran permukaan (m^3/dt)
 A = luas DAS (km^2)

2.7.2. Kurva durasi aliran (*Flow Duration Curve*)

Lengkung durasi aliran (*flow duration curve*) adalah suatu grafik yang memperlihatkan debit sungai dan selama beberapa waktu tertentu dalam satu tahun. Pada gambar berikut jelas bahwa debit minimum terdapat selama setahun penuh, sedangkan debit maksimum hanya terdapat selama beberapa jam. Lengkung durasi aliran digambarkan dari data-data debit, sekurang-kurangnya 10 tahun.

Tabel 2.8 *Hidrologic Condition Classes*

<i>Flow Duration Interval</i>	<i>Hydrologic Condition Class</i>
0 - 10%	<i>High flows</i>
10 - 40%	<i>Moist Conditions</i>
40 - 60%	<i>Mid-Range Conditions</i>
60 - 90%	<i>Dry Conditions</i>
90 - 100%	<i>Low Flows</i>

Sumber: Anonim, 2007:23

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

$$\frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} \quad (2-45)$$

$$= \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (2-46)$$

$\frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n}$ = debit rerata dalam 1 periode

P_w = nilai probabilitas

m = data ke-

n = jumlah data

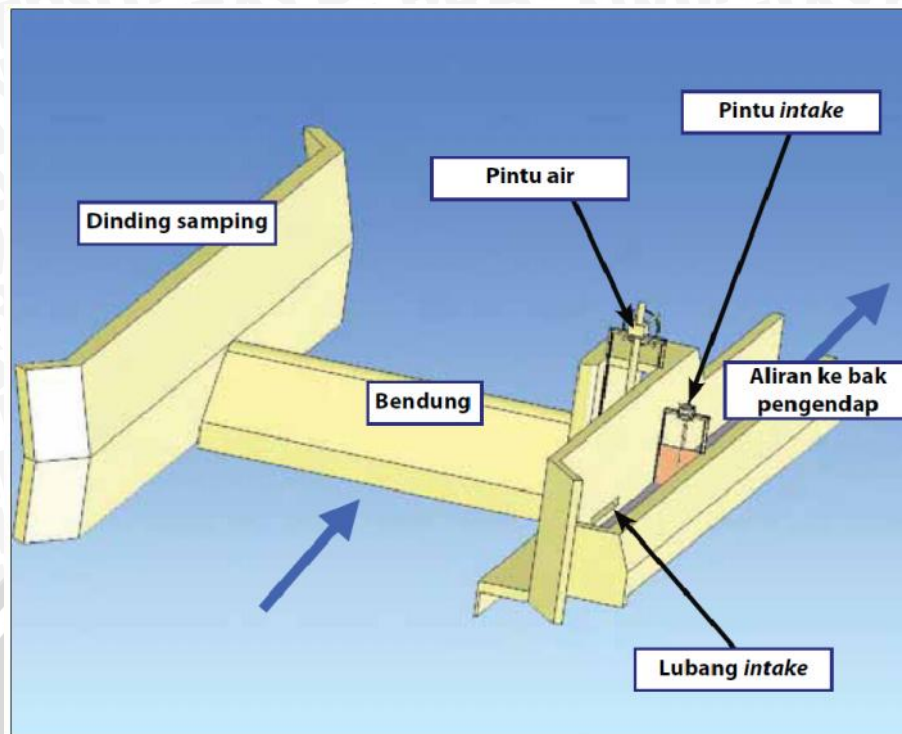
2.8. Bangunan Hantar

Bangunan hantar adalah sebuah saluran pembawa yang menghantarkan debit kebutuhan yang akan dibangkitkan oleh turbin. Dalam perencanaan PLTMH Tumbang Atei bangunan hantar dibagi menjadi:

- ✓ Bangunan pengambilan (*intake*)
- ✓ Bak pengendap
- ✓ Saluran pembawa (*waterway*)
- ✓ Bak penenang (*forebay*)
- ✓ Pipa pesat (*penstock*)
- ✓ Saluran pembuang (*tailrace*)

2.8.1. Bangunan pengambilan (*Intake*)

Bangunan pengambilan adalah bangunan struktur hidrolika yang berada di hulu yang berfungsi untuk mengontrol masuknya air, mencegah masuknya sedimen, dan debris sebelum air dialirkan untuk kebutuhan irigasi atau mikrohidro. *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 dan dibuat sedekat mungkin dengan pembilas dan as bendung. 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.



Gambar 2.1 Bendung dan *Intake*
 Sumber: Jorde, 2009:45

2.8.1.1. Pintu sorong (*Sluice Gate*)

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

Dipakai dengan tinggi maksimum sampai 3 meter dan lebar tidak lebih dari 3 meter. Pintu tipe ini hanya digunakan untuk bukaan kecil. Agar mampu mengatasi tinggi muka air yang berubah-ubah di sungai, pengambilan harus direncanakan sebagai pintu aliran bawah. Rumus debit yang dapat dipakai adalah (Anonim/KP-02, 1986:110):

$$Q = K \cdot \mu \cdot a \cdot B \sqrt{2 g h_1} \quad (2-47)$$

dimana:

Q = debit (m^3/dt)

K = faktor untuk aliran tenggelam (**Gambar 2.2**)

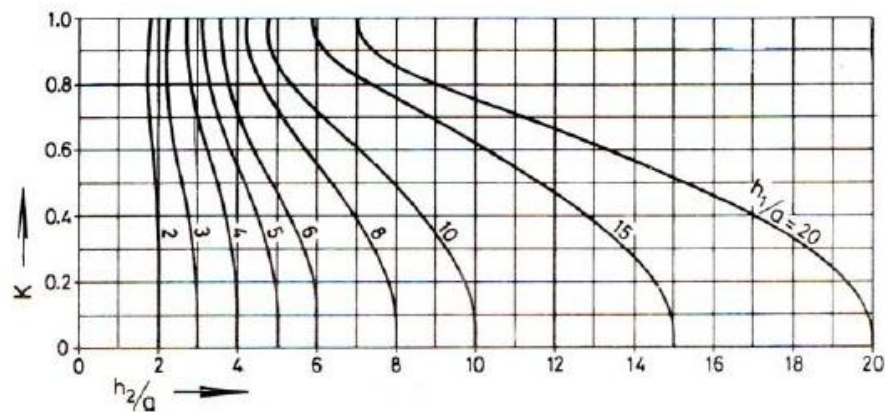
μ = koefisien bukaan debit (**Gambar 2.3**)

a = bukaan pintu (m)

B = lebar pintu (m)

