

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Hidrologi

Data hidrologi yang digunakan dalam penggerjaan skripsi ini adalah menggunakan data debit AWLR Lubuk Ambacang tahun 1993-2014 atau tersedia 22 tahun. Pencatatan data tersebut adalah berupa data bulanan sebagaimana disajikan pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.1 Data Debit Rerata Bulanan Stasiun AWLR Lubuk Ambacang

No	Tahun	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	Rerata
1	1993	334.60	268.78	377.34	293.29	422.6	149.13	182.07	105.06	144.03	239.89	568.21	238.15	276.93
2	1994	312.89	341.21	274.43	238.82	268.03	209.68	132.11	74.44	58.29	60.45	309.22	321.17	216.73
3	1995	550.19	677.59	355.82	416.17	450.67	206.29	118.64	142.98	164.37	229.34	283.05	211.83	317.25
4	1996	186.67	409.83	312.73	498.70	251.48	218.69	133.57	189.38	293.76	234.38	152.64	150.68	252.71
5	1997	131.86	89.64	173.74	265.99	227.4	82.83	76.17	44.84	36.28	37.19	82.5	177.58	118.84
6	1998	463.42	359.28	252.30	263.22	214.69	99.28	131.92	381.35	314.63	119.79	92.77	119.65	234.36
7	1999	178.86	140.86	148.55	47.72	233.93	85.97	91.54	98.1	153.23	321.35	215.77	296.27	167.68
8	2000	512.13	195.92	195.09	183.19	76.96	149.2	108.9	171.17	56.98	41.92	310.39	511.08	209.41
9	2001	486.86	309.67	237.47	405.30	442.33	111.78	42.34	44.54	93.5	73.77	90.02	100.02	203.13
10	2002	336.46	163.43	297.58	440.55	304.45	126.7	120.53	186.05	156.83	127.19	381.57	545.49	265.57
11	2003	347.38	412.5	458.82	573.73	237.3	112.3	100.58	152.43	237.13	252.85	260.28	368.94	292.85
12	2004	277.96	240.81	132.37	323.47	140.11	84	137.27	73.58	59.1	184.7	332.81	470.05	204.69
13	2005	401.82	148.77	232.39	169.15	200.15	134.9	81.62	63.43	68.46	209.84	191.54	105.86	167.33
14	2006	291.85	352.64	171.98	167.52	134.39	184.3	145.15	52.2	177.26	128.22	331.12	631.3	230.66
15	2007	456.66	236.79	159.72	243.11	182.34	197.26	140.03	136.37	231.02	212.11	128.19	318.53	220.18
16	2008	453.60	175.2	450.54	387.77	142.22	160.38	140.99	231.28	239.67	278.39	175.39	298.46	261.16
17	2009	159.17	163.24	159.42	375.58	112.45	67.28	44.78	53.51	149.57	195.27	312.11	533.98	193.86
18	2010	312.88	436.14	422.91	575.15	283.58	254.67	248.45	175.89	247.57	163.06	152.97	136.71	284.17
19	2011	144.81	147.36	157.35	226.94	281.13	134.2	84.71	85.3	129.14	184.37	291.58	415.76	190.22
20	2012	150.10	280.4	132.34	249.97	148.27	116.56	144.08	122.41	127.86	257.85	548.72	548.29	235.57
21	2013	194.47	205.64	397.51	279.40	306.27	105.35	111.79	126.92	170.08	217.42	302.86	341.08	229.90
22	2014	229.90	159.27	257.80	234.36	202.72	160.44	105.66	123.04	128.65	79.16	169.75	429.09	189.99
Rerata		314.30	268.86	261.74	311.78	239.25	143.24	119.22	128.83	156.25	174.93	258.34	330.45	225.60
Max		550.19	677.59	458.82	575.15	450.67	254.67	248.45	381.35	314.63	321.35	568.21	631.30	317.25
Min		131.86	89.64	132.34	47.72	76.96	67.28	42.34	44.54	36.28	37.19	82.50	100.02	118.84

Sumber: Data Konsultan

4.2. Debit Andalan

Debit andalan adalah debit yang tersedia sepanjang tahun dengan besarnya resiko kegagalan tertentu (Limantara,2010:87). Kegunaan dari debit andalan ini adalah sebagai debit yang digunakan untuk pembangkitan energi. Metode yang digunakan dalam perencanaan ini adalah dengan menggunakan Metode *Basic Year* atau Metode Tahun Dasar Perencanaan.

4.2.1. Perhitungan Debit Andalan Dengan Metode Tahun Dasar Perencanaan.

Berikut adalah rerata debit tahunan yang nantinya akan digunakan dalam perhitungan debit andalan:

Tabel 4.2 Debit Rerata Tahunan AWLR Lubuk Ambacang

No	Tahun	Rerata
1	1993	276.929
2	1994	216.728
3	1995	317.245
4	1996	252.709
5	1997	118.835
6	1998	234.358
7	1999	167.679
8	2000	209.411
9	2001	203.133
10	2002	265.569
11	2003	292.853
12	2004	204.686
13	2005	167.328
14	2006	230.661
15	2007	220.178
16	2008	261.158
17	2009	193.863
18	2010	284.165
19	2011	190.221
20	2012	235.571
21	2013	229.899
22	2014	189.987

Sumber: Hasil Perhitungan

Data diatas kemudian diurutkan dari debit yang terbesar ke debit yang terkecil kemudian digunakan persamaan (2-1) untuk mendapatkan nilai keandalan dari tiap debit. Dan berikut contoh perhitungan dari Metode Tahun Dasar Perencanaan pada keandalan 97,30%:

$$\begin{aligned}
 R_{97,3} &= \frac{n}{\left(\frac{100\%}{(100\% - 97,30\%)}\right)} + 1 \\
 &= \frac{22}{37,037} + 1 \\
 &= 1,594 = \text{maka terdapat pada data ke } 2
 \end{aligned}$$

Perhitungan berikutnya ada pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.3 Debit Terurut Sungai Indragiri Metode Basic Year

No	Tahun	Rerata	Debit Andalan
1	1997	118.835	
2	2005	167.328	97,30%
3	1995	167.679	
4	2014	189.987	
5	2011	190.221	
6	2009	193.863	75,34%
7	2001	203.133	
8	2004	204.686	
9	2000	209.411	
10	1994	216.728	
11	2007	220.178	
12	2013	229.899	50,68%
13	2006	230.661	
14	1998	234.358	
15	2012	235.571	
16	1996	252.709	
17	2008	261.158	26,02%
18	2002	265.569	
19	1993	276.929	
20	2010	284.165	
21	2003	292.853	
22	1995	317.245	

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari tabel diatas didapatkan 4 debit yaitu:

1. Debit air cukup (26,02%) = $261,16 \text{ m}^3/\text{dt}$ yang terjadi pada tahun 2008
2. Debit air normal (50,68%) = $229,899 \text{ m}^3/\text{dt}$ yang terjadi pada tahun 2013
3. Debit air rendah (75,34%) = $193.86 \text{ m}^3/\text{dt}$ yang terjadi pada tahun 2009
4. Debit air kering (97,34%) = $167.33 \text{ m}^3/\text{dt}$ yang terjadi pada tahun 2005

4.3. Simulasi Waduk

Simulasi waduk ini bertujuan untuk menentukan debit pembangkit PLTA, mengontrol debit yang tersedia dalam tumpungan waduk apakah bisa memenuhi kebutuhan PLTA, dan apakah debit yang keluar dari PLTA dan yang keluar dari pelimpah (*spillway*) dapat ditampung oleh sungai di bagian hilir dari Bendungan Lubuk Ambacang ini.

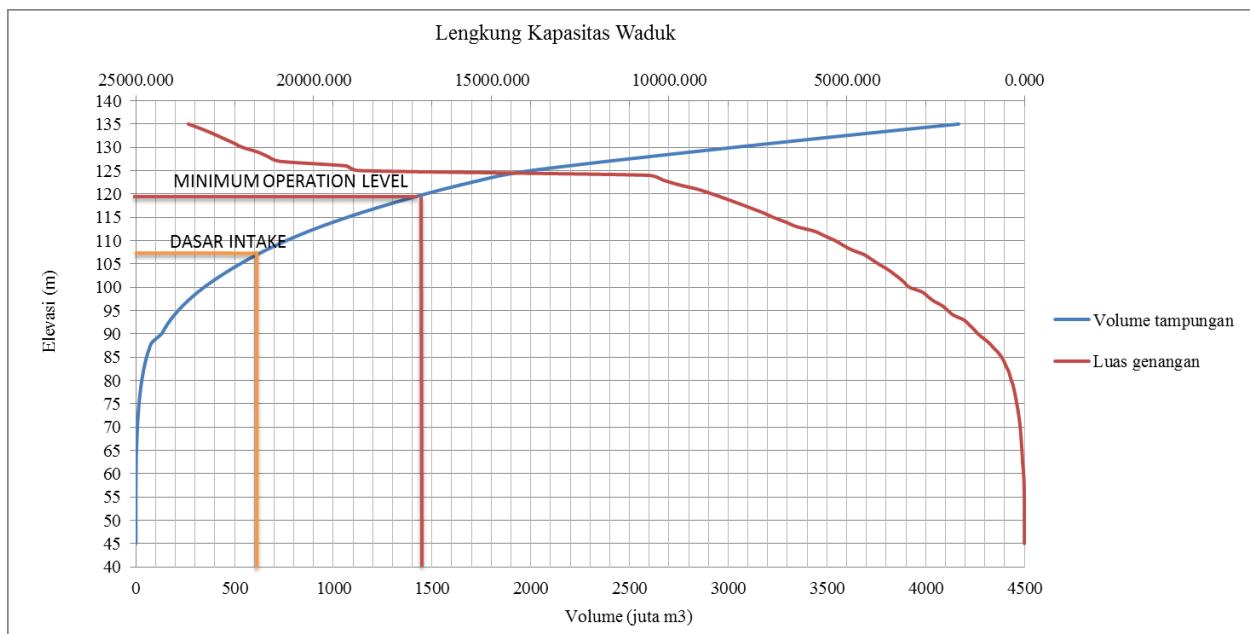
Dalam simulasi ini terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan, antara lain:

1. Debit yang keluar dari pelimpah dan debit outflow PLTA tidak boleh melebihi *full bank capacity* atau tumpungan maksimum sungai di hilir bendungan

2. Draft dari debit PLTA yang ada tidak selalu menunjukkan angka 1,00. Hal tersebut dimaksudkan agar tetap menjaga volume tampungan waduk agar tetap effisien untuk dimanfaatkan

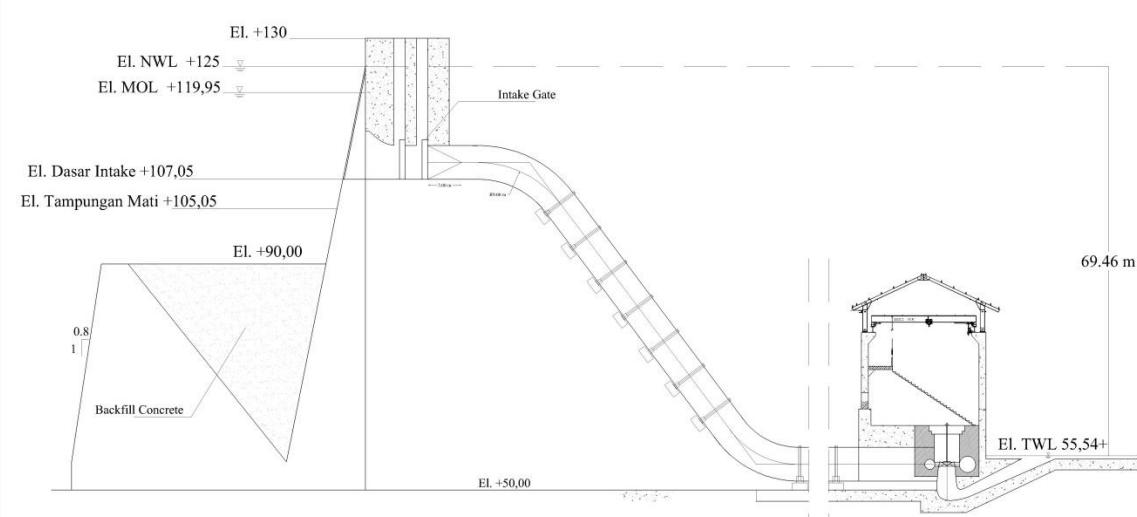
Data tampungan Waduk Lubuk Ambacang:

- Elevasi muka air normal (FSL) = 125,00 m
- Elevasi muka air rendah (LWL) = 113,55 m
- Kedalaman efektif = FSL – LWL
= $125,00 - 113,55$
= 11,45 m
- Elevasi *Tail Water Level* (TWL) = 55,54 m
- Minimum Operation level (MOL) = 119,95 m
- Elevasi intake = 107,05 m
- Volume tampungan maksimum = 1999,03 juta m³
- Volume tampungan mati = 529,90 juta m³
- Volume non aktif (dibawah MOL) = $(529,900 \text{ juta m}^3 + 932,205 \text{ juta m}^3)$
= 1462,1045 juta m³
- Volume tampungan efektif = $1999,03 \text{ juta m}^3 - 1462,1045 \text{ juta m}^3$
= 536,929juta m³
- Elevasi Tampungan mati = 105,05 m
- *Full bank capacity tailrace* = 1402,20 m³/dt



Gambar 4.1 Lengkung Kapasitas Waduk

Sumber: Data Konsultan



Gambar 4.2 Sketsa Tampungan Waduk Bendungan Lubuk Ambacang
Sumber: Hasil Perhitungan

Contoh perhitungan simulasi waduk pada debit musim kering:

kolom 1	Bulan	= Januari
kolom 2	Jumlah hari	= 31 hari
kolom 3	Debit inflow	= $401,82 \text{ m}^3/\text{dt}$
kolom 4	Debit waduk dalam juta m^3	= $\frac{\text{jumlah hari} \times \text{debit inflow} \times 24 \times 60 \times 60}{1000000}$ = $1076,235 \text{ juta m}^3$
kolom 5	Luas genangan	= dari lengkung kapasitas waduk = $7091,85 \text{ km}^2$
kolom 6	Evaporasi	= $7,869 \text{ mm/hari}$
kolom 7	Evaporasi dalam juta m^3	= $\frac{\text{evaporasi} \times \text{jumlah hari} \times 1000}{1000000}$ = 0.244 juta m^3
kolom 8	Draft outflow PLTA	= 1,00
kolom 9	Debit outflow PLTA	= $200 \text{ m}^3/\text{dt}$ (diasumsikan)
kolom 10	Outflow dalam juta m^3	= $\frac{\text{jumlah hari} \times \text{debit outflow} \times 24 \times 60 \times 60}{1000000}$ = $535,680 \text{ juta m}^3$
kolom 11	S_{n-1}	= $S_{\text{akhir periode (n-1)}} + \text{inflow} - \text{evaporasi} - \text{outflow}$ = $2009,44 \text{ juta m}^3$
kolom 12	S akhir periode (tampungan efektif) :	
		= Jika $S_{n-1} < 0$, maka $S_{\text{akhir periode}} = 0$
		= Jika $S_{n-1} < \text{Tampungan Efektif}$, maka (12) = (11)
		= Jika $S_{n-1} > \text{Tampungan Efektif}$, maka (12) = Tampungan Efektif

kolom 13 S total periode	$= S \text{ akhir periode} + \text{Volume Mati dibawah El. MOL}$ $= 1469,13 \text{ m}^3 + (529,900 \text{ juta m}^3 + 932,205 \text{ juta m}^3)$ $= 1999,033 \text{ juta m}^3$
kolom 14 Spillout	$= \text{Jika } (11) < \text{Tampungan Efektif Maksimal, maka } (14) = 0$ $= \text{Jika } (11) > \text{Tampungan Efektif Maksimal, maka } (14) = (11)$
kolom 15 Spillout dalam m^3/dt	$= \frac{(14) \times 1000000}{24 \times 60 \times 60 \times \text{jumlah hari}}$ $= 201,73 \text{ m}^3/\text{dt}$
kolom 16 Outflow + spillout	$= (9) + (15)$ $= 200 + 201,7 = 401,73 \text{ m}^3/\text{dt}$
kolom 17 Elevasi muka air waduk di dapat dari lengkung kapasitas waduk	
kolom 18 Keterangan tampungan	$= \text{Jika } (13) < \text{MOL maka } (18) = \text{Gagal}$ $= \text{Jika } (13) > \text{MOL maka } (18) = \text{Sukses}$
kolom 19 Keterangan Q hilir	$= \text{jika } (16) < \text{full bank capacity} = \text{sukses}$ $= \text{jika } (16) > \text{full bank capacity} = \text{gagal}$
kolom 20 Gross Head	$= \text{EMAW } (17) - \text{El. TWL}$ $= 125,00 - 55,54$ $= 69,46 \text{ m}$
kolom 21 Head Loss	$= 10\% \times \text{gross head } (20)$ $= 10\% \times 69,46$ $= 6,95 \text{ m}$
kolom 22 Net Head	$= \text{gross head} - \text{head loss}$ $= 69,46 - 6,95$ $= 62,51 \text{ m}$
kolom 23 Power	$= (9) \times (22) \times \text{Effisiensi} \times 9,81 / 1000$ $= 103,76 \text{ MW}$
kolom 24 Energy	$= \text{power } (23) \times 24 \text{ jam} \times \text{jumlah hari } (2)$ $= 103,76 \text{ MW} \times 24 \text{ jam} \times 31 \text{ hari}$ $= 77.200,41 \text{ MWh}$
kolom 25 Total Energy	$= \text{total } (24) \text{ januari} - \text{desember}$ $= 630.449,17$

Perhitungan selanjutnya ditampilkan pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.4 Simulasi Pola Operasi Waduk Berdasarkan Karakteristik Debit Musim Kering (97,34%)

Karakteristik Debit	Bulan	Jumlah hari	Inflow		A	E	Outflow PLTA			S _(n-1)	S akhir periode (tampungan efektif)	S total periode	
	[1]	[2]	[3]	[4]	km ²	mm/hari	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[13]
DEBIT AIR MUSIM KERING	Jan	31	401.82	1,076.23	7,091.85	7.87	0.24	1.00	200.00	535.68	1077.24	536.93	1,999.03
	Feb	28	148.77	359.90	3,297.72	8.01	0.22	1.00	200.00	483.84	412.77	412.77	1,874.87
	Mar	31	232.39	622.43	4,576.98	8.06	0.25	1.00	200.00	535.68	499.27	499.27	1,961.38
	Apr	30	169.15	438.44	3,643.98	6.51	0.20	1.00	200.00	518.40	419.11	419.11	1,881.22
	May	31	200.15	536.08	4,147.96	6.30	0.20	1.00	200.00	535.68	419.32	419.32	1,881.42
	Jun	30	134.9	349.66	3,255.10	6.19	0.19	0.50	100.00	259.20	509.60	509.60	1,971.70
	Jul	31	81.62	218.61	2,183.24	6.23	0.19	0.50	100.00	267.84	460.17	460.17	1,922.28
	Aug	31	63.43	169.89	1,660.65	7.10	0.22	0.50	100.00	267.84	362.00	362.00	1,824.11
	Sep	30	68.46	177.45	1,742.12	7.23	0.22	0.50	100.00	259.20	280.04	280.04	1,742.14
	Oct	31	209.84	562.04	4,272.51	7.26	0.22	1.00	200.00	535.68	306.17	306.17	1,768.27
	Nov	30	191.54	496.47	3,933.47	7.18	0.22	1.00	200.00	518.40	284.02	284.02	1,746.13
	Dec	31	105.86	283.54	2,689.65	7.10	0.22	0.00	0.00	0.00	567.34	536.93	1,999.03

Tabel lanjutan

Spillout juta m ³	Outflow + spillout m ³ /dt	EMAW m	keterangan tampungan	keterangan Q hilir	Gross Head m	Head Loss m	Net Head m	Power MW	Energy MWh	Keterangan Energi MWh	
[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]
540.31	201.73	401.73	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	77,200.407	
0.00	0.00	200.00	124.14	sukses	sukses	68.60	6.86	61.74	102.48	68,867.700	
0.00	0.00	200.00	124.74	sukses	sukses	69.20	6.92	62.28	103.38	76,911.060	
0.00	0.00	200.00	124.19	sukses	sukses	68.65	6.86	61.78	102.55	73,834.003	
0.00	0.00	200.00	124.19	sukses	sukses	68.65	6.86	61.78	102.55	76,296.722	
0.00	0.00	100.00	124.81	sukses	sukses	69.27	6.93	62.34	51.74	37,253.411	
0.00	0.00	100.00	124.47	sukses	sukses	68.93	6.89	62.04	51.49	38,305.315	
0.00	0.00	100.00	123.71	sukses	sukses	68.17	6.82	61.35	50.92	37,882.388	Rerata Energi =
0.00	0.00	100.00	122.92	sukses	sukses	67.38	6.74	60.64	50.32	36,233.866	60,951.14
0.00	0.00	200.00	123.17	sukses	sukses	67.63	6.76	60.87	101.03	75,166.920	Total Energy =
0.00	0.00	200.00	122.96	sukses	sukses	67.42	6.74	60.67	100.71	72,510.787	670,462.58
30.41	11.35	11.35	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	0.00	-	

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.5 Simulasi Pola Operasi Waduk Berdasarkan Karakteristik Debit Air Rendah (75,34%)

