

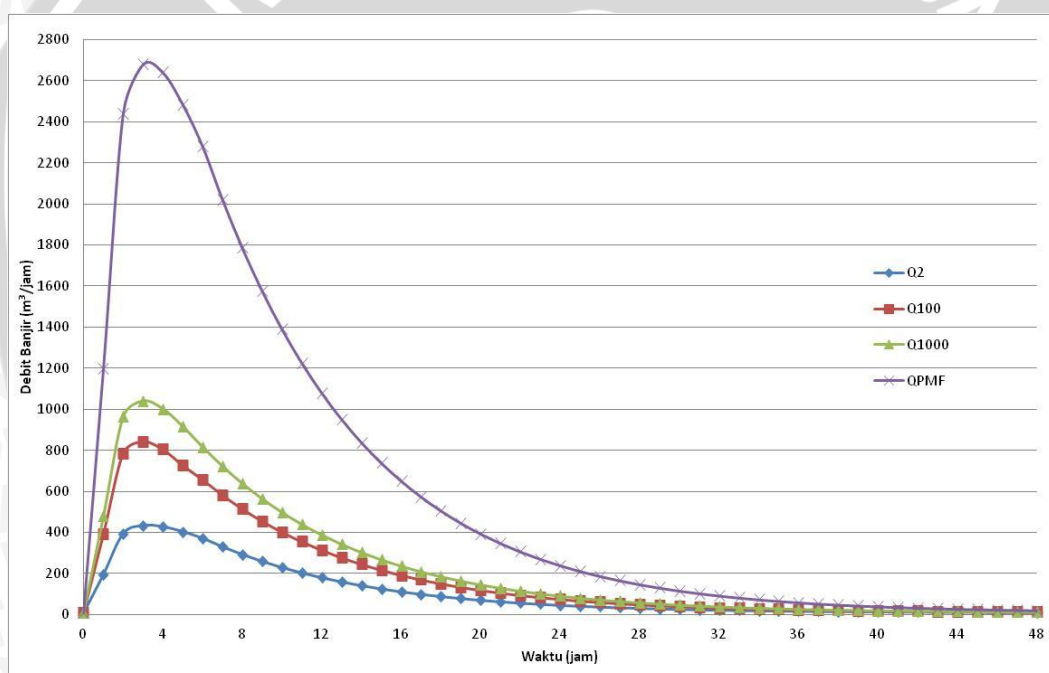
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Penelusuran Banjir (*Flood Routing*) melalui Pelimpah

Penelusuran banjir di waduk diperlukan untuk mengetahui debit outflow maksimum dan tinggi air maksimum di atas ambang pelimpah pada debit outflow yang bersesuaian sebagai dasar perencanaan hidrolika struktur.

4.1.1. Hidrograf Debit Banjir Rancangan

Hidrograf debit banjir rancangan dihitung dengan menggunakan prinsip linieritas perkalian antara ordinat hidrograf satuan dengan hujan netto. Adapun tabel rekapitulasinya terdapat pada lampiran 1, sedangkan penyajian secara grafis dapat dilihat pada Gambar 4.1. berikut ini:



Gambar 4.1. Grafik hidrograf banjir rancangan Bendungan Krueng Keureuto
Sumber: Data Perhitungan

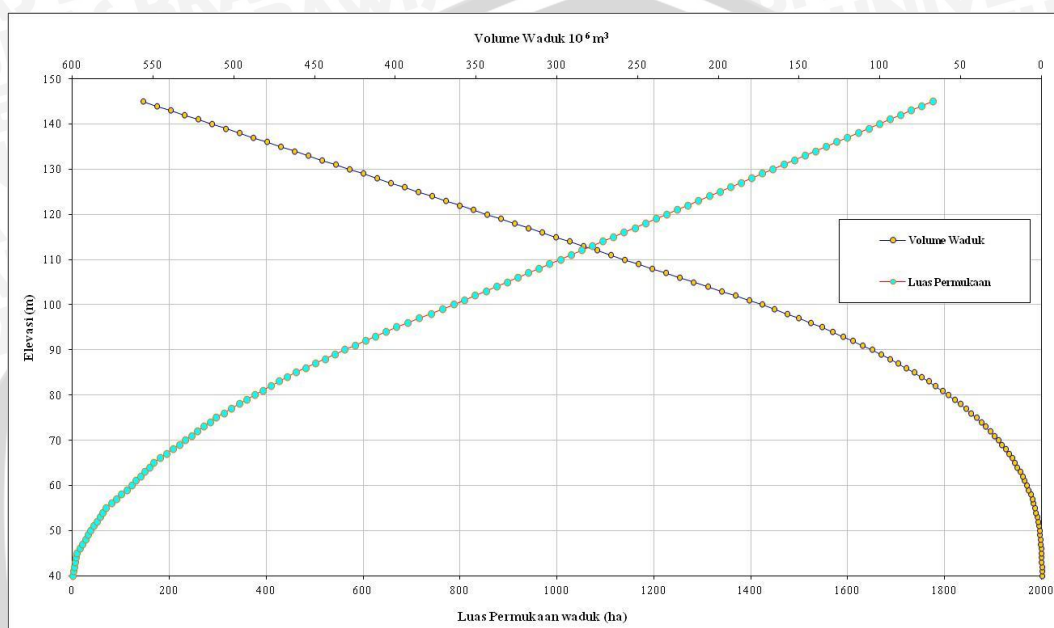
Tujuan dari menampilkan perhitungan kedalaman aliran air banjir ini adalah untuk mempelajari karakteristik kejadian banjir sesuai dengan kondisi lapangan.