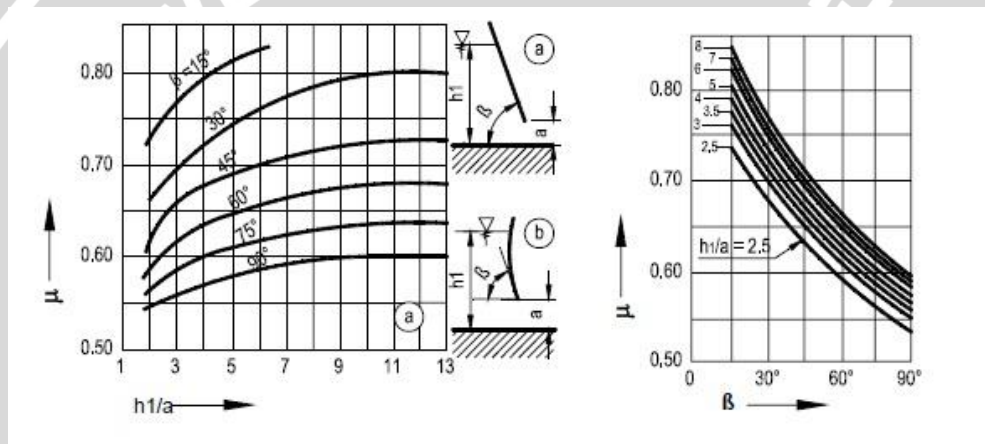
g = percepatan gravitasi (m/dt^2)

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



Gambar 2.2 Koefisien K untuk debit tenggelam

Sumber: Anonim/KP-04, 1986:57



Gambar 2.3 Koefisien debit μ untuk permukaan pintu datar atau lengkung

Sumber: Anonim/KP-04, 1986:57

2.8.2. Bak pengendap

Bak pengendap merupakan pembesaran potongan melintang saluran sampai panjang tertentu untuk mengurangi kecepatan aliran dan memberi kesempatan pada sedimen untuk mengendap. Bak pengendap harus memiliki struktur yang mampu mengendapkan dan membilas sedimen dengan ukuran minimal yang dapat menimbulkan efek buruk pada turbin dan juga dilengkapi *spillway* untuk mencegah masuknya air berlebih ke saluran pembawa. Untuk menampung endapan sedimen ini, dasar bagian saluran tersebut diperdalam atau diperlebar. Tampungan ini dibersihkan tiap jangka waktu tertentu (kurang lebih seminggu sampai setengah bulan) dengan cara membilas sedimennya kembali ke sungai dengan aliran terkonsentrasi yang berkecepatan tinggi (Anonim/KP-02, 1986:162).

Setiap bagian bak pengendap memiliki fungsi berikut:

1. Bagian Penghubung

Bagian ini menghubungkan antara *intake* dengan bak pengendap, panjang saluran penghubung harus diminimalkan.

2. Bagian Transisi

Bagian ini mengatur aliran dari saluran penghubung untuk mencegah atau mengurangi terjadinya pusaran air, aliran turbulen, dan mengurangi kecepatan aliran pada bak penenang sehingga didapat kecepatan yang telah ditentukan.

3. Bagian Pengendapan

Bagian ini berfungsi untuk mengendapkan sedimen/ukuran butiran 0,5-1 mm. Ukuran dasar bak pengendap diantaranya adalah lebar bak (B), tinggi air dalam bak (h), kecepatan air dalam bak (v) dan panjang bak (L).

$$Q = B \cdot h \cdot V \quad (2-48)$$

$$L = V \times t \quad (2-49)$$

$$t = \frac{h}{\omega} \quad (2-50)$$

$$V_c = a \sqrt{d} \quad (2-51)$$

dengan:

Q = debit desain (m^3/dt)

B = lebar bak pengendap (m)

h = tinggi muka air dalam bak pengendap (m), umumnya 1,5-4,0 m

L = panjang bak pengendap (m)

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

= kecepatan turun dari butir tertentu

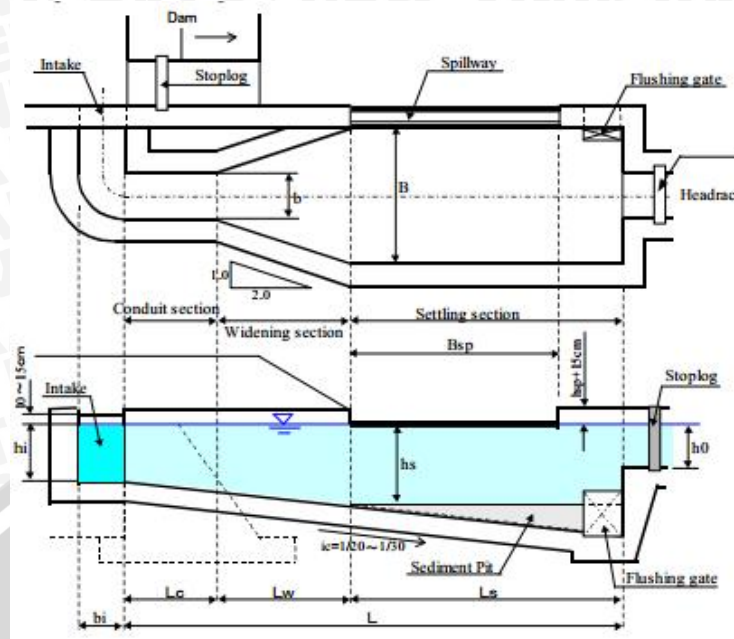
= 7 cm/dt untuk butiran dengan diameter 0,5 mm

V = kecepatan dalam bak (m/dt), kecepatan ini tidak diijinkan melebihi kecepatan kritis (V_c)

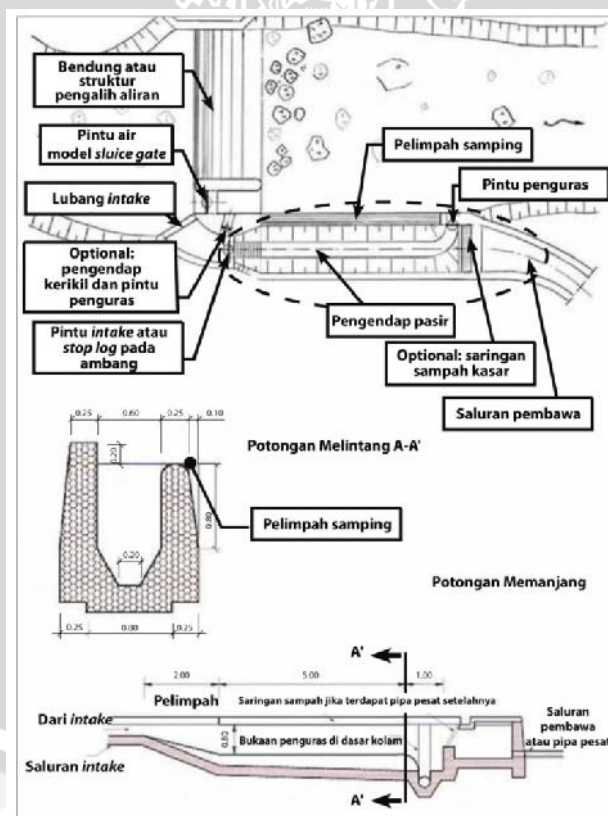
V_c = kecepatan kritis (m/dt)

d = diameter butir (mm)

a = 44 apabila $1 \text{ mm} > d > 0,1 \text{ mm}$



Gambar 2.4 Dimensi bak pengendap
 Sumber: Anonim, 2009d:4-14



Gambar 2.5 Rincian konstruksi dari bak pengendap (Sand trap)
 Sumber: Jorde, 2009:53

2.8.3. Saluran pembawa

Saluran hantar dalam perencanaan mikrohidro biasanya juga disebut dengan *waterway*. *Waterway* adalah saluran penghubung antara saluran pengambilan (*intake*)

menuju bak penenang (*forebay*). Dalam perencanaan *waterway* biasanya mengikuti suatu kontur dalam perencanaannya.