Karakteristik Debit	Bulan	Jumlah hari	Inflow		A	E	Outflow PLTA			S _(n-1)	S akhir periode (tampungan efektif)	S total periode	
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	draft	[9]	[10]	juta m ³	juta m ³	juta m ³
DEBIT AIR RENDAH	Jan	31	159.17	426.32	3,586.50	7.87	0.24	1.00	200.00	535.68	427.33	536.93	1,999.03
	Feb	28	163.24	394.91	3,445.70	8.01	0.22	1.00	200.00	483.84	338.17	338.17	1,800.28
	Mar	31	159.42	426.99	3,589.67	8.06	0.25	1.00	200.00	535.68	229.23	229.23	1,691.34
	Apr	30	375.58	973.50	6,590.09	6.51	0.20	1.00	200.00	518.40	684.14	536.93	1,999.03
	May	31	112.45	301.19	2,799.97	6.30	0.20	1.00	200.00	535.68	302.24	302.24	1,764.34
	Jun	30	67.28	174.39	1,701.74	6.19	0.19	0.50	100.00	259.20	217.24	217.24	1,679.35
	Jul	31	44.78	119.94	1,246.98	6.23	0.19	0.50	100.00	267.84	69.15	69.15	1,531.25
	Aug	31	53.51	143.32	1,421.32	7.10	0.22	0.30	60.00	160.70	51.55	51.55	1,513.65
	Sep	30	149.57	387.69	3,414.55	7.23	0.22	0.75	150.00	388.80	50.21	50.21	1,512.32
	Oct	31	195.27	523.01	4,081.44	7.26	0.22	1.00	200.00	535.68	37.32	37.32	1,499.43
	Nov	30	312.11	808.99	5,575.88	7.18	0.22	1.00	200.00	518.40	327.69	327.69	1,789.80
	Dec	31	533.98	1,430.21	8,629.02	7.10	0.22	1.00	200.00	535.68	1222.01	536.93	1,999.03

Tabel lanjutan

Spillout juta m ³	m ³ /dt	Outflow + spillout m ³ /dt	EMAW m	keterangan tampungan	keterangan Q hilir	Gross Head m	Head Loss m	Net Head m	Power MW	Energy MWh	Keterangan Energi MWh
[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]
0.00	0.00	200.00	124.24	sukses	sukses	68.70	6.87	61.83	102.63	76,358.235	
0.00	0.00	200.00	123.48	sukses	sukses	67.94	6.79	61.14	101.49	68,202.224	
0.00	0.00	200.00	122.41	sukses	sukses	66.87	6.69	60.18	99.89	74,316.392	
147.21	56.79	256.79	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	74,710.071	
0.00	0.00	200.00	123.13	sukses	sukses	67.59	6.76	60.83	100.97	75,124.880	
0.00	0.00	100.00	122.28	sukses	sukses	66.74	6.67	60.07	49.85	35,894.810	
0.00	0.00	100.00	120.72	sukses	sukses	65.18	6.52	58.66	48.69	36,222.484	
0.00	0.00	60.00	120.53	sukses	sukses	64.99	6.50	58.49	29.12	-	
0.00	0.00	150.00	120.51	sukses	sukses	64.97	6.50	58.47	72.79	52,411.121	Rerata Energi =
0.00	0.00	200.00	120.37	sukses	sukses	64.83	6.48	58.34	96.84	72,051.470	65,041.58
0.00	0.00	200.00	123.38	sukses	sukses	67.84	6.78	61.05	101.34	72,965.253	Total Energy =
685.08	255.78	455.78	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	77,200.407	715,457.35

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.6 Simulasi Pola Operasi Waduk Berdasarkan Karakteristik Debit Air Normal (50,68%)

Karakteristik Debit	Bulan	Jumlah hari	Inflow		A	E		Outflow PLTA			S _(n-1)	S akhir periode (tampungan efektif)	S total periode
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]
DEBIT AIR NORMAL	Jan	31	194.47	520.87	4,069.50	7.87	0.24	1.00	200.00	535.68	521.87	521.87	1,999.03
	Feb	28	205.64	497.48	3,939.12	8.01	0.22	1.00	200.00	483.84	535.29	535.29	1,997.40
	Mar	31	397.51	1,064.69	7,038.50	8.06	0.25	1.00	200.00	535.68	1064.05	536.93	1,999.03
	Apr	30	279.40	724.20	5,160.82	6.51	0.20	1.00	200.00	518.40	742.54	536.93	1,999.03
	May	31	306.27	820.31	5,635.63	6.30	0.20	1.00	200.00	535.68	821.37	536.93	1,999.03
	Jun	30	105.35	273.07	2,623.02	6.19	0.19	1.00	200.00	518.40	291.41	291.41	1,753.51
	Jul	31	111.79	299.42	2,788.98	6.23	0.19	0.50	100.00	267.84	322.80	322.80	1,784.90
	Aug	31	126.92	339.94	3,168.53	7.10	0.22	1.00	200.00	535.68	126.84	126.84	1,588.94
	Sep	30	170.08	440.85	3,655.42	7.23	0.22	1.00	200.00	518.40	49.07	49.07	1,511.17
	Oct	31	217.42	582.34	4,368.19	7.26	0.22	1.00	200.00	535.68	95.50	95.50	1,557.61
	Nov	30	302.86	785.01	5,447.44	7.18	0.22	1.00	200.00	518.40	361.90	361.90	1,824.00
	Dec	31	341.08	913.55	6,224.12	7.10	0.22	1.00	200.00	535.68	739.55	536.93	1,999.03

Tabel lanjutan

Spillout juta m ³	Outflow + spillout m ³ /dt	EMAW m	keterangan tumpungan	keterangan Q hilir	Gross Head m	Head Loss m	Net Head m	Power MW	Energy MWh	Keterangan Energi MWh	
[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]
0.00	0.00	200.00	124.90	sukses	sukses	69.36	6.94	62.42	103.61	77,084.723	
0.00	0.00	200.00	124.99	sukses	sukses	69.45	6.94	62.50	103.75	69,718.049	
527.13	196.81	396.81	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	77,200.407	
205.61	79.32	279.32	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	74,710.071	
284.44	106.20	306.20	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	77,200.407	
0.00	0.00	200.00	123.03	sukses	sukses	67.49	6.75	60.74	100.82	72,589.289	
0.00	0.00	100.00	123.33	sukses	sukses	67.79	6.78	61.01	50.64	37,672.486	
0.00	0.00	200.00	121.34	sukses	sukses	65.80	6.58	59.22	98.30	73,137.797	
0.00	0.00	200.00	120.50	sukses	sukses	64.96	6.50	58.46	97.04	69,867.778	Rerata Energi =
0.00	0.00	200.00	121.01	sukses	sukses	65.47	6.55	58.93	97.81	72,769.947	71,039.25
0.00	0.00	200.00	123.71	sukses	sukses	68.17	6.82	61.35	101.83	73,319.662	Total Energy =
202.62	75.65	275.65	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	77,200.407	852,471.02

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.7 Simulasi Pola Operasi Waduk Berdasarkan Karakteristik Debit Air Cukup (26,02%)

Karakteristik Debit	Bulan	Jumlah hari	Inflow		A	E		Outflow PLTA			S _(n-1)	S akhir periode (tampungan efektif)	S total periode
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]
DEBIT AIR CUKUP	Jan	31	453.60	1,214.92	7,690.00	7.87	0.24	1.00	200.00	535.68	1215.93	536.93	1,999.03
	Feb	28	175.20	423.84	3,574.74	8.01	0.22	1.00	200.00	483.84	476.71	476.71	1,938.81
	Mar	31	450.54	1,206.73	7,652.61	8.06	0.25	1.00	200.00	535.68	1147.50	536.93	1,999.03
	Apr	30	387.77	1,005.10	6,741.18	6.51	0.20	1.00	200.00	518.40	1023.43	536.93	1,999.03
	May	31	142.22	380.92	3,385.40	6.30	0.20	1.00	200.00	535.68	381.98	381.98	1,844.08
	Jun	30	160.38	415.70	3,536.13	6.19	0.19	1.00	200.00	518.40	279.09	279.09	1,741.20
	Jul	31	140.99	377.63	3,371.46	6.23	0.19	1.00	200.00	535.68	120.85	120.85	1,582.95
	Aug	31	231.28	619.46	4,555.24	7.10	0.22	1.00	200.00	535.68	204.41	204.41	1,666.51
	Sep	30	239.67	621.22	4,568.14	7.23	0.22	1.00	200.00	518.40	307.02	307.02	1,769.12
	Oct	31	278.39	745.64	5,254.00	7.26	0.22	1.00	200.00	535.68	516.75	516.75	1,978.86
	Nov	30	175.39	454.61	3,721.58	7.18	0.22	1.00	200.00	518.40	452.75	452.75	1,914.85
	Dec	31	298.46	799.40	5,524.48	7.10	0.22	1.00	200.00	535.68	716.24	536.93	1,999.03

Tabel lanjutan

Spillout juta m ³	Outflow + spillout m ³ /dt	EMAW m	keterangan tumpungan	keterangan Q hilir	Gross Head m	Head Loss m	Net Head m	Power MW	Energy MWh	Keterangan Energi MWh	
[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]
679.00	253.51	453.51	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	77,200.407	
0.00	0.00	200.00	124.58	sukses	sukses	69.04	6.90	62.14	103.14	69,311.456	
610.58	227.96	427.96	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	77,200.407	
486.50	187.69	387.69	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	74,710.071	
0.00	0.00	200.00	123.90	sukses	sukses	68.36	6.84	61.52	102.12	75,978.610	
0.00	0.00	200.00	122.91	sukses	sukses	67.37	6.74	60.63	100.64	72,457.574	
0.00	0.00	200.00	121.28	sukses	sukses	65.74	6.57	59.17	98.21	73,067.500	
0.00	0.00	200.00	122.16	sukses	sukses	66.62	6.66	59.95	99.52	74,039.386	
0.00	0.00	200.00	123.18	sukses	sukses	67.64	6.76	60.87	101.04	72,751.001	Rerata Energi =
0.00	0.00	200.00	124.86	sukses	sukses	69.32	6.93	62.39	103.56	77,045.372	74,587.19
0.00	0.00	200.00	124.42	sukses	sukses	68.88	6.89	61.99	102.89	74,084.102	Total Energy =
179.31	66.95	266.95	125.00	sukses	sukses	69.46	6.95	62.51	103.76	77,200.407	895,046.29

Sumber: Hasil Perhitungan

4.4. Perencanaan Bangunan Sipil

Bangunan sipil yang direncanakan pada PLTA Lubuk Ambacang adalah sebagai berikut:

a. Bangunan pengambilan

Jenis bangunan pengambilan yang didesain dalam studi ini adalah tunnel intake atau bangunan intake dengan tipe terowongan. Tipe ini diambil karena bendungan Lubuk Ambacang merupakan Bendungan beton yang memiliki lebar tubuh bendungan yang lebih tipis dari pada Bendungan urugan. Sehingga intake bisa langsung tersambung ke pipa pesat.

b. Bangunan Pembawa

Bangunan pembawa dalam perencanaan ini menggunakan saluran tertutup (pipa pesat). Pipa pesat difungsikan sebagai pengarah aliran bertekanan menuju turbin,

c. Bangunan pembuang

Bangunan pembuang dalam studi PLTA Lubuk Ambacang ini menggunakan saluran *tailrace*, desain bentuk dari saluran ini bisa saja berbentuk saluran terbuka atau tertutup sesuai dengan kebutuhan dan lokasi perencanaan.

4.4.1. Bangunan Pengambilan (*intake*)

Menentukan Elevasi Dasar Intake

Bangunan pengambilan menggunakan tipe tunnel intake atau terowongan. Diketahui dari data:

Volume Tampungan Mati = 529.9 juta m³

Elevasi Tampungan Mati = + 105.05

Tinggi intake rencana = 6 m

Didapat jarak antara intake dan tampungan mati setinggi:

$$\begin{aligned}
 \text{El dasar intake} &= (1/3 \times \text{tinggi intake rencana}) + \text{El. tampungan mati} \\
 &= (1/3 \times 6) + 105,05 \\
 &= 2 \text{ m (diatas tampungan mati)} \\
 &= +107,05
 \end{aligned}$$

Menghitung Dimensi Intake

Dimensi intake harus disesuaikan dengan debit yang dibutuhkan di hilir Bendungan.

Sehingga dalam menghitung dimensi intake dibutuhkan data-data sebagai berikut:

Q = 200 m³/dt

Q 1 intake = 100 m³/dt

Lebar intake rencana = 6 m

$$\begin{aligned} n &= 0.02 \\ \text{Slope} &= 0.002 \end{aligned}$$

Dari data diatas dicari tinggi intake yang bisa mengeluarkan debit 100 m³/dt dengan rumus:

$$\begin{aligned} Q &= A \cdot V \\ V &= \frac{1}{n} \times \sqrt[3]{R^2} \times \sqrt{S} \\ R &= 2h + b \\ A &= b \cdot h \end{aligned}$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} Q &= (b \cdot h) \cdot [1/n \times \sqrt[3]{((b \times h)/(2h+b))^2} \times \sqrt{s}] \\ 100 &= (6 \cdot h) \cdot [1/0.02 \times \sqrt[3]{((0.02 \times h)/(2h+0.02))^2} \times \sqrt{0.002}] \end{aligned}$$

Dengan cara coba-coba (trial and error) dapat diketahui kedalaman air, $h = 4.921$ m. Namun diambil ketinggian 6 m untuk mengantisipasi kekurangan debit yang dibutuhkan.

Operasi Pintu Intake

Data teknis yang direncanakan adalah sebagai berikut:

- Jenis pintu : *Tunnel Intake* dengan bentuk persegi empat
- Debit desain : $1,1 \times$ Debit
 $: 1,1 \times 200 = 220 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Debit tiap intake : $110 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Tinggi intake : 6 m
- Lebar pintu : 6 m
- Jumlah pintu : 2 buah
- EL dasar pintu : 107,05 m

Untuk perhitungan debit yang terjadi pada intake untuk aliran tenggelam digunakan rumus : (Simon,1986:493)

$$Q = bac\sqrt{2g(Ho - H1)}$$

Dimana:

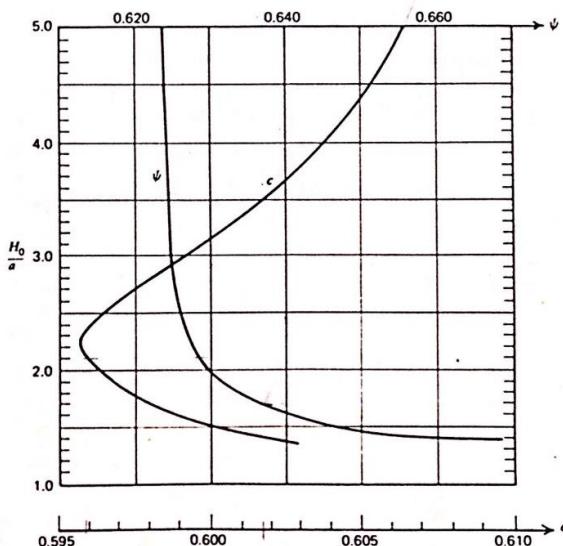
- b = lebar intake (m)
- a = Tinggi bukaan intake (m)
- c = koefisien debit didapat dari grafik

Ho = Tinggi muka air diatas intake sebelum pintu (m)

H_1 = Tinggi muka air setelah pintu (m)

Sehingga contoh perhitungan pada $Ho = 1$ m, $a = 0,5$ m adalah sebagai berikut:

- $Ho/a = 1/0,5 = 2$
- Dari Ho/a didapat nilai $C = 0,597$ dan $\Psi = 0,630$



Gambar 4.3 Grafik Ho/a , c , dan Ψ

Sumber: Simon, 1986:494

- $H_1 = \Psi \cdot a$
 $= 0,63 \cdot 0,5$
 $= 0,315 \text{ m}$
- $Q = 5 \cdot 0,5 \cdot 0,597 \sqrt{2g(1 - 0,315)} = 5,467 \text{ m}^3/\text{dt}$

Dan untuk perhitungan debit yang terjadi pada intake untuk aliran bebas digunakan persamaan (2-4) (Yuwono, 1988:93)

$$Q = Cd \cdot b \cdot 2/3 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g \cdot H}$$

Dimana:

Cd = koefisien debit

b = lebar intake

H = tinggi air diatas intake

Sehingga pada $Ho = 1 \text{ m}$, $a = 1 \text{ m}$ memiliki debit sebesar:

$$Q = 1 \cdot 5 \cdot 2/3 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot 9,81 \cdot 1}$$

$$Q = 8,524 \text{ m}^3/\text{dt}$$

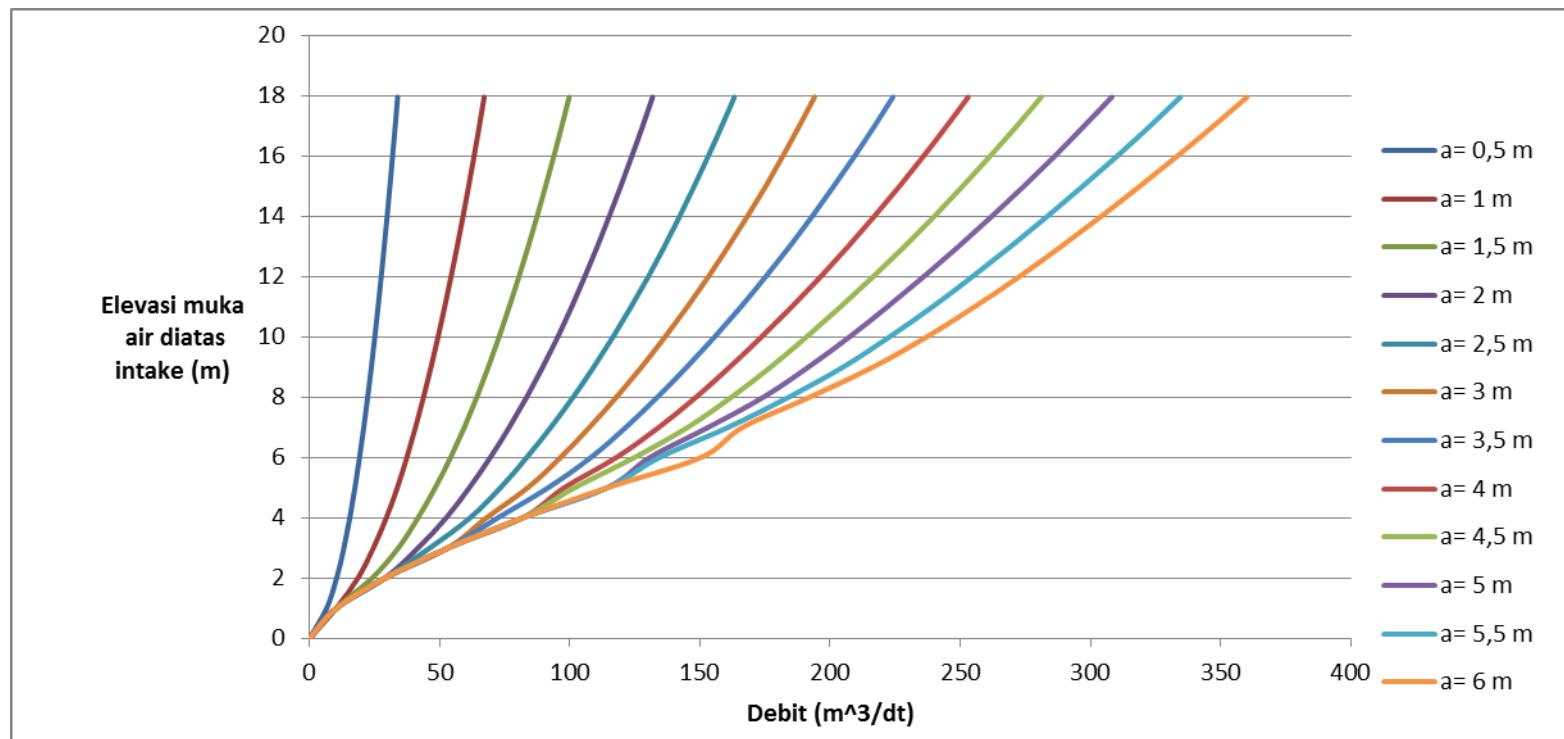
Tabel 4.8 Perhitungan Debit pada Pintu Intake

