

BAB IV ANALISA DATA DAN PERENCANAAN

4.1 Analisis Hidrologi

Data debit untuk pengolahan hidrologi dapat diperoleh dari debit Sungai Cisanggarung

Tabel 4.1

Data Debit Sungai Cisanggarung

No.	Tahun	Bulan											
		Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober	Nopember	Desember
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2004	53,878	29,234	62,643	21,031	19,859	6,060	10,800	1,810	4,174	1,295	8,436	28,935
2	2005	36,918	51,410	49,199	56,813	19,858	23,686	18,200	2,007	4,583	6,691	6,481	26,939
3	2006	58,702	57,836	31,433	42,018	25,971	6,591	1,486	1,781	0,861	0,198	2,892	20,085
4	2007	29,251	47,925	47,884	36,244	24,823	11,788	5,598	3,494	2,259	1,679	2,291	9,305
5	2008	28,163	35,233	35,603	30,037	16,389	6,803	1,641	1,562	1,138	1,203	0,184	23,252
6	2009	54,106	66,380	42,280	32,600	29,039	22,354	4,643	2,226	1,230	3,940	8,062	20,297
7	2010	50,515	72,581	50,553	56,772	61,233	30,352	17,846	17,050	39,641	40,775	61,550	76,202
8	2011	34,634	58,391	74,738	70,380	58,079	21,128	8,307	2,769	1,953	4,316	13,588	23,778
9	2012	37,064	59,719	62,978	40,588	19,716	5,534	2,995	1,054	1,310	2,869	8,295	28,199
10	2013	44,729	41,130	54,358	50,846	31,108	35,582	40,007	5,260	3,070	5,596	14,291	40,082
11	2014	37,358	51,499	59,781	46,301	0,000	0,000	6,238	5,711	1,747	0,710	3,667	14,450

Sumber: Laporan Pekerjaan, 2016

4.1.1 Analisa Debit Andalan

Guna mendapatkan kapasitas PLTMH, tidak terlepas dari perhitungan berapa banyak air yang dapat diandalkan untuk membangkitkan PLTMH. Debit andalan adalah debit minimum yang masih dimungkinkan untuk keamanan operasional suatu bangunan air dalam PLTMH.

Debit minimum sungai dianalisis atas dasar debit andalan. Dalam perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro ini, dikarenakan minimalnya data, maka perhitungan debit andalan menggunakan probabilitas yang dihitung dengan persamaan Weibull.

4.1.1.1 Pemilihan Debit Andalan Metode *Flow Duration Curve* (Lengkung Durasi Aliran)

Menurut Suyono Sosrodarsono, secara umum besarnya debit andalan berdasarkan kondisi debit dibedakan menjadi 4. Pembagian karakteristik debit sungai tersebut antara lain:

1. Debit air cukup, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 95 hari dalam

$$\text{setahun } (P = \frac{95}{365} \times 100\% = 26,0\%).$$

2. Debit air normal, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 185 hari dalam setahun ($P = \frac{185}{365} \times 100\% = 50,7\%$).
3. Debit air rendah, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 275 hari dalam setahun ($P = \frac{275}{365} \times 100\% = 75,3\%$).
4. Debit air musim kering, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 355 hari dalam setahun ($P = \frac{355}{365} \times 100\% = 97,3\%$).

Dalam studi ini dihitung besarnya debit andalan dengan tingkat keandalan 80%, 90%, 97% dengan probabilitas tersebut dihitung dengan persamaan Weibull:

$$P_w = \frac{m}{n+1} \times 100\% \dots\dots\dots (4-1)$$

dengan:

P_w = Probabilitas %

M = data ke- n

n = jumlah data

debit rerata pada bulan Februari:

$$\begin{aligned} \overline{Q_{rerata}} &= \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} \\ &= \frac{29,234 + 51,410 + \dots + 51,499}{11} \\ &= 51,940 \end{aligned}$$

Probabilitas dengan persamaan Weibull, hasil pada tabel 4.4:

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{m}{n+1} \times 100\% \\ &= \frac{2}{132+1} \times 100\% \\ &= 1,504 \end{aligned}$$

Tabel 4.2

Debit Rerata Sungai Cisanggarung Bendung Cikeusik (m^3/dt)

No.	Tahun	Bulan											
		Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober	Nopember	Desember
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2004	53,878	29,234	62,643	21,031	19,859	6,060	10,800	1,810	4,174	1,295	8,436	28,935
2	2005	36,918	51,410	49,199	56,813	19,858	23,686	18,200	2,007	4,583	6,691	6,481	26,939
3	2006	58,702	57,836	31,433	42,018	25,971	6,591	1,486	1,781	0,861	0,198	2,892	20,085
4	2007	29,251	47,925	47,884	36,244	24,823	11,788	5,598	3,494	2,259	1,679	2,291	9,305
5	2008	28,163	35,233	35,603	30,037	16,389	6,803	1,641	1,562	1,138	1,203	0,184	23,252
6	2009	54,106	66,380	42,280	32,600	29,039	22,354	4,643	2,226	1,230	3,940	8,062	20,297
7	2010	50,515	72,581	50,553	56,772	61,233	30,352	17,846	17,050	39,641	40,775	61,550	76,202
8	2011	34,634	58,391	74,738	70,380	58,079	21,128	8,307	2,769	1,953	4,316	13,588	23,778
9	2012	37,064	59,719	62,978	40,588	19,716	5,534	2,995	1,054	1,310	2,869	8,295	28,199
10	2013	44,729	41,130	54,358	50,846	31,108	35,582	40,007	5,260	3,070	5,596	14,291	40,082
11	2014	37,358	51,499	59,781	46,301	0,000	0,000	6,238	5,711	1,747	0,710	3,667	14,450
Rerata		42,301	51,940	51,950	43,966	27,825	15,443	10,705	4,066	5,633	6,297	11,794	28,320

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari penampang sungai dapat ditentukan tinggi muka air berdasarkan debit yang dilalui.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada contoh perhitungan sebagai berikut:

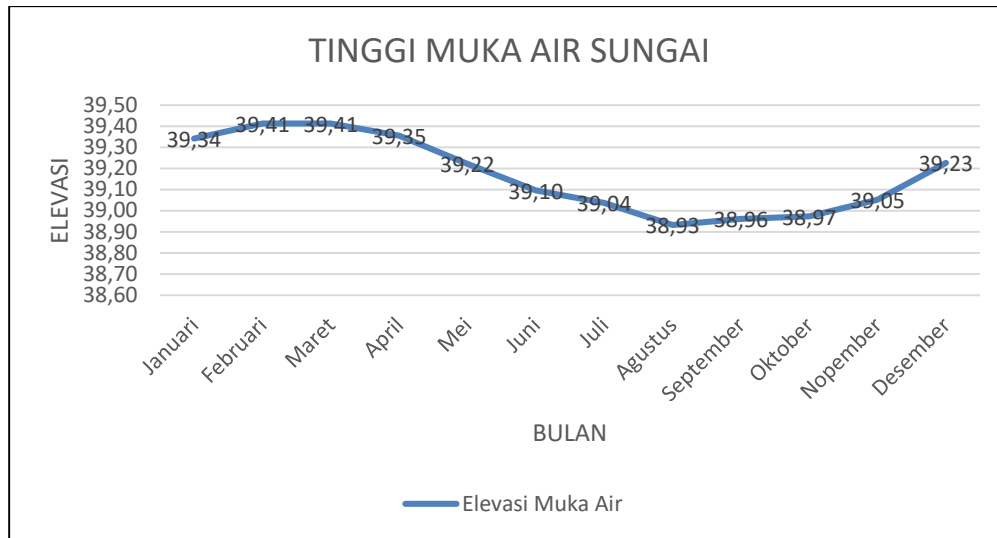
Tabel 4.3

Perhitungan Penampang Sungai Cisanggarung

Bulan	b meter	h meter	m	A m^2	P meter	R meter	n	S m	V m/detik	Q m^3/detik	Elevasi
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Januari	93,30	0,54	1,00	50,88	95,469	0,533	0,025	0,001	0,83	42,30	39,34
Februari	93,30	0,61	1,00	57,62	95,754	0,602	0,025	0,001	0,90	51,94	39,41
Maret	93,30	0,61	1,00	57,63	95,754	0,602	0,025	0,001	0,90	51,95	39,41
April	93,30	0,55	1,00	52,09	95,520	0,545	0,025	0,001	0,84	43,97	39,35
Mei	93,30	0,42	1,00	39,50	94,986	0,416	0,025	0,001	0,70	27,82	39,22
Juni	93,30	0,30	1,00	27,69	94,483	0,293	0,025	0,001	0,56	15,44	39,10
Juli	93,30	0,24	1,00	22,20	94,249	0,236	0,025	0,001	0,48	10,71	39,04
Agustus	93,30	0,13	1,00	12,40	93,831	0,132	0,025	0,001	0,33	4,06	38,93
Septembe	93,30	0,16	1,00	15,08	93,945	0,161	0,025	0,001	0,37	5,63	38,96
Oktober	93,30	0,17	1,00	16,13	93,990	0,172	0,025	0,001	0,39	6,30	38,97
Nopembe	93,30	0,25	1,00	23,53	94,306	0,249	0,025	0,001	0,50	11,79	39,05
Desember	93,30	0,43	1,00	39,92	95,004	0,420	0,025	0,001	0,71	28,32	39,23

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

- | | |
|---|---|
| 1. Bulan | 7. (5) / (6) |
| 2. Data Lebar Saluran (b) | 8. Koefisien Kekasaran Manning (n) |
| 3. Tinggi Muka Air (h) | 9. Kemiringan Saluran |
| 4. Kemiringan Talut | 10. $1/(8) \times (7)^{2/3} \times (9)^{1/2}$ |
| 5. $\{(2) + (4) \times (3)\} (3)$ | 11. (5) x (10) |
| 6. $(2) + 2 (3) \times [1 + (4)^2]^{1/2}$ | 12. Elevasi |



Gambar 4.1 Tinggi Muka Air Sungai Cikeusik

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dimensi penampang sungai di hitung dengan menggunakan rumus-rumus perhitungan aliran seragam pada saluran terbuka. Perhitungan dimensi saluran pembawa, digunakan rumus Manning:

- ✓ Q desain (Q_{90}) = 1,509 m³/dt
- ✓ Kecepatan maksimum = 2 m/dt
- ✓ Kemiringan saluran (I) = 0,001
- ✓ Koefesien Manning = 0.025 (pasangan batu)
- ✓ Lebar saluran = 93,30 m
- ✓ Kemiringan talud = 1

Dari parameter diatas direncanakan dimensi penampang sungai, dengan cara coba-coba nilai h dan menyesuaikan debit rencana. Untuk perhitungannya digunakan nilai h=0,54 m, perhitungan sebagai berikut:

- ✓ Menghitung luas penampang (A) = $(b + mh)h$
 $= (93,30 + 1 \times 0,54) 0,54$
 $= 50,88 \text{ m}^2$
- ✓ Keliling basah (P) = $b + 2 \times h \sqrt{1 + m^2}$
 $= 93,30 + 2 \times 0,54 \sqrt{1 + 1^2}$
 $= 95,469 \text{ m}$
- ✓ Jari-jari hidrolis (R) = $\left(\frac{(b + mh)h}{b + 2 \times h \sqrt{1 + m^2}} \right)$
 $= \left(\frac{(93,30 + 1 \times 0,54) 0,54}{93,30 + 2 \times 0,54 \sqrt{1 + 1^2}} \right)$
 $= 0,533 \text{ m}$

$$\begin{aligned}
 \checkmark \text{ Menghitung debit (Q)} &= \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2} \\
 &= \frac{1}{0,025} \times 0,533^{2/3} \times 0,001^{1/2} \\
 &= 42,30 \text{ m}^3/\text{detik}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.4

Probabilitas Debit Sungai Cisanggarung Bendung Cikeusik (%)

No. 1	Q (m ³ /dt) 2	Prob (%) 3	No. 1	Q (m ³ /dt) 2	Prob (%) 3	No. 1	Q (m ³ /dt) 2	Prob (%) 3
1	76,202	0,752	45	35,233	33,835	89	6,481	66,917
2	74,738	1,504	46	34,634	34,586	90	6,238	67,669
3	72,581	2,256	47	32,600	35,338	91	6,060	68,421
4	70,380	3,008	48	31,433	36,090	92	5,711	69,173
5	66,380	3,759	49	31,108	36,842	93	5,598	69,925
6	62,978	4,511	50	30,352	37,594	94	5,596	70,677
7	62,643	5,263	51	30,037	38,346	95	5,534	71,429
8	61,550	6,015	52	29,251	39,098	96	5,260	72,180
9	61,233	6,767	53	29,234	39,850	97	4,643	72,932
10	59,781	7,519	54	29,039	40,602	98	4,583	73,684
11	59,719	8,271	55	28,935	41,353	99	4,316	74,436
12	58,702	9,023	56	28,199	42,105	100	4,174	75,188
13	58,391	9,774	57	28,163	42,857	101	3,940	75,940
14	58,079	10,526	58	26,939	43,609	102	3,667	76,692
15	57,836	11,278	59	25,971	44,361	103	3,494	77,444
16	56,813	12,030	60	24,823	45,113	104	3,070	78,195
17	56,772	12,782	61	23,778	45,865	105	2,995	78,947
18	54,358	13,534	62	23,686	46,617	106	2,892	79,699
19	54,106	14,286	63	23,252	47,368	107	2,869	80,451
20	53,878	15,038	64	22,354	48,120	108	2,769	81,203
21	51,499	15,789	65	21,128	48,872	109	2,291	81,955
22	51,410	16,541	66	21,031	49,624	110	2,259	82,707
23	50,846	17,293	67	20,297	50,376	111	2,226	83,459
24	50,553	18,045	68	20,085	51,128	112	2,007	84,211
25	50,515	18,797	69	19,859	51,880	113	1,953	84,962
26	49,199	19,549	70	19,858	52,632	114	1,810	85,714
27	47,925	20,301	71	19,716	53,383	115	1,781	86,466
28	47,884	21,053	72	18,200	54,135	116	1,747	87,218
29	46,301	21,805	73	17,846	54,887	117	1,679	87,970
30	44,729	22,556	74	17,050	55,639	118	1,641	88,722
31	42,280	23,308	75	16,389	56,391	119	1,562	89,474
32	42,018	24,060	76	14,450	57,143	120	1,486	90,226
33	41,130	24,812	77	14,291	57,895	121	1,310	90,977
34	40,775	25,564	78	13,588	58,647	122	1,295	91,729
35	40,588	26,316	79	11,788	59,398	123	1,230	92,481
36	40,082	27,068	80	10,800	60,150	124	1,203	93,233