4.1.2. Kurva Kapasitas Tampungan Waduk

Fungsi utama tampungan waduk adalah sebagai penampung air dan sebagai stabilisator aliran air yang terjadi. Oleh karena itu, hal yang paling penting diperhatikan dari karakteristik fisik waduk adalah berapa besar kapasitas

tampungannya. Perencanaan lokasi waduk, ditentukan dari peta kontur dan survey topografi lokasi bendungan yang dilaksanakan.

Berdasarkan lokasi as bendungan yang dibuat berdasarkan survey topografi maka di dapatkan data elevasi dan luasan tampungan. Dari data tersebut maka dapat dihitung kapasitas tampungan waduk, dengan hasil seperti dapat dilihat pada Gambar 4.2. dan perhitungan ditabelkan pada lampiran 2.



Gambar 4.2. Kurva lengkung kapasitas tampungan waduk
Sumber: Data Perhitungan

4.1.3. Kurva Hubungan antara Kedalaman Aliran di atas Pelimpah dengan Debit Pelimpah (*Rating Curve Pelimpah*)

Dalam perhitungan koefisien limpahan ini menggunakan rumus Iwasaki, dimana untuk menghitung nilai C pada hubungan antara kedalaman aliran dan debit yang melalui ambang pelimpah diperlukan nilai H_d , sedangkan nilai H_d diperoleh dari hasil *flood routing*. Maka untuk perhitungan awal, nilai H_d diasumsikan dari debit *inflow*. Kemudian jika hasil *flood routing* debit *outflow* telah diperoleh maka nilai H_d akan dikoreksi sesuai dengan hasil *flood routing* debit *outflow*, dimana penyesuaian atau koreksi ini dilakukan sampai diperoleh nilai H_d yang digunakan sebagai data masukkan dalam perhitungan koefisien limpahan sama dengan hasil *outflow*.

$$\text{Asumsi awal} \quad C = 2,18 \text{ m}^{1/2}/\text{detik}$$

$$K_p = \text{Koefisien kontraksi pada pilar} = 0,1 \text{ (diasumsikan } H/H_d = 1)$$

Ka = Koefisien kontraksi pada dinding samping kiri atau kanan = 0.117
(diasumsikan H/Hd = 1)

$$\text{Inflow } Q_{1000} = 359,64 \text{ meter}^3/\text{detik}$$

$$H_d = \left(\frac{Q}{CL} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{359,64}{2,18 \cdot 40} \right)^{\frac{2}{3}} = 2,599 \text{ meter}$$

$$L = L - 2(N \cdot K_p + K_a)H$$

$$L = 40 - 2(0.0,1 + 0,167)0,1$$

$$L = 39,97 \text{ meter}$$

Kemudian dihitung nilai Cd sebagai berikut:

$$C_d = 2,20 - 0,0416 \left(\frac{H_d}{P} \right)^{0,99}$$

$$C_d = 2,20 - 0,0416 \left(\frac{2,599}{5} \right)^{0,99}$$

$$C_d = 2,178$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai a sebagai berikut:

$$C_d = 1,60 \times \frac{1 + 2a(h/H_d)}{1 + a(h/H_d)}$$

$$2,178 = 1,60 \times \frac{1 + 2a(h/H_d)}{1 + a(h/hd)}, \text{ karena } h = H_d \text{ maka:}$$

$$2,178 = 1,60 \times \frac{1 + 2a}{1 + a}, a = 0,566$$

Untuk nilai a = 0,566 maka persamaan koefisien debit menjadi:

$$C_d = 1,60 \times \frac{1 + 2 \times 0,566 \times (h/2,599)}{1 + 0,566 \times (h/2,599)}$$

$$C_d = 1,60 \times \frac{1 + 2 \times 0,566 \times (0,1/2,599)}{1 + 0,566 \times (0,1/2,599)}$$

$$C_d = 1,634$$

Selanjutnya menghitung Q dengan rumus :

$$Q = CLH^{\frac{3}{2}}$$

$$Q = 1,634 \cdot 39,97 \cdot 0,1^{1,5}$$

$$Q = 2,065 \text{ meter}^3/\text{detik}$$

Untuk perhitungan selanjutnya ditabelkan pada tabel 4.1. di bawah ini, sedangkan penyajian secara grafik dapat dilihat pada Gambar 4.3.

Tabel 4.1. Perhitungan Hubungan C-L-Q untuk Penelusuran Banjir Melalui Pelimpah Bendungan Krueng Keureuto (perhitungan C menggunakan nilai Hd dari Q inflow)

Elevasi (m)	h (m)	h/Hd	Ka	L (m)	C	Q (m ³ /det)
1	2	3	4	5	6	7
105		0	0,167	40	1,600	0,000
105,1	0,1	0,038	0,167	39,97	1,634	2,065
105,2	0,2	0,077	0,167	39,93	1,667	5,955
105,3	0,3	0,115	0,167	39,9	1,698	11,141
105,4	0,4	0,154	0,167	39,87	1,728	17,451
105,5	0,5	0,192	0,167	39,83	1,757	24,793
105,6	0,6	0,231	0,166	39,8	1,785	33,107
105,7	0,7	0,269	0,165	39,77	1,812	42,353
105,8	0,8	0,308	0,164	39,74	1,837	52,498
105,9	0,9	0,346	0,163	39,71	1,862	63,518
106	1	0,385	0,161	39,68	1,886	75,395
106,1	1,1	0,423	0,160	39,65	1,909	88,111
106,2	1,2	0,462	0,158	39,62	1,931	101,664
106,3	1,3	0,5	0,155	39,59	1,953	116,032
106,4	1,4	0,539	0,153	39,57	1,974	131,209
106,5	1,5	0,577	0,151	39,54	1,994	147,187
106,6	1,6	0,615	0,149	39,52	2,013	163,959
106,7	1,7	0,654	0,147	39,49	2,032	181,520
106,8	1,8	0,692	0,145	39,47	2,050	199,855
106,9	1,9	0,731	0,143	39,45	2,068	218,973
107	2	0,769	0,142	39,42	2,085	238,864
107,1	2,1	0,808	0,140	39,4	2,102	259,525
107,2	2,2	0,846	0,138	39,38	2,118	280,953
107,3	2,3	0,885	0,136	39,36	2,134	303,145
107,4	2,4	0,923	0,126	39,38	2,149	326,426
107,5	2,5	0,962	0,121	39,38	2,164	350,292
107,6	2,6	1	0,117	39,37	2,178	374,946
107,7	2,7	1,039	0,113	39,37	2,192	400,387
107,8	2,8	1,077	0,108	39,38	2,206	426,619
107,9	2,9	1,115	0,097	39,42	2,219	454,121
108	3	1,154	0,090	39,44	2,232	482,161
108,1	3,1	1,192	0,083	39,46	2,245	511,035
108,2	3,2	1,231	0,077	39,49	2,257	540,749