Elevasi Muka Air (m)	Ho (m)	b (m)	0.5					1					1.5					2					2.5				
			Ho/a		c	Ψ	H1	Q		Ho/a		c	Ψ	H1	Q	Ho/a		c	Ψ	H1	Q	Ho/a		c	Ψ	H1	Q
					m ³ /dt				m ³ /dt				m ³ /dt				m ³ /dt				m ³ /dt				m ³ /dt		
107.05	0	6	0	0.603	0.668	0.334	0.000	0	0.603	0.668	0.668	0.000	0.00	0.6030	0.6680	1.002	0.000	0.00	0.6030	0.6680	1.336	0.000	0.00	0.6030	0.6680	1.67	0.000
108.05	1	6	2	0.597	0.630	0.315	6.560	1	0.603	0.668	0.668	10.229	0.67	0.6030	0.6680	1.002	10.229	0.50	0.6030	0.6680	1.336	10.229	0.40	0.6030	0.6680	1.67	10.229
109.05	2	6	4	0.604	0.624	0.312	10.428	2	0.5965	0.63	0.63	18.555	1.33	0.6030	0.6680	1.002	24.015	1.00	0.6030	0.6680	1.336	28.933	0.80	0.6030	0.6680	1.67	28.933
110.05	3	6	6	0.607	0.623	0.3115	13.219	3	0.5992	0.624	0.624	24.547	2.00	0.5965	0.6300	0.945	34.089	1.50	0.6000	0.6470	1.294	41.655	1.20	0.6030	0.6680	1.67	46.204
111.05	4	6	8	0.607	0.623	0.3115	15.484	4	0.604	0.624	0.624	29.494	2.67	0.5974	0.6250	0.938	41.675	2.00	0.5965	0.6300	1.26	52.483	1.60	0.5988	0.6400	1.60	61.635
112.05	5	6	10	0.607	0.623	0.3115	17.457	5	0.6067	0.623	0.623	33.734	3.33	0.6009	0.6243	0.937	48.291	2.50	0.5965	0.6255	1.251	61.390	2.00	0.5965	0.6300	1.58	73.347
113.05	6	6	12	0.607	0.623	0.3115	19.228	6	0.6067	0.623	0.623	37.389	4.00	0.6040	0.6240	0.936	54.185	3.00	0.5992	0.6240	1.248	69.429	2.40	0.5962	0.6260	1.57	83.422
114.05	7	6	14	0.607	0.623	0.3115	20.850	7	0.6067	0.623	0.623	40.718	4.67	0.6059	0.6233	0.935	59.488	3.50	0.6018	0.6245	1.249	76.710	2.80	0.5981	0.6246	1.56	92.673
115.05	8	6	16	0.607	0.623	0.3115	22.355	8	0.6067	0.623	0.623	43.794	5.33	0.6067	0.6230	0.935	64.289	4.00	0.6040	0.6240	1.248	83.423	3.20	0.6004	0.6242	1.56	101.230
116.05	9	6	18	0.607	0.623	0.3115	23.764	9	0.6067	0.623	0.623	46.668	6.00	0.6067	0.6230	0.935	68.688	4.50	0.6054	0.6235	1.247	89.600	3.60	0.6023	0.6244	1.56	109.147
117.05	10	6	20	0.607	0.623	0.3115	25.094	10	0.6067	0.623	0.623	49.375	6.67	0.6067	0.6230	0.935	72.822	5.00	0.6067	0.6230	1.246	95.413	4.00	0.6040	0.6240	1.56	116.587
118.05	11	6	22	0.607	0.623	0.3115	26.357	11	0.6067	0.623	0.623	51.941	7.33	0.6067	0.6230	0.935	76.733	5.50	0.6067	0.6230	1.246	100.715	4.40	0.6051	0.6236	1.56	123.531
119.05	12	6	24	0.607	0.623	0.3115	27.563	12	0.6067	0.623	0.623	54.386	8.00	0.6067	0.6230	0.935	80.455	6.00	0.6067	0.6230	1.246	105.752	4.80	0.6062	0.6232	1.56	130.151
120.05	13	6	26	0.607	0.623	0.3115	28.718	13	0.6067	0.623	0.623	56.726	8.67	0.6067	0.6230	0.935	84.011	6.50	0.6067	0.6230	1.246	110.560	5.20	0.6067	0.6230	1.56	136.356
121.05	14	6	28	0.607	0.623	0.3115	29.828	14	0.6067	0.623	0.623	58.973	9.33	0.6067	0.6230	0.935	87.424	7.00	0.6067	0.6230	1.246	115.167	5.60	0.6067	0.6230	1.56	142.190
122.05	15	6	30	0.607	0.623	0.3115	30.898	15	0.6067	0.623	0.623	61.138	10.00	0.6067	0.6230	0.935	90.708	7.50	0.6067	0.6230	1.246	119.597	6.00	0.6067	0.6230	1.56	147.793
123.05	16	6	32	0.607	0.623	0.3115	31.933	16	0.6067	0.623	0.623	63.228	10.67	0.6067	0.6230	0.935	93.877	8.00	0.6067	0.6230	1.246	123.868	6.40	0.6067	0.6230	1.56	153.192
124.05	17	6	34	0.607	0.623	0.3115	32.935	17	0.6067	0.623	0.623	65.252	11.33	0.6067	0.6230	0.935	96.942	8.50	0.6067	0.6230	1.246	127.997	6.80	0.6067	0.6230	1.56	158.407
125	18	6	35.9	0.607	0.623	0.3115	33.859	17.95	0.6067	0.623	0.623	67.118	11.97	0.6067	0.6230	0.935	99.767	8.98	0.6067	0.6230	1.246	131.800	7.18	0.6067	0.6230	1.56	163.206

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel lanjutan

3					3.5					4					4.5					5					5.5					6				
Ho/a	c	Ψ	H1	Q	Ho/a	c	Ψ	H1	Q	Ho/a	c	Ψ	H1	Q	Ho/a	c	Ψ	H1	Q	Ho/a	c	Ψ	H1	Q	Ho/a	c	Ψ	H1	Q	Ho/a	c	Ψ	H1	Q
				m^3/dt					m^3/dt				m^3/dt				m^3/dt				m^3/dt			m^3/dt			m^3/dt			m^3/dt				
0.00	0.6030	0.6680	2.004	0.000	0.00	0.6030	0.6680	2.338	0.000	0.00	0.6030	0.6680	2.672	0.000	0.00	0.6030	0.6680	3.006	0.000	0.00	0.6030	0.6680	3.34	0.000	0.00	0.6030	0.6680	3.674	0.000	0.00	0.6030	0.6680	4.008	0.000
0.33	0.6030	0.6680	2.004	10.229	0.29	0.6030	0.6680	2.338	10.229	0.25	0.6030	0.6680	2.672	10.229	0.22	0.6030	0.6680	3.006	10.229	0.20	0.6030	0.6680	3.34	10.229	0.18	0.6030	0.6680	3.674	10.229	0.17	0.6030	0.6680	4.008	10.229
0.67	0.6030	0.6680	2.004	28.933	0.57	0.6030	0.6680	2.338	28.933	0.50	0.6030	0.6680	2.672	28.933	0.44	0.6030	0.6680	3.006	28.933	0.40	0.6030	0.6680	3.34	28.933	0.36	0.6030	0.6680	3.674	28.933	0.33	0.6030	0.6680	4.008	28.933
1.00	0.6030	0.6680	2.004	53.153	0.86	0.6030	0.6680	2.338	53.153	0.75	0.6030	0.6680	2.672	53.153	0.67	0.6030	0.6680	3.006	53.153	0.60	0.6030	0.6680	3.34	53.153	0.55	0.6030	0.6680	3.674	53.153	0.50	0.6030	0.6680	4.008	53.153
1.33	0.6030	0.6680	2.004	67.923	1.14	0.6030	0.6680	2.338	72.311	1.00	0.6030	0.6680	2.672	81.835	0.89	0.6030	0.6680	3.006	81.835	0.80	0.6030	0.6680	3.34	81.835	0.73	0.6030	0.6680	3.674	81.835	0.67	0.6030	0.6680	4.008	81.835
1.67	0.5983	0.6373	1.912	83.822	1.43	0.6011	0.6606	2.312	91.662	1.25	0.6030	0.6680	2.672	97.807	1.11	0.6030	0.6680	3.006	101.834	1.00	0.6030	0.6680	3.34	114.368	0.91	0.6030	0.6680	3.674	114.368	0.83	0.6030	0.6680	4.008	114.368
2.00	0.5965	0.6300	1.89	96.417	1.71	0.5979	0.6357	2.225	108.055	1.50	0.6000	0.6470	2.588	117.819	1.33	0.6030	0.6680	3.006	124.783	1.20	0.6030	0.6680	3.34	130.686	1.09	0.6030	0.6680	3.674	134.427	1.00	0.6030	0.6680	4.008	150.340
2.33	0.5961	0.6267	1.88	107.535	2.00	0.5965	0.6300	2.205	121.499	1.75	0.5976	0.6350	2.54	134.165	1.56	0.5993	0.6431	2.894	145.242	1.40	0.6015	0.6661	3.33	153.113	1.27	0.6030	0.6680	3.674	160.747	1.17	0.6030	0.6680	4.008	166.322
2.67	0.5974	0.6250	1.875	117.873	2.29	0.5960	0.6271	2.195	133.569	2.00	0.5965	0.6300	2.52	148.444	1.78	0.5974	0.6344	2.855	162.052	1.60	0.5988	0.6400	3.2	174.330	1.45	0.6007	0.6557	3.606	184.046	1.33	0.6030	0.6680	4.008	192.116
3.00	0.5992	0.6240	1.872	127.549	2.57	0.5969	0.6253	2.189	144.915	2.25	0.5959	0.6273	2.509	161.395	2.00	0.5965	0.6300	2.835	177.129	1.80	0.5972	0.6340	3.17	191.613	1.64	0.5985	0.6385	3.512	204.947	1.50	0.6000	0.6470	3.882	216.448
3.33	0.6009	0.6243	1.873	136.588	2.86	0.5985	0.6244	2.186	155.626	2.50	0.5965	0.6255	2.502	173.638	2.22	0.5958	0.6274	2.8233	190.902	2.00	0.5965	0.6300	3.15	207.456	1.82	0.5971	0.6336	3.485	222.786	1.67	0.5983	0.6373	3.824	237.083
3.67	0.6026	0.6243	1.873	145.157	3.14	0.6001	0.6241	2.185	165.740	2.75	0.5978	0.6248	2.499	185.290	2.44	0.5963	0.6258	2.816	204.026	2.20	0.5958	0.6275	3.138	221.999	2.00	0.5965	0.6300	3.465	239.340	1.83	0.5971	0.6333	3.800	255.471
4.00	0.6040	0.6240	1.872	153.257	3.43	0.6014	0.6244	2.186	175.245	3.00	0.5992	0.6240	2.496	196.375	2.67	0.5974	0.6250	2.8125	216.547	2.40	0.5962	0.6260	3.13	235.952	2.18	0.5958	0.6276	3.452	254.641	2.00	0.5965	0.6300	3.780	272.708
4.33	0.6049	0.6237	1.871	160.892	3.71	0.6029	0.6243	2.185	184.419	3.25	0.6006	0.6243	2.497	206.920	2.89	0.5987	0.6243	2.8095	228.579	2.60	0.5971	0.6252	3.126	249.324	2.36	0.5961	0.6264	3.445	269.350	2.17	0.5959	0.6277	3.766	288.733
4.67	0.6059	0.6233	1.87	168.259	4.00	0.6040	0.6240	2.184	193.126	3.50	0.6018	0.6245	2.498	216.970	3.11	0.6000	0.6241	2.8085	240.036	2.80	0.5981	0.6246	3.123	262.119	2.55	0.5968	0.6254	3.440	283.475	2.33	0.5961	0.6267	3.760	304.156
5.00	0.6067	0.6230	1.869	175.285	4.29	0.6048	0.6237	2.183	201.392	3.75	0.6031	0.6243	2.497	226.684	3.33	0.6009	0.6243	2.8095	250.929	3.00	0.5992	0.6240	3.12	274.442	2.73	0.5977	0.6248	3.437	297.074	2.50	0.5965	0.6255	3.753	318.993
5.33	0.6067	0.6230	1.869	181.837	4.57	0.6057	0.6234	2.182	209.430	4.00	0.6040	0.6240	2.496	235.955	3.56	0.6021	0.6244	2.81	261.510	3.20	0.6004	0.6242	3.121	286.321	2.91	0.5988	0.6243	3.434	310.298	2.67	0.5974	0.6250	3.750	333.396
5.67	0.6067	0.6230	1.869	188.161	4.86	0.6063	0.6231	2.181	217.088	4.25	0.6047	0.6238	2.495	244.807	3.78	0.6032	0.6242	2.809	271.752	3.40	0.6012	0.6244	3.122	297.614	3.09	0.5998	0.6241	3.433	322.958	2.83	0.5983	0.6245	3.747	347.338
5.98	0.6067	0.6230	1.869	193.978	5.13	0.6067	0.6230	2.181	224.105	4.49	0.6054	0.6235	2.494	253.002	3.99	0.6040	0.6240	2.8081	281.072	3.59	0.6023	0.6244	3.122	308.168	3.26	0.6007	0.6243	3.433	334.518	2.99	0.5992	0.6240	3.744	360.108



Gambar 4.4 Grafik EL. Muka Air dan Debit pada Intake

Sumber: Hasil Perhitungan

Menghitung Kehilangan Energi (hf) pada Intake

Kehilangan tinggi tekan pada intake meliputi kehilangan di mulut intake. Kehilangan tinggi pada intake dapat dihitung dengan persamaan berikut :

Kehilangan pada inlet :

$$hf = f V^2 / 2g$$

dimana :

$$f = 0,25 (\text{inlet berbentuk Haunch})$$

$$v = Q / A$$

$$= 110,00 / 36$$

$$= 3,0556 \text{ m/dt}$$

Maka kehilangan energi pada Intake :

$$hf = 0,25 \times 3,056^2 / (2 \times 9,81)$$

$$hf = 0,119 \text{ m}$$

Menghitung Kehilangan Energi (hf) pada saringan (trashrack)

Kehilangan tinggi tekan akibat saringan (trashrack) pada intake

Persamaannya sebagai berikut (2-25):

$$ht = Kt \times \left(\frac{t}{b} \right)^{\frac{4}{3}} \times \frac{V_0^2}{2g} \times \sin \phi$$

Diketahui:

- Qdesain tiap intake = 110 m³/dt
- Lebar trashrack = 10 m (tiap 1 intake)
- Tinggi trashrack = 7 m
- V (pada trashrack) = 1,57 m/dt
- Kt = 2,4 (profil kisi saringan berbentuk persegi)
- Φ = 90°
- t = 350 mm
- b = 100 mm

maka:

$$\begin{aligned} ht &= 2,4 \times \left(\frac{350}{100} \right)^{\frac{4}{3}} \times \frac{1,57^2}{2g} \times \sin 90 \\ &= 1,44 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi kehilangan tinggi tekan akibat saringan (trashrack) adalah 1,44 m.

4.4.2. Perencanaan Pipa Pesat (*Penstock*)

Kajian perencanaan pipa pesat dalam perencanaan ini meliputi diameter pipa pesat, dan tebal pipa pesat. Data teknis yang direncanakan adalah :

- Debit total = 200,00 m³/dt
- Panjang pipa pesat = 125 m
- Tinggi jatuh kotor = 69,460 m
- Koefisien manning (n) = 0,015
- Jumlah pipa pesat = 2 buah beserta 2 buah turbin
- Daya yang dibangkitkan = 45 MW (untuk 1 turbin)
- Debit untuk tiap pipa pesat = 100 m³/dt
- Debit desain = 110 m³/dt

Diameter Pipa Pesat

Dalam perencanaan diameter pipa pesat harus memperhatikan kecepatan yang diijinkan. Menurut Mosonyi kecepatan yang diijinkan bergantung kepada material dari pipa pesat itu sendiri. Dan pada perencanaan kali ini material yang dipilih untuk pipa pesat adalah baja. Dengan demikian menurut Mosonyi kecepatan yang diijinkan untuk material baja adalah 2,5 – 7 m/dt. Terdapat rumus empiris dan cara coba-coba yang dapat digunakan untuk menghitung diameter pipa pesat. Berikut persamaan menurut Mosonyi:

- Persamaan Mosonyi

$$\begin{aligned} D &= 0,62 \times Q^{0,48} \\ &= 0,62 \times 110^{0,48} \\ &= 5,919 \text{ m} \\ A &= 27,518 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Dengan diameter dan luas pipa pesar diatas di dapatkan kecepatans sebesar:

$$\begin{aligned} V &= Q/A \\ &= 110 / 27,518 \\ &= 3,997 \text{ m/dt} \text{ (memenuhi kecepatan izin)} \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa perhitungan dengan persamaan Mosonyi memenuhi syarat kecepatan izin sehingga dapat digunakan. namun perlu dilakukan analisa pengaruh diameter terhadap beberapa faktor seperti kehilangan energi. Maka selanjutnya diameter dihitung dengan pendekatan kecepatan berdasarkan mosonyi, maka :

Kecepatan potensial aliran pada pipa pesat berdasarkan tinggi jatuh digunakan persamaan (2-7):

$$\begin{aligned}
 V &= \sqrt{2 g H} \\
 &= \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 69,46} \\
 V &= 36,916 \text{ m/dt}
 \end{aligned}$$

Sedangkan kecepatan ijin yang mampu dicapai oleh pipa pesat (*penstock*) adalah V maks = 7 m/dt

$$\begin{aligned}
 V_{\min} &= 2,5 \text{ m/dt} \longrightarrow D = 7,487 \text{ m} \\
 V_{\max} &= 7 \text{ m/dt} \longrightarrow D = 4,474 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Sehingga nilai kisaran diameter *penstock* adalah 7,487 m – 4,474 m.

Kehilangan Tinggi Tekan Pada Pipa Pesat

Kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat meliputi kehilangan tinggi akibat inlet, outlet, belokan dan gesekan. Kehilangan tinggi dapat dihitung dengan persamaan :

Diketahui data sebagai berikut :

- $D = 4,474 \text{ m}$
- $V = 6,997 \text{ m/dt}$
- $n = 0,015$
- $L = 125 \text{ m}$

- a. Kehilangan energi akibat gesekan

$$\begin{aligned}
 Hf_1 &= \frac{\frac{L n^2 v^2}{4}}{R^3} \\
 &= \frac{125 \cdot 0,015^2 \cdot 6,997^2}{2,237^3}
 \end{aligned}$$

$$Hf_1 = 0,471 \text{ m}$$

- b. kehilangan energi akibat belokan 1($f = 0,475$ karena sudut belokan 54°)

$$\begin{aligned}
 Hf_2 &= f \frac{V^2}{29} \\
 &= 0,475 \frac{6,997^2}{29,81}
 \end{aligned}$$

$$Hf_2 = 1,185 \text{ m}$$

- c. kehilangan energi akibat belokan 2 ($f = 0,475$ karena sudut belokan 54°)

$$\begin{aligned}
 Hf_3 &= f \frac{V^2}{29} \\
 &= 0,475 \frac{6,997^2}{29,81}
 \end{aligned}$$

$$Hf_3 = 1,185 \text{ m}$$

d. Kehilangan akibat pelebaran dari intake pipa penstock :

$$f = (1 - A_1/A_2)^2$$

$$f = (1 - 36 \text{ m}^2 / 28,278 \text{ m}^2)^2$$

$$= 1,664$$

$$Hf_4 = f \frac{V^2}{2g}$$

$$= 0,013 \frac{6,997^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$Hf_4 = 4,152 \text{ m}$$

e. Kehilangan akibat outlet pipa pesat :

$$Hf_5 = 0,2 \text{ m}$$

Maka kehilangan energi tekan total adalah sebesar 7,193 m atau 10,36% dari tinggi tekan (H), sehingga tinggi jatuh effektifnya adalah sebesar 62,267 m. Perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada table dibawah ini :

Tabel 4.9 Perhitungan Kehilangan pada Pipa Pesat

No	Diameter (m)	Luas (m ²)	Kecepatan (m/dt)	n	Hf 1 (m)	Hf 2 (m)	Hf 3 (m)	Hf 4 (m)	Hf 5 (m)	Hf total (m)	% of Hf (%)	Heff (m)
1	4.474	15.721	6.997	0.015	0.471	1.185	1.185	4.152	0.2	7.193	10.36%	62.267
2	4.6	16.619	6.619	0.015	0.406	1.061	1.061	3.037	0.2	5.764	8.30%	63.696
3	4.7	17.349	6.340	0.015	0.362	0.973	0.973	2.368	0.2	4.876	7.02%	64.584
4	4.8	18.096	6.079	0.015	0.323	0.895	0.895	1.844	0.2	4.156	5.98%	65.304
5	4.9	18.857	5.833	0.015	0.290	0.824	0.824	1.433	0.2	3.571	5.14%	65.889
6	5	19.635	5.602	0.015	0.260	0.760	0.760	1.111	0.2	3.091	4.45%	66.369
7	5.1	20.428	5.385	0.015	0.234	0.702	0.702	0.859	0.2	2.697	3.88%	66.763
8	5.2	21.237	5.180	0.015	0.211	0.650	0.650	0.661	0.2	2.371	3.41%	67.089
9	5.3	22.062	4.986	0.015	0.191	0.602	0.602	0.506	0.2	2.100	3.02%	67.360
10	5.4	22.902	4.803	0.015	0.173	0.559	0.559	0.385	0.2	1.874	2.70%	67.586
11	5.5	23.758	4.630	0.015	0.156	0.519	0.519	0.290	0.2	1.685	2.43%	67.775
12	5.6	24.630	4.466	0.015	0.142	0.483	0.483	0.217	0.2	1.525	2.19%	67.935
13	5.7	25.518	4.311	0.015	0.129	0.450	0.450	0.160	0.2	1.389	2.00%	68.071
14	5.8	26.421	4.163	0.015	0.118	0.420	0.420	0.116	0.2	1.273	1.83%	68.187
15	5.9	27.340	4.023	0.015	0.108	0.392	0.392	0.083	0.2	1.174	1.69%	68.286
16	6	28.274	3.890	0.015	0.098	0.366	0.366	0.058	0.2	1.089	1.57%	68.371
17	6.1	29.225	3.764	0.015	0.090	0.343	0.343	0.039	0.2	1.015	1.46%	68.445
18	6.2	30.191	3.644	0.015	0.083	0.321	0.321	0.025	0.2	0.950	1.37%	68.510
19	6.3	31.172	3.529	0.015	0.076	0.301	0.301	0.015	0.2	0.894	1.29%	68.566
20	6.4	32.170	3.419	0.015	0.070	0.283	0.283	0.008	0.2	0.844	1.22%	68.616
21	6.5	33.183	3.315	0.015	0.064	0.266	0.266	0.004	0.2	0.800	1.15%	68.660
22	6.6	34.212	3.215	0.015	0.059	0.250	0.250	0.001	0.2	0.761	1.10%	68.699
23	6.7	35.257	3.120	0.015	0.055	0.236	0.236	0.000	0.2	0.726	1.05%	68.734
24	6.8	36.317	3.029	0.015	0.050	0.222	0.222	0.000	0.2	0.695	1.00%	68.765
25	6.9	37.393	2.942	0.015	0.047	0.210	0.210	0.001	0.2	0.666	0.96%	68.794

Lanjutan Tabel 4.9. Perhitungan Kehilangan pada Pipa Pesat

No	Diameter	Luas	Kecepatan	n	Hf 1	Hf 2	Hf 3	Hf 4	Hf 5	Hf total	% of Hf	Heff
	(m)	(m ²)	(m/dt)		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(%)	(m)
26	7	38.485	2.858	0.015	0.043	0.198	0.198	0.002	0.2	0.641	0.92%	68.819
27	7.1	39.592	2.778	0.015	0.040	0.187	0.187	0.003	0.2	0.617	0.89%	68.843
28	7.2	40.715	2.702	0.015	0.037	0.177	0.177	0.005	0.2	0.596	0.86%	68.864
29	7.3	41.854	2.628	0.015	0.035	0.167	0.167	0.007	0.2	0.576	0.83%	68.884
30	7.487	44.026	2.499	0.015	0.030	0.151	0.151	0.011	0.2	0.543	0.78%	68.917

Sumber: Hasil Perhitungan

Jadi dari perhitungan diatas, diameter pipa pesat yang dipilih adalah 6 m dengan pertimbangan mendekati hasil perhitungan persamaan Mosonyi yaitu 5,919 dan dengan pertimbangan kecepatan dan kehilangan yang lebih efektif.