Lanjutan Tabel 4.4

Probabilitas Debit Sungai Cisanggarung Bendung Cikeusik (%)

No. 1	Q (m ³ /dt) 2	Prob (%) 3	No. 1	Q (m ³ /dt) 2	Prob (%) 3	No. 1	Q (m ³ /dt) 2	Prob (%) 3
37	40,007	27,820	81	9,305	60,902	125	1,138	93,985
38	39,641	28,571	82	8,436	61,654	126	1,054	94,737
39	37,358	29,323	83	8,307	62,406	127	0,861	95,489
40	37,064	30,075	84	8,295	63,158	128	0,710	96,241
41	36,918	30,827	85	8,062	63,910	129	0,198	96,992
42	36,244	31,579	86	6,803	64,662	130	0,184	97,744
43	35,603	32,331	87	6,691	65,414	131	0,000	98,496
44	35,582	33,083	88	6,591	66,165	132	0,000	99,248

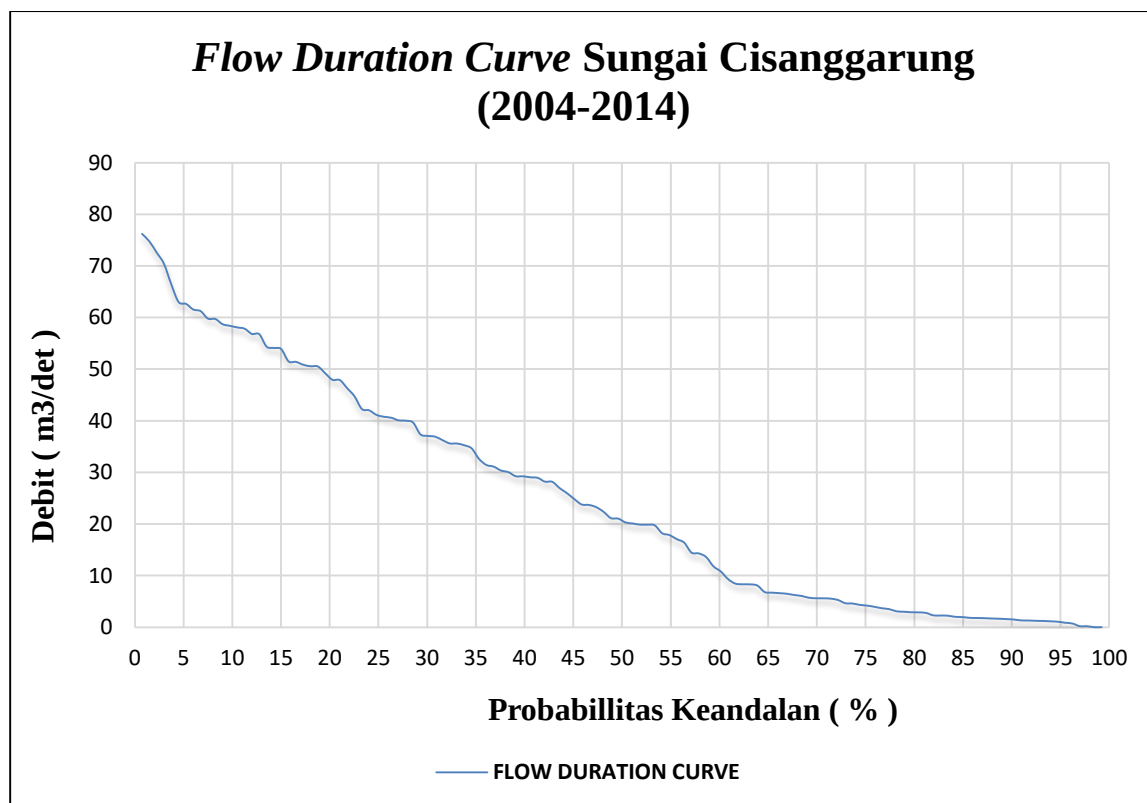
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

(1) No.

(2) Q Sungai Cisanggarung (m³/dt)

(3) Probabilitas %



Gambar 4.2 Flow Duration Curve Sungai Cisanggarung

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.5
Debit Andalan Terurut

No.	Prob (%)	Q (m ³ /dt)	Kondisi Debit Sungai
1	2	3	4
1	5	62,760	Tersedia 5% dalam setahun
2	10	58,297	Tersedia 10% dalam setahun
3	15	53,889	Tersedia 15% dalam setahun
4	20	48,434	Tersedia 20% dalam setahun
5	26	40,569	Tersedia 26% dalam setahun (Debit Air Cukup)
6	30	37,093	Tersedia 30% dalam setahun
7	35	33,515	Tersedia 35% dalam setahun
8	40	29,195	Tersedia 40% dalam setahun
9	45	24,995	Tersedia 45% dalam setahun
10	51	19,687	Tersedia 51% dalam setahun (Debit Air Normal)
11	55	17,727	Tersedia 55% dalam setahun
12	60	10,347	Tersedia 60% dalam setahun
13	65	6,752	Tersedia 65% dalam setahun
14	70	5,597	Tersedia 70% dalam setahun
15	75	4,210	Tersedia 75% dalam setahun (Debit Air Rendah)
16	80	2,883	Tersedia 80% dalam setahun
17	85	1,946	Tersedia 85% dalam setahun
18	90	1,509	Tersedia 90% dalam setahun (Debit Andalan)
19	95	0,986	Tersedia 95% dalam setahun
20	96	0,758	Tersedia 96% dalam setahun
21	97	0,197	Tersedia 97% dalam setahun (Debit Air Kering)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

1. Nomor
2. Probabilitas (%)
3. Debit Rencana (m³/detik)
4. Kondisi Debit Sungai

Debit andalan untuk perhitungan PLTMH yang digunakan 85% - 90% adalah:

$$Q_{80} = 2,883 \text{ m}^3/\text{dt}$$

$$Q_{90} = 1,509 \text{ m}^3/\text{dt}$$

$$Q_{97} = 0,197 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Sehingga debit yang digunakan untuk desain bangunan adalah debit 90% yaitu 1,509 m³/dt karena dianggap dapat mencukupi kebutuhan debit untuk pembangkitan.

Tabel 4.6
Debit Andalan untuk Pembangkitan Daya

No.	Bulan	Q ₉₀ (m ³ /dt)
1	2	3
1	Januari	28,381
2	Februari	30,434
3	Maret	32,267
4	April	22,832
5	Mei	3,278
6	Juni	1,107
7	Juli	1,517
8	Agustus	1,155
9	September	0,916
10	Oktober	0,300
11	Nopember	0,605
12	Desember	10,334

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

1. Nomor
2. Bulan
3. Debit Andalan (m³/detik)

4.2 Penentuan Debit Pembangkit

Penentuan debit pembangkitan yang dimaksudkan adalah untuk menentukan debit andalan yang mendukung operasi pembangkit listrik secara maksimal. Hasil dari perhitungan penentuan debit pembangkitan yang akan digunakan sebagai dasar untuk mendesain bangunan pada PLTMH Cikeusik dari bangunan pengambilan (*intake*), saluran pembawa (*headrace*), bak penenang (*forebay*), pipa pesat (*penstock pipe*) hingga pemilihan jenis turbin.

Untuk menentukan debit pembangkitan akan dilakukan simulasi perhitungan dengan menggunakan beberapa hal, yaitu debit andalan yang dihasilkan oleh *Flow Duration Curve* (FDC) hingga menghitung kapasitas. Untuk debit andalan yang akan digunakan berdasarkan probabilitas 26% (Debit Air Cukup), 51% (Debit Air Normal), 75% (Debit Air Rendah), dan 90 % (Debit Andalan) yang dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.7
Debit Andalan Probabilitas Tertentu

Prob (%)	Q (m ³ /dt)
5	62,760
10	58,297
15	53,889
20	48,434
26	40,569
30	37,093
35	33,515
40	29,195
45	24,995
51	19,687
55	17,727
60	10,347
65	6,752
70	5,597
75	4,210
80	2,883
85	1,946
90	1,509
95	0,986
96	0,758
97	0,197

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Penentuan debit andalan yang digunakan PLTA pada umumnya adalah 85% - 90% (Soemarto, 1987, p.214). Agar mendapatkan debit yang paling tepat diantara probabilitas 85% - 90%, maka diperlukan simulasi perhitungan daya dan energi yang dihasilkan. Perhitungan energi yang dihasilkan akan dihitung berdasarkan setiap probabilitas. Parameter perhitungan energi adalah sebagai berikut:

$Q_{rencana}$: 1,509 m³/detik (sebagai contoh diambil probabilitas 90%)

Tinggi jatuh : 1,44 meter (nilai perkiraan berdasarkan topografi Sungai Cisanggarung)

Efisiensi : 0,8

Contoh perhitungan $Q_{90} = 1,509 \text{ m}^3/\text{detik}$

- ✓ Menentukan nilai daya dengan $Q \times H \times \text{Efisiensi} \times \text{Gravitasi (g)} = 1,509 \times 1,44 \times 0,8 \times 9,81 = 17,053 \text{ kW}$
- ✓ Menentukan nilai energi produksi tahunan perkalian antara daya yang dihasilkan (17,053 kW) dengan jumlah jam dalam sehari dan jumlah hari beroperasi pada debit tersebut. Pada debit dengan probabilitas 90% didapatkan nilai energi produksi bulanan yang dihasilkan sebesar 124.319,214 kWh (dalam 1 bulan).

Untuk perhitungan dapat dilihat pada tabel 4.8 sampai dengan tabel 4.11 sebagai berikut:

Tabel 4.8
Perhitungan Energi Produksi Tahunan untuk Probabilitas 26% (Debit Air Cukup)

No	Bulan	Hari	Q prob (m ³ /dt)	Q pakai (m ³ /dt)	Heff (meter)	η turbin	Daya (kW)	Energi (kWh/bulan)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Januari	31	53,474	40,569	1,44	0,8	458,475	341.105,5021
2	Februari	28	59,560	40,569	1,44	0,8	458,475	308.095,2923
3	Maret	31	62,299	40,569	1,44	0,8	458,475	341.105,5021
4	April	30	56,060	40,569	1,44	0,8	458,475	330.102,0988
5	Mei	31	30,859	30,4268	1,44	0,8	343,856	255.829,1266
6	Juni	30	23,526	30,4268	1,44	0,8	343,856	247.576,5741
7	Juli	31	17,000	30,4268	1,44	0,8	343,856	255.829,1266
8	Agustus	31	5,048	0	1,44	0,8	0	0
9	September	30	4,042	0	1,44	0,8	0	0
10	Oktober	31	5,442	0	1,44	0,8	0	0
11	November	30	12,970	0	1,44	0,8	0	0
12	Desember	31	28,847	30,4268	1,44	0,8	343,856	255.829,1266
TOTAL								2.335.472,349

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. No. | 6. Data Heff (m) |
| 2. Bulan | 7. Efisiensi Turbin |
| 3. Jumlah Hari | 8. Efisiensi Generator |
| 4. Data Qsungai (m ³ /dt) | 9. (5) x (6) x (7) x 9,81 |
| 5. Data Q ₂₆ (m ³ /dt) | 10. (8) x 24 x (3) |

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa operasi PLTMH dioperasikan selama 8 bulan. Pada bulan agustus, september, oktober, dan november merupakan kondisi dimana sistem mengalami *off* atau berhenti beroperasi secara teoritis. Dan untuk probabilitas debit 26% didapatkan hasil daya maksimum sebesar 458,48 kW dengan energi produksi maksimum sebesar 2.335.472,35 kWh.

Tabel 4.9
Perhitungan Energi Produksi Tahunan untuk Probabilitas 51% (Debit Air Normal)

No	Bulan	Hari	Q prob (m ³ /dt)	Q pakai (m ³ /dt)	Heff (meter)	η turbin	Daya (kW)	Energi (kWh/bulan)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Januari	31	37,322	19,687	1,44	0,8	222,485	165.528,9512
2	Februari	28	51,489	19,687	1,44	0,8	222,485	149.510,0204
3	Maret	31	50,390	19,687	1,44	0,8	222,485	165.528,9512
4	April	30	41,846	19,687	1,44	0,8	222,485	160.189,3076
5	Mei	31	24,227	19,687	1,44	0,8	222,485	165.528,9512
6	Juni	30	11,189	14,7653	1,44	0,8	166,864	120.141,9807
7	Juli	31	6,161	0	1,44	0,8	0	0
8	Agustus	31	2,199	0	1,44	0,8	0	0
9	September	30	1,928	0	1,44	0,8	0	0
10	Oktober	31	2,726	0	1,44	0,8	0	0
11	November	30	7,872	14,7653	1,44	0,8	166,864	120.141,9807
12	Desember	31	23,715	19,687	1,44	0,8	222,485	165.528,9512
TOTAL								1.212.099,094

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. No. | 6. Data Heff (m) |
| 2. Bulan | 7. Efisiensi Turbin |
| 3. Jumlah Hari | 8. Efisiensi Generator |
| 4. Data Qsungai (m ³ /dt) | 9. (5) x (6) x (7) x 9,81 |
| 5. Data Q ₅₁ (m ³ /dt) | 10. (8) x 24 x (3) |

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa operasi PLTMH dioperasikan selama 8 bulan. Pada bulan agustus, september, oktober, dan november merupakan kondisi dimana sistem mengalami *off* atau berhenti beroperasi secara teoritis. Dan untuk probabilitas debit 51% didapatkan hasil daya maksimum sebesar 222,485 kW dengan energi produksi maksimum sebesar 1.212.099,094 kWh.