2.8.3.1. Perhitungan kecepatan

Debit yang melalui suatu saluran tenaga dihitung sebagai berikut:

$$Q = V \times A \quad (2-52)$$

Kecepatan diperoleh dengan formula Manning – Strickler:

$$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad (2-53)$$

dengan:

Q = debit (m³/dt)

V = kecepatan rata-rata (m/dt)

R = jari-jari hidrolik (m)

S = kemiringan dasar saluran

n = koefisien kekasaran

Tabel 2.9 Koefisien Manning

No	Bahan Saluran	n
1	Plastik, kaca, karet halus	0,009
2	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, 1994:245

Kecepatan minimum dari aliran ditetapkan pada saluran, sehingga lumpur yang terbawa aliran dapat ditinggal di dasar saluran. Beberapa kecepatan rata-rata untuk mencegah pendekatan adalah (Dandekar, 1991:363):

$V > 0,3$ m/dt dalam kasus air asin

$V < 0,3-0,5$ mm/dt dalam kasus air yang membawa pasir bagus

2.8.3.2. Dimensi saluran

Suatu saluran yang penampang melintangnya dibuat tidak berubah-ubah dan kemiringan dasarnya tetap, disebut saluran prisma (*prismatic channel*). Bila sebaliknya, disebut saluran tak prisma (*nonprismatic channel*) (Chow, 1997:18).

Unsur-unsur geometrik adalah sifat-sifat suatu penampang saluran yang dapat diuraikan seluruhnya berdasarkan geometri penampang dan kedalaman aliran. Definisi beberapa unsur geometrik dasar yang penting adalah sebagai berikut:

- a. Kedalaman aliran (h) adalah jarak vertikal titik terendah pada suatu penampang saluran sampai ke permukaan bebas.
- b. Taraf adalah elevasi atau jarak vertikal dari permukaan bebas di atas suatu bidang persamaan. Bila titik terendah dari penampang saluran dipilih sebagai bidang persamaan, taraf ini sama dengan kedalaman aliran.
- c. Lebar puncak (T) adalah lebar penampang saluran pada permukaan bebas.
- d. Luas basah (A) adalah luas penampang melintang aliran yang tegak lurus arah aliran.
- e. Keliling basah (P) adalah panjang garis perpotongan dari permukaan basah saluran dengan bidang penampang melintang yang tegak lurus arah aliran.
- f. Jari-jari hidrolis (R) adalah rasio luas basah dengan keliling basah.

$$R = \frac{A}{P} \quad (2-54)$$

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

$$D = \frac{A}{T} \quad (2-55)$$

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

2.8.3.3. Kemiringan dasar saluran

Kemiringan dasar pada saluran pembawa harus dibuat selandai mungkin untuk mengurangi kehilangan energi (perbedaan tinggi muka air di *intake* dan *forebay*), tapi hal ini akan mengurangi kecepatan dan mengakibatkan dimensi yang lebih besar. Sebaliknya, *slope* yang cenderung curam akan menyebabkan kecepatan yang lebih tinggi dan dimensi yang lebih kecil namun kehilangan energinya besar. Umumnya, pada skala mikrohidro, *slope* saluran pembawa didesain antara 1/500 – 1/1500 (Anonim 2009d:5-21).

2.8.3.4. Tinggi jagaan

Jagaan suatu saluran adalah jarak vertikal dari puncak saluran ke permukaan air pada kondisi rancang. Jarak ini harus cukup untuk mencegah gelombang atau kenaikan muka air yang melimpah ke tepi (Chow, 1997:145).

Tinggi jagaan berguna untuk menaikkan muka air dan mencegah kerusakan tanggul saluran. Kenaikan muka air sampai di atas tinggi jagaan yang telah direncanakan dapat disebabkan oleh penutupan pintu secara tiba-tiba di daerah hilir. Tinggi jagaan minimum pada saluran dikaitkan dengan debit rencana saluran dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.10 Tinggi Jagaan untuk Saluran Pasangan

Debit (m ³ /dt)	Tinggi jagaan (m)
< 0,5	0,2
0,5 - 0,15	0,2
1,5 - 5,0	0,25
5,0 - 10,0	0,3
10,0 - 15,0	0,4
> 15,0	0,5

Sumber: Anonim/KP-03, 1986:65

2.8.4. Bak penenang (*Forebay*)

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*).

1. Fungsi bak penenang

Fungsi bak penenang secara umum dibagi menjadi 2, yaitu:

- Untuk mengatur perbedaan debit di *penstock* dan fluktuasi muka air di saluran pembawa.
- Untuk menggelontor sampah (tanah, pasir, batu apung, dll) dalam aliran.

2. Kapasitas bak penenang

Kapasitas bak penenang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V_{sc} = A_{sc} \times d_{sc} \quad (2-56)$$

$$V_{sc} = B \times L \times d_{sc} \quad (2-57)$$

dengan:

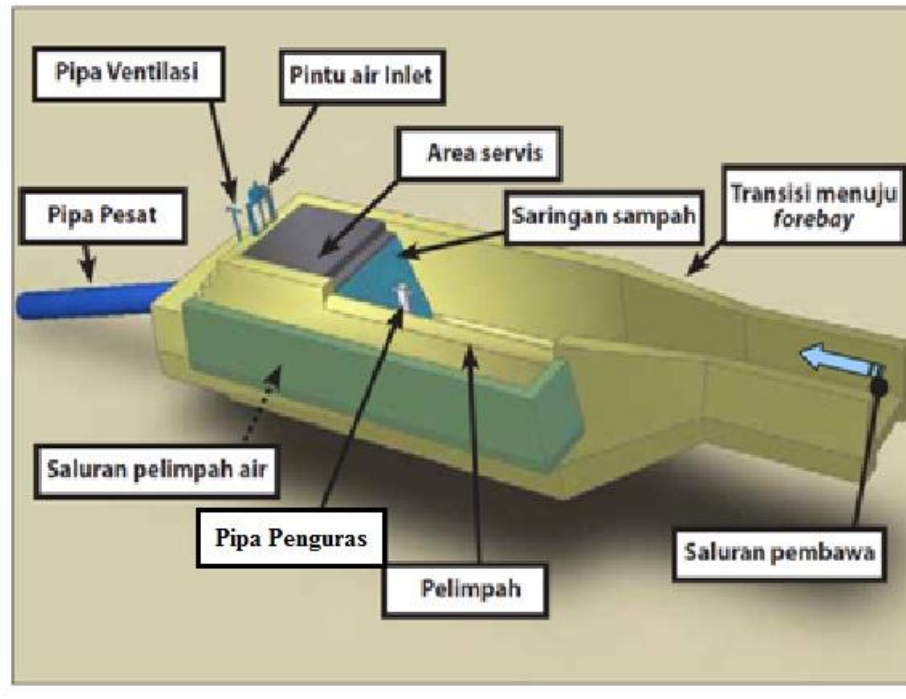
V_{sc} = volume bak penenang (m), $V_{sc} = Qd \times 10 dt$