Tebal Pipa Pesat

Dalam perencanaan pipa pesat perlu diperhatikan ketebalannya. Ketebalan ini harus direncanakan sedemikian rupa sehingga kuat untuk menahan pengaruh tekanan air yang ada didalam pipa pesat. Tebal pipa pesat dihitung dengan persamaan berikut:

- a) Persamaan Pacific G & E.Co :

$$\begin{aligned} t &= \frac{D}{288} \\ &= \frac{6000}{288} \end{aligned}$$

$$t = 20,833 \text{ mm, kemudian ditambahkan jagaan korosif sebesar } 3 \text{ mm}$$

$$t = 23,833 \text{ mm}$$

- b) Persamaan USBR

$$\begin{aligned} t &= \frac{D+500}{400} \\ &= \frac{6000+500}{400} \end{aligned}$$

$$t = 16,25 \text{ mm kemudian ditambahkan jagaan korosif sebesar } 3 \text{ mm}$$

$$t = 19,25 \text{ mm}$$

- c) Persamaan ASME

$$\begin{aligned} t &= (2,5 \cdot D) + 1,2 \\ &= (2,5 \cdot 6) + 1,2 \\ &= 16,200 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dari ketiga persamaan tersebut diambil nilai maksimum yaitu persamaan PG&E dengan tebal pipa pesat 23,833 mm yang kemudian dibulatkan menjadi 24 mm.

Menghitung Minimum Operation Level

Selanjutnya menghitung Minimum Operation Level (MOL). Menurut ESHA terdapat 4 persamaan dalam menghitung ketinggian air minimum sebelum pipa pesat. Dan dalam perhitungan MOL digunakan rumus (2-18), (2-19), (2-20), dan (2-21).

$$\begin{aligned}
 \text{Knauss} &= D \cdot 1 + 2,3 \cdot \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} \\
 &= 6 \left(1 + 2,3 \times \frac{3,890}{\sqrt{9,81 \cdot 6}} \right) \\
 &= 6,91 \text{ m} \\
 \text{Nagarkar} &= 4,4 (V \cdot D^{0,50})^{0,54} \\
 &= 4,4 \cdot (3,890 \cdot 6^{0,05})^{0,54} \\
 &= 9,62, \\
 \text{Rohan} &= 1,474 \cdot V^{0,48} \cdot D^{0,76} \\
 &= 1,474 \cdot 3,890^{48} \cdot 6^{0,76} \\
 &= 11,04 \text{ m} \\
 \text{Gordon} &= c \cdot V \cdot \sqrt{D} \\
 &= 0,7245 \cdot 3,890 \cdot \sqrt{6} \\
 &= 6,90 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Diambil hasil perhitungan dari Gordon yang memiliki nilai paling kecil, sehingga didapat kedalaman tumpungan waduk efektif lebih besar. Maka MOL terdapat pada elevasi:

$$\begin{aligned}
 \text{MOL} &= \text{El. Dasar intake} + \text{Tinggi Intake} + \text{Ht} \\
 &= 107,05 + 6 + 6,90 \\
 &= 119,95
 \end{aligned}$$

Maka didapatkan kedalaman efektif waduk setinggi:

$$\begin{aligned}
 \text{Kedalaman efektif waduk} &= \text{NWL} - \text{MOL} \\
 &= 125 - 119,95 \\
 &= 5,05 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Penentuan Jenis Baja dalam Perencanaan Pipa Pesat

Untuk perencanaan bahan pipa pesat pada PLTA Bendungan Lubuk Ambacang cocok menggunakan baja karbon SM 400B. Jenis ini dipilih karena memiliki kekuatan menahan tekanan, dan baja ini memiliki ketebalan antara 16 – 40 mm. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Jenis-Jenis Baja

Standard Designation	Grade, Class, Type, Symbol or Name	Steel Number	UNS Number	Heat Treatment	Section Thickness		Yield Strength, min		Tensile Strength, min		Elongation, min, %	Other
					t, mm	t, in.	N/mm ² or MPa	ksi	N/mm ² or MPa	ksi		
ASTM A 283/A 283M-03	C	---	K02401	---	---	---	205	30	380-515	55-75	25	---
ASTM A 1011/A 1011M-03	40 [275]	---	K02502	HR	0.65 ≤ t < 1.6	0.025 ≤ t < 0.064	275	40	380	55	15	---
					1.6 ≤ t < 2.5	0.064 ≤ t < 0.097					20	
					2.5 ≤ t < 6.0	0.097 ≤ t < 0.230					21	
ASTM A 36/A 36M-03a	---	---	K02595 K02596 K02597 K02598 K02599	---	---	---	250	36	400-550	58-80	23	---
ASTM A 1011/A 1011M-03	36 [250] Type 2	---	K02502	HR	0.65 ≤ t < 1.6	0.025 ≤ t < 0.064	250	36	400-550	58-80	16.0	---
					1.6 ≤ t < 2.5	0.064 ≤ t < 0.097					20.0	
					2.5 ≤ t < 6.0	0.097 ≤ t < 0.230					21.0	
ASTM A 573/A 573M-00a	58 [400]	---	K02301	---	≤ 40	≤ 1.5	220	32	400-490	58-71	24	---
ASTM A 709/A 709M-03a	36 [250]	---	---	---	≤ 100	≤ 4	250	36	400-550	58-80	23	---
JIS G 3101:1995	SS400	---	---	HR	≤ 16	---	245	---	400-510	---	17	---
					16 < t ≤ 40	---	235	---			21	
					40 < t ≤ 75	---	215	---			23	
					75 < t ≤ 100	---	215	---			24	
					100 < t ≤ 160	---	205	---			24	
JIS G 3106:1999	SM400A	---	---	HR	160 < t ≤ 200	---	195	---	400-510	---	24	---
					≤ 16	---	245	---			18	
					16 < t ≤ 40	---	235	---			22	
					40 < t ≤ 75	---	215	---			24	
					75 < t ≤ 100	---	215	---			24	
	SM400B	---	---	HR	100 < t ≤ 160	---	205	---	400-510	---	24	27 J at 0°C
					160 < t ≤ 200	---	195	---			24	
					≤ 16	---	245	---			18	
					16 < t ≤ 40	---	235	---			22	
					40 < t ≤ 75	---	215	---			24	

Sumber: (Bringas, 2004: 54)

Pengaruh Pukulan Air Terhadap Pipa Pesat

Perhitungan tekanan hidrostatis untuk pipa pesat perlu memperhatikan pengaruh pukulan air (*Water Hammer*) terhadap pipa, dimana kenaikan air akibat pukulan air ini dihitung dengan persamaan allevi :

Diketahui :

- Jenis baja = SM 400B
- Modulus air (k) = $2,1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
- Modulus elastis baja karbon = $1,9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
- Diameter pipa pesat = 6.00 m
- Panjang pipa pesat = 125 m
- Tebal pipa pesat = 0,024 m
- Berat jenis air (ρ_w) = 1000 kg/m³
- Poisson ratio baja = 0,26
- Debit desain = $110,00 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Gross Head = $FSL - TWL = 125 - 55,54 = 69,46 \text{ m}$
- Waktu penutupan katup = 5 detik
- Internal diameter = 6,00 m

- Internal radius (R_i) = 3,00 m
- External diameter = 6,048 m
- External radius (R_o) = 3,024 m

Menghitung kecepatan gelombang :

Konstanta fleksibilitas :

$$\begin{aligned}\Psi &= 2 \left[\frac{R_2^o + 1,5R_i^2}{R_2^o - R_i^2} + \frac{\nu (R_2^o - 3R_i^2)}{R_2^o - R_i^2} \right] \\ &= 2 \left[\frac{3,024^2 + 1,5 \cdot 3,00^2}{3,024^2 - 3,00^2} + \frac{0,26 (3,024^2 - 3,00^2)}{3,024^2 - 3,00^2} \right]\end{aligned}$$

$$\Psi = 249,034$$

Kecepatan gelombang :

$$\begin{aligned}\alpha &= \sqrt{\frac{K}{\rho [1 + \left(\frac{K}{E}\right)\psi]}} \\ &= \sqrt{\frac{2,1 \times 10^9}{1000 [1 + \left(\frac{2,1 \times 10^9}{1,9 \times 10^{11}}\right) 249,034]}} \\ \alpha &= 747,898 \text{ m/dt}\end{aligned}$$

Kecepatan air :

$$\begin{aligned}v &= \frac{Q}{A} \\ &= \frac{110}{0,25 \pi \cdot 6^2} \\ v &= 3,890 \text{ m/dt}\end{aligned}$$

allevi pipeline constanta :

$$\begin{aligned}\rho_{\text{allevi}} &= \frac{\alpha V o}{2 g H o} \\ &= \frac{747,898 \times 3,890}{2 \times 9,81 \times 69,46} \\ \rho_{\text{allevi}} &= 2,135\end{aligned}$$

Closing time constan :

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{\alpha T}{2 L o} \\ &= \frac{747,898 \times 5}{2 \times 125} \\ \theta &= 14,958 \\ n &= \frac{\rho_{\text{allevi}}}{\theta} \\ &= \frac{2,135}{14,958} \\ n &= 0,1427\end{aligned}$$

Dimana perhitungan pukulan air untuk turbin francis digunakan persamaan (2-17) sebagai berikut:

$$\frac{h_o}{H_o} = \left(\frac{0,75}{\theta\sqrt{\theta}} + 1,25 \right) n$$

$$h_o = 12,521 \text{ m},$$

$$\frac{h_o}{H_o} = 18,027 \%$$

4.4.3. Perencanaan Tangki Peredam (*Surge Tank*)

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

- o Ketika beban berkurang, air bergerak mundur dan akan disimpan di dalamnya
- o Bila beban meningkat, tambahan pasokan air akan disediakan oleh surge tanks

Singkatnya surge tank meringankan variasi tekanan karena perubahan yang cepat dalam kecepatan air.

Kebutuhan Terhadap Tangki Gelombang

Pipa pesat membutuhkan tangki gelombang bila $L > 4H$ (AHEC,2009:50), dalam studi ini panjang pipa pesat (L) adalah 125 m, sedangkan tinggi jatuh (H) adalah 69,64 m maka :

$$125 < 4(69,64)$$

$$125 < 277,84$$

Sehingga pipa pesat tidak membutuhkan tangki gelombang.

4.5. Saluran Pembuang (*Tail Race*)

Setelah melalui fasilitas pembangkitan, debit akan dikembalikan ke sungai asli melalui draft tube menuju saluran pembuang (tail race) Data teknis saluran pembuang adalah sebagai berikut :

$$\text{Lebar dasar rerata} = 49.00 \text{ m}$$

$$\text{Slope, } S = 0.007$$

$$\text{Manning, } n = 0.014$$

Berdasarkan data teknis tersebut, dapat diperoleh hubungan tinggi air dan debit pada saluran pembuang (tailrace) sebagai berikut:

$$h = 0,1 \text{ m}$$

$$A = 0,1 \cdot 49,00$$

$$\begin{aligned}
 &= 4,9 \text{ m}^2 \\
 P &= b+2.h \\
 &= 49,00 + 2 \cdot 0,1 \\
 &= 49,20 \\
 A/P &= 4,9 / 49,20 \\
 &= 0,100 \\
 V &= \frac{1}{n} \times \sqrt[3]{R^2} \times \sqrt{S} \\
 &= \frac{1}{0,014} \times \sqrt[3]{0,100^2} \times \sqrt{0,007} \\
 &= 1,284 \text{ m/dt} \\
 Q &= 6,292 \text{ m}^3/\text{dt} \\
 \text{Elevasi} &= 54,98 + 0,1 \\
 &= + 55,08
 \end{aligned}$$

Tabel 4.11 Hubungan Tinggi Air dan Debit pada Saluran Pembuang

No	b	h	A	P	A/P	n	s	V	Elevasi	Q
1	49	0.1	4.90	49.20	0.100	0.014	0.007	1.284	55.08	6.292
2	49	0.2	9.80	49.40	0.198	0.014	0.007	2.033	55.18	19.921
3	49	0.3	14.70	49.60	0.296	0.014	0.007	2.657	55.28	39.051
4	49	0.4	19.60	49.80	0.394	0.014	0.007	3.210	55.38	62.906
5	49	0.5	24.50	50.00	0.490	0.014	0.007	3.714	55.48	91.002
6	49	0.6	29.40	50.20	0.586	0.014	0.007	4.183	55.58	122.988
7	49	0.7	34.30	50.40	0.681	0.014	0.007	4.624	55.68	158.595
8	49	0.8	39.20	50.60	0.775	0.014	0.007	5.041	55.78	197.605
9	49	0.9	44.10	50.80	0.868	0.014	0.007	5.438	55.88	239.833
10	49	1	49.00	51.00	0.961	0.014	0.007	5.819	55.98	285.124
11	49	1.1	53.90	51.20	1.053	0.014	0.007	6.184	56.08	333.341
12	49	1.2	58.80	51.40	1.144	0.014	0.007	6.537	56.18	384.363
13	49	1.3	63.70	51.60	1.234	0.014	0.007	6.877	56.28	438.080
14	49	1.4	68.60	51.80	1.324	0.014	0.007	7.207	56.38	494.396
15	49	1.5	73.50	52.00	1.413	0.014	0.007	7.527	56.48	553.220

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan tabel diatas dapat diperoleh tinggi air di tailrace pada saat operasi unit PLTA

Lubuk Ambacang adalah sebagai berikut :

- 1 Unit PLTA Operasi : $Q = 110 \text{ m}^3/\text{dt}$, Elevasi TWL = El. + 55,54 m
- 2 Unit PLTA Operasi : $Q = 220 \text{ m}^3/\text{dt}$, Elevasi TWL = El. + 55,83 m

Dari kesimpulan elevasi TWL diatas dapat direncanakan tinggi saluran tailrace = 1 m yaitu pada elevasi 56,98 m, sehingga dinilai aman untuk dilewati debit untuk 2 unit PLTA.

4.6. Tinggi Jatuh Efektif (*Net Head*)

Dalam studi perencanaan PLTA Bendungan Lubuk Ambacang ini tinggi jatuh efektif dihitung berdasarkan muka air normal dan elevasi *tail water level* (TWL). Dan diketahui muka air normal adalah 125 m dan elevasi TWL adalah 55,54 m sehingga didapatkan tinggi jatuh kotor sebesar 69,46 m.

Tinggi jatuh efektif adalah hasil pengurangan tinggi jatuh kotor dengan total kehilangan tinggi tekan. Perhitungan tinggi jatuh efektif dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.12 Rekapitulasi Kehilangan Energi

No	Parameter Tinggi Tekan	Hf
1	Kehilangan pada Intake	
	trashrack	1.44
	intake	0.12
2	Kehilangan pada pipa pesat	
	Akibat gesekan	0.10
	Akibat belokan 1	0.37
	Akibat belokan 2	0.37
	Akibat pengecilan intake ke pipa	0.06
	Akibat outlet pipa	0.20
3	Kehilangan sebelum turbin	
	Diasumsikan	0.1
	Total kehilangan	2.74
	Gross Head	69.46
	Tinggi jatuh efektif	66.72

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari tabel perhitungan diatas dapat diketahui tinggi jatuh efektif PLTA Bendungan Lubuk Ambacang adalah sebesar 66,72 m.

4.7. Perencanaan Peralatan Hidromekanik dan Elektrik

Kajian perencanaan peralatan hidromekanik dalam studi ini meliputi perencanaan turbin, perencanaan peralatan elektrik dan rumah pembangkit.

4.7.1. Turbin Hidraulik

Perencanaan turbin meliputi pemilihan tipe turbin, analisa karakteristik turbin, titik pusat turbin, kavitas dan dimensi turbin. Dalam studi ini digunakan beberapa metode dalam merencanakan turbin hidraulik, metode yang digunakan adalah metode USBR dalam engineering monograph no 20 dan metode yang dikembangkan oleh European small hydropower association (ESHA) dalam pence,2004.

4.7.1.1. Metode Eropa (ESHA)

a. Pemilihan Tipe Turbin (Untuk Metode ESHA)

Turbin air mempunyai beberapa klasifikasi berdasarkan pengubah momentum kerja, berdasarkan tinggi jatuh, dan berdasarkan kecepatan jenis dari turbin tersebut. Maka klasifikasi turbin yang digunakan dapat ditambahkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan momentum kerjanya, dibagi menjadi turbin impuls dan turbin reaksi.
2. Klasifikasi turbin berdasarkan tinggi jatuh disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4.13 Pemilihan Tipe Turbin

Pemilihan Turbin	Range Head (m)	Turbin
Head Rendah	2 – 15	Propeller (Kaplan)
Head Menengah	16 – 70	Kaplan atau Francis
Head Tinggi	70 – 500	Francis atau Pelton
Head Sangat Tinggi	> 500	Pelton

Sumber: (Dandekar, Sharma,1991:394)

Dari tabel di atas diketahui bahwa dengan tinggi jatuh efektif 66,64 meter, maka dipilih Turbin *Francis* sumbu vertikal.