Tabel 4.10
Perhitungan Energi Produksi Tahunan untuk Probabilitas 75% (Debit Air Rendah)

No	Bulan	Hari	Q prob (m ³ /dt)	Q pakai (m ³ /dt)	Heff (meter)	η turbin	Daya (kW)	Energi (kWh/bulan)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Januari	31	34,634	4,21	1,44	0,8	47,5777	35.397,82011
2	Februari	28	41,130	4,21	1,44	0,8	47,5777	31.972,22461
3	Maret	31	42,280	4,21	1,44	0,8	47,5777	35.397,82011
4	April	30	32,600	4,21	1,44	0,8	47,5777	34.255,95494
5	Mei	31	19,716	4,21	1,44	0,8	47,5777	35.397,82011
6	Juni	30	6,060	4,21	1,44	0,8	47,5777	34.255,95494
7	Juli	31	2,995	3,1575	1,44	0,8	35,6833	26.548,36508
8	Agustus	31	1,781	3,1575	1,44	0,8	35,6833	26.548,36508
9	September	30	1,230	0	1,44	0,8	0	0
10	Oktober	31	1,203	0	1,44	0,8	0	0
11	November	30	2,892	3,1575	1,44	0,8	35,6833	25.691,96621
12	Desember	31	20,085	4,21	1,44	0,8	47,5777	35.397,82011
TOTAL								32.0864,1113

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. No. | 6. Data Heff (m) |
| 2. Bulan | 7. Efisiensi Turbin |
| 3. Jumlah Hari | 8. Efisiensi Generator |
| 4. Data Qsungai (m ³ /dt) | 9. (5) x (6) x (7) x 9,81 |
| 5. Data Q ₇₅ (m ³ /dt) | 10. (8) x 24 x (3) |

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa operasi PLTMH dioperasikan selama 10 bulan. Pada bulan september dan oktober merupakan kondisi dimana sistem mengalami *off* atau berhenti beroperasi secara teoritis. Dan untuk probabilitas debit 75% didapatkan hasil daya maksimum sebesar 47,577 kW dengan energi produksi maksimum sebesar 32.0864,11 kWh.

Tabel 4.11
Perhitungan Energi Produksi Tahunan untuk Probabilitas 90% (Debit Andalan)

No	Bulan	Hari	Q prob (m ³ /dt)	Q pakai (m ³ /dt)	Heff (meter)	η turbin	Daya (kW)	Energi (kWh/bulan)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Januari	31	28,381	1,509	1,44	0,8	17,0534	12.687,72222
2	Februari	28	30,434	1,509	1,44	0,8	17,0534	11.459,87813
3	Maret	31	32,267	1,509	1,44	0,8	17,0534	12.687,72222
4	April	30	22,832	1,509	1,44	0,8	17,0534	12.278,44086
5	Mei	31	3,278	1,509	1,44	0,8	17,0534	12.687,72222
6	Juni	30	1,107	1,13175	1,44	0,8	12,79	92.08,830643
7	Juli	31	1,517	1,509	1,44	0,8	17,0534	12.687,72222
8	Agustus	31	1,155	1,13175	1,44	0,8	12,79	95.15,791665
9	September	30	0,916	1,13175	1,44	0,8	12,79	92.08,830643
10	Oktober	31	0,300	0,000	1,44	0,8	0	0
11	November	30	0,605	1,13175	1,44	0,8	12,79	92.08,830643
12	Desember	31	10,334	1,509	1,44	0,8	17,0534	12.687,72222
TOTAL								12.4319,2137

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. No. | 6. Data Heff (m) |
| 2. Bulan | 7. Efisiensi Turbin |
| 3. Jumlah Hari | 8. Efisiensi Generator |
| 4. Data Qsungai (m ³ /dt) | 9. (5) x (6) x (7) x 9,81 |
| 5. Data Q ₉₀ (m ³ /dt) | 10. (8) x 24 x (3) |

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa operasi PLTMH dioperasikan selama 11 bulan. Pada bulan oktober merupakan kondisi dimana sistem mengalami *off* atau berhenti beroperasi secara teoritis. Dan untuk probabilitas debit 90% didapatkan hasil daya maksimum sebesar 17,053 kW dengan energi produksi maksimum sebesar 12.4319,213 kWh.

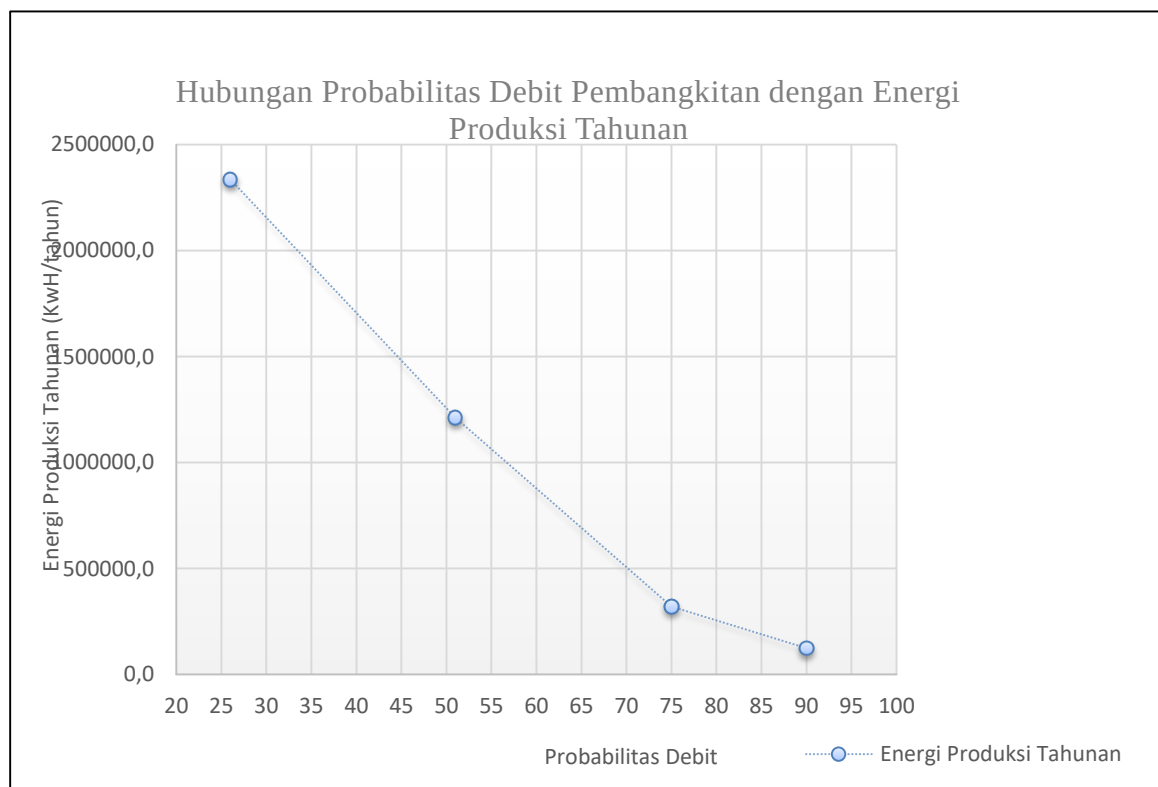
Tabel 4.12
Perhitungan Daya, Energi dan Faktor Kapasitas

No	Keandalan Debit	Debit Rencana	Tinggi Jatuh Bersih	Kapasitas Terpasang	Energi Produksi Tahunan	Capacity Factor	Kondisi Debit Sungai
	%	m ³ /detik	meter	kW	kWh/tahun	%	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	26	40,569	1,44	458,470	2.335.472,35	58,15	(Debit Air Cukup)
2	51	19,687	1,44	222,483	1.212.099,09	62,19	(Debit Air Normal)
3	75	4,210	1,44	47,572	320.864,11	77,00	(Debit Air Rendah)
4	90	1,509	1,44	17,051	124.319,21	83,23	(Debit Andalan)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

1. Nomor
2. Keandalan Debit (%)
3. Data Debit Rencana (m³/detik)
4. Data H_{gross} (m)
5. $(4) \times (3) \times 9,81 \times \eta_{\text{turbin}}$
6. Data Energi Produksi Tahunan (kWh/tahun)
7. $\{(6) / (5) \times 8760\} \times 100$
8. Kondisi Debit Sungai



Gambar 4.3 Hubungan Probabilitas Debit Pembangkitan Dengan Energi Produksi Tahunan

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 12 Tahun 2017 tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan untuk Penyediaan Listrik dengan kapasitas paling tinggi 10 MW untuk penyediaan listrik minimal nilai *Capacity Factor* sebesar 65%. Maka, debit dengan keandalan 90% dapat digunakan paling efektif. Oleh sebab itu, debit dengan keandalan 90% bisa dipakai untuk perhitungan selanjutnya dengan debit sebesar 1,509 m³/detik.

4.3 Analisis Hidrolika

4.3.1 Bangunan Pengambilan (*Intake*)

Bangunan pengambilan (*Intake*) berfungsi untuk mengelekkkan air irigasi dan dialirkan kembali ke saluran irigasi dalam jumlah yang diinginkan.

Bangunan pengambilan terletak pada sisi kiri saluran induk irigasi bendung cikeusik dan dilengkapi dengan dua buah pintu baja tipe *Sluice Gate*. Berikut adalah data yang dibutuhkan perhitungan *intake*:

- ✓ Q saluran (Q₉₀) = 1,509 m³/dt
- ✓ Q desain bangunan pengambilan = 1,2 x Q_{saluran}
= 1,2 x 1,509 m³/dt
= 1,811 m³/dt
- ✓ Elevasi dasar pintu pengambilan = +35,73
- ✓ Lebar pintu (b) = 2,2 m
- ✓ Kekasaran = 0,013 (Pasangan Beton)
- ✓ Percepatan gravitasi (g) = 9,81 m/dt²
- ✓ Tinggi ambang pengambilan (p) = 0,1 m, sehingga elevasi ambang pengambilan
+35,83
- ✓ Jumlah pintu pengambilan = 1 buah

Untuk menentukan pengoperasian pintu pengambilan, maka perlu dihitung hubungan antara bukaan pintu dengan debit untuk aliran tenggelam yang melalui pintu pengambilan, sehingga contoh perhitungan saat muka air di depan pintu H=0,3 m dan tinggi bukaan a=0,1 m adalah sebagai berikut:

- $h_1/a = 0,3/0,1 = 3$
- $h_2/a = 0,1/0,1 = 1$

Nilai h_1/a dan h_2/a untuk menentukan Koefisien aliran tenggelam (K) digunakan 0,95 (didapat dari Tabel 2.6)

- $\mu = 0,55$

Nilai μ didapat dari hubungan h_1/a dan sudut dari pintu sorong tegak untuk menentukan Koefisien debit (μ) digunakan 0,55 (didapat dari Tabel 2.7)

Contoh perhitungan dalam kondisi Q (Aliran Tenggelam) dihitung pada saat bukaan pintu sebesar 0,1 meter dengan tinggi muka air disimulasikan 0,3 meter, sehingga:

$$\begin{aligned} Q &= K \times \mu \times b \times a \sqrt{2 \times g \times h} \\ &= 0,95 \times 0,55 \times 2,2 \times 0,1 \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,3} \\ &= 0,28 \text{ m}^3/\text{dt} \end{aligned}$$

Perhitungan selanjutnya untuk aliran dalam Q (Aliran Bebas) dihitung pada saat bukaan pintu sebesar 0,1 meter dengan tinggi muka air 0,1 meter. Karena tinggi bukaan lebih tinggi daripada tinggi muka air maka $a = 0,10$ meter atau ($a = H$), sehingga:

$$\begin{aligned} Q &= K \times \mu \times b \times a \sqrt{2 \times g \times h} \\ &= 1 \times 0,55 \times 2,2 \times 0,1 \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,1} \\ &= 0,17 \text{ m}^3/\text{dt} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan operasi pintu pengambilan dapat di lihat pada tabel berikut ini:

Tabel 4.13

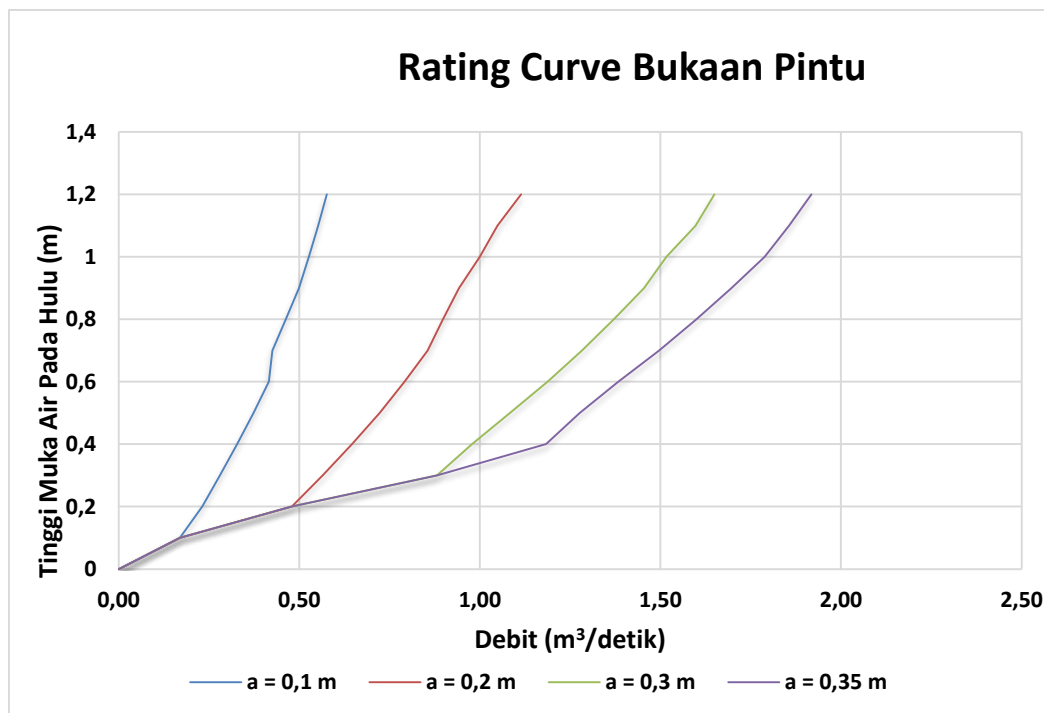
Pola Operasi Pintu Pengambilan *Intake*

No.	Elevasi	Kedalaman Air di Hulu Pintu h_1 (m)	Tinggi Bukaan Pintu (a)				Keterangan
			0,1	0,2	0,3	0,35	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	35,83	0	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	35,93	0,1	0,17	0,17	0,17	0,17	
3	36,03	0,2	0,23	0,48	0,48	0,48	
4	36,13	0,3	0,28	0,56	0,88	0,88	
5	36,23	0,4	0,33	0,65	0,98	1,18	
6	36,33	0,5	0,37	0,72	1,08	1,28	
7	36,43	0,6	0,42	0,79	1,19	1,38	
8	36,53	0,7	0,43	0,86	1,28	1,50	
9	36,63	0,8	0,46	0,90	1,37	1,60	
10	36,73	0,9	0,50	0,94	1,45	1,70	
11	36,83	1	0,53	1,00	1,52	1,79	
12	36,93	1,1	0,55	1,05	1,60	1,86	
13	37,03	1,2	0,58	1,11	1,65	1,92	