A_{sc} = luas bak penenang (m²)

B = lebar bak penenang (m)

L = panjang bak penenang (m)

dsc = selisih antara tinggi muka air normal pada debit desain (NWL) dengan tinggi muka air kritis pada bak penenang (h_c)



Gambar 2.6 Bak penenang (*Forebay*)

Sumber: Jorde, 2009:71

2.8.5. Pipa pesat (*Penstock*)

Pipa pesat (*penstock*) merupakan pipa yang direncanakan untuk dapat menahan tekanan tinggi yang berfungsi untuk mengalirkan air dari kolam penampungan menuju turbin. Untuk mendapatkan diameter pipa pesat dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$d = 2,69 \times \left(\frac{n^2 \times Q^2 \times L}{H} \right)^{0,1875} \quad (2-58)$$

dengan:

d = diameter pipa pesat (mm)

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

Q = debit pembangkit (m^3/dt)

L = panjang pipa pesat (m)

H = tinggi jatuh total/kotor (m)

Sedangkan untuk menentukan tebal pipa pesat digunakan persamaan *Cylinder formulae* (Varshney, 1977:411):

$$t = \frac{P \times r \times 1000}{q} \quad (2-59)$$

$$P = x g x h \quad (2-60)$$

dengan:

t = tebal pipa pesat (m)

P = gaya (ton/m²)

r = jari-jari pipa pesat (m)

q = tegangan material pipa pesat yang digunakan (ton/m²)

= massa jenis air (ton/m³)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²)

H = tinggi jatuh total/kotor (m)

Untuk fenomena vortex dianalisa berdasarkan perencanaan inlet pipa pesat terkait dengan kedalaman minimum operasi (LWL). Kedalaman tenggelam harus lebih besar dari nilai “s” ($Ht > s$) dimana s dihitung dengan persamaan:

$$Ht = LWL - \text{elv. dasar pipa} - \text{diameter pipa} \quad (2-61)$$

$$v = (1,5 - 2,0) v \left(\frac{s+b}{s} \right) \quad (2-62)$$

- Metode Gordon

$$Ht = c V \sqrt{D}$$

- Metode Knauss

$$Ht = D \left(1 + 2,3 \frac{v}{\sqrt{gD}} \right)$$

- Metode Rohan

$$Ht = 1,474 V^{0,48} D^{0,76}$$

dengan:

C = 0,7245 untuk inlet asimetris dan 0,5434 untuk inlet simetris

V = kecepatan air dalam bak (m/dt)

D = diameter pipa pesat (m)

g = gaya gravitasi (9,81)

Pencegahan masuknya udara juga dapat dilakukan dengan meniadakan lubang yang terlalu dalam dan tanjakan hidrolis yang curam, dengan cara menghilangkan kondisi susunan yang memungkinkan terjadinya lonjakan hidrolis atau pusaran.

2.8.6. Saluran pembuang (*Tail Race*)

Saluran pembuang (*tailrace*) adalah sebuah saluran yang dilalui oleh air yang keluar dari turbin air, kemudian kembali ke sungai. Tinggi TWL tergantung dari debit air yang keluar dari turbin, jenis penampang serta dimensi penampang saluran pembuang. Saluran ini bersatu dengan rumah pembangkit dan aliran sungai. Dalam perhitungan saluran pembuang, tinggi air pada saat terjadi banjir ($Q_{50} - Q_{100}$) harus diperhatikan untuk keamanan rumah pembangkit dan saluran pembuang.

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

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

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):

$$Q = V \times A \quad (2-63)$$

$$V = \frac{1}{n} \times \frac{A^{2/3}}{P} \times S^{1/2} \quad (2-64)$$

$$hc = \left(\frac{1,1 \times Q^2}{9,8 \times b^2} \right)^{1/3} \quad (2-65)$$

dengan:

$$Q = \text{debit (m}^3/\text{dt)}$$

$$V = \text{kecepatan rata-rata (m/dt)}$$

$$R = \text{jari-jari hidrolik (m)}$$

$$P = \text{keliling basah saluran (m)}$$

$$A = \text{luas penampang saluran (m}^2\text{)}$$

$$S = \text{kemiringan dasar saluran}$$

$$n = \text{koefisien kekasaran manning}$$

$$hc = \text{tinggi muka air di saluran pembuang (m)}$$

$$b = \text{lebar saluran direncanakan (m)}$$

2.8.7. Kehilangan tinggi aliran

Persamaan umum kehilangan tinggi tekan adalah sebagai berikut (Liu, 2003:32):

$$h_l = k \times \frac{V^2}{2g} \quad (2-66)$$

dengan:

h_l = jumlah kehilangan tinggi (m)

k = nilai koefisien kehilangan tinggi

V = kecepatan aliran (m/dt)

g = percepatan gravitasi (m/dt²)

a) Kehilangan tinggi tekan akibat saringan (*trashrack*) (Sosrodarsono, 1989:244)

$$h_s = x \sin x \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3} x \frac{V^3}{2g} \quad (2-67)$$

dengan:

h_s = kehilangan tinggi energi

V = kecepatan datang (m/dt)

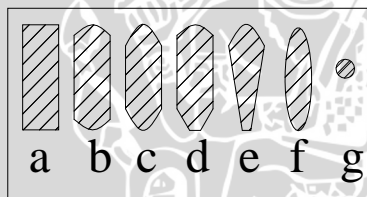
G = percepatan gravitasi (9,81 m/dt²)

= faktor bentuk profil kisi saringan

= sudut kemiringan dari horizontal dalam derajat

t = tebal jeruji (m)

b = jarak bersih antar jeruji b ($b > 50$ mm) (m)



Gambar 2.7 Profil Kisi Saringan

Sumber: Patty, 1995:40

Faktor bentuk profil kisi saringan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.11 Profil Kisi Saringan

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

Sumber: Patty, 1995:40

b) Kehilangan tinggi tekan akibat pemasukan

Kehilangan tinggi akibat pemasukan (h_p) tergantung dari pemasukannya.

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan rumus (Dake, 1985:77):

$$h_p = K x \frac{V^2}{2g} \quad (2-68)$$

dengan:

h_p = kehilangan tinggi pada pemasukan (m)

K = koefisien kecepatan (0,95-1,00)

V = kecepatan aliran (m/dt)

g = percepatan gravitasi (m/dt²)

c) Kehilangan tinggi tekan akibat belokan

Kehilangan tinggi tekan akibat belokan terdiri dari 2 macam yaitu belokan lengkung dan belokan patah, akan tetapi belokan lengkunglah yang banyak digunakan.