Setelah penentuan jenis turbin maka harus dihitung besarnya kecepatan spesifik turbin karena kecepatan spesifik turbin adalah parameter yang mendasari karakteristik turbin hidraulik. Dalam perhitungan kecepatan spesifik dan putar turbin data yang diperlukan antara lain sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 - \text{Heff} &= H_{gross} - (\sum H_L) = 69,46 \text{ m} - 2,82 \text{ m} = 66,64 \\
 - Q_{\text{turbin}} &= 220 \text{ m}^3/\text{detik} \\
 - Q_{1 \text{ turbin}} &= 110 \text{ m}^3/\text{detik}
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan kecepatan spesifik dan putar turbin menurut Schweiger dan Greory dalam (Pache, 2004: 169) kecepatan spesifik coba-coba (trial specific speed) turbin francis dihitung sebagai berikut:

1. Kecepatan Spesifik (N_{QE})

$$\begin{aligned}
 N_{QE'} &= \frac{1,924}{H^{0,512}} \\
 &= \frac{1,924}{66,64^{0,512}} \\
 &= 0,224
 \end{aligned}$$

2. Kecepatan putar turbin (n)

$$n = N_{QE'} \frac{(g \times H_{eff})^{0,75}}{Q^{0,5}} \longrightarrow Q \text{ merupakan debit untuk 1 turbin.}$$

$$= 0,224 \times \frac{(9,81 \times 66,72)^{0,75}}{110^{0,5}} = 2,763 \text{ t/s}$$

$$\begin{aligned} N' &= n \times 60 \\ &= 2,763 \times 60 = 165,798 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Pada studi ini turbin direncanakan menggunakan generator tipe sinkron dengan frekuensi 50 Hz maka kecepatan sinkron generator sama dengan kecepatan putar turbin, sehingga kecepatan sinkron generator dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} p &= \frac{120 \times f}{N'} \\ &= \frac{120 \times 50}{165,751} = 36,188 \end{aligned}$$

Dikarenakan nilai kutub generator (p) harus memiliki nilai genap dan tidak berbentuk bilangan desimal maka dipilih alternatif jumlah kutub yang mendekati dengan hitungan tersebut. Sehingga perhitungan kecepatan putar terkoreksi adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} p &= 38 \text{ pole} \\ N' &= \frac{120 \times f}{p} \\ &= \frac{120 \times 50}{38} = 157,89 \text{ rpm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{QE'} &= \frac{N'}{60} \times \frac{Q^{0,5}}{(g \times H_{eff})^{0,75}} \\ &= \frac{157,89}{60} \times \frac{110^{0,5}}{(9,18 \times 66,64)^{0,75}} = 0,213 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan kecepatan spesifik terkoreksi diatas, maka diperoleh kecepatan spesifik turbin Francis sebesar 0,213. Selain itu dapat ditentukan rasio kecepatan (φ) dan diameter runner maksimum (Dm), dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \varphi &= 2,11 \times N_{QE'} \\ &= 2,11 \times 0,213 \\ &= 0,450 \text{ m/dt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Dm &= 84,5 \times (0,79 + 1,603 \times 0,158) \times \frac{\sqrt{H_{eff}}}{N'} \\
 &= 84,5 \times (0,79 + 1,603 \times 0,158) \times \frac{\sqrt{66,64}}{157,89} = 4.946 \text{ m}
 \end{aligned}$$

b. Titik Pusat Turbin (Untuk Metode ESHA)

Analisa titik pusat turbin sangat berpengaruh terhadap gejala kavitas, penempatan turbin yang tidak benar akan menyebabkan terjadinya kavitas pada turbin. Data perencanaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Elevasi TWL} &= + 55,54 \\
 \text{Tinggi jatuh efektif} &= 66,72 \text{ m} \\
 \text{Kecepatan Spesifik } (N_{QE}) &= 0,213 \\
 \text{Suhu Air} &= 25^\circ\text{C} \\
 \text{Tekanan Atmosfer (atm)} &= 102.269 \text{ Pa} \\
 \text{Tekanan Uap Air (Pw)} &= 3.200 \text{ Pa} \\
 \text{Berat Jenis air } (\rho) &= 1000 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Percepatan gravitasi } (g) &= 9,81 \text{ m/dt}^2 \\
 \text{Kecepatan setelah runner} &= 2 \text{ m/dt (pendekatan)}
 \end{aligned}$$

Berikut ini adalah perhitungan titik pusat turbin (Celso, 2004: 178):

$$\begin{aligned}
 \text{Koef. Thoma kritis } (\sigma_c) &= 1,2715 \times N_{QE}^{1,41} + \frac{V^2}{2gh} \\
 &= 1,2715 \times 0,213^{1,41} + \frac{2^2}{2 \times 9,81 \times 66,72} \\
 &= 0,147
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi Hisap kritis } (H_s) &= \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} - \sigma \times H_{eff} \\
 &= \frac{102269 - 3200}{1000 \times 9,81} + \frac{2^2}{2 \times 9,81} - 0,147 \times 66,72 \\
 &= 0,496 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Kavitas akan terjadi nilai tinggi hisap (Hs) berada pada nilai diatas 0,495 m, jadi untuk keamanan direncanakan Hs= -1 m. Angka minus menunjukkan bahwa titik turbin berada dibawah elevasi TWL. Kavitas juga terjadi apabila elevasi titik pusat turbin rencana lebih besar dibandingkan dengan elevasi titik pusat turbin yang diizinkan. Untuk mencegah hal tersebut maka penentuan elevasi titik pusat turbin adalah sebagai berikut (Celso, 2004):

$$\begin{aligned}\text{Elevasi titik pusat turbin yang diizinkan} &= TWL_{0,2Q} + (H_s) \\ &= 55,54 + (-1) = +54,54 \text{ m}\end{aligned}$$

Maka, elevasi titik pusat turbin ditempatkan lebih rendah dibanding elevasi titik pusat turbin yang diizinkan, yaitu +54,54 m.

c. Kontrol Gejala Kavitas (Untuk Metode ESHA)

Kavitas merupakan fenomena dimana terdapat gelembung udara pada turbin yang akan membentur dinding runner sehingga dapat mengakibatkan korosi. Berikut merupakan data yang dibutuhkan untuk kontrol gejala kavitas:

- Tekanan atmosfer (H_a) $= \frac{P_{atm}}{\rho \times g} = \frac{102269}{1000 \times 9,81} = 10,425 \text{ m}$
- Tekanan uap (H_w) $= \frac{P_v}{\rho \times g} = \frac{3200}{1000 \times 9,81} = 0,326 \text{ m}$
- σ_{kritis} $= 0,147$
- Tinggi hisap (H_s) $= -1,00 \text{ m}$
- Tinggi jatuh efektif $= 66,64 \text{ m}$

Berikutnya analisa kavitas pada turbin menggunakan rumus (2 – 47) :

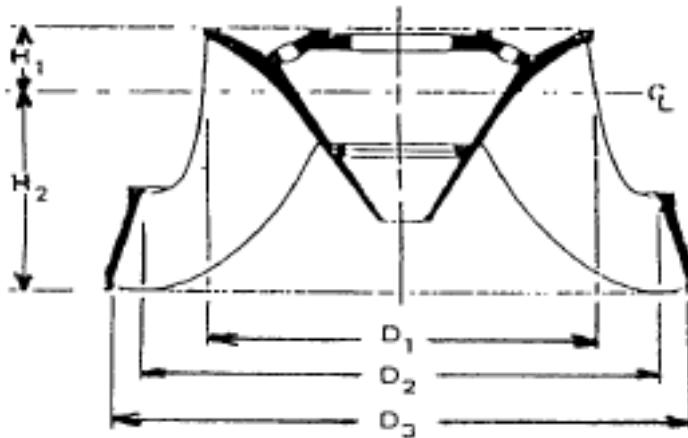
$$\boxed{\sigma_{aktual} = \frac{H_a - H_w - H_s}{H_{eff}} = \frac{10,550 - 0,234 - (-1,00)}{66,64} = 0,166}$$

Kavitas terjadi jika $\sigma_{aktual} < \sigma_{kritis}$ sehingga dari perhitungan diatas didapatkan $0,166 > 0,147$ maka desain turbin aman terhadap gejala kavitas.

d. Dimensi Turbin (Untuk Metode ESHA)

Dimensi turbin yang direncanakan meliputi, dimensi *blade* turbin, dimensi *runner* turbin dimensi *spiral case* dan dimensi *draft tube*. Berikut merupakan perencanaan dimensi turbin:

- Kecepatan spesifik (N_{QE}) $= 0,213$
- Kecepatan dasar (N') $= 165,751 \text{ rpm}$
- Tinggi jatuh efektif (H_{eff}) $= 66,72 \text{ m}$
- Kecepatan spesifik (N_s) $= 995 \times N_{QE}$
 $= 995 \times 0,213$
 $= 212,230 \text{ mkW}$



Gambar 4.5 Sketsa Runner Turbin Francis

Sumber: Ramos, 2000:97

- *Dimensi runner* turbin

Dimensi runner dalam turbin francis terdiri dari 3 bagian yaitu runner bagian luar (D₃), runner bagian tengah (D₂) dan runner bagian dalam (D₁). Berikut merupakan perhitungan diameter runner:

$$\begin{aligned} K_U &= 0,31 + 2,5 \times 10^{-3} \times N_s \\ &= 0,31 + 2,5 \times 10^{-3} \times 212,230 \\ &= 0,724 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_3 &= 84,5 \times K_U \times \frac{\sqrt{H_{eff}}}{N'} \\ &= 84,5 \times 0,724 \times \frac{\sqrt{66,72}}{165,798} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_1 &= D_3 \times \left(0,4 + \frac{94,5}{N_s} \right) \\ &= 3,015 \times \left(0,4 + \frac{94,5}{212,230} \right) \\ &= 2,549 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_2 &= \frac{D_3}{0,96 + 0,00038 \times N_s} \\ &= \frac{3,015}{0,96 + 0,00038 \times 212,230} \\ &= 2,898 \end{aligned}$$

Selanjutnya, untuk tinggi turbin dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 H_1 &= D_3 \times (0,094 + 0,00025 \times Ns) \\
 &= 3,016 \times (0,094 + 0,00025 \times 212,230) \\
 &= 0,444 \text{ m} \\
 H_2 &= D_3 (-0,05 + \frac{42}{Ns}) \\
 &= 3,016x(-0,05 + \frac{42}{212,230}) \\
 &= 0,446 \text{ m}
 \end{aligned}$$

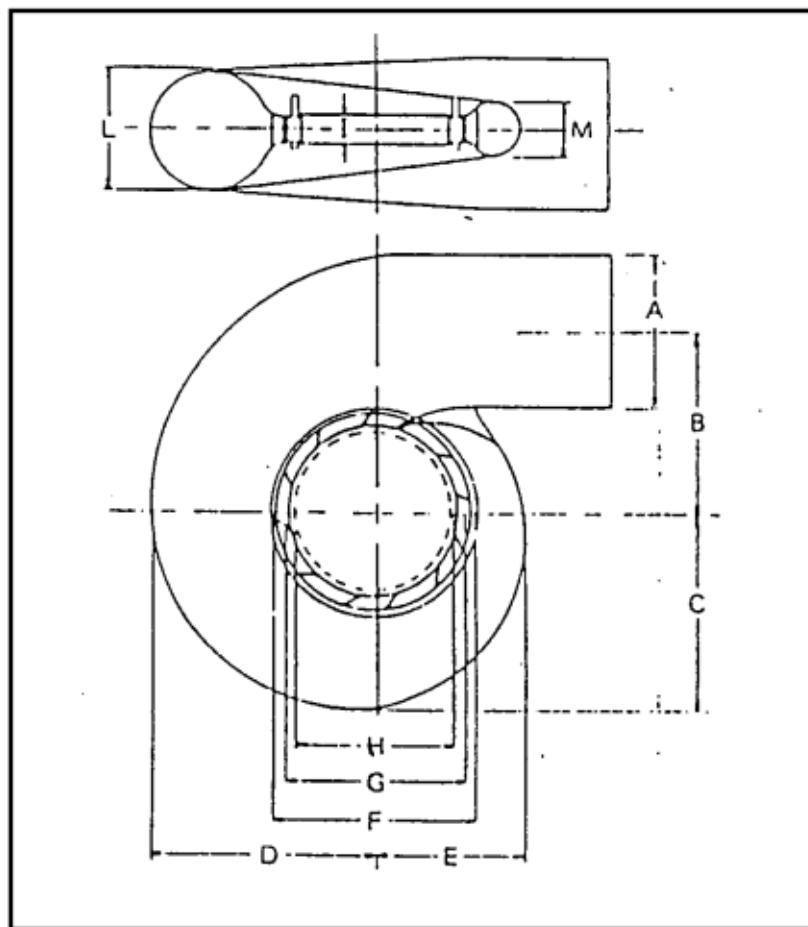
■ Dimensi rumah siput

Berikut merupakan tabel perhitungan dimensi rumah siput turbin Francis:

Tabel 4.14 Perhitungan Dimensi Rumah Siput (Metode ESHA)

Section	Persamaan	Dimensi (m)
A	= $D_3 (1,2 - 19.56 / Ns)$	3.341
B	= $D_3 (1,1 + 54.8 / Ns)$	4.096
C	= $D_3 (1,32 + 49.25 / Ns)$	4.681
D	= $D_3 (1,5 + 48.8 / Ns)$	5.217
E	= $D_3 (0.98 + 63.6 / Ns)$	3.859
F	= $D_3 (1 + 131.4 / Ns)$	4.883
G	= $D_3 (0.89 + 96.5 / Ns)$	3.875
H	= $D_3 (0.79 + 81.75 / Ns)$	3.544
I	= $D_3 (0,1 + 6.5 \times 10^{-4} Ns)$	0.718
L	= $D_3 (0,88 + 4,9 \times 10^{-4} Ns)$	2.968
M	= $D_3 (0,6 + 1,5 \times 10^{-5} Ns)$	1.819

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.6 Sketsa Spiral Case Turbin Francis

Sumber: (Ramos, 2000: 99)

Kecepatan didalam rumah siput:

$$V = 488/\text{Ns}^{0.44}$$

$$V = 488/212,230^{0.44}$$

$$V = 46,198 \text{ m/dt}$$

Dimana syarat kecepatan $> 12 \text{ m/dt}$, jadi desain rumah siput memenuhi

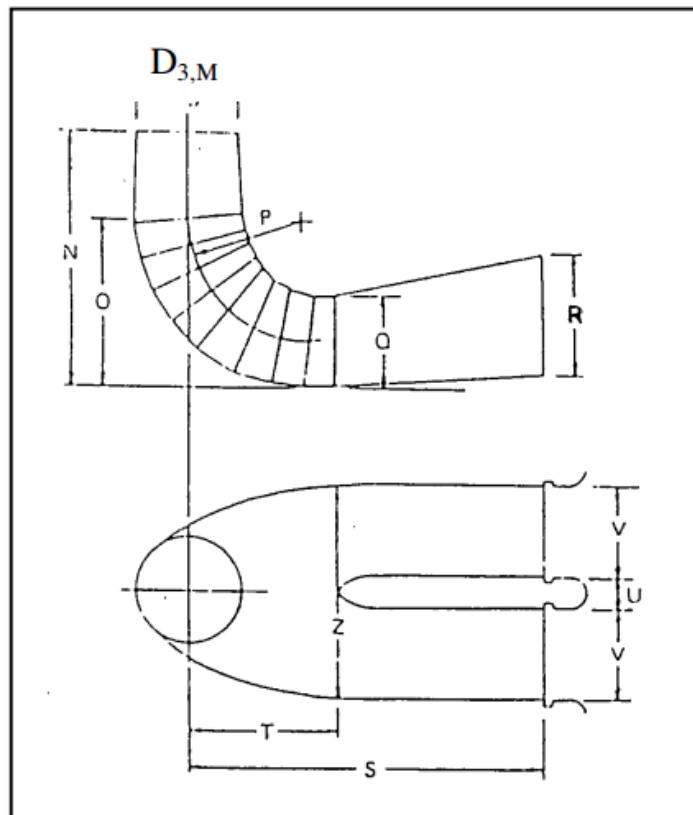
- Dimensi *Draft Tube*

Berikut merupakan tabel perhitungan dimensi *draft tube* turbin Francis:

Tabel 4.15 Perhitungan Dimensi *Draft Tube* Turbin (Metode ESHA)

Section	Persamaan	Dimensi (m)
N	= $D_3 (1,54 + 203,5 / Ns)$	7.537
O	= $D_3 (0,83 + 140,7 / Ns)$	4.503
P	= $D_3 (1,37 - 5,6 \times 10^{-4} Ns)$	3.773
Q	= $D_3 (0,58 + 22,6 / Ns)$	2.070
R	= $D_3 (1,6 - 0,0013 Ns)$	3.993
S	= $Ns / (-9,28 + 0,25Ns)$	4.848
T	= $D_3 (1,5 + 1,9 \times 10^{-4} Ns)$	4.646
U	$D_3 (1,5 + 1,9 \times 10^{-4} Ns)$	1.090
V	$D_3 (1,10 + 53,7/Ns)$	4.081
Z	= $D_3 (2,63 + 33,8/ Ns)$	8.412

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.7 Sketsa Spiral Case Turbin Francis

Sumber: (Ramos,2000:99)

Kecepatan pada inlet *draft tube* dihitung dengan persamaan :

$$V = 8,74 + 2,48/Ns$$

$$V = 8,74 + 2,48/212,230$$

$$V = 8,752 \text{ m/dt}$$

e. Effisiensi Turbin (Untuk Metode ESHA)

Effisiensi turbin dapat diketahui berdasarkan persamaan:

$$\eta = \frac{P}{\gamma Q H_0}$$

dimana:

η : efisiensi turbin

P : daya (watt)

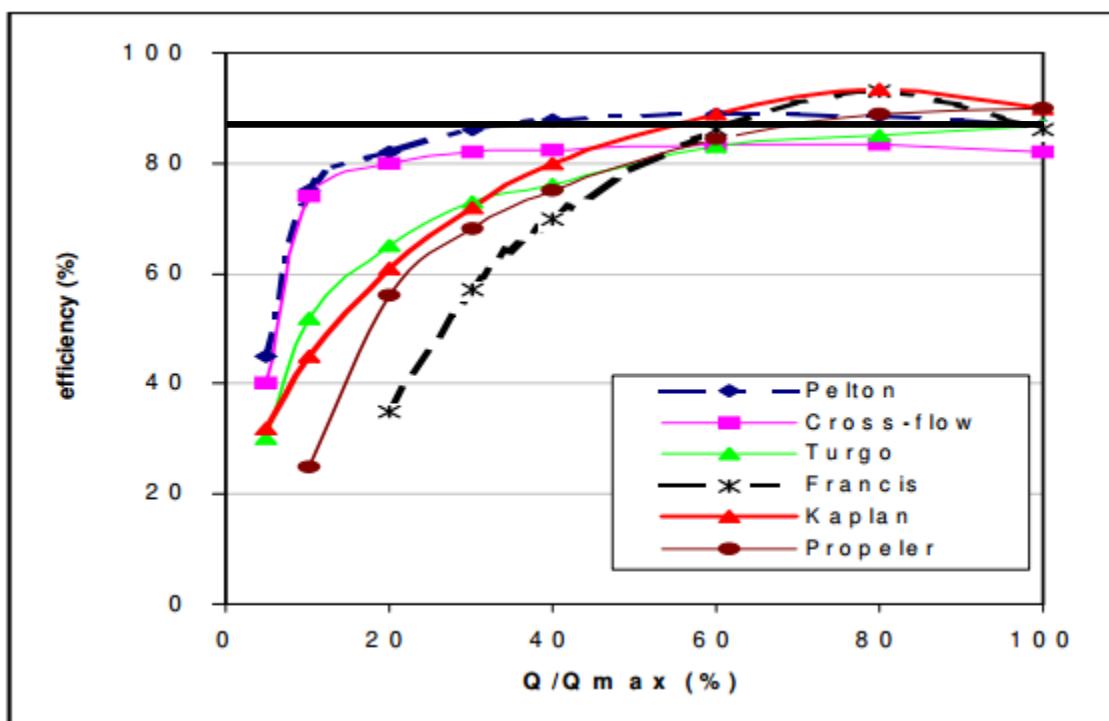
γ : berat jenis fluida (kg/m^3)

Q : debit (m^3/dt)

H_0 : tinggi jatuh (m)

namun effisiensi turbin hanya bisa diketahui melalui percobaan model atau lapangan dikarenakan daya aktual tidak bisa diketahui secara langsung.

Effisiensi turbin biasanya dikeluarkan oleh perusahaan manufaktur untuk tiap spesifikasi turbin tertentu, maka dipergunakan gambar 4.7 untuk mengetahui kisaran effisiensi turbin, dalam studi ini debit yang dipergunakan untuk PLTA relatif stabil maka nilai effisiensi dapat menggunakan effisiensi maksimum, untuk turbin tipe Francis effisiensi 100% atau $Q/Q_{\max} = 1$ adalah 0,87 atau 87%.