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

- (1) Nomor
- (2) Elevasi
- (3) Kedalaman Air di Hulu Pintu (m)
- (4) Qintake pada saat $a = 0,1 \text{ m (m}^3/\text{dt)}$
- (5) Qintake pada saat $a = 0,2 \text{ m (m}^3/\text{dt)}$
- (6) Qintake pada saat $a = 0,3 \text{ m (m}^3/\text{dt)}$
- (7) Qintake pada saat $a = 0,35 \text{ m (m}^3/\text{dt)}$



Gambar 4.4 Rating Curve Bukaan Pintu Pengambilan

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.3.2 Saluran Pembawa Air (*Headrace*)

Saluran Pembawa Air (*Headrace*) menyalurkan air dari intake sampai ke bak penenang, atau tempat lainnya pipa penstok (*Penstok*).

Dimensi saluran pembawa di hitung dengan menggunakan rumus-rumus perhitungan aliran seragam pada saluran terbuka. Perhitungan dimensi saluran pembawa, digunakan rumus Strickler:

$$\begin{aligned}
 \checkmark \text{ Q desain (Q}_{90}\text{)} &= 1,509 \text{ m}^3/\text{dt} \\
 \checkmark \text{ Q desain saluran pembawa} &= 1,1 \times \text{Q}_{\text{saluran}} \\
 &= 1,1 \times 1,509 \text{ m}^3/\text{dt} \\
 &= 1,66 \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

- ✓ Kecepatan maksimum = 3 m/dt
- ✓ Kemiringan saluran (I) = 0,0015 (direncanakan)
- ✓ Koefisien strickler = 70 (pasangan beton)
- ✓ Lebar saluran rencana = 2,2 m (direncanakan)
- ✓ Kemiringan talud = 1 (direncanakan)

Dari parameter diatas direncanakan dimensi penampang saluran pembawa, dengan cara coba-coba nilai h dan menyesuaikan debit rencana. Untuk perhitungannya digunakan nilai $h=0,42$ m, perhitungan sebagai berikut:

- ✓ Menghitung luas penampang (A) = $b \times h$
 $= 2,2 \times 0,42$
 $= 0,92 \text{ m}^2$
- ✓ Keliling basah (P) = $b + 2h$
 $= 2,2 + 2 \cdot 0,42$
 $= 3,04 \text{ m}$
- ✓ Jari-jari hidrolis (R) = $\left(\frac{b \times h}{b + 2h}\right)$
 $= \left(\frac{(2,2 \times 0,42)}{2,2 + 2 \cdot 0,42}\right)$
 $= 0,304 \text{ m}$
- ✓ Menghitung debit (Q) = $K \cdot A \cdot R^{2/3} S^{1/2}$
 $= 70 \times 0,92 \times 0,304^{2/3} \cdot 0,001^{1/2}$
 $= 0,92 \text{ m}^3/\text{detik}$

Perhitungan debit yang didapatkan adalah $0,92 \text{ m}^3/\text{dt}$ sehingga belum memenuhi debit rencana saluran. Untuk mendapatkan debit yang sesuai dengan debit rencana saluran maka dilakukan dengan cara yang sama. Hasil perhitungan coba-coba didapatkan sebagai berikut:

Tabel 4.14

Perhitungan Saluran Pembawa

b	h	b/h	A	P	R	S	K	V	Q	Fr	Ket
meter	meter		m²	meter	meter		m^{1/3}/dt	m/dt	m³/dt		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2,20	0,42	5,24	0,92	3,040	0,304	0,001	70	1,00	0,92	0,49	Subkritis
2,20	0,46	4,82	1,00	3,112	0,322	0,001	70	1,04	1,04	0,49	Subkritis
2,20	0,500	4,40	1,10	3,200	0,344	0,001	70	1,09	1,19	0,49	Subkritis
2,20	0,588	3,74	1,29	3,376	0,383	0,001	70	1,17	1,51	0,49	Subkritis
2,20	0,628	3,50	1,38	3,456	0,400	0,001	70	1,20	1,66	0,48	Subkritis

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

- | | |
|-----------------------------|--|
| 1. Data Lebar Saluran (b) | 7. Data Kemiringan Saluran |
| 2. Tinggi Muka Air (h) | 8. Data Koefisien Strickler (K) |
| 3. $(1) / (2)$ | 9. $(8) \times (6)^{2/3} \times (7)^{1/2}$ |
| 4. $(1) \times (2)$ | 10. $(9) \times (4)$ |
| 5. $\{(1) + 2 \times (2)\}$ | 11. $(9) / [9,81 \times (2)]^{1/2}$ |
| 6. $(4) / (5)$ | 12. $Fr=1$, Aliran Kritis |
| | $Fr<1$, Aliran Subkritis |
| | $Fr>1$, Aliran Superkritis |

Berdasarkan hasil perhitungan untuk debit 1,66 m³/dt sesuai dengan debit rencana dan lebar saluran 2,2 meter, maka didapatkan teknis untuk saluran pembawa air sebagai berikut:

- ✓ Lebar saluran (b) = 2,2 meter
- ✓ Kemiringan saluran (I) = 0,001
- ✓ Kemiringan talud (m) = 1
- ✓ Tinggi muka air (h) = 0,628 m
- ✓ Tinggi jagaan = $\frac{1}{3} \cdot h$
= $\frac{1}{3} \times 0,628$
= 0,209 m
- ✓ Kecepatan aliran (V) = 1,20 m/dt (memenuhi syarat, aman)
- ✓ Material = pasangan beton

4.3.3 Bak Penenang (*Forebay*)

Tujuan untuk bangunan bak penenang adalah sebagai tempat penenang air yang kemudian mengarahkannya untuk masuk ke pipa pesat sesuai dengan debit yang diinginkan. Untuk perhitungan dimensi bak penenang dibutuhkan data-data sebagai berikut:

- ✓ Q desain (Q_{90}) = 1,509 m³/dt
- ✓ Q desain bak penenang (Q_d) = $1,2 \times Q_{\text{saluran}}$
= $1,2 \times 1,509 \text{ m}^3/\text{dt}$
= 1,811 m³/dt
- ✓ Lebar headrace = 3,0 meter
- ✓ Diameter penstock (D) = 0,93 meter
- ✓ Lebar saluran pembawa (bs) = 2,2 meter
- ✓ TMA saluran pembawa (h) = 0,628 meter

Sebelum menentukan dimensi dari bak penenang, perlu diketahui kapasitas volume bak penenang. Kapasitas bak penenang dapat didesain 10 sampai 20 kali dari debit rencana bak penenang hal tersebut untuk menyerap getaran dari saluran pembawa dengan maksimum debit. Berikut perhitungan rencana dimensi dari bak penenang. (JICA, 2010, p.112)

$$\begin{aligned}
 \checkmark \quad \text{Volume bak penenang (V}_f\text{)} &= 10 \times Q_d \\
 &= 10 \times 1,811 \text{ m}^3/\text{dt} \\
 &= 18,11 \text{ m}^3/\text{dt} \\
 \checkmark \quad V_f &= A_f \times h_f \\
 10Q &= B_f \times L \times (b_s + \Delta z) \\
 18,11 &= 3 \times L \times 3 \\
 L &= 2,01 \text{ meter} \\
 \checkmark \quad \text{Tinggi kritis (h}_c\text{)} &= \left(\frac{\alpha \cdot Q d^2}{9,81 \cdot B^2} \right)^{\frac{1}{3}} ; \alpha = 1,1 \\
 &= \left(\frac{1,1 \cdot 18,11^2}{9,81 \cdot 2,2^2} \right)^{1/3} \\
 &= 0,42 \text{ meter} \\
 \checkmark \quad \text{Tinggi kritis (h}_0\text{)} &= h \text{ pada headrace} = 0,628 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

Setelah didapatkan dimensi bangunan bak penenang, selanjutnya menghitung lebar pelimpah. Perhitungan lebar pelimpah didasarkan pada debit rencana 1,811 m³/detik, koefisien pada umumnya sudah ditentukan sebesar C = 1,8 dan tinggi muka air di pelimpah direncanakan setinggi jagaan saluran pembawa yaitu 0,209 meter . Sehingga, didapatkan lebar pelimpah adalah

$$\begin{aligned}
 \checkmark \quad \text{Lebar pelimpah} &= 0,4 \times \text{Panjang bak Penenang} \\
 &= 0,4 \times 2,01 \text{ m} \\
 &= 0,80 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

4.3.4 Pipa Pesat (*Penstock Pipe*)

Pipa pesat (*Penstock*) adalah pipa yang berfungsi untuk mengalirkan air dari bak penenang (*forebay*) menuju ke Rumah Pembangkit (*Power House*). Perencanaan pipa pesat mencakup pemilihan material, diameter , tebal dan jenis sambungan (*coordination point*).

4.3.4.1 Tebal Pipa Pesat

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

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

$$= 2,69 \times \left(\frac{0,012^2 \times 1,509^2 \times 19,14}{1,44} \right)^{1,875}$$

$$= 0,97 \text{ m}$$

Dari hasil didapatkan nilai diameter pipa pesat sebesar 0,97 m dan dibulatkan diameter yang akan digunakan sebesar 1 m.

$$V = \left(\frac{Q}{A} \right)$$

$$= \left(\frac{1,509}{\frac{1}{4} \times 3,14 \times 1} \right)$$

$$= 1,980 \text{ m/detik}$$

Tebal Pipa Pesat :

$$t = \frac{P \times r \times 1000}{q}$$

$$P = \rho \times g \times h$$

$$= 1 \times 9,81 \times 1,44$$

$$= 14,126 \text{ ton/m}$$

$$t = \frac{14,126 \times 0,93}{7000}$$

$$= 0,001959 \text{ m} = 1,96 \text{ mm}$$

$$= 1,96 \text{ mm} + 1 \text{ mm (Extra thickness)}$$

$$= 2,96 \text{ mm, diambil tebal 3,00 mm}$$

4.3.4.2 Diameter Pipa Pesat

Untuk mengamankan pipa dari *waterhammer* yang dapat memecahkan pipa akibat adanya penutupan secara tiba-tiba maka harus melakukan analisa tekanan hidrostatik, dalam ESHA ada beberapa langkah perhitungan yang harus dilakukan, dimulai dari menghitung kecepatan aliran, menghitung parameter N dan tekanan hidrostatik. Perhitungan yang dimaksud adalah sebagai berikut:

$$\checkmark \text{ Kecepatan aliran dalam pipa (V)} = \frac{4.Q}{\pi.D}$$

$$= \frac{4.1,509}{\pi.0,97}$$

$$= 1,980 \text{ m/detik}$$

$$\checkmark \text{ Nilai N} = \left(\frac{V_0.L}{g.Po.t} \right)^2$$

Nilai Po adalah nilai tekanan hidrostatik kotor yang ekuivalen dengan tinggi jatuh kotor Po = 1,44 meter. Sedangkan untuk t adalah waktu yang diperkirakan untuk penutupan katup *inlet* yaitu selama 5 detik. (ESHA, 2004, p.144)

$$= \left(\frac{1,509 \cdot 19,14}{9,81 \cdot 1,44 \cdot 5} \right)^2$$

$$= 0,167$$

$$\checkmark \Delta p \text{ (hidrostatik)} = H \left(\frac{N}{2} \pm \sqrt{N + \frac{N^2}{4}} \right)$$

$$= 1,44 \left(\frac{0,167}{2} \pm \sqrt{0,167 + \frac{0,167^2}{4}} \right)$$

$$\Delta p (+) = 0,720$$

$$\Delta p (-) = -0,480$$

Dari hasil perhitungan sebelumnya, total tekanan hidrostatik adalah $P_o + (\Delta p (+))$, sehingga didapatkan nilai ketinggian $1,44 + 0,720 = 2,16$ meter. tekanan hidrostatik dengan tinggi 2,16 adalah sebagai berikut :

$$\checkmark \text{ Tekanan hidrostatik } (P_1) = P_o + \rho h g$$

$$= 10^5 + 1000 \cdot 2,16 \cdot 9,81$$

$$= 121189,60 \text{ N/m}^2$$

$$= 0,0001212 \text{ kN/mm}^2$$

Selain itu *total head pressure (Water hammer)* pada saat katup *inlet* menutup dengan waktu 5 detik adalah 2,16 meter.

Untuk kedalaman tenggelam pengambilan, karena $d < 1,0$ m, maka:

$$H \leq 1,0 d$$

$$H \leq 1,0 \times 0,97$$

$$H = 0,97 \text{ m}$$

jadi dapat disimpulkan bahwa kedalaman tenggelam untuk pengambilan aman terhadap masuknya udara pada pipa pesat karena $h = 0,97$ m.