Untuk belokan lengkung dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$h_b = K_b \times \frac{v^2}{2g} \quad (2-69)$$

dengan:

h_b = kehilangan tinggi akibat belokan (m)

K_b = koefisien belokan

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

g = percepatan gravitasi (m/dt²)

Tabel 2.12 Nilai K pada Belokan pada Pipa

α	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
K	0,08	0,31	0,49	0,60	0,67	0,72	0,72

Sumber: Triatmojo, 2003:199

d) Kehilangan tinggi tekan akibat gesekan

Kehilangan tinggi tekan akibat gesekan meliputi gesekan sepanjang pipa pesat. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$h_g = f \times \frac{L_p}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad (2-70)$$

$$f = \frac{124,5 \times n^2}{d^{1/3}} \quad (2-71)$$

dengan:

h_g = kehilangan tinggi akibat gesekan (m)

f = koefisien pada diameter pipa pesat

L_p = panjang pipa pesat (m)

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

d = diameter dalam pipa (m)

g = percepatan gravitasi (m/dt²)

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

2.9. 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 tinggi tekan (m)

2.10. Turbin Air

Turbin air adalah turbin dengan air sebagai fluida kerja. Air yang mengalir dari tempat yang lebih tinggi menuju tempat yang lebih rendah, hal ini air memiliki energi potensial. Dalam proses aliran dalam pipa, energi potensial tersebut berangsur-angsur berubah menjadi energi mekanis, dimana air memutar roda turbin. Roda turbin dihubungkan dengan generator yang mengubah energi mekanis (gerak) menjadi energi listrik (Arismunandar, 1988:64). Berdasarkan prinsip kerjanya, turbin air dibagi menjadi kelompok yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2.13 - Jenis Turbin

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

Sumber: Anonim, 2009c:8

2.10.1. Penentuan tipe turbin

Dalam studi ini penentuan tipe turbin didasarkan pada kecepatan khusus N_s dan tinggi jatuh titik. Penentuan tipe turbin berdasarkan kecepatan khusus, tinggi tekan tenaga dan diameter roda dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 2.14 Penentuan Tipe Turbin

Tipe Turbin	Maksimum Ketinggian	Maksimum Tenaga	Maksimum Diameter Roda	Kecepatan Khusus
	(m)	(PH)	(m)	(rpm)
Pelton	300-2000	330.000	5,5	4-7
Francis	30-500	960.000	10	60-400
Kaplan	2-70	300.000	10	300-1100

Sumber: Dandekar, 1991:400

Tabel 2.15 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Tinggi Jatuh

Klasifikasi	Tinggi Jatuh (m)	Tipe
Tinggi tekan rendah	2-15	Propeler/Kaplan
Tinggi tekan sedang	16-70	Kaplan/Francis
Tinggi tekan tinggi	71-500	Francis/Pelton
Tinggi tekan sangat tinggi	>500	Pelton

Sumber: Dandekar, 1991:394

Adapun tipe penggunaan head yang berlaku pada beberapa macam turbin diantaranya:

- Kaplan : $2 < H < 40$ (H = head dalam m)
- Francis : $10 < H < 350$
- Pelton : $50 < H < 1300$
- Crossflow : $6 < H < 100$
- Turgo : $50 < H < 250$

Tabel 2.16 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Kecepatan Jenis

Rotor	Kecepatan Jenis (rpm)		
	Lambat	Sedang	Cepat
Pelton	4-15	16-30	31-70
Francis	60-150	151-250	251-400
Kaplan	300-450	451-700	701-1100

Sumber: Dandekar, 1991:398

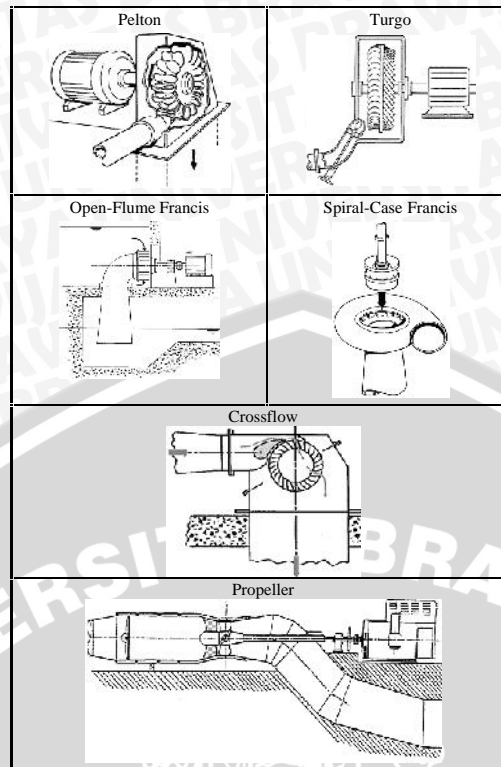
Selain penentuan tipe turbin, juga dapat dibedakan berdasarkan perubahan momentum fluida kerjanya sebagai berikut (Arismunandar, 2004:53):

- Turbin Impuls

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

- Turbin Reaksi

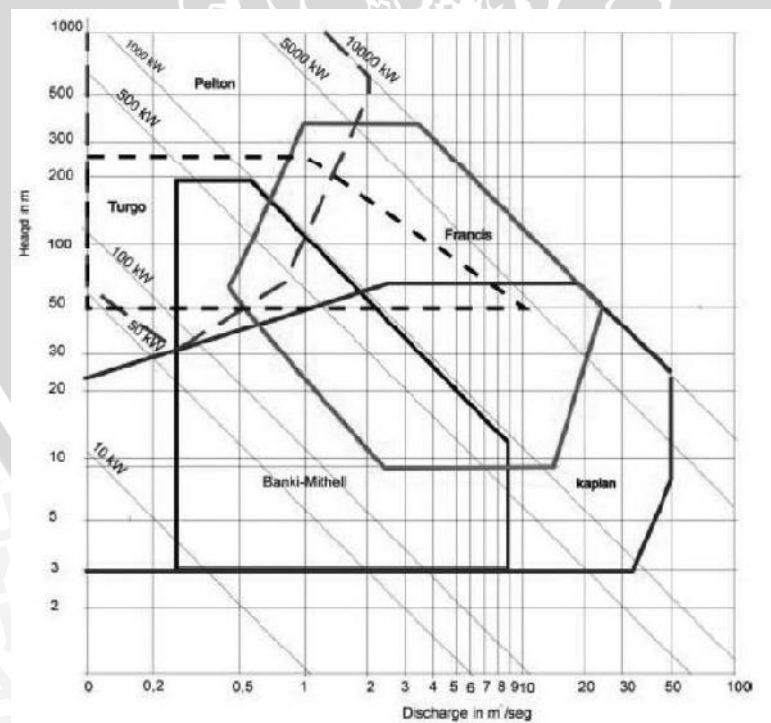
Turbin ini meliputi jenis *francis* dan *kaplan/propeller*, menggunakan energi kinetik dan tekanan dikonversikan di *runner*. Secara umum, jenis turbin ini tidak menerima tumbukan dan hanya mengikuti aliran air.