Tabel 4.1. Lanjutan

Elevasi (m)	h (m)	h/Hd	Ka	L (m)	C	Q (m ³ /det)
1	2	3	4	5	6	7
108,3	3,3	1,269	0,070	39,52	2,269	571,309
108,4	3,4	1,308	0,063	39,55	2,281	602,722
108,5	3,5	1,346	0,059	39,57	2,292	634,738
108,6	3,6	1,385	0,052	39,6	2,303	667,785
108,7	3,7	1,423	0,046	39,64	2,314	701,696
108,8	3,8	1,462	0,040	39,68	2,324	736,478
108,9	3,9	1,5	0,034	39,72	2,335	772,138
109	4	1,539	0,028	39,77	2,345	808,686
109,1	4,1	1,577	0,050	39,57	2,355	840,903
109,2	4,2	1,616	0,050	39,56	2,364	877,662
109,3	4,3	1,654	0,050	39,54	2,374	915,147
109,4	4,4	1,692	0,050	39,53	2,383	953,357
109,5	4,5	1,731	0,050	39,52	2,392	992,287
109,6	4,6	1,769	0,050	39,51	2,401	1031,937
109,7	4,7	1,808	0,050	39,5	2,409	1072,303
109,8	4,8	1,846	0,050	39,49	2,418	1113,382
109,9	4,9	1,885	0,050	39,47	2,426	1155,173
110	5	1,923	0,050	39,46	2,434	1197,672
110,1	5,1	1,962	0,050	39,45	2,442	1240,876
110,2	5,2	2	0,050	39,44	2,450	1284,784
110,3	5,3	2,039	0,050	39,43	2,457	1329,391
110,4	5,4	2,077	0,050	39,41	2,465	1374,696
110,5	5,5	2,116	0,050	39,4	2,472	1420,696
110,6	5,6	2,154	0,050	39,39	2,479	1467,388
110,7	5,7	2,193	0,050	39,38	2,486	1514,768
110,8	5,8	2,231	0,050	39,37	2,493	1562,835
110,9	5,9	2,269	0,050	39,35	2,500	1611,585
111	6	2,308	0,050	39,34	2,506	1661,016

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

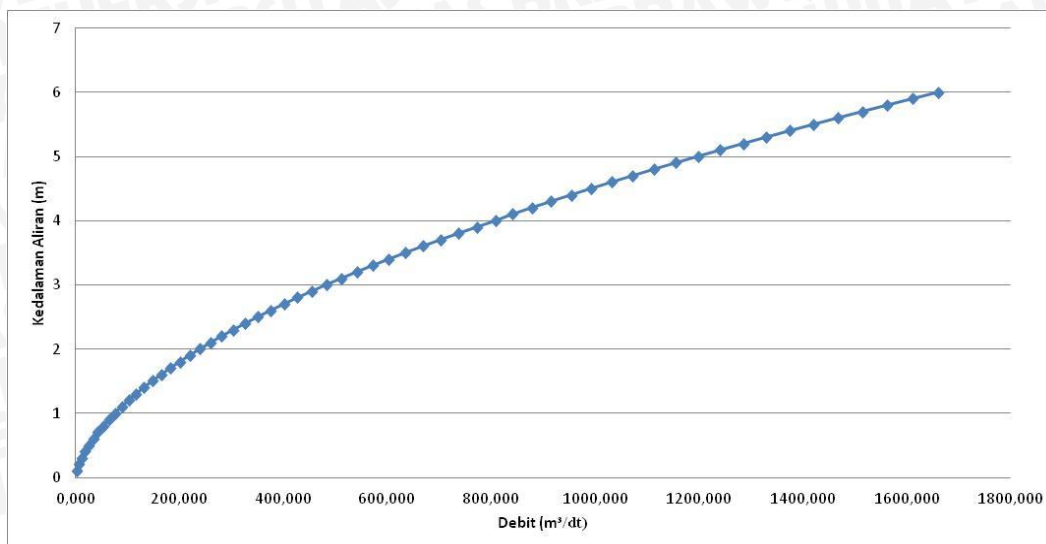
1. Diketahui

2. Selisih Elevasi

3. $[2]/Hd$

4. Diketahui

5. $(20 - 2 \cdot (2) \cdot (4))$ 6. $1,6 \cdot (1 + 2 \cdot a \cdot (2)/Hd) / (1 + a + (2)/Hd)$ 7. $(6) \cdot (5) \cdot (2)^{(3/2)}$



Gambar 4.3. Rating Curve Bendungan Krueng Keureuto
Sumber: Data Perhitungan

4.1.4. Penelusuran Banjir Melalui Pelimpah

Berikut ini merupakan perhitungan fungsi tampungan untuk penelusuran banjir melalui pelimpah Bendungan Krueng Keureuto:

Tabel 4.2. Perhitungan Hubungan H-S-Q untuk Penelusuran Banjir Melalui Pelimpah Bendungan Krueng Keureuto

Elevasi (m)	h (m)	S		Q (m ³ /det)	Q/2 (m ³ /det)	ψ (m ³ /det)	φ (m ³ /det)
		(10 ⁶ m ³)	(m ³ /det)				
1	2	3	4	5	6	7	8
105							
105,1	0,1	42,983	11939,707	2,065	1,033	11938,675	11940,740
105,2	0,2	43,890	12191,748	5,955	2,978	12188,771	12194,726
105,3	0,3	44,798	12443,789	11,141	5,570	12438,219	12449,360
105,4	0,4	45,705	12695,830	17,451	8,726	12687,105	12704,556
105,5	0,5	46,612	12947,871	24,793	12,396	12935,475	12960,268
105,6	0,6	47,520	13199,912	33,107	16,554	13183,359	13216,466
105,7	0,7	48,427	13451,953	42,353	21,176	13430,777	13473,130
105,8	0,8	49,334	13703,994	52,498	26,249	13677,745	13730,243
105,9	0,9	50,242	13956,035	63,518	31,759	13924,276	13987,794
106	1	51,149	14208,076	75,395	37,697	14170,379	14245,774
106,1	1,1	52,078	14466,210	88,111	44,056	14422,154	14510,266
106,2	1,2	53,008	14724,344	101,664	50,832	14673,512	14775,176
106,3	1,3	53,937	14982,478	116,032	58,016	14924,462	15040,494
106,4	1,4	54,866	15240,611	131,209	65,604	15175,007	15306,216
106,5	1,5	55,795	15498,745	147,187	73,593	15425,152	15572,338
106,6	1,6	56,725	15756,879	163,959	81,980	15674,899	15838,858

Tabel 4.2. Lanjutan

Elevasi (m)	h (m)	S		Q (m ³ /det)	Q/2 (m ³ /det)	ψ (m ³ /det)	ϕ (m ³ /det)
		(10 ⁶ m ³)	(m ³ /det)				
1	2	3	4	5	6	7	8
106,7	1,7	57,654	16015,013	181,520	90,760	15924,253	16105,772
106,8	1,8	58,583	16273,146	199,855	99,928	16173,219	16373,074
106,9	1,9	59,513	16531,280	218,973	109,486	16421,794	16640,766
107	2	60,442	16789,414	238,864	119,432	16669,982	16908,846
107,1	2,1	61,393	17053,645	259,525	129,762	16923,883	17183,408
107,2	2,2	62,344	17317,876	280,953	140,477	17177,400	17458,353
107,3	2,3	63,296	17582,108	303,145	151,573	17430,535	17733,680
107,4	2,4	64,247	17846,339	326,426	163,213	17683,126	18009,552
107,5	2,5	65,198	18110,570	350,292	175,146	17935,424	18285,716
107,6	2,6	66,149	18374,801	374,946	187,473	18187,328	18562,274
107,7	2,7	67,101	18639,033	400,387	200,194	18438,839	18839,226
107,8	2,8	68,052	18903,264	426,619	213,309	18689,954	19116,573
107,9	2,9	69,003	19167,495	454,121	227,061	18940,434	19394,556
108	3	69,954	19431,726	482,161	241,081	19190,646	19672,807
108,1	3,1	70,927	19702,055	511,035	255,518	19446,537	19957,573
108,2	3,2	71,901	19972,384	540,749	270,375	19702,009	20242,758
108,3	3,3	72,874	20242,713	571,309	285,654	19957,058	20528,367
108,4	3,4	73,847	20513,041	602,722	301,361	20211,680	20814,402
108,5	3,5	74,820	20783,370	634,738	317,369	20466,001	21100,739
108,6	3,6	75,793	21053,699	667,785	333,893	20719,806	21387,591
108,7	3,7	76,766	21324,028	701,696	350,848	20973,180	21674,876
108,8	3,8	77,740	21594,356	736,478	368,239	21226,118	21962,595
108,9	3,9	78,713	21864,685	772,138	386,069	21478,616	22250,754
109	4	79,686	22135,014	808,686	404,343	21730,671	22539,357
109,1	4,1	80,681	22411,440	840,903	420,452	21990,988	22831,892
109,2	4,2	81,676	22687,866	877,662	438,831	22249,035	23126,697
109,3	4,3	82,671	22964,293	915,147	457,574	22506,719	23421,866
109,4	4,4	83,667	23240,719	953,357	476,678	22764,040	23717,397
109,5	4,5	84,662	23517,145	992,287	496,144	23021,001	24013,289
109,6	4,6	85,657	23793,571	1031,937	515,969	23277,603	24309,540
109,7	4,7	86,652	24069,998	1072,303	536,151	23533,846	24606,149
109,8	4,8	87,647	24346,424	1113,382	556,691	23789,733	24903,115
109,9	4,9	88,642	24622,850	1155,173	577,586	24045,264	25200,436
110	5	89,637	24899,276	1197,672	598,836	24300,440	25498,112
110,1	5,1	90,654	25181,800	1240,876	620,438	24561,362	25802,238
110,2	5,2	91,672	25464,324	1284,784	642,392	24821,932	26106,716
110,3	5,3	92,689	25746,848	1329,391	664,696	25082,152	26411,543