4.3.5 Saluran Pembuang (*Tail Race*)

Saluran pembuang (*Tail Race*) berfungsi untuk mengalirkan debit kembali ke sungai. Saluran pembuang direncanakan berbentuk persegi dan menggunakan pasangan beton dengan desain perencanaan saluran terbuka. Untuk perhitungan saluran pembuang dibutuhkan data-data sebagai berikut:

$$\checkmark \text{ Debit pembangkit } (Q_p) = 1,81 \text{ m}^3/\text{detik}$$

$$\checkmark \text{ Elevasi dasar } \textit{tail race} = +34,33$$

$$\checkmark \text{ Bentuk saluran} = \text{Persegi}$$

$$\checkmark \text{ Lebar tailrace} = 3 \text{ m (direncanakan)}$$

Untuk mengamankan saluran pembuang agar air yang berada di saluran irigasi tidak masuk kedalam *tail race* yang akan mengakibatkan aliran balik atau *Backwater*, maka dari itu perlu di ditambahkan ambang pada ujung saluran. Berikut data perencanaan:

- ✓ Bentuk ambang = ogee tipe 1
- ✓ Tinggi ambang (P) = 0,44 meter (direncanakan)
- ✓ Lebar ambang (B) = 3 meter
- ✓ P/Hd = 0,44/0,46 = 0,90

Nilai P/Hd untuk menentukan Koefisien debit (C) digunakan 1,96 (didapat dari gambar grafik 2.15)

Untuk menganalisa tinggi muka air pada ambang yang digunakan untuk merencanakan elevasi dasar saluran pembuang, maka didapat lengkung kapasitas ambang untuk beberapa tinggi muka air di atas ambang. Berikut ini contoh dari perhitungan pada ketinggian 0,1 meter :

$$\begin{aligned}
 Q &= C.B.H^{1,5} \\
 &= 1,96 \cdot 3 \cdot 0,1^{1,5} \\
 &= 0,19 \text{ m}^3/\text{detik}
 \end{aligned}$$

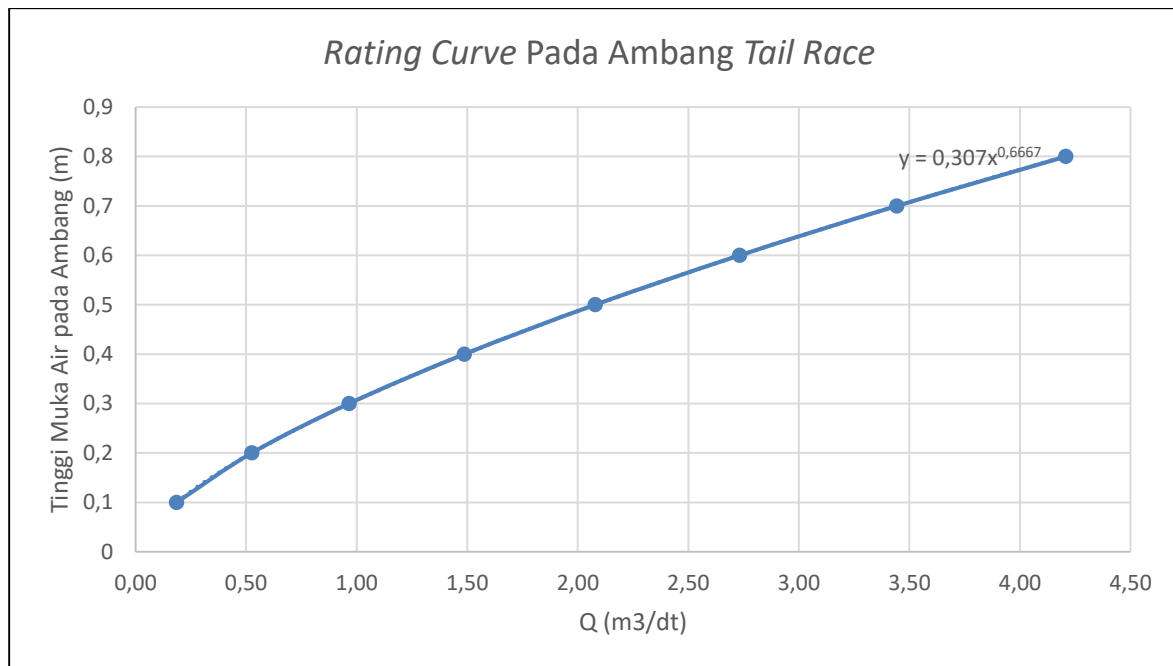
Tabel 4.15
Rating Curve pada Ambang *Tailrace*

El. Muka Air	H (m)	Q (m ³ /dt)
1	2	3
34,43	0,1	0,19
34,53	0,2	0,53
34,63	0,3	0,97
34,73	0,4	1,49
34,83	0,5	2,08
34,93	0,6	2,73
35,03	0,7	3,44
35,13	0,8	4,21

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

1. Elevasi Muka Air
2. Ketinggian Muka Air Pada Ambang (H)
3. $1,96 \times B \times (2)^{1,5}$



Gambar 4.5 Rating Curve pada Ambang Tail Race

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil dari *rating curve*, dapat diketahui ketinggian dari saluran pembuang. Ketinggian air pada ambang ada beberapa debit operasional pada *tailrace*, berikut dapat dilihat pada tabel dibawah :

Tabel 4.16

Tinggi Muka Air Diatas Ambang Tail Race

Q Operasi (m ³ /dt)		Tinggi Muka Air Ambang Tail Race (m)	Elevasi Muka air
1		2	3
1,2 Q	1,81	0,46	34,79
1,1 Q	1,66	0,43	34,76
1,0 Q	1,51	0,40	34,73
0,9 Q	1,36	0,38	34,71
0,8 Q	1,21	0,35	34,68
0,7 Q	1,06	0,32	34,65
0,6 Q	0,91	0,29	34,62
0,5 Q	0,75	0,25	34,58
0,4 Q	0,60	0,22	34,55
0,3 Q	0,45	0,18	34,51
0,2 Q	0,30	0,14	34,47
0,1 Q	0,15	0,09	34,42

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

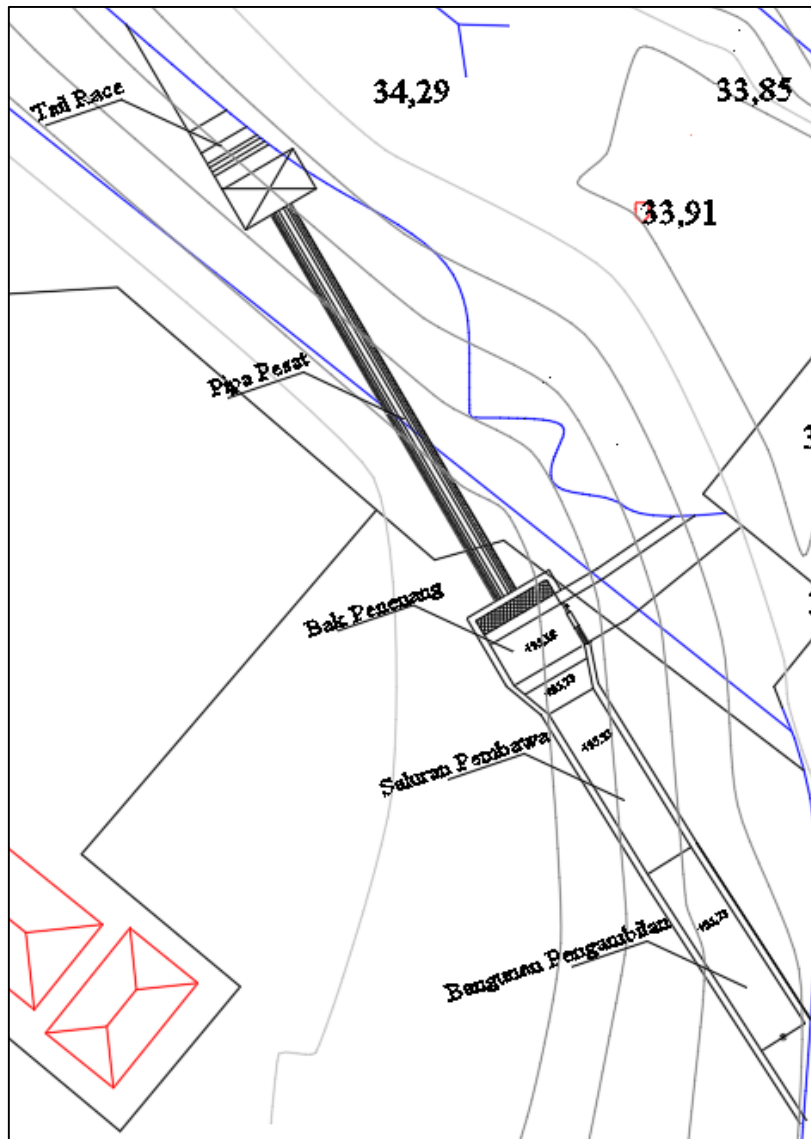
Keterangan:

1. $1,2 \times Q$ pada ambang
2. $0,307 \times (2)^{0,6667}$
3. Elevasi dasar *tail race* + (2)

Dengan operasi debit sebesar $1,81 \text{ m}^3/\text{detik}$ dapat diketahui hasil analisa perhitungan di atas dengan tinggi muka air 0,46 meter pada elevasi +34,79

4.3.6 Kehilangan Tinggi Tekan Aliran (*Head Loss*)

Kehilangan tinggi tekan aliran adalah menurunnya besaran energi yang diakibatkan gesekan maupun kontraksi yang terjadi selama proses pengaliran. Perhitungan *Head loss* dibutuhkan untuk mengetahui tinggi jatuh efektif pada PLTMH.



Gambar 4.6 Titik Terjadinya *Head Loss*

Sumber: Perencanaan Penulis, 2017

Berikut adalah contoh perhitungan *Head Loss* dengan debit masuk sebesar 1,509 m³/dt.

a. Kehilangan pada bangunan pengambilan

Diketahui:

- $b_{\text{intake}} = 2,2 \text{ meter}$
- $h_{\text{intake}} = 0,62 \text{ meter}$
- $f = 0,1$ (bentuk *Inlet round*)

maka:

$$\begin{aligned} V_{\text{intake}} &= \frac{Q}{(b_{\text{intake}} \times h_{\text{intake}})} \\ &= \frac{1,509}{(2,2 \times 0,62)} \\ &= 1,108 \text{ m/detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_a &= f \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,1 \times \frac{1,108^2}{2,9,81} \\ &= 0,006 \text{ m} \end{aligned}$$

b. Kehilangan tinggi tekan akibat belokan *intake*

Diketahui:

- $V_{\text{intake}} = 1,108 \text{ m/detik}$
- $\alpha = 30^\circ$

didapatkan nilai $\xi = 0,04$ maka perhitungan *Head loss* nya

$$\begin{aligned} h_b &= \xi \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,04 \times \frac{1,108^2}{2,9,81} \\ &= 0,003 \text{ m/detik} \end{aligned}$$

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

Diketahui:

- $V_{\text{headrace}} = 0,45 \text{ m/detik}$
- $B_{\text{forebay}} = 2,2 \text{ meter}$
- $H_{\text{forebay}} = 0,797 \text{ meter}$
- $A_1 = 1,361 \text{ m}^2$

Menghitung luas penampang saluran *forebay*

$$\begin{aligned} A_2 &= b_{\text{forebay}} \times H_{\text{forebay}} \\ &= 2,2 \times 0,797 \\ &= 1,754 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Menghitung koefisien

$$\begin{aligned}\xi &= 1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \\ &= 1 - \left(\frac{1,361}{1,754}\right)^2 \\ &= 0,50\end{aligned}$$

Maka, kehilangan tinggi tekannya adalah

$$\begin{aligned}H_c &= \xi \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,50 \times \frac{0,45^2}{2,9,81} \\ &= 0,001 \text{ m}\end{aligned}$$

d. Kehilangan tinggi tekan akibat saringan (*trashrack*)

Diketahui:

- $b_{\text{forebay}} = 2,2 \text{ meter}$
- $h_{\text{forebay}} = 0,619 \text{ meter}$
- $\phi = 1,43$ (profil kisi saringan berbentuk)

Maka:

$$\begin{aligned}V_{\text{forebay}} &= \frac{Q}{(b_{\text{forebay}} \times h_{\text{forebay}})} \\ &= \frac{1,509}{(2,2 \times 0,619)} \\ &= 0,073 \text{ m/detik}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}H_d &= \phi \times \sin \alpha \times \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3} \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,073 \times \sin 45 \times \left(\frac{0,01}{0,05}\right)^{4/3} \times \frac{1,509^2}{2,9,81} \\ &= 0,0007 \text{ m}\end{aligned}$$

e. Kehilangan tinggi tekan akibat pipa pesat

terdapat tiga kali kehilangan tinggi pada pipa pesat, yaitu akibat belokan pipa pertama (h_{g1}), gesekan pada pipa (h_{g2}), dan belokan pipa (h_{g3}). Masing-masing perhitungannya adalah sebagai berikut:

Diketahui:

- $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$
- $\xi = 0,2$ (hasil gambar 2.19)
- $L = 15 \text{ meter}$
- $d = 0,927 \text{ meter}$
- $n = 0,012$

luas pipa *penstock* :

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times d^2 \\ &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 0,93^2 \\ &= 0,675 \text{ m} \end{aligned}$$

Kecepatan aliran:

$$\begin{aligned} V_{\text{pipa}} &= \frac{Q}{A} \\ &= \frac{1,509}{0,675} \\ &= 2,235 \text{ m/detik} \end{aligned}$$

➤ Kehilangan tinggi tekan akibat lubang pemasukan pipa pesat:

$$\begin{aligned} H_{e1} &= k \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,25 \times \frac{2,235^2}{2,9,81} \\ &= 0,064 \text{ meter} \end{aligned}$$

➤ Kehilangan tinggi tekan akibat belokan:

$$\begin{aligned} H_{e2} = h_{e3} &= \xi \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,2 \times \frac{2,235^2}{2,9,81} \\ &= 0,051 \text{ m} \end{aligned}$$

➤ Kehilangan tinggi tekan akibat gesekan:

$$\begin{aligned} f &= \frac{124,5 \times n^2}{d^{1/3}} \\ &= \frac{124,5 \times 0,012^2}{0,93^{1/3}} \\ &= 0,058 \\ H_{e4} &= f \times \frac{L_p}{d} \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,058 \times \frac{15}{0,93} \times \frac{2,235^2}{2,9,81} \\ &= 0,239 \text{ m} \end{aligned}$$

➤ Kehilangan tinggi tekan akibat pemasukan katup pada pipa pesat:

$$\begin{aligned} H_{e5} &= k \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,10 \times \frac{0,93^2}{2,9,81} \\ &= 0,03 \text{ meter} \end{aligned}$$

Maka, jumlah kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat adalah:

$$\begin{aligned}\Sigma h_g &= h_{f1} + h_{f2} + h_{f3} + h_{f4} + h_{f5} + h_{f6} \\ &= 0,064 + 0,051 + 0,239 + 0,05 + 0,03 \\ &= 0,481 \text{ m}\end{aligned}$$

- o kehilangan tinggi tekan total

$$\begin{aligned}h_{\text{loss}} &= h_a + h_b + h_c + h_d + h_e + h_f + h_g \\ &= 0,00022 + 1,087 \\ &= 1,088 \text{ m}\end{aligned}$$

Berikut rekapitulasi kehilangan tinggi tekan pada PLTMH Cikeusik pada tabel 4.17.