Gambar 2.8 Jenis Turbin
 Sumber: Anonim, 2009c:9

2.10.2. Karakteristik turbin

Perbandingan karakteristik turbin dapat dilihat pada grafik dibawah ini.



Gambar 2.9 Grafik pemilihan turbin
 Sumber: Anonim, 2009c:11

Karakteristik turbin dalam kajian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Kecepatan Spesifik (kecepatan khusus)

Kecepatan spesifik (*specific speed*) adalah kecepatan turbin model (turbin dengan bentuk sama tetapi skalanya berlainan), yang bekerja pada tinggi satu satuan jatuh dan dengan debit satu satuan debit dan menghasilkan daya (*output*) satu satuan daya. Kecepatan spesifik setiap turbin memiliki kisaran:

- Turbin Pelton = 12 N_s 25
- Turbin Francis = 60 N_s 300
- Turbin *Crossflow* = 40 N_s 200
- Turbin *Propeller* = 250 N_s 1000

Dengan mengetahui kecepatan spesifik turbin maka perencanaan dan pemilihan jenis turbin akan menjadi lebih mudah. Beberapa formula yang dikembangkan dari data eksperimen berbagai jenis turbin dapat digunakan untuk melakukan estimasi perhitungan kecepatan spesifik turbin, yaitu:

- Turbin pelton (1 jet) $N_s = 85,49/H^{0,243}$ (Siervo & Lugaresi, 1978)
- Turbin francis $N_s = 3763/H^{0,854}$ (Schweiger & Gregory, 1989)
- Turbin kaplan $N_s = 2283/H^{0,486}$ (Schweiger & Gregory, 1989)
- Turbin *crossflow* $N_s = 513,25/H^{0,505}$ (Kpordze & Wamick, 1983)
- Turbin *propeller* $N_s = 2702/H^{0,5}$ (USBR, 1976)

Rumus untuk menentukan N_s (kecepatan spesifik) adalah sebagai berikut:

$$N_s = \frac{1750}{\sqrt{H}} \quad (2-73)$$

$$N = \frac{N_s \times H^{3/4}}{P^{1/2}} \quad (2-74)$$

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad (2-75)$$

dengan:

N_s = kecepatan spesifik

n = kecepatan putar turbin

H = tinggi jatuh efektif (m)

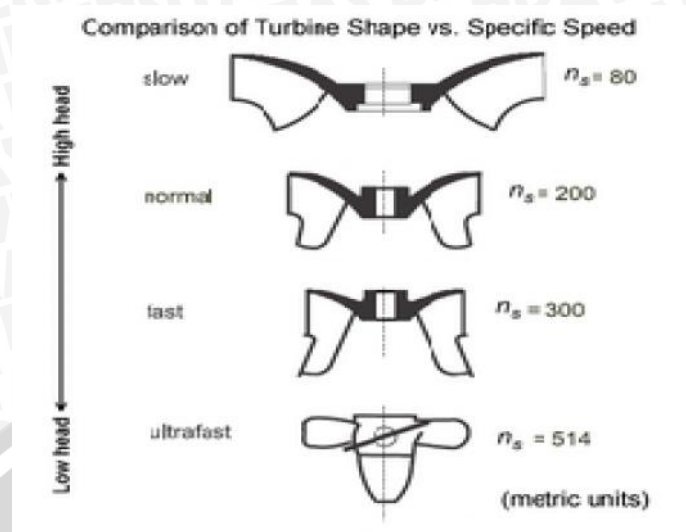
P = daya yang dihasilkan (kW)

f = frekuensi, biasanya 50 Hertz

= 50 ppd (putaran per detik)

N = putaran sinkron generator (rpm)

p = nomor dari pasangan katup generator



Gambar 2.10 Perbandingan bentuk sudu turbin berdasarkan kecepatan spesifik
 Sumber: Waluyo, 2011:56

2. Efisiensi

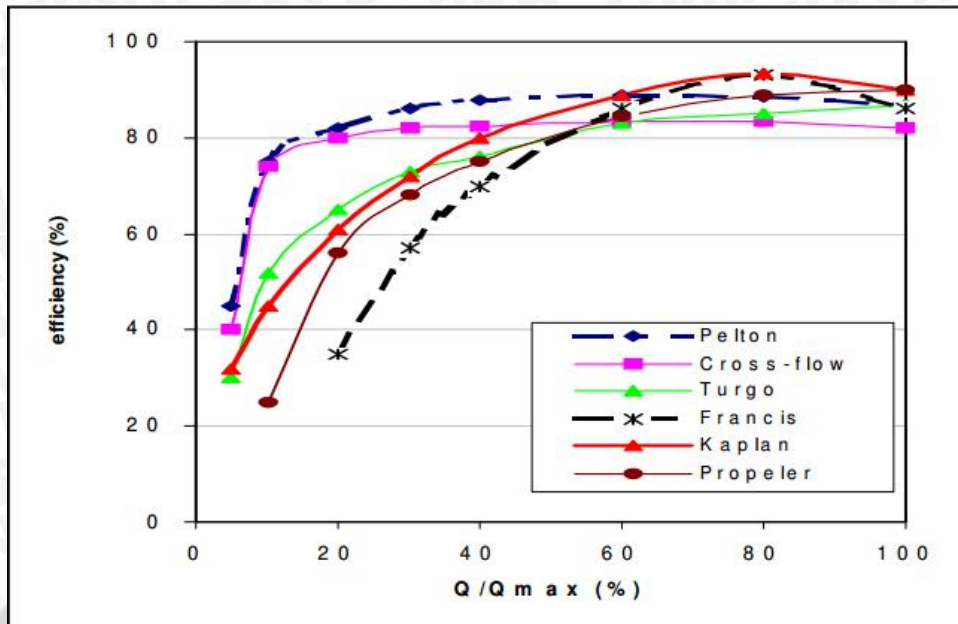
Setiap jenis turbin dan setiap kecepatan jenis masing-masing mempunyai angka efisiensi yang berbeda-beda. Agar dapat menjamin kerja turbin di sekitar daerah efisiensi maksimumnya serta untuk mencegah terjadinya kavitasi. Maka biasanya tinggi jatuh yang diperbolehkan harus dibatasi, misalnya deviasi beberapa persen dari tinggi air jatuh yang direncanakan sesuai dengan turbin yang digunakan (Arismunandar, 2004:66).