Gambar 4.8 Nilai Kisaran Efisiensi Turbin

Sumber: Hasil Perhitungan

4.7.1.2. Metode Amerika (USBR)

a. Pemilihan Tipe Turbin (Untuk Metode USBR)

Turbin dipilih berdasarkan karakteristik yang sesuai dengan jenis turbin yang digunakan, turbin biasanya ditentukan berdasarkan besarnya debit, tinggi jatuh, potensi daya bangkitan dan kecepatan spesifik turbin. Dengan data rencana sebagai berikut :

$$\text{Debit desain tiap turbin (Q)} = 110 \text{ m}^3/\text{dt} \text{ (direncanakan 2 buah turbin)}$$

$$\text{Tinggi jatuh effektif} = 66,72 \text{ m}$$

$$\text{Eff Turbin} = 91\%$$

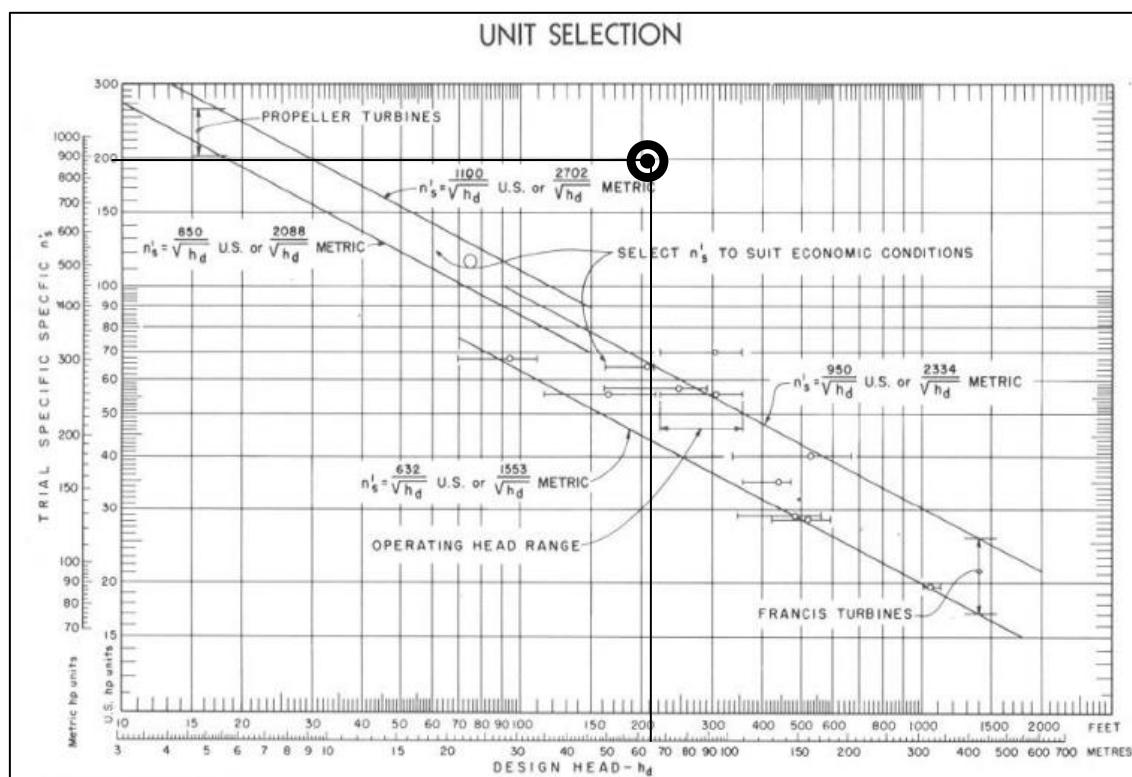
$$\text{Eff Generator} = 95,5\%$$

$$\text{Daya teoritis} = 9,81 \times Q \times H \times \text{eff turbin} \times \text{eff gen}$$

$$= 9,81 \times 110 \times 66,72 \times 0,91 \times 0,955$$

$$\text{Daya teoritis} = 62566,80 \text{ kW atau } 62,567 \text{ MW atau } 53807,452\text{HP}$$

Dengan mengetahui besarnya tinggi jatuh effektif turbin dapat ditentukan dengan pertimbangan kecepatan spesifik turbin seperti pada grafik pemilihan turbin yang disarankan oleh USBR sebagai berikut :



Gambar 4.9 Grafik Pemilihan Tipe Turbin yang Disarankan Menurut USBR

Sumber: (USBR,1976:15)

Dengan tinggi jatuh sebesar 66,72 m maka dari grafik diatas didapatkan putaran spesifik coba-coba (n_s') sebesar 190.131 atau dapat digunakan persamaan dari grafik diatas :

$$\begin{aligned} N_s' &= \frac{1553}{\sqrt{H}} \text{ (Untuk turbin Francis)} \\ &= \frac{1553}{\sqrt{66,64}} = 190,131 \text{ mkw} \end{aligned}$$

Kemudian cek kecepatan putar turbin dengan persamaan (USBR,1976:14):

$$n = \frac{N_s' H^{1,25}}{\sqrt{P}} = \frac{190,246 \cdot 66,64^{1,25}}{\sqrt{53742,551}} = 156,289 \text{ rpm}$$

Turbin direncanakan menggunakan generator tipe sinkron dengan frekuensi 50 Hz maka kecepatan sinkron generator sama dengan kecepatan putar turbin maka kecepatan sinkron generator (USBR,1976:14):

$$\begin{aligned} n &= \frac{120f}{P} \\ 156,289 &= \frac{120 \cdot 50}{P} \\ P &= 38,390 \end{aligned}$$

Dikarenakan nilai kutub generator (p) harus memiliki nilai genap dan tidak berbentuk bilangan decimal, maka dipilih alternatif jumlah kutub yang mendekati nilai coba-coba tersebut sehingga dapat diketahui kecepatan putar yang akan digunakan dan dapat dihitung besarnya kecepatan spesifik terkoreksi, perhitungan ditunjukan pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.16 Alternatif Pemilihan Jumlah Kutub Terhadap Kecepatan Spesifik

Alternatif	Kutub	Kecepatan	Kecepatan	Kecepatan	Δn
	Generator (p)	Sinkron (n)	Terkoreksi (Ns)	Putar (n')	
	buah	rpm	(mkW)	rpm	
1	40	150.00	196.952	150.00	0.00
2	42	142.86	187.573	142.86	0.00

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari hasil diatas dipilih alternatif 1 dengan kutub generator dengan kecepatan spesifik terkoreksi adalah 196,952 mkW, pemilihan alternatif dilakukan berdasarkan jumlah kutub generator dikarenakan jumlah kutub generator yang kecil akan menghasilkan desain turbin yang lebih ekonomis.

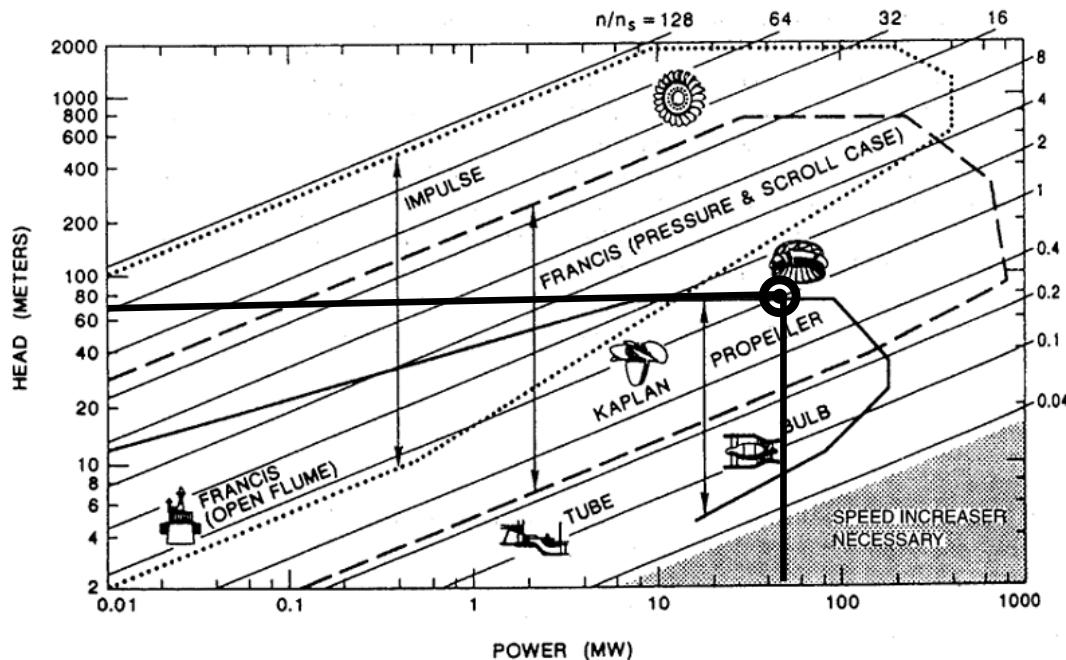
Kemudian dilakukan penentuan rasio kecepatan (ϕ) dan diameter *runner* maksimum (Dm), ratio kecepatan dihitung dengan persamaan (USBR,1976:14): 0,023 $N_s^{2/3}$ dan diameter maksimum dihitung dengan persamaan (USBR,1976:14): $\frac{84,47 \phi H^{0,5}}{n}$

maka didapatkan :

$$\Phi = 0,0211 N_s^{2/3} = 0,023 \cdot 196,952^{2/3} = 0,714 \text{ m/dt}$$

$$D_m = \frac{84,47 \phi H^{0,5}}{n} = \frac{84,47 \cdot 0,714 \cdot 66,72^{0,5}}{150,00} = 3,283 \text{ m}$$

Dan untuk memilih tipe turbin dapat digunakan grafik hubungan antara tinggi jatuh, daya, dan rasio kecepatan sebagai berikut :



Gambar 4.10 Grafik Pemilihan Tipe Turbin
Sumber: Hasil Perhitungan

Dari grafik tersebut dengan data teknis diatas dapat dipilih turbin francis. Selain itu turbin jenis Francis dinilai lebih cocok untuk studi karena memiliki keunggulan membutuhkan tipe generator yang kecil dan cocok untuk tinggi jatuh 40 – 200 meter juga memiliki efisiensi yang tinggi yaitu berkisar 90% - 93 %.

b. Titik Pusat Turbin (Untuk Metode USBR)

Analisa titik pusat turbin sangat berpengaruh terhadap gejala kavitas, penempatan turbin yang tidak sesuai akan menyebabkan kavitas terjadi pada turbin. Data perencanaan sebagai berikut :

Elevasi TWL : + 55,54

Tinggi jatuh efektif : 66,72 m

Kecepatan spesifik (N_s) : 196,773 mkW

Suhu air : 25°

Maka dengan persamaan : $Z = TWL + H_s + b$

Dengan :

TWL : +55,54

H_s : tinggi hisap turbin, dihitung dengan persamaan berikut:

$$H_s = H_a + H_w - \sigma c H$$

Dengan :

Ha : tekanan atmosfer : 10.227 (berdasarkan tabel 2.3 untuk +55,54 mdpl)
 Hw : tekanan uap air : 0,32 (berdasarkan tabel 2.4 untuk suhu air 25°)
 σc : koefisien thoma kritis, USBR merekomendasikan koefisien thoma kritis untuk turbin tipe Francis dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_c = \frac{Ns^{1.64}}{50327}$$

$$\sigma_c = \frac{196,773^{1.64}}{50327} = 0,115$$

maka:

$$H_s = 10,227 + 0,32 - 0,115 \cdot 66,72$$

$$H_s = 2,881 \text{ m}$$

Dimana kavitas akan terjadi jika nilai tinggi hisap (H_s) berada pada nilai diatas 2,881 m. Namun sebaiknya turbin dalam keadaan tenggelam sehingga nilai tinggi hisap dianggap minus dengan alasan keamanan terhadap kavitas. Sehingga tinggi hisap rencana (H_s') direncanakan adalah -1,00 m.

b = perbedaan tinggi antar pusat turbin dengan outlet *runner*, USBR merekomendasikan $b = 0,41 \text{ Dm}$, namun dikarenakan nilai H_s' adalah minus maka nilai b harus diabaikan karena turbin dalam keadaan tenggelam, sehingga titik pusat turbin adalah:

$$Z = (+55,54) + (-1,00)$$

$$Z = +54,54$$

c. Kontrol Gejala Kavitas (Untuk Metode USBR)

Kavitas adalah fenomena dimana terdapat gelembung udara pada turbin yang akan membentur dinding *runner* sehingga dapat mengakibatkan korosi. Dengan data perhitungan sebelumnya diketahui sebagai berikut:

Tekanan atmosfer : 10,227

Tekanan uap : 0,32

σkritis : 0,115

tinggi hisap : -1,00 m

tinggi jatuh efektif : 66,72 m

maka perhitungan berikutnya menggunakan rumus (2 – 47) :

$$\sigma_{aktual} = \frac{Ha - Hw - Hs}{H} \quad (\text{Patty, 1995: 100})$$

$$\sigma_{aktual} = \frac{10,227 - 0,32 - (-1,00)}{66,72}$$

$$\sigma_{aktual} = 0,163$$

Dari perhitungan diatas $0,163 > 0,115$ atau $\sigma_{actual} > \sigma_{critical}$, maka desain turbin aman terhadap kavitas. Kavitas pada turbin terjadi apabila nilai $\sigma_{actual} < \sigma_{critical}$.

d. Dimensi Turbin (Untuk Metode USBR)

Berdasarkan kajian pustaka maka dimensi turbin yang harus direncanakan dalam studi ini meliputi: dimensi *runner*, dimensi *Guide vane*, dimensi rumah sifat (*spiral case*) dan dimensi *draft tube*. Parameter utama dari perencanaan dimensi turbin terletak pada nilai kecepatan spesifik (N_s) dan kecepatan putaran (n).

Dimana pada analisa sebelumnya:

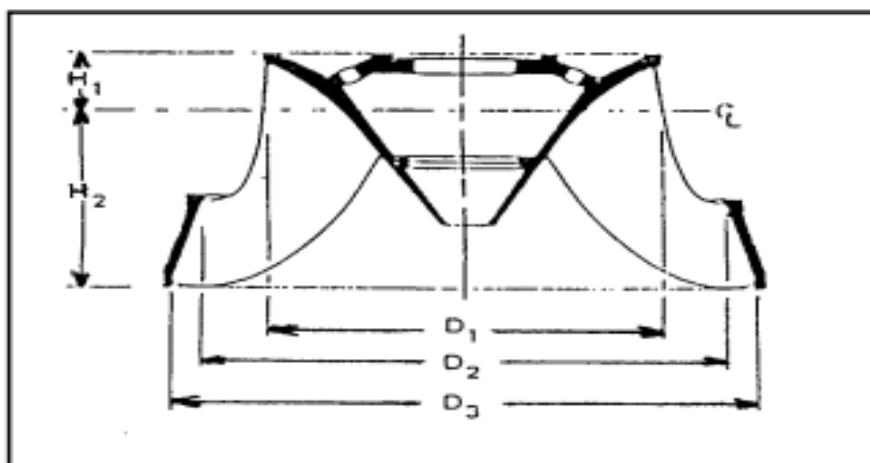
Kecepatan spesifik : 196,77 mKw

Kecepatan dasar : 150 rpm

Tinggi jatuh efektif : 66,72 m

a. Dimensi *runner* turbin

Diameter *runner* untuk turbin Francis terdiri dari 3 bagian yaitu *runner* bagian luar, *runner* bagian tengah, dan *runner* bagian dalam seperti pada gambar berikut:



Gambar 4.11 Bentuk Tipikal Diameter Turbin Francis

Sumber: Ramos, 2000:97

Diameter *runner* dihitung dengan persamaan berikut:

Sehingga:

$$\begin{aligned} K_U &= 0.31 + 2.5 \times 10^{-3} N_s \\ &= 0.31 + 2.5 \times 10^{-3} \cdot 196,77 = 0,685 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_3 &= 84.5 K_u \frac{\sqrt{H_0}}{n} \\ &= 84.5 \cdot 0,685 \frac{\sqrt{66,72}}{150,00} = 3,152 \text{ m} \end{aligned}$$

$$D_1 = D_3 \left(0.4 + \frac{94.5}{N_S} \right)$$

$$= 3,150 \left(0.4 + \frac{94.5}{196,77} \right) = 2,774 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} D2 &= \frac{D_3}{0.96 + 0.00038Ns} \\ &= \frac{3,150}{0.96 + 0.00038 \cdot 196,77} = 2,681 \text{ m} \end{aligned}$$

Sedangkan untuk tinggi turbin dihitung dengan persamaan (2-52) dan (2-53)

$$\begin{aligned} H_1 &= D_3 (0.094 + 0.00025Ns) \\ &= 3,152 (0.094 + 0.00025 \cdot 196,77) = 0,451 \text{ m} \\ H_2 &= D_3 \left(-0.05 + \frac{42}{Ns} \right) \\ H_2 &= 3,152 \left(-0.05 + \frac{42}{196,77} \right) = 0,515 \text{ m} \end{aligned}$$

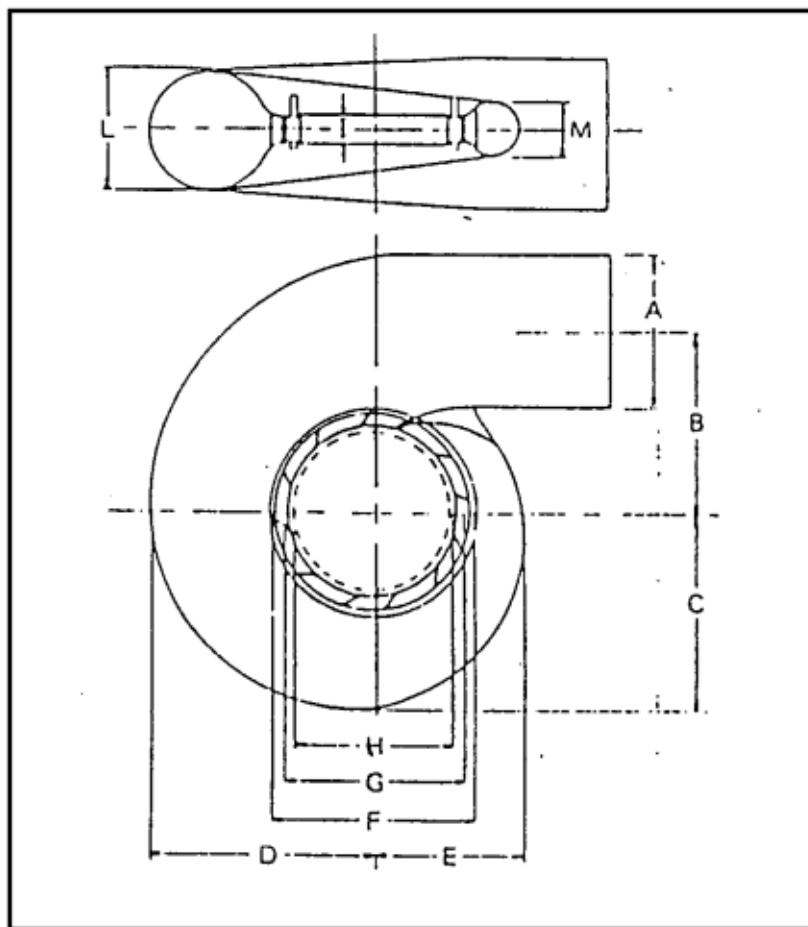
b. Dimensi rumah siput

Berikut merupakan tabel perhitungan dimensi rumah siput turbin Francis:

Tabel 4.17 Perhitungan Dimensi Rumah Siput Turbin (Metode USBR)

Section	Persamaan	Dimensi (m)
A	$= D_3 (1,2 - 19.56 / Ns)$	3.469
B	$= D_3 (1,1 + 54.8 / Ns)$	4.345
C	$= D_3 (1,32 + 49.25 / Ns)$	4.949
D	$= D_3 (1,5 + 48.8 / Ns)$	5.510
E	$= D_3 (0.98 + 63.6 / Ns)$	4.108
F	$= D_3 (1 + 131.4 / Ns)$	5.257
G	$= D_3 (0.89 + 96.5 / Ns)$	4.162
H	$= D_3 (0.79 + 81.75 / Ns)$	3.799
I	$= D_3 (0,1 + 6.5 \times 10^{-4} Ns)$	0.315
L	$= D_3 (0,88 + 4,9 \times 10^{-4} Ns)$	3.078
M	$= D_3 (0,6 + 1,5 \times 10^{-5} Ns)$	1.900

Sumber: perhitungan



Gambar 4.12 Sketsa Spiral Case Turbin Francis

Sumber: (Ramos, 2000: 99)

Kecepatan didalam rumah siput:

$$V = 488/N_s^{0.44}$$

$$V = 488/196,77^{44}$$

$$V = 47,761 \text{ m/dt}$$

Dimana syarat kecepatan $> 12 \text{ m/dt}$, jadi desain rumah siput memenuhi syarat kecepatan.

c. Dimensi *draft tube*

Perhitungan akan dimensi draft tube ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 4.18 Perhitungan Dimensi Draft Tube Turbin (Metode USBR)

Section	Persamaan	Dimensi (m)
N	= $D_3 (1,54 + 203,5 / Ns)$	8.114
O	= $D_3 (0,83 + 140,7 / Ns)$	4.870
P	= $D_3 (1,37 - 5,6 \times 10^{-4} Ns)$	3.971
Q	= $D_3 (0,58 + 22,6 / Ns)$	2.190
R	= $D_3 (1,6 - 0,0013 Ns)$	4.237
S	= $Ns / (-9,28 + 0,25Ns)$	4.930
T	= $D_3 (1,5 + 1,9 \times 10^{-4} Ns)$	4.846
U	$D_3 (1,5 + 1,9 \times 10^{-4} Ns)$	1.173
V	$D_3 (1,10 + 53,7/Ns)$	4.327
Z	= $D_3 (2,63 + 33,8/ Ns)$	8.831

Sumber: perhitungan

Kecepatan pada inlet *draft tube* dihitung dengan persamaan :

$$V = 8,74 + 2,48/Ns$$

$$V = 8,74 + 2,48/196,77$$

$$V = 8,752 \text{ m/dt}$$

e. Effisiensi Turbin (Metode USBR)

Effisiensi turbin dapat diketahui berdasarkan persamaan:

$$\eta = \frac{P}{\gamma Q H_0}$$

dimana:

η : efisiensi turbin

P : daya (watt)

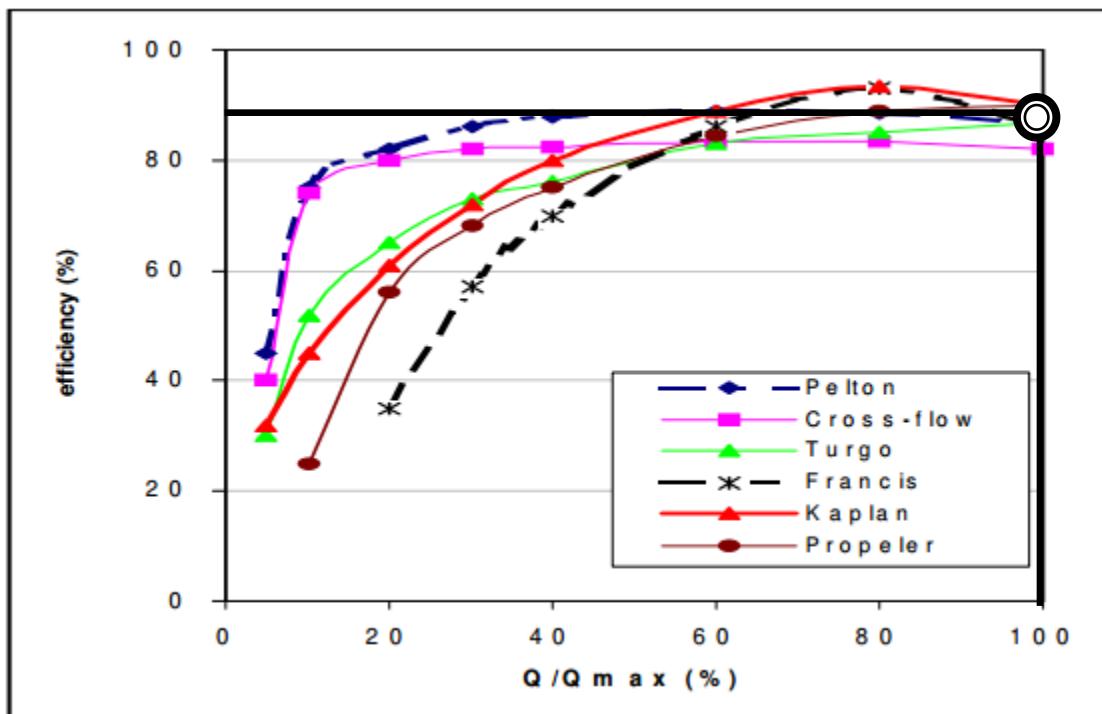
γ : berat jenis fluida (kg/m^3)

Q : debit (m^3/dt)

H_0 : tinggi jatuh (m)

namun effisiensi turbin hanya bisa diketahui melalui percobaan model atau lapangan dikarenakan daya aktual tidak bisa diketahui secara langsung.