Tabel 4.17

Total Kehilangan Tinggi Tekan Tiap Bulan

No.	Simbol	Penyebab <i>Head Loss</i>	Kehilangan (m)
1	2	3	4
1	ha	Pada bangunan pengambilan	0,006
2	hb	Pada belokan <i>intake</i>	0,003
3	hc	Pada pelebaran saluran menuju <i>forebay</i>	0,001
4	hd	Pada saringan (<i>Trashrack</i>)	0,001
5	he1	Pada pemasukan pipa	0,064
6	he2	Pada belokan 1 pipa pesat	0,051
7	he3	Pada belokan 2 pipa pesat	0,051
8	he4	Pada gesekan sepanjang pipa pesat	0,239
9	he5	Pada katup (<i>intake valve</i>)	0,030
Total			0,446

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

1. Nomor
2. Simbol
3. Penyebab *Head Loss*
4. Kehilangan (m)

4.3.7 Tinggi Jatuh Efektif

Tinggi jatuh efektif adalah tinggi jatuh yang digunakan untuk membangkitkan daya, yang merupakan selisih antara Elevasi Muka Air Intake (EMAI) pada bangunan pengambilan dan *Tail Water Level* dikurangi total kehilangan tinggi tekan aliran. Berikut adalah contoh perhitungan tinggi jatuh efektif:

Jadi, tinggi jatuh efektif yang digunakan adalah:

$$\begin{aligned}
 H_{\text{eff}} &= \text{EMAI} - \text{TWL} - h_{\text{loss}} \\
 &= 35,83 - 34,33 - 0,446 \\
 &= 1,054 \text{ m}
 \end{aligned}$$

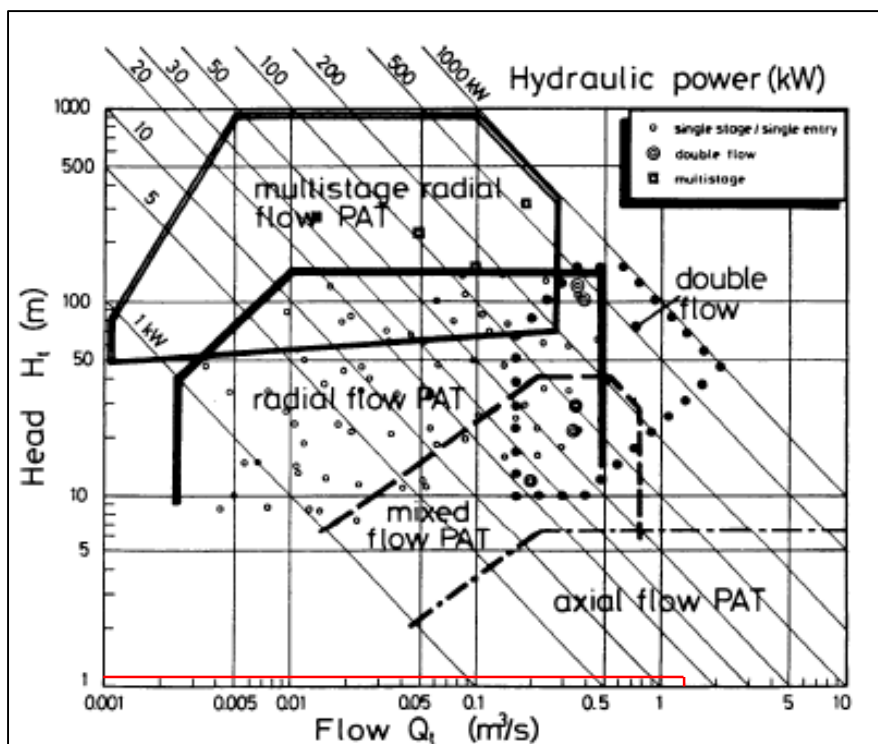
4.4 Analisa Mekanikal

4.4.1 Pemilihan Turbin

Pemilihan jenis turbin dilakukan dengan parameter debit dan tinggi jatuh efektif. Penentuan turbin yang akan digunakan didapat pada grafik dan berdasarkan kecepatan spesifik. Parameter untuk penentuan dengan grafik adalah sebagai berikut :

- ✓ Debit = 1,509 m³/detik
- ✓ Tinggi jatuh kotor = 1,44 meter
- ✓ Tinggi jatuh efektif = 1,054 meter
- ✓ Head loss = 0,446 meter
- ✓ Gravitasi (g) = 9,81 m/s²
- ✓ Efisiensi turbin (η) = 0,8

Dari parameter tersebut dan dengan tinggi jatuh yang sangat terbatas, penggunaan jenis turbin yang dipilih cocok untuk karakteristik lokasi. Penentuan dengan grafik ditampilkan pada gambar 4.6

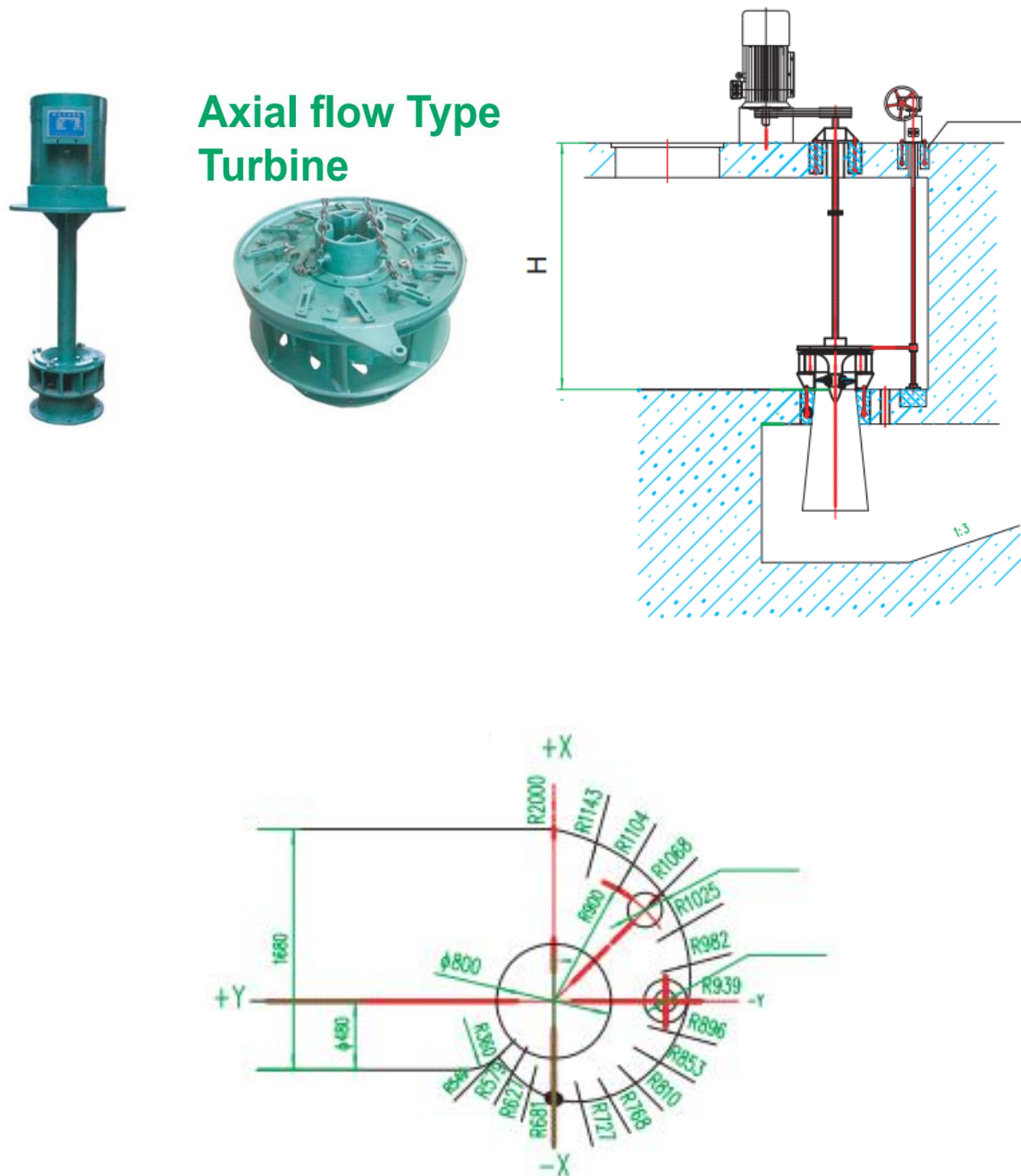


Gambar 4.7 Pemilihan Turbin

Sumber: Perencanaan Penulis, 2017

Berdasarkan hasil analisis *Pump As Turbine* yang digunakan menggunakan metode grafik, yang paling cocok berdasarkan karakteristik tinggi jatuh dan debit, turbin yang direkomendasikan paling cocok adalah *Axial Flow Pump As Turbine*.

Adapun bentuk spesifikasi dari axial flow type turbinesebagai berikut :



Gambar 4.8 Axial Flow Type Turbine

Sumber: Electway Electric, 2013

4.4.2 Kecepatan Putar Turbin

1. Kecepatan spesifik (n_{QE})

Kecepatan spesifik digunakan untuk menentukan parameter ukuran dan karakteristik dari sifat hidrolis turbin tersebut dimana $Head$ efektif H_n dan Efisiensi termal η_h (0.9), kecepatan spesifik dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} H_n &= H_{eff} \times \eta \\ &= 1,054 \times 0,9 \\ &= 0,949 \text{ m} \\ n_{QE} &= \frac{2,294}{H^{0,486}} \\ &= \frac{2,294}{1,054^{0,486}} \\ &= 2,236 \end{aligned}$$

2. Kecepatan putaran (n)

Kecepatan putaran turbin dihitung untuk menyesuaikan jenis dari generator yang akan digunakan, sebelumnya dihitung energi spesifik hidrolis E (J/Kg), dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} E &= H_n \times g \\ &= 0,949 \times 9,81 \\ &= 9,305 \text{ J/kg} \\ n &= \frac{n_{QE} \times E^{3/4}}{\sqrt{Q}} \\ &= \frac{2,236 \times 9,305^{3/4}}{\sqrt{1,509}} \\ &= 9,697 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

3. Putaran maksimal

$$\begin{aligned} n_{max} &= 3,2 \times n \\ &= 3,2 \times 9,697 \\ &= 31,032 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

4. Diameter terluar sudu (D_e)

$$\begin{aligned} D_e &= 84,5 \times (0,79 + 1,602 \times n_{QE}) \times \frac{\sqrt{H_n}}{60 \times n} \\ &= 84,5 \times (0,79 + 1,602 \times 2,236) \times \frac{\sqrt{0,949}}{60 \times 9,697} \\ &= 0,618 \text{ m} = 61,8 \text{ cm dibulatkan } 24,3 \text{ inch} \end{aligned}$$

5. Diameter diameter Hub (Di)

$$\begin{aligned}
 D_i &= \left(0,25 + \frac{0,0951}{n_{QE}}\right) D_e \\
 &= \left(0,25 + \frac{0,0951}{2,236}\right) 0,618 \\
 &= 0,180 \text{ m} = 1,8 \text{ cm dibulatkan } 0,7 \text{ inch}
 \end{aligned}$$

4.4.3 Perhitungan Sudu Distorsi

Untuk perancangan sudu, sudu tidak hanya tergantung pada analisis tegangan, beberapa faktor lainnya juga mempunyai peran penting. Yang paling utama adalah segitiga kecepatan, perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Q &= 1,509 \text{ m}^3/\text{detik} \\
 d &= D_e = 0,618 \text{ m} \\
 n &= 9,697 \text{ min}^{-1} \\
 H_n &= 0,949 \text{ m} \\
 D_i &= 0,18 \text{ m} \\
 H_1 &= 0,62 \text{ m} \\
 H_2 &= 0,42 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Kecepatan tangensial (u) merupakan gaya yang diberikan oleh aliran air masuk turbin dan aliran air keluar, kecepatan tangensial dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$u = \pi \times n \times d = 3,14 \times 9,697 \times 0,618 = 18,817 \text{ m/s}$$