Tabel 4.2. Lanjutan

Elevasi (m)	h (m)	S		Q (m ³ /det)	Q/2 (m ³ /det)	ψ (m ³ /det)	ϕ (m ³ /det)
		(10 ⁶ m ³)	(m ³ /det)				
1	2	3	5	6	7	8	9
110,4	5,4	93,706	26029,371	1374,696	687,348	25342,023	26716,719
110,5	5,5	94,723	26311,895	1420,696	710,348	25601,547	27022,243
110,6	5,6	95,740	26594,419	1467,388	733,694	25860,725	27328,113
110,7	5,7	96,757	26876,943	1514,768	757,384	26119,558	27634,327
110,8	5,8	97,774	27159,466	1562,835	781,417	26378,049	27940,884
110,9	5,9	98,791	27441,990	1611,585	805,793	26636,198	28247,783
111	6	99,808	27724,514	1661,016	830,508	26894,006	28555,022

Sumber: Perhitungan

Keterangan :

- | | | |
|---------|------------------------------|------------|
| 1. Data | 4. (3)*10 ⁶ /3600 | 7. (4)-(6) |
| 2. Data | 5. Diketahui | 8. (4)+(6) |
| 3. Data | 6. (5)/2 | |

Tabel 4.3. Perhitungan Penelusuran Banjir (*Flood Routing*) Q₁₀₀₀ Melalui Pelimpah Bendungan Krueng Keureuto

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ (m ³ /det)	ϕ (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
1	2	3	4	5	6	7	8
0	9,459				9,4593	0,27	105,27
1	478,013	243,736	12357,335	12601,072	14,8922	0,36	105,36
2	963,672	720,843	12586,179	13307,022	36,3693	0,64	105,64
3	1039,768	1001,720	13270,653	14272,373	76,6737	1,01	106,01
4	1001,219	1020,494	14195,700	15216,193	126,0672	1,37	106,37
5	915,573	958,396	15090,126	16048,522	177,7532	1,68	106,68
6	815,844	865,709	15870,769	16736,477	226,0744	1,94	106,94
7	722,143	768,994	16510,403	17279,397	267,0060	2,13	107,13
8	638,204	680,173	17012,391	17692,564	299,8312	2,29	107,29
9	563,617	600,910	17392,733	17993,643	325,0833	2,39	107,39
10	497,585	530,601	17668,560	18199,161	342,8122	2,47	107,47
11	439,248	468,417	17856,349	18324,766	353,7734	2,51	107,51
12	387,775	413,512	17970,992	18384,504	359,0987	2,54	107,54
13	342,397	365,086	18025,405	18390,492	359,6325	2,54	107,54
14	302,415	322,406	18030,859	18353,265	356,3139	2,52	107,52
15	267,202	284,808	17996,951	18281,759	349,9504	2,50	107,50

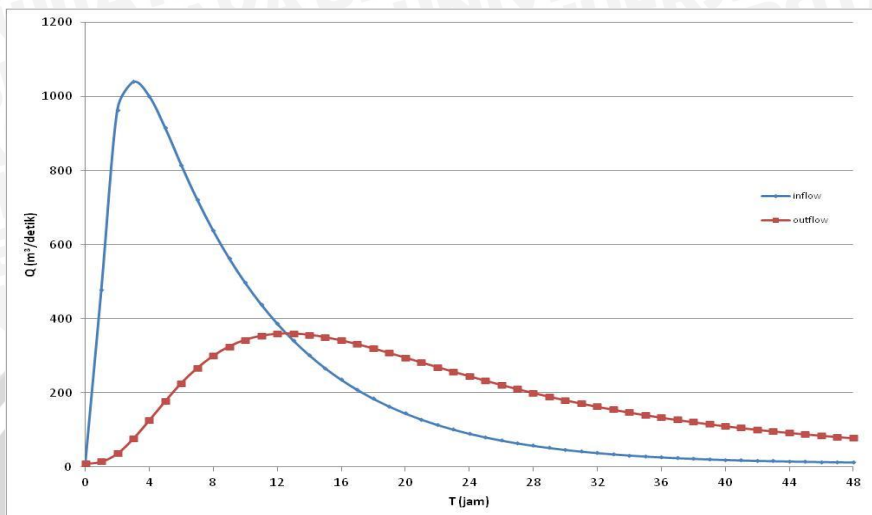
Tabel 4.3. Lanjutan

T	Inflow (I)	$(I_1+I_2)/2$	ψ	ϕ	Outflow (Q)	h	Elevasi
(jam)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m)	(m)
1	2	3	4	5	6	7	8
16	236,199	251,700	17931,809	18183,509	341,4595	2,46	107,46
17	208,910	222,554	17842,049	18064,604	331,1835	2,42	107,42
18	184,893	196,901	17733,420	17930,322	319,7396	2,37	107,37
19	163,760	174,327	17610,582	17784,909	307,4684	2,32	107,32
20	145,167	154,464	17477,440	17631,904	294,9418	2,26	107,26
21	128,809	136,988	17336,962	17473,950	282,2102	2,21	107,21
22	114,420	121,615	17191,740	17313,355	269,6525	2,15	107,15
23	101,763	108,091	17043,702	17151,794	257,1460	2,09	107,09
24	90,630	96,196	16894,648	16990,844	245,0343	2,03	107,03
25	80,838	85,734	16745,810	16831,544	233,1281	1,97	106,97
26	72,227	76,533	16598,416	16674,949	221,5090	1,91	106,91
27	64,653	68,440	16453,440	16521,880	210,4823	1,86	106,86
28	57,993	61,323	16311,397	16372,720	199,8310	1,80	106,80
29	52,135	55,064	16172,889	16227,953	189,9008	1,75	106,75
30	46,985	49,560	16038,053	16087,613	180,3250	1,69	106,69
31	42,455	44,720	15907,287	15952,007	171,4033	1,64	106,64
32	38,472	40,464	15780,604	15821,068	162,8395	1,59	106,59
33	34,970	36,721	15658,228	15694,949	154,9028	1,55	106,55
34	31,890	33,430	15540,046	15573,476	147,2584	1,50	106,50
35	29,182	30,536	15426,217	15456,753	140,2471	1,46	106,46
36	26,800	27,991	15316,506	15344,497	133,5072	1,41	106,41
37	24,706	25,753	15210,990	15236,743	127,2409	1,37	106,37
38	22,865	23,786	15109,502	15133,288	121,3320	1,33	106,33
39	21,246	22,056	15011,956	15034,012	115,6809	1,30	106,30
40	19,823	20,535	14918,331	14938,866	110,5284	1,26	106,26
41	18,571	19,197	14828,337	14847,535	105,5825	1,23	106,23
42	17,471	18,021	14741,952	14759,973	100,8863	1,19	106,19
43	16,503	16,987	14659,087	14676,074	96,5940	1,16	106,16
44	15,653	16,078	14579,480	14595,558	92,4749	1,13	106,13
45	14,905	15,279	14503,083	14518,362	88,5256	1,10	106,10
46	14,247	14,576	14429,837	14444,412	84,9452	1,08	106,08
47	13,669	13,958	14359,467	14373,425	81,5322	1,05	106,05
48	13,160	13,415	14291,893	14305,307	78,2572	1,02	106,02
max	1039,768	1020,494	18030,859	18390,492	359,6325	2,54	107,54