Effisiensi turbin biasanya dikeluarkan oleh perusahaan manufaktur untuk tiap spesifikasi turbin tertentu, maka dipergunakan gambar 4.12 untuk mengetahui kisaran effisiensi turbin, dalam studi ini debit yang dipergunakan untuk PLTA relatif stabil maka nilai effisiensi dapat menggunakan effisiensi maksimum, untuk turbin tipe Francis effisiensi 100% atau $Q/Q_{\max} = 1$ adalah 0,87 atau 87%.

**Gambar 4.13 Nilai Kisaran Efisiensi Turbin**

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.19 Kesimpulan Perhitungan Turbin Hidrolik untuk Tiap Metode

No.	Uraian	Metode Eropa (ESHA)		Metode Amerika (USBR)	
		Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
1	Tipe Turbin		Francis		Francis
2	Frekuensi Generator	50	Hz	50	Hz
3	Kutub Generator (p)	38	buah	40	buah
4	Kecepatan Putar (n)	157.895	rpm	150.00	rpm
5	Rasio Kecepatan	0.450	m/dt	0.714	m/dt
6	Diameter Maksimum	4.948	m	3.283	m
7	Koefisien Kavitasasi Kritis (σ_c)	0.147		0.115	
8	Tinggi Hisap Kritis (H _s)	0.496	m	2.881	m
9	Tinggi Hisap Rencana (H _{s'})	-1.00	m	-1.00	m
10	Elv Pusat Turbin (Z)	54.54	m	54.54	m
11	Koefisien Kavitasasi Aktual (σ_a)	0.166		0.163	
12	Kontrol Kavitasasi	aman		aman	

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari tabel diatas dapat disimpulkan bahwa Metode Eropa (ESHA) lebih cocok digunakan dalam perencanaan PLTA Lubuk Ambacang ini. Dari segi ekonomi untuk peralatan pembangkit dengan putaran 157.895 rpm akan mempunyai dimensi yang lebih kecil, sehingga dari harga material akan sedikit lebih murah dari pada peralatan pembangkit dengan putaran 150,00 rpm.

4.7.2. Generator

Pada PLTA Ambacang ini dipilih generator jenis sinkron tiga-fasa, poros vertical tipe umbrella. Daya keluar generator dapat dihitung dengan persamaan (2-77):

$$P_g = \frac{P_t \eta_g}{P_f}$$

dengan:

P_g : rating keluaran generator

P_t : rating keluaran turbin (kW)

η_g : effisiensi generator

P_f : faktor tenaga

Daya keluar (P_g) generator akan dihitung berdasarkan pada daya teoritis dari perhitungan turbin (P_t) yaitu sebesar 62566,804 kW. Dan dengan melihat pada tabel 2.7 didapat angka effisiensi generator sebesar 97%. Maka didapatkan nilai P_g sebesar:

$$P_g = \frac{62566,804 \cdot 0,97}{0,8}$$

$$P_g = 75862,250 \text{ kVA}$$

4.8. Analisa Pembangkitan Energi

Analisa pembangkitan energi pada studi ini dihitung secara series, yaitu dilakukan simulasi energi dari tahun 1993 hingga tahun 2014 sesuai dari data debit yang diambil. Dalam simulasi energi ini secara umum memiliki cara yang sama dengan simulasi operasi waduk, namun didalamnya sudah digunakan hasil dari perhitungan yang telah dilakukan seperti hasil perhitungan kehilangan tinggi tekan (*head loss*), efisiensi turbin, efisiensi turbin, dan lain-lain yang dibutuhkan dalam perhitungan energi. Berikut adalah data teknis yang dibutuhkan dalam analisa pembangkitan energi:

- Debit outflow : $200 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Tampungan efektif : $536,929 \text{ juta m}^3$
- Tampungan mati : $529,90 \text{ juta m}^3$
- Tampungan maksimum TWL : $1.402,20 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Efisiensi turbin : 87 %
- Efisiensi generator : 97 %
- El. TWL : + 55,54
- *Head loss* total : 2,74 m (Tabel 4.9)

Berikut adalah contoh perhitungan pada debit di bulan januari tahun 1993:

kolom 1 Bulan = Januari

kolom 2 Jumlah hari = 31 hari

kolom 3	Debit inflow	$= 334,60 \text{ m}^3/\text{dt}$
kolom 4	Debit waduk dalam juta m^3	$= \frac{\text{jumlah hari} \times \text{debit inflow} \times 24 \times 60 \times 60}{1000000}$ $= 896,19 \text{ juta m}^3$
kolom 5	Luas genangan	= dari lengkung kapasitas waduk
kolom 6	Evaporasi	$= 7,869 \text{ mm/hari}$
kolom 7	Evaporasi dalam juta m^3	$= \frac{\text{evaporasi} \times \text{jumlah hari} \times 1000}{1000000}$ $= 0.244 \text{ juta m}^3$
kolom 8	Draft outflow PLTA	$= 1,00$
kolom 9	Debit outflow PLTA	$= 200 \text{ m}^3/\text{dt}$
kolom 10	Outflow dalam juta m^3	$= \frac{\text{jumlah hari} \times \text{debit outflow} \times 24 \times 60 \times 60}{1000000}$ $= 535,680 \text{ juta m}^3$
kolom 11	S_{n-1}	= tampungan periode n-1 + inflow – evaporasi – outflow $= 536,93 + 896,19 - 0.24 - 535,68$ $= 897,20 \text{ juta m}^3$
kolom 12	S akhir periode (tampungan efektif) :	
		= Jika $S_{n-1} < 0$, maka S akhir periode = 0
		= Jika $S_{n-1} <$ Tampungan Efektif, maka (12) = (11)
		= Jika $S_{n-1} >$ Tampungan Efektif, maka (12) = Tampungan Efektif
kolom 13	S Total Periode	= S akhir periode + Volume Mati dibawah El. MOL $= 536,93 \text{ m}^3 + (529,900 \text{ juta m}^3 + 932,205 \text{ juta m}^3)$ $= 1999,033 \text{ juta m}^3$
kolom 14	Spillout	= Jika (11) < Tampungan Efektif Maksimal, maka (14) = 0 = Jika (11) > Tampungan Efektif Maksimal, maka (14) = (11)
kolom 15	Spillout dalam m^3/dt	$= \frac{(14) \times 1000000}{24 \times 60 \times 60 \times \text{jumlah hari}} = 134,51 \text{ m}^3/\text{dt}$
kolom 16	Outflow + spillout	$= (9) + (15) = 200 + 134,51 = 334,51 \text{ m}^3/\text{dt}$
kolom 17	Elevasi muka air waduk di dapat dari lengkung kapasitas waduk	
kolom 18	Keterangan tampungan	= Jika (13) < Tampungan MOL maka (18) = Gagal = Jika (13) > Tampungan MOL maka (18) = Sukses
kolom 19	Keterangan Q hilir	= jika (16) < full bank capacity = sukses = jika (16) > full bank capacity = gagal
kolom 20	Gross Head	$= \text{EMAW (17)} - \text{El. TWL}$ $= 125 - 55,54$

	= 69,46 m
kolom 21 <i>Head Loss</i>	= 2,82 m
kolom 22 <i>Net Head</i>	= gross head – head loss
	= 69,46 – 2,82
	= 66,64 m
kolom 23 <i>Power</i>	= (9) x (22) x eff. turbin x eff. Generator x 9,81 / 1000
	= 200 x 66,64 x 87% x 97% x 9,81 / 1000
	= 110,33 MW
kolom 24 <i>Energy</i>	= power × 24 jam
	= 110,33 MW × 24 jam × 31 hari
	= 82088,11 MWh
kolom 25 Energi tahunan	= total energi dari bulan januari hingga desember
Energi bulanan	= 941.046,27 MWh / tahun
	= Rerata energi dari bulan januari hingga desember
	= 78.420,52 MWh

Tabel 4.20 Simulasi Energi Series Tahun 1993

Karakteristik Debit	Bulan	Jumlah Hari	Inflow		A	E		Outflow PLTA			S _(n-1)	S akhir periode (tampungan efektif)	S total periode
	[1]	[2]	[3]	[4]	km ²	mm/hari	juta m ³	draft	m ³ /dt	juta m ³	juta m ³	juta m ³	juta m ³
1993	Jan	31	334.60	896.19	6,081.95	7.87	0.24	1.00	200.00	535.68	897.20	536.93	1,999.03
	Feb	28	268.78	650.23	4,780.25	8.01	0.22	1.00	200.00	483.84	703.10	536.93	1,999.03
	Mar	31	377.34	1,010.67	6,768.96	8.06	0.25	1.00	200.00	535.68	1011.67	536.93	1,999.03
	Apr	30	293.29	760.21	5,317.32	6.51	0.20	1.00	200.00	518.40	778.54	536.93	1,999.03
	May	31	422.60	1,131.89	7,317.37	6.30	0.20	1.00	200.00	535.68	1132.95	536.93	1,999.03
	Jun	30	149.13	386.54	3,409.64	6.19	0.19	1.00	200.00	518.40	404.89	404.89	1,866.99
	Jul	31	182.07	487.66	3,884.50	6.23	0.19	1.00	200.00	535.68	356.67	356.67	1,818.78
	Aug	31	105.06	281.39	2,676.01	7.10	0.22	1.00	200.00	535.68	102.16	102.16	1,564.27
	Sep	30	144.03	373.33	3,353.56	7.23	0.22	0.90	180.00	466.56	8.71	8.71	1,470.82
	Oct	31	239.89	642.52	4,723.86	7.26	0.22	1.00	200.00	535.68	115.33	115.33	1,577.43
	Nov	30	568.21	1,472.80	8,814.47	7.18	0.22	1.00	200.00	518.40	1069.51	536.93	1,999.03
	Dec	31	238.15	637.86	4,689.79	7.10	0.22	1.00	200.00	535.68	638.89	536.93	1,999.03

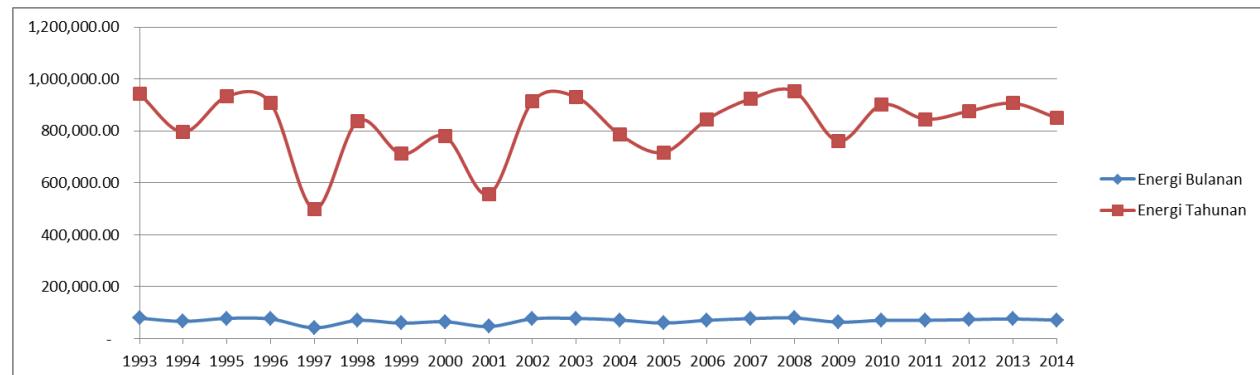
Spillout juta m ³	Outflow + spillout m ³ /dt	EMAW m	keterangan tampungan	keterangan Q hilir	Gross Head m	Head Loss m	Net Head m	Power MW	Energy MWh	Keterangan Energi MWh	
[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]
360.27	134.51	334.51	125.00	sukses	sukses	69.46	2.74	66.72	110.47	82,187.24	
166.17	68.69	268.69	125.00	sukses	sukses	69.46	2.74	66.72	110.47	74,233.63	
474.74	177.25	377.25	125.00	sukses	sukses	69.46	2.74	66.72	110.47	82,187.24	
241.61	93.21	293.21	125.00	sukses	sukses	69.46	2.74	66.72	110.47	79,536.04	
596.02	222.53	422.53	125.00	sukses	sukses	69.46	2.74	66.72	110.47	82,187.24	
0.00	0.00	200.00	124.09	sukses	sukses	68.55	2.74	65.80	108.96	78,447.80	
0.00	0.00	200.00	123.66	sukses	sukses	68.12	2.74	65.37	108.24	80,532.77	
0.00	0.00	200.00	121.08	sukses	sukses	65.54	2.74	62.80	103.98	77,363.41	
0.00	0.00	180.00	120.05	sukses	sukses	64.51	2.74	61.77	92.04	66,270.53	Energi Bulanan=
0.00	0.00	200.00	121.22	sukses	sukses	65.68	2.74	62.94	104.21	77,534.70	78,516.99
532.59	205.47	405.47	125.00	sukses	sukses	69.46	2.74	66.72	110.47	79,536.04	Energi Tahunan =
101.96	38.07	238.07	125.00	sukses	sukses	69.46	2.74	66.72	110.47	82,187.24	942,203.86

Untuk perhitungan simulasi energi pada tahun 1994 hingga 2014 terdapat pada Lampiran I. Dan dari perhitungan simulasi energi series didapatkan tabel rekapitulasi sebagai berikut:

Tabel 4.21 Tabel Rekapitulasi Simulasi Energi Series

No	Tahun	Energi Bulanan (MWh)	Energi Tahunan (MWh)
1	1993	78,420.52	941,046.27
2	1994	66,255.97	795,071.58
3	1995	77,671.60	932,059.20
4	1996	75,533.97	906,407.69
5	1997	41,556.40	498,676.84
6	1998	69,762.96	837,155.53
7	1999	59,231.18	710,774.14
8	2000	64,797.58	777,570.96
9	2001	46,256.64	555,079.67
10	2002	76,030.89	912,370.64
11	2003	77,443.53	929,322.37
12	2004	71,345.49	784,800.34
13	2005	59,715.99	716,591.87
14	2006	70,318.20	843,818.39
15	2007	76,916.64	922,999.62
16	2008	79,257.17	951,086.08
17	2009	63,314.81	759,777.69
18	2010	70,349.84	899,869.43
19	2011	70,349.84	844,198.08
20	2012	72,960.67	875,528.01
21	2013	75,469.69	905,636.25
22	2014	70,809.41	849,712.96
Rerata Energi Tahunan		824,979.71	
Rerata Energi Bulanan		68,807.68	

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.14 Perbandingan Antara Energi Bulanan dan Energi Tahunan

Sumber: Hasil Perhitungan

4.8.1. Faktor Kapasitas

Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2017, Tenaga Air dengan kapasitas paling tinggi 10 MW (sepuluh megawatt) harus mampu beroperasi dengan faktor kapasitas (capacity factor) paling sedikit sebesar 65% (enam puluh lima persen), sedangkan kapasitas lebih dari 10 MW (sepuluh megawatt) beroperasi dengan faktor kapasitas (capacity factor) tergantung kebutuhan sistem. PLTA Bendungan Lubuk Ambacang memiliki kapasitas paling tinggi sebesar 110,33 MW, sehingga faktor kapasitas tergantung kebutuhan system. Dan untuk perhitungan faktor kapasitas untuk PLTA Bendungan Lubuk Ambacang adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Rerata energi tahunan} &= 824.979,71 \text{ MWh} \\
 \text{Daya PLTA} &= 110,33 \text{ MW} \\
 \text{Kapasitas faktor} &= \frac{\text{Energi Rerata Tahunan}}{(365 \text{ hari}) \times (24 \text{ jam}) \times (\text{Daya PLTA})} \\
 &= \frac{824.979,71}{(365 \text{ hari}) \times (24 \text{ jam}) \times (110,33)} \\
 &= 85,36\%
 \end{aligned}$$

Dengan melihat nilai kapasitas faktor serta energi rerata tahunan dan daya yang dibangkitkan oleh PLTA Bendungan Lubuk Ambacang ini dinilai layak beroperasi secara teknis.

Dan dari perhitungan energi series didapat kapasitas faktor untuk 4 kondisi debit andalan sebagai berikut:

Tabel 4.22 Perhitungan Kapasitas Faktor 4 Kondisi Debit

No	Kondisi Debit Andalan	Debit PLTA (m ³ /dt)	Daya Maksimum (MW)	Energi Tahunan (MWh)/Tahun	Kapasitas Faktor (%)
1	Debit Air Musim Kering (Tahun 2005)	200	110.47	717,469.81	74.14%
2	Debit Air Rendah (Tahun 2009)	200	110.47	760,724.23	78.61%
3	Debit Air Normal (Tahun 2013)	200	110.47	906,753.86	93.70%
4	Debit Air Cukup (Tahun 2008)	200	110.47	952,253.25	98.40%

Sumber: Hasil Perhitungan

4.9. Analisa Ekonomi

Dalam perhitungan analisa ekonomi akan memperhitungkan mengenai komponen biaya hingga sensitivitas ekonomi berdasarkan bunga peminjaman dan perubahan energi yang dihasilkan. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

4.9.1. Komponen Biaya

Dalam perhitungan komponen biaya akan diperhitungkan biaya dari masing – masing komponen berdasarkan rumus empiris dari *RETscreen Canada*. Parameter yang digunakan dalam perhitugnan komponen biaya adalah sebagai berikut:

- Debit rencana (Q) = 200 m³/detik
- Tinggi jatuh efektif (H_g) = 66,72 meter
- Daya dibangkitkan (MW) = 110,47 MW
- Jumlah turbin (n) = 2 unit
- Berat Pipa Pesat (W) = 444247,20 kg
- Diameter runner turbin (d) = 3,016 meter
- Panjang *crest* bendung (l_d) = 376 meter
- Kurs Kanada ke rupiah = Rp. 10.556,11 (13 Desember 2017)

(*) = Direncanakan

a. Menentukan harga Komponen Teknis

$$(A1) \quad = 0,37 \cdot n^{0,1} \cdot E \cdot \left(\frac{MW}{Hg^{0,3}} \right)^{0,54} \cdot 10^6$$

(*) Faktor Bendung = 0,67 (apabila terdapat bendungan)
= 1,0 (apabila tidak terdapat bendungan)
= diambil nilai 0,67 karena terdapat bendungan

$$= 0,37 \cdot 2^{0,1} \cdot 0,67 \cdot \left(\frac{110,47}{66,72^{0,3}} \right)^{0,54} \cdot 10^6$$

$$= (\$ kanada) 1.706.860,515$$

$$= Rp 18.017.807.353,977$$

b. Menentukan harga Komponen Elektromekanikal

$$(A2) \quad = 0,17 n^{0,96} \cdot Jt \cdot Kt \cdot d^{1,47} \{ (13 + 0,01 Hg)^{0,3} + 3 \} \cdot 10^6$$

(*) Faktor Tinggi Jatuh (Jt) = 1,10 (jika tinggi jatuh > 25 meter)
= 1,00 (jika tinggi jatuh ≤ 25 meter)
= diambil nilai 1,10 karena memiliki tinggi jatuh 66,72 m

(*) Faktor Diameter Runner (Kt) = 1 (jika diameter runner ≥ 1,8 meter)
= 0,9 (jika diameter runner < 1,8 meter)
= diambil nilai 1 karena diameter runner 3,016 m

$$= 0,17 \cdot 2^{0,96} \cdot 1,10 \cdot 1,00 \cdot 3,016^{1,47} \{ (13 + 0,01 \cdot 66,72)^{0,3} + 3 \} \cdot 10^6$$

$$\begin{aligned}
 &= (\$ \text{ kanada}) 9.569.099,477 \\
 &= \text{Rp} 101.012.466.683,68
 \end{aligned}$$

c. Menentukan harga Komponen Instalasi Peralatan Elektromekanikal

$$\begin{aligned}
 (\text{A3}) \quad &= 0,15 \cdot (\text{A2}) \\
 &= 0,15 \cdot 9.569.099,477 \\
 &= (\$ \text{ kanada}) 1.435.364,922 \\
 &= \text{Rp} 15.151.870.002,55
 \end{aligned}$$

d. Menentukan harga Komponen Kabel Transmisi

$$(\text{A4}) \quad = 0,00011 \cdot D \cdot P \cdot l t^{0,95} \cdot V \cdot 10^6$$

(*)Faktor Kesulitan Pemasangan (D) = direkomendasikan memiliki nilai antara 1-2.

Maka diambil nilai 1,5 karena lokasi benduga dinilai sedikit sulit dijangkau

(*)Voltase (V) = Direncanakan sebesar $V = 20 \text{ kV}$, untuk kabel transmisi karena $V < 69 \text{ kV}$ maka $P = 0,85$ sedangkan kabel transmisi diperkirakan sepanjang 1 km.