Kecepatan mutlak (c) merupakan gaya yang diberikan oleh ketinggian jatuh air pada saat mengenai permukaan turbin H_1 (0,62 m) dan gaya gravitasi g (9.81m2/s) dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\begin{aligned}
 c_{u1} &= \frac{H_1 \times g}{u} \\
 &= \frac{0,62 \times 9,81}{18,817} \\
 &= 0,323 \text{ m/s} \\
 c_{u2} &= \frac{H_2 \times g}{u} \\
 &= \frac{0,42 \times 9,81}{18,817} \\
 &= 0,218 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Kecepatan relatif (W) merupakan gaya yang diberikan oleh aliran air masuk turbin dan aliran air keluar dari turbin, perhitungan sebagai berikut:

$$W_{u1} = C_{u1} - u = 0,323 - 18,817 = -18,50 \text{ m/s}$$

$$W_{u2} = C_{u2} - u = 0,218 - 18,817 = -18,59 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} W_u &= \frac{W_{u1} + W_{u2}}{2} \\ &= \frac{(-18,50) + (-18,59)}{2} \\ &= -18,55 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{Q}{A} \\ A &= \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2)}{4} \\ &= \frac{3,14 (0,618^2 - 0,18^2)}{4} \\ &= 0,274 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{1,509}{0,274} \\ &= 5,507 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_1 &= \sqrt{W_{u1}^2 + W_m^2} \\ &= \sqrt{(-18,50)^2 + (5,507)^2} \\ &= 19,30 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_2 &= \sqrt{W_{u2}^2 + W_m^2} \\ &= \sqrt{(-18,59)^2 + (5,507)^2} \\ &= 19,38 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{W_u^2 + W_m^2} \\ &= \sqrt{(-18,55)^2 + (5,507)^2} \\ &= 19,35 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan sudut yang akurat dari penyimpangan, sudut serang harus dikurangkan dari sudut luncur ($180-\beta^\infty$) :

$$\begin{aligned} \beta &= \arccos \frac{W_u}{W} \\ &= \arccos \frac{-18,55}{19,35} \\ &= \arccos -0,958 \\ &= 163 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(180^\circ - \beta_\infty) &= 1800 - 1630 \\ &= 17^\circ\end{aligned}$$

4.4.3.1 Menentukan Dimensi Utama Sudu

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

$$\xi_a = \frac{W_2^2 - W_\infty^2 + 2 \times g \times \left(\frac{p}{\gamma} - H_s - \frac{P_{min}}{\gamma} - \gamma_s - \eta_s \times \left(\frac{C_3^2 - C_4^2}{2g} \right) \right)}{k \times W_\infty^2}$$

dimana:

$$W_2 = 19,38 \text{ m/s}$$

$$W_\infty = 19,35 \text{ m/s}$$

$$\eta_s = 0,88 - 0,91$$

$$\eta_s = 0,8$$

$$p/\gamma = 1 \text{ m}$$

$$H_s = 0,85$$

$$K = 2,6 - 3$$

$$K = 2,6$$

$$P_{min} = 2 - 2,5$$

$$P_{min}/\gamma = 2$$

$$C_4 = 0,2 \text{ m/s}$$

$$Q = 1,509 \text{ m}^3/\text{detik}$$

$$c_3 = \frac{Q}{A_3}$$

$$A_3 = \frac{\pi \times D_i^2}{4}$$

$$= \frac{3,14 \times 0,18^2}{4}$$

$$= 0,025 \text{ m}^2$$

$$c_3 = \frac{1,509}{0,025}$$

$$= 60,36 \text{ m/s}$$

Maka dari persamaan tersebut dihitung koefisien angkat adalah :

$$\begin{aligned}\xi_a &= \frac{W_2^2 - W_\infty^2 + 2 \times g \times \left(\frac{p}{\gamma} - H_s - \frac{P_{min}}{\gamma} - \gamma_s - \eta_s \times \left(\frac{C_3^2 - C_4^2}{2g}\right)\right)}{k \times W_\infty^2} \\ &= \frac{19,38^2 - 19,35^2 + 2 \times 9,81 \times (10 - 0,85 - 2 - 0,8 \times \left(\frac{60,36^2 - 0,2^2}{2 \times 9,81}\right))}{2,6 \times 19,35^2} \\ &= 0,115\end{aligned}$$

4.4.3.2 Perbandingan l/t (Panjang Sudu Gerak dengan Jarak Antara Sudu)

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

$$\begin{aligned}\frac{l}{t} &= \frac{\eta \times g \times H}{W_\infty} \times \frac{c_m}{u} \times \frac{\cos \lambda}{\sin(180 - \beta - \lambda)} \times \frac{1}{\xi_a} \\ \eta_h &= 0,8 \\ H &= 1,054 \\ C_m &= w_m = 5,507 \text{ m/s} \\ w_\infty &= 19,35 \text{ m/s} \\ u &= 18,817 \text{ m/s} \\ \beta_\infty &= 163^\circ \\ \xi_a &= 0,115 \\ \lambda &= 3^\circ \text{ (asumsi)} \\ \frac{l}{t} &= \frac{\eta \times g \times H}{W_\infty} \times \frac{c_m}{u} \times \frac{\cos \lambda}{\sin(180 - \beta - \lambda)} \times \frac{1}{\xi_a} \\ &= \frac{0,8 \times 9,81 \times 1,054}{19,35} \times \frac{5,507}{18,817} \times \frac{\cos 3}{\sin(180 - 163 - 3)} \times \frac{1}{0,115} \\ &= 1,115\end{aligned}$$

Untuk nilai l/t tidak sama persis dengan nilai secara teoritis, pada teoritis nilai l/t dipakai satu, namun nilai yang sebenarnya adalah 0,95. Nilai tersebut didapat menggunakan metoda numerik, namun dalam perhitungan di atas data numerik dibulatkan, nilai l/t dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{l}{t} = 1,115$$

$$\frac{l}{t} = \frac{1}{l/t}$$

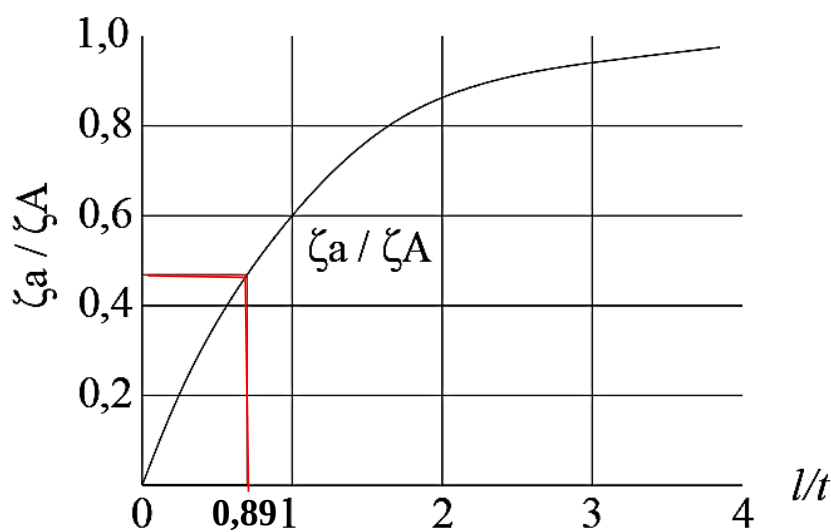
$$\frac{l}{t} = \frac{1}{1,115}$$

$$= 0,89$$

$$\frac{l}{t} \text{ (maximum allowed)} = 0,9 - 1,05$$

4.4.3.3 Perhitungan Koefisien Gaya Angkat ζ

Nilai timbal balik dari perbandingan l/t harus ditetapkan. Melalui nilai timbal balik, rasio koefisien gaya angkat ζ_a/ζ_A dapat dibaca dalam mengikuti Gambar (4.8) Menggunakan rasio ini maka koefisien ζ_A dapat dibentuk.



Gambar 4.9 Grafik Menentukan Nilai ζ_a / ζ_A

Sumber: Perencanaan Penulis, 2017

Dari gambar 4.8 maka dapat ditentukan nilai dari ζ_a / ζ_A dimana ζ_a adalah koefisien gaya angkat setiap radius sedangkan ζ_A adalah koefisien gaya angkat setiap sudu.

Berdasarkan hasil perhitungan dari l/t dengan cara setelah mengetahui nilai l/t ditarik garis hingga ujung garis menyentuh dari penentuan nilai ζ_a / ζ_A untuk selanjutnya dapat diketahui nilai ζ_a / ζ_A dengan grafik tersebut, maka nilai ζ_A dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

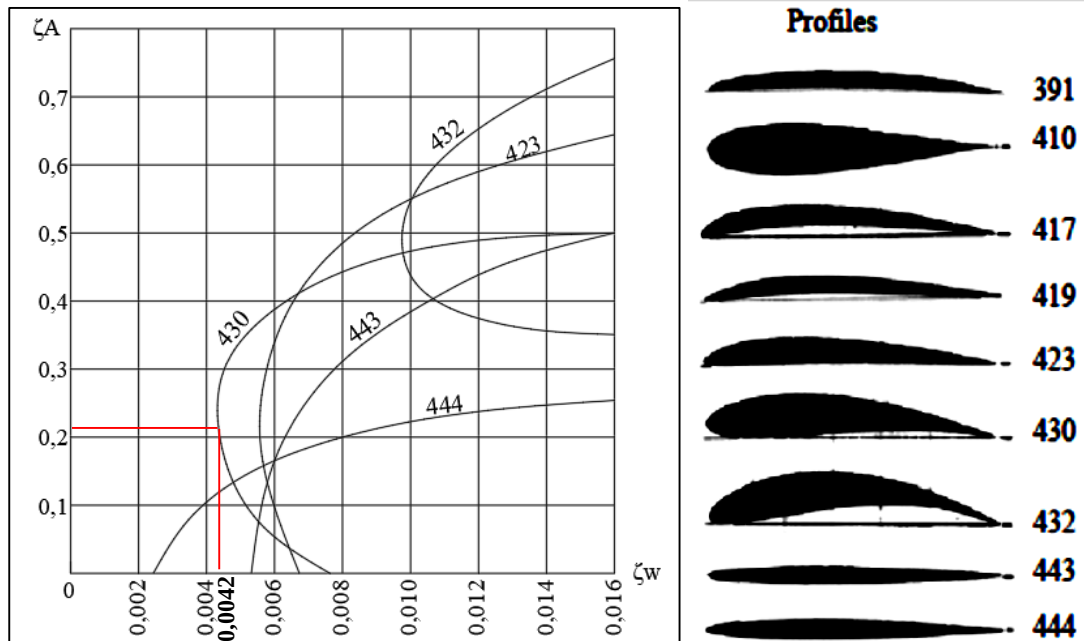
$$\zeta_a / \zeta_A = 0,47$$

$$\zeta_A = 0,115/0,47$$

$$= 0,24$$

4.4.3.4 Perhitungan Koefisien Gaya Gesek (ζ_w)

Grafik pada gambar berikut memberikan informasi tentang hambatan koefisien gaya gesek (ζ_w) dari profil yang berbeda. Profil sudu dapat dipilih berdasarkan tingkat kesulitan dari bentuk sudu tersebut dan berdasarkan dimensi turbin yang direncanakan, dapat dilihat pada Gambar (4.9)



Gambar 4.10 Grafik Untuk Menentukan Profil Yang Akan Digunakan

Sumber: Perencanaan Penulis, 2017

Dari grafik diatas setelah diperoleh nilai $\zeta_A = 0,24$ ditarik garis hingga ujung garis menyentuh dari penentuan profil, maka dapat ditentukan profil sudu yang akan digunakan, pada perancangan kali ini profil sudu yang buat profil dengan nomor 430 dan nilai koefisien gaya gesek (ζ_w)=0,0042.

4.4.3.5 Perhitungan Sudut Luncur (λ)

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

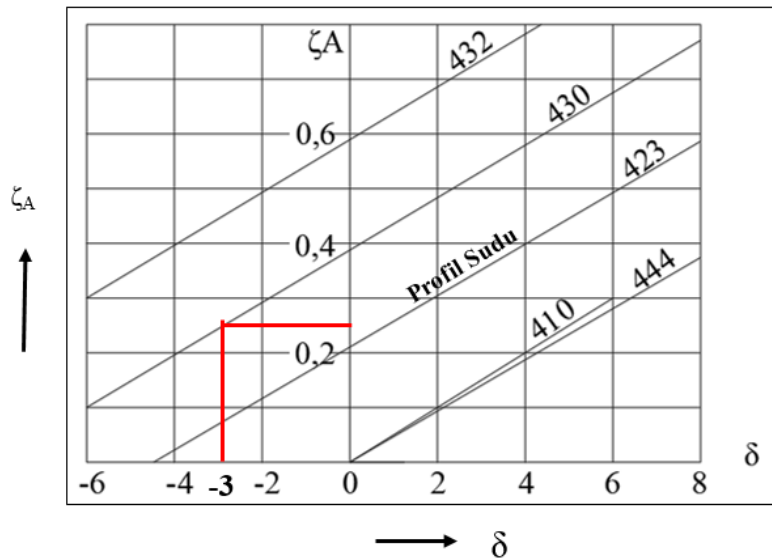
$$\lambda = \tan^{-1} \frac{\zeta_w}{\zeta_A}$$

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{0,0042}{0,24}$$

$$= 1^0$$

4.4.3.6 Perhitungan Sudut Serang (δ)

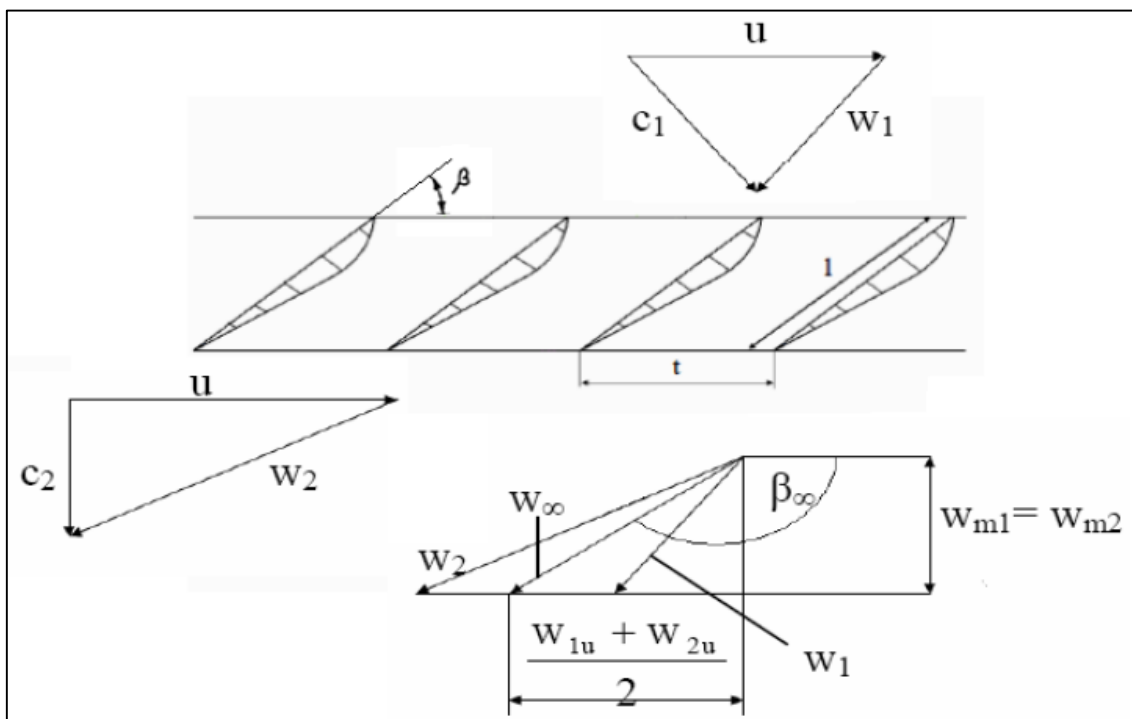
Sudut serang dihitung untuk menentukan ketebalan dari diameter luar sudu turbin, untuk menentukan ketebalan dari sudu turbin maka dapat digunakan dari Gambar (4.12) .