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan :

- | | | |
|----------------------------|--------------------|--------------------|
| 1. Data | 4. interpolasi (7) | 7. interpolasi (6) |
| 2. Data | 5. (3)+(4) | 8. 105 + (7) |
| 3. $[(2)_{n+1} - (2)_n]/2$ | 6. interpolasi (5) | |



Gambar 4.4. Grafik Penelusuran Banjir Q_{1000}

Sumber: Hasil Perhitungan

Adapun langkah-langkah perhitungan penelusuran banjir melalui pelimpah Bendungan Krueng Keureuto, untuk Q_{1000} pada $t = 1$ jam sebagai berikut:

- Memasukkan nilai S (tampungan) yang sudah diketahui
- Menghitung $\psi_{awal} = S - (Q/2) = 16015,013 - 90,760 = 11938,675$
- Menghitung $\phi_{awal} = S + (Q/2) = 16015,013 + 90,760 = 11940,740$
- Debit *inflow* (I) dari perhitungan hidrograf banjir rancangann metode *Snyder* untuk debit banjir rancangan Q_{1000}
- Menghitung nilai inflow rata-rata $0,5 \times (I_1 + I_2) = 0,5 \times (9,46 + 478,01) = 243,74$ meter³/detik.
- Menentukan nilai ψ dengan menginterpolasi nilai debit pada jam sebelumnya dalam hal ini $Q_{outflow\ awal} = 9,46$ meter³/detik dari tabel 4.2., diperoleh harga $\psi = 12357,33$.
- Menghitung nilai ϕ dengan persamaan $\phi = 0,5 \cdot (I_1 + I_2) + \psi = 243,74 + 12357,33 = 12601,07$.
- Outflow* awal pada $t = 1$ jam diperoleh dengan interpolasi dari tabel 4.2. dengan nilai $\phi = 12601,07$ didapatkan nilai $Q_{outflow} = 14,892$ m³/dt.

- i. Tinggi air di atas pelimpah pada $t = 1$ jam diperoleh dengan interpolasi dari tabel 4.1. dengan $Q_{\text{outflow}} = 14,892 \text{ m}^3/\text{dt}$, didapatkan nilai tinggi air di atas pelimpah pada $t = 1$ jam $H_d = 0,359$ meter.
- j. Menghitung elevasi awal tinggi muka air diatas pelimpah Bendungan Krueng Keureuto dengan persamaan $\text{Elv. Muka air awal} = \text{Elv. Mercu} + H_d = 105,00 + 0,359 = + 105,36$ meter.
- k. Perhitungan dilakukan seterusnya dalam tabel 4.2. di atas sehingga didapatkan nilai Q_{outflow} dan H_d maksimum.

Tahapan perhitungan dan grafik penelusuran banjir melalui pelimpah selengkapny dapat dilihat pada Lampiran 3.

4.2. Perhitungan Hidrolika pada Pelimpah

4.2.1. Debit pada Pelimpah

Debit aliran melalui pelimpah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Q = C.L.H^{3/2}$$

Debit rencana pelimpah Bendungan Krueng Keureuto digunakan Q_{1000} . Untuk keperluan pengujian model fisik hidrolika tentang waduk diperlukan data hasil perhitungan penelusuran debit banjir yang berupa *outflow*. Debit yang digunakan sebagai berikut :

- Q_2 : 108,00 meter³/detik
- Q_{100} : 273,72 meter³/detik
- Q_{1000} : 359,64 meter³/detik
- Q_{PMF} : 1295,26 meter³/detik

4.2.2. Perhitungan Profil Muka Air di Atas Pelimpah

Waduk Krueng Keureuto menggunakan pelimpah tipe *Overflow*. Dengan menggunakan persamaan 2.4 dan 2.5 dapat dihitung profil muka air diatas pelimpah. Berikut contoh perhitungan diambil untuk Q_2 :

- $Q_2 = 108,00 \text{ meter}^3/\text{detik}$
- $z = 8,5 \text{ meter}$
- Dengan mensubstitusikan persamaan

$$V_z = \sqrt{2g(Z + H_z - y_z)} \text{ dengan } V_z = \frac{Q}{L.y_z}$$

maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\sqrt{2g(Z + H_z - y_z)} - \frac{Q}{L \cdot y_z} = 0$$

$$\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (8,50 + 1,22 - y_z)} - \frac{108,00}{40 \cdot y_z} = 0$$

Selanjutnya dengan coba-coba (*trial&error*) akan didapatkan nilai $y_z = 0,57$ meter

- Selanjutnya didapatkan nilai $V_z = 108,00 / (40 \times 0,57) = 4,754$ meter/detik

- Bilangan Froude, $F_z = \frac{V_z}{\sqrt{g \cdot y_z}} = \frac{4,754}{\sqrt{9,81 \cdot 0,57}} = 2,014$

- Elevasi Dasar saluran = + 104,50 meter

- Elevasi muka air = $104,50 + 1,22 = +105,72$ meter

Perhitungan selanjutnya disajikan pada tabel 4.4 dan untuk perhitungan debit selanjutnya ditabelkan pada lampiran 4.