Sehingga, biayanya adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 &= 0,00011 \cdot 1,5 \cdot 0,85 \cdot 2^{0,95} \cdot 20 \cdot 10^6 \\
 &= (\$ \text{ kanada}) 54.189,03 \\
 &= \text{Rp} 572.025.340,92
 \end{aligned}$$

e. Menentukan harga Komponen Subtansi dan Transformer

$$\begin{aligned}
 (\text{A5}) \quad &= 0,0025 \cdot n^{0,95} + 0,002 \cdot (n + 1) \cdot \left(\frac{MW}{0,95} \right)^{0,9} \cdot V^{0,3} \cdot 10^6 \\
 &= 0,0025 \cdot 2^{0,95} + 0,002 \cdot (2 + 1) \cdot \left(\frac{110,47}{0,95} \right)^{0,9} \cdot 20^{0,3} \cdot 10^6 \\
 &= (\$ \text{ kanada}) 1.069.995,72 \\
 &= \text{Rp} 11.294.992.485,63
 \end{aligned}$$

f. Menentukan harga Komponen Instalasi Subtansi dan Transformer

$$\begin{aligned}
 (\text{A6}) \quad &= 0,15 \cdot \text{A5} \\
 &= 0,15 \cdot 1.069.995,72 \\
 &= (\$ \text{ kanada}) 160.499,36 \\
 &= \text{Rp} 1.694.248.872,84
 \end{aligned}$$

g. Menentukan harga Komponen Pekerjaan Sipil

$$(\text{A7}) \quad = 1,97 \cdot n^{-0,04} \cdot C \cdot R \cdot \left(\frac{MW}{Hg^{0,3}} \right)^{0,82} \cdot (1 + 0,01 \cdot lb) \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \frac{ld}{Hg} \right) \cdot 10^6$$

(*)Faktor Biaya (C) = 0,44 (jika ada bendungan)

$$= 1,00 \text{ (jika tidak ada bendungan)}$$

$$= \text{diambil } 0,44 \text{ karena ada bendungan}$$

(*)Faktor Batuan (R) = 1 jika terdapat batuan dalam pembangunan Bendungan
 = 1,05 jika tidak terdapat batuan dalam pembangunan Bendungan
 = diambil nilai 1 karena terdapat batuan dalam pembangunan

(*)Jarak *borrow area* (lb) = ditentukan sepanjang 1 km

$$\begin{aligned}
 &= 1,97 \cdot 2^{-0,04} \cdot 0,44 \cdot 1 \cdot \left(\frac{110,47}{66,72^{0,3}} \right)^{0,82} \cdot (1 + 0,01 \cdot 1) \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \frac{376}{66,64} \right) \cdot 10^6 \\
 &= (\$ \text{ kanada}) 26.515.026,08 \\
 &= \text{Rp } 279.895.531.944,60
 \end{aligned}$$

h. Menentukan harga Komponen Pipa Pesat

$$\begin{aligned}
 (\text{A8}) \quad &= 20 \cdot np^{0,95} \cdot W^{0,88} \\
 &= 20 \cdot 2^{0,95} \cdot 14716,655^{0,88} \\
 &= (\$ \text{ kanada}) 568.614,08 \\
 &= \text{Rp } 6.002.352.808,99
 \end{aligned}$$

i. Menentukan harga Komponen Instalasi Pipa Pesat

$$\begin{aligned}
 (\text{A9}) \quad &= 5 \cdot W^{0,88} \\
 &= 5 \cdot 14716,655^{0,88} \\
 &= (\$ \text{ kanada}) 23.261,73 \\
 &= \text{Rp } 245.553.391,79
 \end{aligned}$$

j. Menentukan harga Biaya Lain-lain

$$(\text{A10}) \quad = 0,25 \cdot i \cdot Qd^{0,35} \cdot (1,1 \Sigma (A1 + A2 + \dots + A9) + 0,1 \Sigma (A1 + A2 + \dots + A9))$$

$$\begin{aligned}
 (\text{*})\text{Suku Bunga} &= 9,75\% \\
 &= 0,25 \cdot 9,75 \cdot 200^{0,35} \cdot (1,1 \cdot (1.706.860,515 + 9.569.099,477 + 1.435.364,922 \\
 &\quad + 54.189,03 + 1.069.995,72 + 160.499,36 + 26.515.026,08 + 568.614,08 + \\
 &\quad 23.261,73) + (0,1 \cdot (1.706.860,515 + 9.569.099,477 + 1.435.364,922 + \\
 &\quad 54.189,03 + 1.069.995,72 + 160.499,36 + 26.515.026,08 + 568.614,08 + \\
 &\quad 23.261,73)) \\
 &= (\$ \text{ kanada}) 224.397.583,64 \\
 &= \text{Rp } 2.368.765.576.631,59
 \end{aligned}$$

Tabel 4.23 Rekapitulasi Harga Komponen PLTA Bendungan Lubuk Ambacang

No	Komponen	Biaya
1	Teknis	Rp 18,017,807,353.98
2	Elektromekanikal	Rp 101,012,466,683.68
3	Instalasi elektromekanikal	Rp 15,151,870,002.55
4	Kabel transmisi	Rp 572,025,340.92
5	Substansi dan transformer	Rp 11,294,992,485.63
6	instalasi substansi dan transformer	Rp 1,694,248,872.84
7	Pekerjaan sipil	Rp 279,895,531,944.60
8	Pipa pesat	Rp 6,002,352,808.99
9	Instalasi pipa pesat	Rp 245,553,391.79
10	Biaya lain-lain	Rp 2,368,765,576,631.59
Total		Rp 2,802,652,425,516.58

Sumber: Hasil Perhitungan

4.9.2. Nilai Sekarang (*Present Value*)

Dalam perhitungan nilai sekarang akan memperhitungkan biaya investasi, biaya O&P hingga biaya pajak air permukaan. Perhitungan nilai sekarang berdasarkan tabel bunga 9,75% dengan periode 1 tahun mulai pembangunan, 20 tahun untuk pembangkitan dan 7 tahun untuk peminjaman. Untuk parameter yang diperlukan dalam perhitungan nilai sekarang adalah sebagai berikut:

- Biaya investasi = Rp 2.802.652.425.516,58
- Pendanaan = 30% Modal Awal dan 70% Pinjaman
- Biaya modal (30% biaya) = Rp 840.795.727.654,97
- Biaya pinjaman (70% biaya) = Rp 1.961.856.697.861,60
- Biaya O&P (2% biaya) = Rp 56.053.048.510,33
- Biaya Pajak Air Permukaan = Rp. 50,00/kWh
- Bunga bank = 9,75%
- Periode operasi pembangkit = 20 tahun
- Periode pinjaman = 7 tahun
- Produksi energi tahunan = 825.996.107,39 kWh

a. Menentukan harga Modal

$$\begin{aligned}
 &= \text{Biaya Modal} \times (F/P; 10,50; 1) \\
 &= Rp 840.795.727.654,97 \times 1,0975 \\
 &= Rp 922.773.311.101,33
 \end{aligned}$$

b. Menentukan harga Cicilan Utang

$$= \text{Biaya Pinjaman} \times (F/P; 10,50; 7)$$

$$\begin{aligned}
 &= Rp 1.961.856.697.861,60 \times 1,9185 \\
 &= Rp 3.763.871.121.264,93
 \end{aligned}$$

c. Menentukan harga Biaya Operasi dan Oemeliharan (O&P)

$$\begin{aligned}
 &= Biaya O&P \times (P/A; 10,50; 20) \\
 &= Rp 56.053.048.510,33 \times 6,446 \\
 &= Rp 361.358.589.,157,77
 \end{aligned}$$

d. Menentukan harga Pajak Air Permukaan

$$\begin{aligned}
 &= (Harga Pajak Per kWh \times Produksi Energi Tahunan) \times (P/A; 10,50; 20) \\
 &= Rp. 50,00/kWh \times 825.996.107,39 \text{ kWh} \times 6,446 \\
 &= Rp 266.248.487.770,34
 \end{aligned}$$

Tabel 4.24 Rekapitulasi Biaya Keseluruhan PLTA (Bunga 9,75%)

No	Biaya	Jumlah	Faktor konversi	Biaya sekarang
1	Modal	Rp 840.795.727.654,97	1.098	Rp 922.773.311.101,33
2	Cicilan	Rp 1.961.856.697.861,60	1.919	Rp 3.763.871.121.264,93
3	O&P	Rp 56.053.048.510,33	6,447	Rp 361.358.589,157,77
4	Pajak Air Permukaan	Rp 41.299.805.369,45	6,447	Rp 266.248.487.770,34
Total				Rp 5,314,251,509,294,37

Sumber: Hasil Perhitungan

e. Menentukan harga Jual Listrik

$$\begin{aligned}
 \text{Untuk Pulau Sumatera } F &= 1,15 \\
 &= Rp 750,00 \times F \\
 &= Rp 750,00 \times 1,15 \\
 &= Rp 862,50 /kWh
 \end{aligned}$$

f. Menentukan harga Manfaat Tahunan

$$\begin{aligned}
 &= Produksi Energi Tahunan \times Harga Jual Listrik \\
 &= 825.996.107,39 \text{ kWh} \times Rp 862,50 \\
 &= Rp 712.421.642.622,93
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan setiap tahunnya dan total dalam jangka 20 tahun dapat dilihat pada

Tabel 4.25 sebagai berikut:

Tabel 4.25 Manfaat Tahunan PLTA Bendungan Lubuk Ambacang

No	Tahun	Produksi energi	Harga jual	Manfaat tahunan
1	2019	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
2	2020	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
3	2021	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
4	2022	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
5	2023	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
6	2024	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
7	2025	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
8	2026	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
9	2027	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
10	2028	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
11	2029	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
12	2030	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
13	2031	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
14	2032	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
15	2033	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
16	2034	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
17	2035	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
18	2036	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
19	2037	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
20	2038	825,996,107.39	Rp862.50	Rp 712,421,642,622.93
Total		16,519,922,147.78	6,519,922,147.78	Rp 14,248,432,852,458.60

Sumber: Hasil Perhitungan

Selain dari manfaat tahunan yang telah dihitung, nilai manfaat tersebut perlu dikalkulasi dengan faktor koreksi. Berikut ini adalah manfaat PLTA Bendungan Lubuk Ambacang yang didapat tiap tahun (Annuity) dengan periode 20 tahun dan suku bunga 9,75%

- o Manfaat pada tahun ke-1 (2019)

$$\begin{aligned}
 \text{PV manfaat} &= \text{Rp } 712.421.642.622,93 \times (P/A; 10,50\%; 1) \\
 &= \text{Rp } 785.885.891.535,92 \times 0,9112 \\
 &= \text{Rp } 649.140.790.216,95
 \end{aligned}$$

Contoh perhitungan di atas berlaku untuk tahun pertama operasi, untuk operasi 19 tahun berikutnya disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4.26 PV Manfaat 20 Tahun PLTA Bendungan Lubuk Ambacang (Bunga 9,75%)

No	Tahun	Manfaat tahunan	Faktor konversi	PV biaya tahunan
1	2019	Rp 712,421,642,622.93	0.9112	Rp 649,140,790,216.95
2	2020	Rp 712,421,642,622.93	0.8302	Rp 591,470,258,246.62
3	2021	Rp 712,421,642,622.93	0.7565	Rp 538,964,783,185.31
4	2022	Rp 712,421,642,622.93	0.6894	Rp 491,107,859,342.12
5	2023	Rp 712,421,642,622.93	0.6282	Rp 447,507,654,813.59
6	2024	Rp 712,421,642,622.93	0.5725	Rp 407,825,769,319.50
7	2025	Rp 712,421,642,622.93	0.5217	Rp 371,634,749,874.25
8	2026	Rp 712,421,642,622.93	0.4754	Rp 338,649,627,820.81
9	2027	Rp 712,421,642,622.93	0.4332	Rp 308,603,245,043.19
10	2028	Rp 712,421,642,622.93	0.3947	Rp 281,210,632,884.34
11	2029	Rp 712,421,642,622.93	0.3598	Rp 256,293,685,933.60
12	2030	Rp 712,421,642,622.93	0.3278	Rp 233,549,624,992.86
13	2031	Rp 712,421,642,622.93	0.2988	Rp 212,889,397,356.80
14	2032	Rp 712,421,642,622.93	0.2723	Rp 193,974,602,745.16
15	2033	Rp 712,421,642,622.93	0.2482	Rp 176,805,241,157.95
16	2034	Rp 712,421,642,622.93	0.2262	Rp 161,131,965,020.24
17	2035	Rp 712,421,642,622.93	0.2061	Rp 146,847,911,085.65
18	2036	Rp 712,421,642,622.93	0.1879	Rp 133,881,837,189.91
19	2037	Rp 712,421,642,622.93	0.1713	Rp 122,002,206,299.18
20	2038	Rp 712,421,642,622.93	0.1561	Rp 111,173,397,331.31
Total		Rp 14,248,432,852,458.60		Rp 6,174,665,239,859.34
Rerata		Rp 712,421,642,622.93		Rp 308,733,261,992.97

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari hasil perhitungan nilai sekarang didapat Biaya Keseluruhan sebesar Rp 5.314.251.509.294,37 dan Manfaat Selama 20 Tahun sebesar Rp 6.174.665.239.859,34. perhitungan selanjutnya akan memperhitungkan besarnya keuntungan bersih dalam proyek PLTA Bendungan Lubuk Ambacang.

4.9.3. Benefit Cost Ratio (BCR)

Dalam perhitungan BCR akan memperhitungkan perbandingan antara manfaat dan biaya. Hasil BCR ini akan menentukan layak atau tidaknya proyek yang akan dibangun secara ekonomi. Proyek dikatakan layak saat nilai BCR > 1. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

$$\text{BCR} = \frac{\text{PV Manfaat Tahunan}}{\text{PV Biaya}} = \frac{\text{Rp } 6.174.665.239.859,34}{\text{Rp } 5.314.251.509.294,37} = 1,16$$

4.9.4. Net Present Value (NPV)

Dalam perhitungan *Net Present Value* akan memperhitungkan selisih antara PV manfaat dengan PV biaya. Untuk lebih jelasnya akan diperhitungkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{NPV} &= \text{Manfaat} - \text{Biaya} \\ &= \text{Rp } 6.174.665.239.859,34 - \text{Rp } 5.314.251.509.294,37 \\ &= \text{Rp } 860.413.730.564,97 \end{aligned}$$

4.9.5. Internal Rate of Return (IRR)

Dalam perhitungan Internal Rate of Return akan memperhitungkan simulasi perubahan suku bunga dimana BCR = 1 dan NPV = 0. Untuk suku buka yang akan

disimulasikan dari 9,75% sampai dengan 12% dengan faktor konversinya sesuai tabel suku bunga. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.29, Tabel 4.30 dan diperhitungkan sebagai berikut:

Tabel 4.27 Manfaat PLTA Lubuk Ambacang untuk Beberapa Suku Bunga

No	Tahun	Manfaat PLTA	9.75		10		11	
			F	Manfaat	F	Manfaat	F	Manfaat
1	2019	Rp 712,421,642,622.93	0.9112	Rp 649,140,790,216.95	0.9091	Rp 647,662,515,308.51	0.9009	Rp 641,820,657,839.00
2	2020	Rp 712,421,642,622.93	0.8302	Rp 591,470,258,246.62	0.8264	Rp 588,745,245,463.59	0.8116	Rp 578,201,405,152.77
3	2021	Rp 712,421,642,622.93	0.7565	Rp 538,964,783,185.31	0.7513	Rp 535,242,380,102.61	0.7312	Rp 520,922,705,085.89
4	2022	Rp 712,421,642,622.93	0.6894	Rp 491,107,859,342.12	0.6830	Rp 486,583,981,911.46	0.6587	Rp 469,272,135,995.73
5	2023	Rp 712,421,642,622.93	0.6282	Rp 447,507,654,813.59	0.6209	Rp 442,342,597,904.58	0.5935	Rp 422,822,244,896.71
6	2024	Rp 712,421,642,622.93	0.5725	Rp 407,825,769,319.50	0.5645	Rp 402,162,017,260.65	0.5346	Rp 380,860,610,146.22
7	2025	Rp 712,421,642,622.93	0.5217	Rp 371,634,749,874.25	0.5132	Rp 365,614,786,994.09	0.4817	Rp 343,173,505,251.47
8	2026	Rp 712,421,642,622.93	0.4754	Rp 338,649,627,820.81	0.4665	Rp 332,344,696,283.60	0.4339	Rp 309,119,750,734.09
9	2027	Rp 712,421,642,622.93	0.4332	Rp 308,603,245,043.19	0.4241	Rp 302,138,018,636.39	0.3909	Rp 278,485,620,101.30
10	2028	Rp 712,421,642,622.93	0.3947	Rp 281,210,632,884.34	0.3855	Rp 274,638,543,231.14	0.3522	Rp 250,914,902,531.80
11	2029	Rp 712,421,642,622.93	0.3598	Rp 256,293,685,933.60	0.3505	Rp 249,703,785,739.34	0.3173	Rp 226,051,387,204.26
12	2030	Rp 712,421,642,622.93	0.3278	Rp 233,549,624,992.86	0.3186	Rp 226,977,535,339.67	0.2858	Rp 203,610,105,461.63
13	2031	Rp 712,421,642,622.93	0.2988	Rp 212,889,397,356.80	0.2897	Rp 206,388,549,867.86	0.2575	Rp 183,448,572,975.41
14	2032	Rp 712,421,642,622.93	0.2723	Rp 193,974,602,745.16	0.2633	Rp 187,580,618,502.62	0.2320	Rp 165,281,821,088.52
15	2033	Rp 712,421,642,622.93	0.2482	Rp 176,805,241,157.95	0.2394	Rp 170,553,741,243.93	0.2090	Rp 148,896,123,308.19
16	2034	Rp 712,421,642,622.93	0.2262	Rp 161,131,965,020.24	0.2176	Rp 155,022,949,434.75	0.1883	Rp 134,148,995,305.90
17	2035	Rp 712,421,642,622.93	0.2061	Rp 146,847,911,085.65	0.1978	Rp 140,917,000,910.82	0.1696	Rp 120,826,710,588.85
18	2036	Rp 712,421,642,622.93	0.1879	Rp 133,881,837,189.91	0.1799	Rp 128,164,653,507.87	0.1528	Rp 108,858,026,992.78
19	2037	Rp 712,421,642,622.93	0.1713	Rp 122,002,206,299.18	0.1635	Rp 116,480,938,568.85	0.1377	Rp 98,100,460,189.18
20	2038	Rp 712,421,642,622.93	0.1561	Rp 111,173,397,331.31	0.1486	Rp 105,865,856,093.77	0.1240	Rp 88,340,283,685.24
Total		Rp 14,248,432,852,458.60		Rp 6,174,665,239,859.34		Rp 6,065,130,412,306.07		Rp 5,673,156,024,534.93

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.28 Nilai Biaya, Manfaat, BCR, NPV untuk Beberapa Suku Bunga

No	Uraian	Biaya	9.75		10		11	
			F	Biaya	F	Biaya	F	Biaya
1	Modal	Rp 840,795,727,654.97	1.098	Rp 922,773,311,101.33	1.1	Rp 924,875,300,420.47	1.11	Rp 933,283,257,697.02
2	Cicilan	Rp 1,961,856,697,861.60	1.919	Rp 3,763,871,121,264.93	1.9487	Rp 3,823,070,147,122.91	2.0762	Rp 4,073,206,876,100.26
3	O&P	Rp 56,053,048,510.33	6.447	Rp 361,358,589,157.77	6.7275	Rp 377,096,883,853.26	8.0623	Rp 451,916,493,004.85
4	Biaya bahan bakar	Rp 41,299,805,369.45	6.447	Rp 266,248,487,770.34	6.7275	Rp 277,844,440,622.94	8.0623	Rp 332,971,420,830.08
Total Biaya			Rp 5,314,251,509,294.37		Rp 5,402,886,772,019.58		Rp 5,791,378,047,632.21	
Benefit			Rp 6,174,665,239,859.34		Rp 6,065,130,412,306.07		Rp 5,673,156,024,534.93	
Benefit Cost Rasio			1.16		1.12		0.98	
NPV			Rp 860,413,730,564.97		Rp 662,243,640,286.49		Rp (118,222,023,097.28)	

Sumber: Hasil Perhitungan

$$\begin{aligned}
 IRR &= \frac{NPV - NPV \text{ } 11\%}{NPV \text{ } 10\% - NPV \text{ } 11\%} \times (11\% - 10\%) + 11\% \\
 &= \frac{0 - (-118,222,023,097.28)}{662,243,640,286.49 - (-118,222,023,097.28)} \times (11\% - 10\%) + 11\% \\
 &= 10,85\%
 \end{aligned}$$

Sehingga pada suku bunga 10,85% akan mengakibatkan BCR = 1 dan NPV = 0 atau tidak mendapatkan keuntungan.

4.9.6. Payback Period

Dalam perhitungan Payback Period akan memperhitungakan berapa lama jangka waktu yang diperlukan untuk mengembalikan biaya yang dikeluarkan untuk proyek PLTA Lubuk Ambacang. Untuk lebih jelasnya dapat melihat perhitungan berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Payback period} &= \frac{\text{biaya}}{\text{rerata manfaat}} \\
 &= \frac{\text{Rp } 5.314.251.509.294,37}{\text{Rp } 308.733.261.992,97} \\
 &= 17,213 \text{ tahun}
 \end{aligned}$$

Sehingga, periode pengembalian untuk keseluruhan biaya yang dikeluarkan adalah selama 17,213 tahun.