Gambar 4.11 Grafik Untuk Menentukan Sudut Serang

Sumber: Perencanaan Penulis, 2017

Berdasarkan grafik diatas untuk menentukan sudut serang sudah diketahui nilai $\zeta_A = 0,24$ dan profil sudu yang dibuat adalah profil dengan nomor 430, maka didapatkan sudut serang $\delta = -3^\circ$ dan sudut distorsi $(180^\circ - \beta_\infty - \delta) = 180^\circ - 163^\circ - (-3)^\circ = 20^\circ$



Gambar 4.12 Bentuk Segi Tiga Kecepatan

Sumber: Anonim (2015, p.72)

4.4.4 Perhitungan Daya dan Energi

Perhitungan daya dan energi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Cikeusik ditentukan dari besarnya daya yang dibangkitkan dan jumlah energi yang dibangkitkan. Daya listrik dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

- Daya teoritis

$$\begin{aligned} P_{\text{turbin}} &= 9,81 \times Q \times H_{\text{eff}} \\ &= 9,81 \times 1,509 \times 1,054 \\ &= 15,676 \text{ kW} \end{aligned}$$

- Daya turbin

$$\begin{aligned} P_{\text{turbin}} &= 9,81 \times \eta_t \times Q \times H_{\text{eff}} \\ &= 9,81 \times 0,85 \times 1,509 \times 1,054 \\ &= 13,325 \text{ kW} \end{aligned}$$

- Daya generator

$$\begin{aligned} P_{\text{generator}} &= 9,81 \times \eta_g \times \eta_t \times Q \times H_{\text{eff}} \\ &= 9,81 \times 0,85 \times 0,90 \times 1,509 \times 1,054 \\ &= 11,934 \text{ kW} \end{aligned}$$

4.4.5 Produksi Energi Tahunan

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

$$E = P \times 24 \times n$$

contoh perhitungan untuk bulan Januari:

$$Q_{90} = 1,509 \text{ m}^3/\text{dt}$$

$$P = 11,934 \text{ kW}$$

$$n = 31 \text{ hari}$$

$$\begin{aligned} E &= P \times 24 \times n \\ &= 11,934 \text{ kW} \times 24 \times 31 \\ &= 8879,178 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan energi total yang dihasilkan dapat dilihat pada tabel 4.18.

Tabel 4.18
Nilai Daya dan Energi

Bulan	Jumlah Hari	Qsungai (m ³ /dt)	Q ₉₀ (m ³ /dt)	Head loss (m)	Heff (m)	η_{turbine}	$\eta_{\text{generator}}$	Daya (kW)	Energi (kWh)
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11
Januari	31	42,301	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8879,178
Februari	28	51,940	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8019,903
Maret	31	51,950	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8879,178
April	30	43,966	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8592,753
Mei	31	27,825	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8879,178
Juni	30	15,443	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8592,753
Juli	31	10,705	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8879,178
Agustus	31	4,066	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8879,178
September	30	5,633	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8592,753
Oktober	31	6,297	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8879,178
November	30	11,794	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8592,753
Desember	31	28,320	1,509	0,446	1,054	0,850	0,900	11,934	8879,178
Rerata					1,054			11,934	
Jumlah									104545,17

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. Bulan | 6. Data Heff (m) |
| 2. Jumlah Hari | 7. Efisiensi Turbin |
| 3. Data Qsungai (m ³ /dt) | 8. Efisiensi Generator |
| 4. Data Q ₉₀ (m ³ /dt) | 9. (4) x (6) x (7) x 9,81 |
| 5. Data Head loss (m) | 10. (8) x 24 x (2) |

4.5 Rencana Anggaran Biaya (RAB)

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

Untuk mempersiapkan pembangunan PLTMH Cikeusik dari segi finansial, maka diperlukan analisis terkait biaya yang diperlukan untuk membangun PLTMH Cikeusik. Analisis estimasi biaya pembangunan ini menggunakan pendekatan rumus empiris dari (RETscreen Canada, 2005, p.42). Dengan parameter untuk perhitungan adalah:

- | | |
|--|-------------------------------|
| ✓ Debit rencana (Q) | = 1,509 m ³ /detik |
| ✓ Tinggi jatuh efektif (H _g) | = 1,054 meter |
| ✓ Daya dibangkitkan (MW) | = 0,0119 MW |

- ✓ Jumlah turbin (n) = 1 unit
- ✓ Diameter pipa pesat = 0,97 meter
- ✓ Panjang pipa pesat = 19,14 meter
- ✓ Ketebalan pipa pesat = 3 mm
- ✓ Diameter runner turbin (d) = 0,618 meter
- ✓ Panjang saluran pembawa = 8 meter
- ✓ Kemiringan saluran pembawa = 0,1%
- ✓ Kurs Kanada ke rupiah = Rp. 10.556,11 (Tertanggal 19 Desember 2017)

Berdasarkan data-data tersebut di atas, akan dihitung biaya estimasi dari PLTMH Sindupraja, untuk parameter yang tidak tercantum akan disesuaikan kemudian pada perhitungan. Biaya dari masing-masing komponen adalah sebagai berikut:

- ✓ Teknis (C1) (menurut persamaan 2-58)

$$\begin{aligned}
 &= 0,37n^{0,1} \left(\frac{MW}{H_g^{0,3}} \right)^{0,9} \times 10^6 \\
 &= 0,37 \cdot 1^{0,1} \left(\frac{0,0119}{0,994^{0,3}} \right)^{0,9} \times 10^6 \\
 &= 4.362,92 \text{ (dalam \$ kanada)} \\
 &= \text{Rp. } 46.055.463,07
 \end{aligned}$$

- ✓ Elektromekanikal (C2) (menurut persamaan 2-62)

Untuk biaya elektromekanikal nilai $J_t = 1,00$ (Untuk tinggi jatuh efektif < 25 meter), nilai $K_t = 0,3$ (Untuk diameter runner < 1,8 meter). Perhitungan:

$$\begin{aligned}
 &= 0,125J_tK_td^{1,47} \{ 1,17 \cdot H_g^{0,12} + 4 \} \times 10^6 \\
 &= 0,125 \cdot 1^{0,96} \cdot 1 \cdot 0,3 \cdot 0,97^{1,47} \{ 1,17 \times 1,054^{0,12} + 4 \} \times 10^6 \\
 &= 53.303,37 \text{ (dalam \$ kanada)} \\
 &= \text{Rp. } 562.676.237,17
 \end{aligned}$$

- ✓ Instalasi peralatan C2 (C3) (menurut persamaan 2-66)

$$\begin{aligned}
 &= 0,15(C2) \\
 &= 0,15 \cdot (53303,37) \\
 &= 7.995,51 \text{ (dalam \$ kanada)} \\
 &= \text{Rp. } 84.401.435,58
 \end{aligned}$$

- ✓ Kabel transmisi (C4) (menurut persamaan 2-67)

Kabel transmisi ditentukan faktor kesulitan pemasangannya $D = 1,5$. Voltase direncanakan sebesar $V = 10 \text{ kV}$, untuk kabel transmisi karena $V < 69 \text{ kV}$ maka

$P = 0,85$ sedangkan kabel transmisi diperkirakan sepanjang 1 km. Sehingga, biayanya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 &= 0,0011 \cdot D \cdot P \cdot l_T^{0,95} \cdot V \times 10^6 \\
 &= 0,0011 \cdot 1,5 \cdot 0,85 \cdot 1^{0,95} \cdot 10 \times 10^6 \\
 &= 14.025 \text{ (dalam \$ kanada)} \\
 &= \text{Rp. } 148.049.442,75
 \end{aligned}$$

- ✓ Substansi dan transformer (C5) (menurut persamaan 2-68)

$$\begin{aligned}
 &= (0,0025n^{0,95} + 0,002(n+1) \cdot \left(\frac{MW}{0,95}\right)^{0,9} \cdot V^{0,3} \times 10^6 \\
 &= (0,0025 \cdot 1^{0,95} + 0,002(1+1) \cdot \left(\frac{0,0117}{0,95}\right)^{0,9} \cdot 10^{0,3} \times 10^6 \\
 &= 10.853,22 \text{ (dalam \$ kanada)} \\
 &= \text{Rp. } 114.567.765,05
 \end{aligned}$$

- ✓ Instalasi C5 (C6) (menurut persamaan 2-69)

$$\begin{aligned}
 &= 0,15 \cdot (C6) \\
 &= 0,15 \cdot 10853,22 \\
 &= 1.627,98 \text{ (dalam \$ kanada)} \\
 &= \text{Rp. } 17.185.164,76
 \end{aligned}$$

- ✓ Uraian Biaya Pekerjaan sipil (C7) (menurut persamaan 2-70)

Faktor biaya sipil ditentukan $C = 1$, Faktor batuan ditentukan $= 1$, dan jarak ke *borrow area* ditentukan sebesar 1 kilo meter, jika sudah terdapat bendung maka nilai $C = 0,44$ jika belum nilai $C = 1$. Sehingga biaya pekerjaan sipil adalah

$$\begin{aligned}
 &= 1,97n^{-0,04} \cdot C \cdot R \cdot \left(\frac{MW}{H_g^{0,3}}\right)^{0,82} \cdot (1 + 0,01l_b) \cdot (1 + 0,005 \frac{l_d}{H_g}) \times 10^6 \\
 &= 1,97 \cdot 2^{-0,04} \cdot 0,44 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0,01173}{0,994^{0,3}}\right)^{0,82} \cdot (1 + 0,01 \cdot 0) \cdot (1 + 0,005 \frac{1}{0,994}) \times 10^6 \\
 &= 10.313,10 \text{ (dalam \$ kanada)} \\
 &= \text{Rp. } 109.440.834,09
 \end{aligned}$$

- ✓ Pipa pesat (C8)

Berdasarkan harga pipa terbaru Maret 2018, pipa besi seharga Rp 1.035.000,- /meter dan panjang pipa pesat = 19,14 m. Sehingga $1.035.000,- \times 19,14 = \text{Rp } 19.809.900$

- ✓ Biaya lain-lain (C9) (menurut persamaan 2-71)

Untuk biaya lain-lain menggunakan suku bunga $i=6,50\%$ (Bank Indonesia *rate* 21 Juli 2016)

$$\begin{aligned}
&= 0,25 \cdot i \cdot Q_d^{0,35} \cdot (1,1 \sum C1 \text{ sampai } C11) + 0,1 \cdot \sum C1 \text{ sampai } C11) \\
&= 0,25 \cdot 0,065 \cdot 1,509^{0,35} \cdot (1,1 (4.362,92 + 53.303,37 + 7.995,51 + 14.025,00 + \\
&10.853,22 + 1.627,98 + 29.260,77 + 1.876,62) + (0,1((4.362,92 + 53.303,37 + \\
&7.995,51 + 14.025,00 + 10.853,22 + 1.627,98 + 29.260,77 + 1.876,62) \\
&= 3.380,82 \text{ (dalam \$ kanada)} \\
&= \text{Rp. } 35.688.312,58
\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan estimasi biaya menggunakan metode dari *RETScreen* Canada, didapatkan nilai biaya keseluruhan yang ditampilkan pada tabel 4.19 berikut

Tabel 4.19
Rekapitulasi Biaya PLTMH Cikeusik

No.	Komponen	Biaya
1	2	3
1	Teknis	Rp 46.055.463,07
2	Elektromekanikal	Rp 562.676.237,17
3	Instalasi Peralatan Hidromekanikal	Rp 84.401.435,58
4	Kabel Transmisi	Rp 148.049.442,75
5	Substansi dan Transformer	Rp 114.567.765,05
6	Instalasi Substansi dan Transformer	Rp 17.185.164,76
7	Pekerjaan Sipil	Rp 109.440.834,09
8	Pipa Pesat	Rp 19.809.900,00
9	Biaya Lain-lain	Rp 27.080.128,74
	TOTAL	Rp 1.129.266.371,21
	PPN 10%	Rp 112.926.637,12
	Capital Cost	Rp 1.242.193.008,33

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Keterangan:

1. Nomor
2. Komponen
3. Biaya

Jadi, total biaya langsung = Rp 1.242.193.008,33