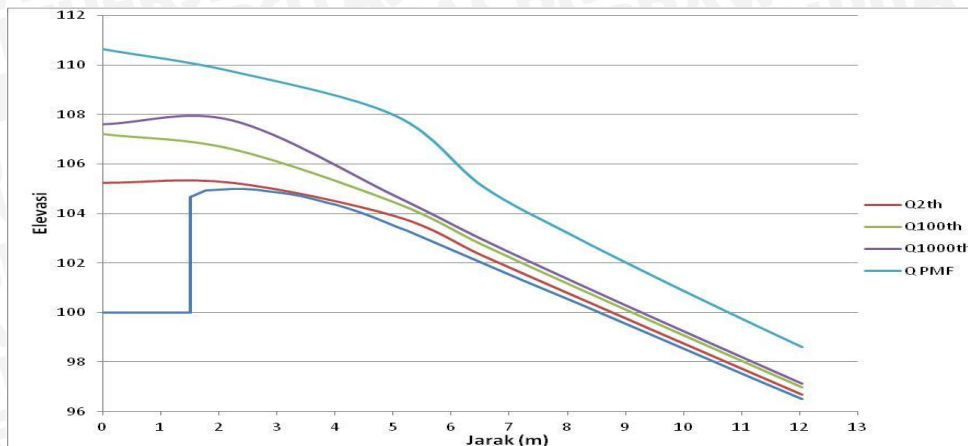
Tabel 4.4. Perhitungan Profil Muka Air $Q_2 = 108,00$ meter³/detik

z (m)	Yz (m)	Vz (m/dt)	Q/(B*Yz) (m/dt)	Fz	El. lereng bendung (m)	El. Muka Air (m)	[3] - [4] (m/dt)
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,91	2,601		1,0	105,00	105,91	
1,50	0,40	6,795	6,795	3,4	103,50	103,90	0,000
3,00	0,31	8,796	8,796	5,1	102,00	102,31	0,000
4,50	0,26	10,379	10,379	6,5	100,50	100,76	0,000
6,00	0,23	11,736	11,736	7,8	99,00	99,23	0,000
7,50	0,21	12,946	12,946	9,1	97,50	97,71	0,000
8,50	0,20	13,691	13,691	9,8	96,50	96,70	0,000

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- | | | | |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 1. Diketahui | 3. $2g \cdot ((1) + Hd - (2))^{0,5}$ | 5. $(3) / (g \cdot (2))^{0,5}$ | 7. $(7) + (2)$ |
| 2. Coba-coba | 4. $Q / (B \cdot (2))$ | 6. $185 - (1)$ | 8. $(3) - (4)$ |



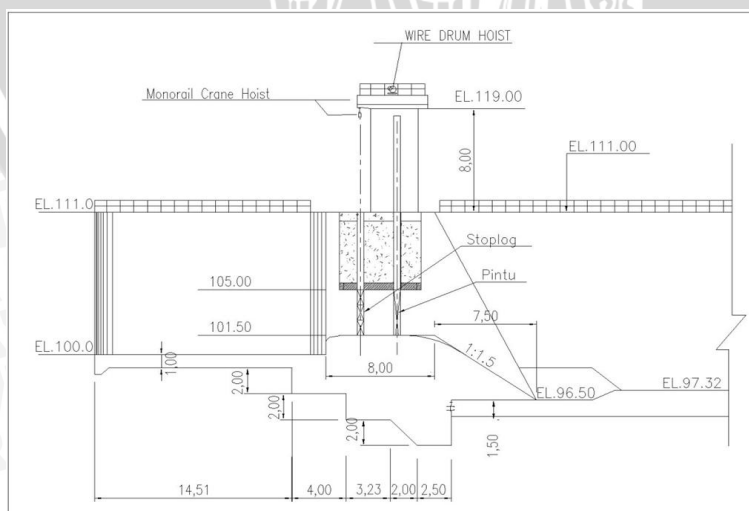
Gambar 4.5. Grafik Profil Muka Air pada Pelimpah Bendungan
Sumber: Hasil Perhitungan

Di tinjau dari nilai bilangan *Froude* tinggi muka air di kaki pelimpah (Y_1), maka dapat ditentukan *design* kolam olakan yang tepat adalah USBR tipe III karena $9,8 > 4,5$.

4.2.3. Pola Operasi Pintu

Pola operasi pintu dilakukan dengan kondisi kedua pintu dibuka dengan tinggi bukaan 0,5 meter - 2,5 meter dan kondisi muka air waduk dipertahankan pada elevasi +105,00 (tepat pada *crest* pelimpah).