3. Kecepatan Lari (*Run Away Speed*)

Kecepatan lari suatu turbin adalah kecepatan putar turbin tanpa beban dengan debit tertentu, kecepatan maksimum yang mungkin terjadi dinamakan kecepatan lari maksimum. Apabila tinggi jatuh air berubah-ubah maka dipakai kecepatan lari yang terbesar yaitu sesuai dengan tinggi jatuh yang terbesar. Pada umumnya kecepatan lari untuk masing-masing jenis turbin adalah sebagai berikut (Arismunandar, 2004:68):

- Turbin Pelton, kecepatan putarnya adalah 1,85 kali kecepatan normal.
- Turbin Francis, kecepatan putarnya adalah 1,8-2,3 kali kecepatan normal.
- Turbin Kaplan, kecepatan putarnya adalah 2,2-3,2 kali kecepatan normal.

(Arismunandar, 2004:71) mengemukakan bahwa kecepatan lari dipengaruhi juga oleh koefisien besarnya kavitasi.



Gambar 2.11 Efisiensi turbin
 Sumber: Ramos, 2000:89

2.10.3. Generator

Generator merupakan suatu alat yang dapat merubah energi gerak (mekanis) menjadi energi listrik. Suatu generator dapat diuraikan lebih lanjut mengenai klasifikasi generator, daya generator, dan berat generator. Perhitungan kecepatan generator dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$n = \frac{f}{N_{poles}/2} \times 60 \quad (2-76)$$

dengan:

n = kecepatan putaran generator (rpm)

f = frekuensi (50 Hz)

N_{poles} = jumlah poles

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 fasa. Jadi pada statornya ada lilitan fasa yang ke satu ujungnya diberi tanda U-X, lilitan fasa yang kedua ujungnya diberi tanda dengan huruf V-Y dan akhirnya ujung lilitan fasa 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:

$$n = \frac{120 \times f}{p} \quad (2-77)$$

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:

$$\text{Daya nyata (kW)} = \text{daya semu (kVA)} \times \text{faktor daya} \quad (2-78)$$

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).

Tabel 2.17 Efisiensi Generator

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

Sumber: Anonim, 2009d:187

2.10.4. Klasifikasi generator

Menurut Arismunandar (2004:77), klasifikasi generator berdasarkan porosnya meliputi:

- a. Generator dengan poros datar (horizontal).
Golongan poros datar ini sesuai untuk mesin-mesin berdaya kecil atau mesin-mesin berputaran tinggi.
- b. Generator dengan poros tegak (vertikal).
Golongan poros tegak ini sesuai untuk mesin-mesin berputaran rendah. Penggunaan poros tegak sangat baik bagi generator turbin air, karena golongan poros tegak memerlukan luas ruangan yang lebih kecil dibandingkan dengan golongan poros datar.

2.11. Perhitungan Daya dan Energi

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

$$\text{Daya Teoritis} = 9,81 \times Q \times H_{eff} \text{ (kW)} \quad (2-79)$$

$$\text{Daya Turbin} = 9,81 \times \eta_t \times Q \times H_{eff} \text{ (kW)} \quad (2-80)$$

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

dengan:

η_t = efisiensi turbin

η_g = efisiensi generator

ρ = massa jenis air = 1000 (kg/m^3)

Q = debit pembangkit (m^3/dt)

H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

2.11.1. Produksi energi tahunan

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

$$E = P \times 24 \times n \quad (2-82)$$

dengan:

E = energi yang dihasilkan (kWh)

P = daya yang dihasilkan (kW)

n = jumlah hari

2.11.2. Proyeksi penduduk

Jumlah penduduk pada daerah studi pada saat tahun perencanaan dimulai dan pada tahun-tahun yang akan datang harus diperhitungkan untuk menghitung kebutuhan tiap penduduk.

Perkiraan perkembangan penduduk diproyeksikan untuk masa 10 tahun yang akan datang. Proyeksi perkembangan jumlah penduduk menggunakan rumus yang sesuai dengan pola kecenderungannya, yaitu dengan cara dilakukan pengujian terhadap data jumlah penduduk terdahulu menggunakan standar deviasi atau koefisien korelasi (Anonim, 1996:11). Untuk proyeksi jumlah penduduk pada tahun-tahun yang akan datang terdapat beberapa metod, antara lain Metode Aritmatik, Metode Eksponensial, dan Metode Geometri.

Dalam studi ini, proyeksi jumlah penduduk menggunakan Metode Aritmatik, karena memiliki nilai standar deviasi terkecil di antara metode-metode lainnya. Rumus dari pertumbuhan penduduk metode aritmatik adalah sebagai berikut: (Muliakusuma, (2000:254) dalam Hasnantio, M. Akbar (2006:11).

$$P_n = P_o (1 + r.n) \quad (2-83)$$

dengan:

P_n = jumlah penduduk pada tahun ke- n (jiwa)

P_o = jumlah penduduk pada awal proyeksi (jiwa)

r = prosentase pertumbuhan penduduk (%)

n = jumlah proyeksi (tahun)

2.12. 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).

2.12.1. 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 beberapa komponen sehingga memudahkan analisis perhitungannya. Menurut Kuiper (1971) semua biaya itu dikelompokkan menjadi dua yaitu biaya modal (*capital cost*) dan biaya tahunan (*annual cost*) (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 PLTMH dinyatakan dalam rumus empiris yang diperkirakan dengan harga satuan dari proyek-proyek PLTMH di Indonesia. Biaya konstruksi sebagai fungsi *cost* yang diperhitungkan.

Rumus-rumus yang digunakan untuk perhitungan besarnya biaya adalah sebagai berikut (Anonim dalam RETScreen,2005:Appendix B):

1. Biaya *engineering* (C1)

Biaya *engineering* merupakan biaya yang diperlukan untuk jasa konsultasi dan jasa konstruksi, persamaan empiris untuk estimasi biaya tersebut adalah:

$$C1 = 0,04 \left(\frac{MW}{Hg^{0,3}} \right)^{0,54} \times 10^6 \quad (2-84)$$

dengan:

$C1$ = estimasi biaya *engineering* (CAD)

MW = total kapasitas terpasang (MegaWatt)

Hg = tinggi jatuh kotor (m)

2. Biaya peralatan hidromekanik (C2)

Biaya peralatan hidromekanik meliputi biaya generator, turbin dan governor, persamaan empiris untuk estimasi biaya tersebut adalah:

$$C2 = CG + CT \quad (2-85)$$

Generator

$$CG = 0,82 n^{0,96} G Cg \left(\frac{MW}{Hg^{0,28}} \right)^{0,9} \times 10^6 \quad (2-86)$$

Turbin Kaplan

$$CT = 0,27 n^{0,96} J_t K_t d^{1,47} (1,17 Hg^{0,12} + 2) \times 10^6 \quad (2-87)$$

Turbin Francis

$$CT = 0,17 n^{0,96} J_t K_t d^{1,47} ((13 + 0,01Hg^{0,3}) + 3) \times 10^6 \quad (2-88)$$

Turbin Propeller

$$CT = 0,125 n^{0,96} J_t K_t d^{1,47} (1,17 Hg^{0,12} + 4) \times 10^6 \quad (2-89)$$

Turbin Turgo atau Pelton

$$CT = 3,47 n^{0,96} \left(\frac{MWu}{Hg^{0,5}} \right)^{0,44} x 10^6 \text{ jika } \left(\frac{MWu}{Hg^{0,5}} \right) > 4 \quad (2-90)$$

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

Turbin Crossflow

$$CT = \text{biaya turbin pelton/turgo} x 0,5 \quad (2-92)$$

dengan:

$C2$ = estimasi biaya hidromekanik (CAD)

CG = biaya generator (CAD)

CT = biaya turbin dan governor (CAD)

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

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

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

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

d = diameter runner turbin (m)

MWu = kapasitas daya tiap turbin (MegaWatt)

3. Biaya instalasi peralatan hidromekanik (C3)

Merupakan biaya pemasangan peralatan hidromekanik, persamaannya adalah:

$$C3 = C2 x 0,15 \quad (2-93)$$

dengan:

$C3$ = estimasi biaya instalasi hidromekanik (CAD)

$C2$ = biaya peralatan hidromekanik (CAD)

4. Biaya instalasi transmisi jaringan (C4)

Merupakan biaya untuk pembangunan jaringan transmisi listrik, dengan persamaan:

$$C4 = 0,0011 D P Lt^{0,95} V x 10^6 \quad (2-94)$$

dengan:

$C4$ = estimasi biaya instalasi transmisi jaringan (CAD)

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

V = voltase jaringan transmisi (kV)

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

Lt = panjang jaringan (km)

5. Biaya trafo dan substation (C5)

Merupakan biaya untuk substation dan transformer (trafo), dengan persamaan:

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

dengan:

$C5$ = estimasi biaya trafo dan substation (CAD)

6. Biaya pemasangan substation dan trafo ($C6$)

Merupakan biaya untuk pemasangan substation dan transformer (trafo)

$$C6 = 0,15 C5 \quad (2-96)$$

dengan:

$C6$ = estimasi biaya pemasangan substation dan trafo (CAD)

7. Biaya pekerjaan sipil ($C7$)

Biaya pekerjaan sipil meliputi pekerjaan galian, timbuna, pembongkaran, dll.

Persamaan empiris yang digunakan adalah:

$$C7 = 1,97 n^{-0,04} C \left(\frac{MW}{Hg^{0,3}}\right)^{0,82} (1 + 0,005 \frac{L_d}{Hg}) x 10^6 \quad (2-97)$$

dengan:

$C7$ = estimasi biaya pekerjaan sipil (CAD)

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

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

L_d = panjang bendungan/bendung (m)

8. Biaya pekerjaan pipa pesat ($C8$)

Merupakan biaya untuk pembangunan pipa pesat, persamaan empirisnya:

$$C8 = 20 n_p^{0,95} W^{0,88} \quad (2-98)$$

$$W = (24,7 d_p l_p t_{ave}) \quad (2-99)$$

$$d_p = \frac{\left(\frac{Qd}{Np}\right)^{0,43}}{Hg^{0,14}} \quad (2-100)$$

$$t_t = dp^{1,3} + 6 \quad (2-101)$$

$$t_b = 0,0375 d_p H_g \quad (2-102)$$

$$t_{ave} = 0,5 (t_t + t_b) \quad (\text{jika } t_b > t_t) \quad (2-103)$$

$$t_{ave} = t_t \quad (\text{jika } t_b < t_t) \quad (2-104)$$

dengan:

$C8$ = estimasi biaya pipa pesat (CAD)

n_p = jumlah pipa pesat

W = berat pipa pesat (kg)

- Q_d = debit desain (m^3/dt)
 d_p = diameter pipa pesat (m)
 l_p = panjang pipa pesat (m)
 t_{ave} = tebal pipa pesat rata-rata (mm)
 t_t = tebal pipa pesat pada intake (mm)
 t_b = tebal pipa pesat pada turbin (mm)

9. Biaya pemasangan pipa pesat (C9)

Merupakan biaya untuk ekskavasi dan pemasangan pipa pesat, dengan persamaan empiris:

$$C9 = 5 W^{0,88} \quad (2-105)$$

dengan:

$C9$ = estimasi biaya pemasangan pipa pesat (CAD)

10. Biaya pekerjaan saluran (C10)

Merupakan biaya untuk pembuatan saluran termasuk bahan untuk pasangan, persamaan empiris untuk estimasi biaya saluran adalah:

Untuk kondisi tanah biasa:

$$C10 = 20 ((1,5 + 0,01Ss^{1,5}) Qd Lcs)^{0,9} \quad (2-106)$$

Untuk kondisi tanah berbatu:

$$C10 = 100 ((1,5 + 0,016 Ss^{1,5}) Qd Lcr)^{0,9} \quad (2-107)$$

dengan:

$C10$ = estimasi biaya pekerjaan saluran (CAD)

Ss = kemiringan lahan

Lcs = panjang saluran pada kondisi tanah biasa (m)

Lcr = panjang saluran pada kondisi tanah berbatu (m)

11. Biaya pekerjaan lain-lain (C11)

$$C11 = 0,25 i Qd^{0,35} x 1,1 C1 \text{ to } C10 + 0,1 C1 \text{ to } C10 \quad (2-108)$$

dengan:

$C11$ = estimasi biaya pekerjaan lain-lain (CAD)

i = suku bunga

Hasil estimasi biaya langsung (*cost*) dinyatakan dalam satuan mata uang dollar Kanada (CAD) dengan *base rate* tahun 2005 sehingga harus diperhatikan faktor eskalasi perubahan nilai mata uang tersebut sehingga hasil estimasi harus dikonversikan menjadi nilai mata uang dollar Kanada dengan *base rate* tahun 2015 sebesar 1,19 (*Bank of Canada*) dan nilai tukar rupiah sebesar Rp 10.534,75 per 2 April 2015 (*BI rate*).

- **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 (Kodoatie, 1995:74), 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 ini merupakan komponen terbesar yang diperhitungkan terhadap biaya modal.
- b. Depresiasi atau amortisasi, dua istilah ini hampir sama tetapi berbeda fungsi. Depresiasi adalah turunya/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).

2.12.2. *Benefit* (Komponen Manfaat)

Manfaat PLTMH didasarkan pada tenaga listrik yang dihasilkan tiap tahun dan tarif dasar listrik yang berlaku.

2.12.3. 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*)
- *Payback Period*

2.12.3.1. *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:

$$BCR = \frac{PV \text{ dari manfaat}}{PV \text{ dari biaya}} \quad (2-109)$$

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.

2.12.3.2. *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*.

$$NPV = PV \text{ komponen } Benefit - PV \text{ komponen } Cost \quad (2-110)$$

dengan :

PV = *Present value*

NPV = *Net Present Value*

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

2.12.3.3. 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):

$$IRR = I' + \frac{NPV'}{NPV' - NPV''} (I'' - I') \quad (2-111)$$

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

2.12.3.4. *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*

$$Payback\ Periode = \frac{I}{A_b} \quad (2-112)$$

dengan:

I = Besarnya biaya investasi yang diperlukan

A_b = Benefit bersih yang dapat diperoleh pada setiap tahun.