- Elevasi ambang pelimpah = 105,00 meter
- Elevasi dasar pintu = 101,50 meter
- Elevasi apron hulu = 100,00 meter
- Lebar pintu = 5,00 meter
- Jumlah pintu = 2



Gambar 4.6. Desain Pintu *Sluice Gate* Bendungan Krueng Keureuto
Sumber: Data Perhitungan

Perhitungan pola operasi pintu Bendungan Krueng Keureuto memakai dua rumus untuk di bandingkan, yaitu Rumus MG Bos dan Rumus Henry-Brooke. Pertama langkah-langkah perhitungan pola operasi pintu Bendungan Krueng Keureuto dengan menggunakan Rumus MG Bos, untuk bukaan pintu 1,00 meter dan tinggi muka air di hulu 3,50 meter, adalah sebagai berikut:

- a. Menghitung debit bukaan pintu dengan menggunakan rumus pintu:

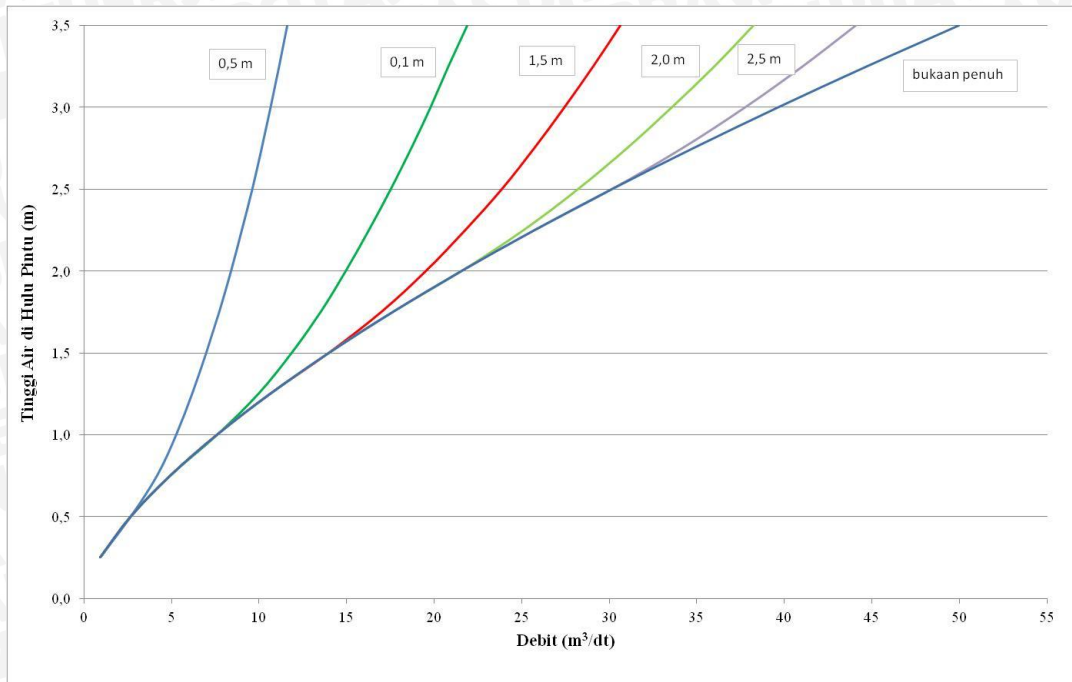
$$\begin{aligned}
 Q &= C_d \cdot C_v \cdot b \cdot D^{1,5} (2g \cdot ((H/D) - C_c))^{0,5} \\
 &= 0,602 \cdot 1,00 \cdot 5,00 \cdot 1,00^{1,5} (2 \cdot 9,81 \cdot ((3,50 / 1,00) - 0,625))^{0,5} \\
 &= 21,87 \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan pola operasi pintu bagian kanan dilakukan seterusnya dalam tabel 4.6. di bawah ini sehingga didapatkan nilai Q untuk seluruh bukaan pintu, sedangkan untuk pola operasi pintu bagian kiri terdapat pada lampiran 5.

Tabel 4.5. Perhitungan Pola Operasi Pintu Kanan Metode MG Bos

No	Kedalaman Air di Hulu Pintu (m)	Elevasi Muka Air di Hulu Pintu (m)	Tinggi Bukaan Pintu Prototipe (Yg)															
			Bukaan Penuh	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	
			Debit Pintu Kanan (Q) (m ³ /dt)															
1	0,25	101,75	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	
2	0,50	102,00	2,70	1,87	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	
3	0,75	102,25	4,95	2,47	4,20	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	
4	1,00	102,50	7,63	2,97	5,28	6,91	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	7,63	
5	1,25	102,75	10,66	3,40	6,19	8,43	9,97	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	
6	1,50	103,00	14,01	3,79	6,99	9,71	11,87	13,35	14,01	14,01	14,01	14,01	14,01	14,01	14,01	14,01	14,01	
7	1,75	103,25	17,66	4,13	7,73	10,83	13,52	15,58	17,01	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	17,66	
8	2,00	103,50	21,57	4,44	8,41	11,87	14,95	17,55	20,93	21,57	21,57	21,57	21,57	21,57	21,57	21,57	21,57	
9	2,25	103,75	25,74	4,73	9,02	12,85	16,26	19,30	21,80	23,76	25,11	25,74	25,74	25,74	25,74	25,74	25,74	
10	2,50	104,00	30,15	5,00	9,62	13,72	17,51	20,89	23,88	26,29	28,21	29,52	30,15	30,15	30,15	30,15	30,15	
11	2,75	104,25	34,78	5,26	10,15	14,61	18,68	22,37	25,73	28,64	31,00	32,88	34,16	34,78	34,78	34,78	34,78	
12	3,00	104,50	39,63	5,51	10,66	15,44	19,78	23,77	27,46	30,78	33,56	35,92	37,75	39,01	39,63	39,63	39,63	
13	3,25	104,75	44,68	5,75	11,15	16,19	20,79	25,11	29,10	32,77	35,99	38,72	41,03	42,83	44,07	44,68	44,68	
14	3,50	105,00	49,94	5,98	11,61	16,93	21,87	26,41	30,65	34,60	38,22	41,40	44,06	46,33	48,10	48,10	49,94	

Sumber: Perhitungan



Gambar 4.7. Grafik Lengkung Debit Operasi Pintu MG Bos
 Sumber: Hasil Perhitungan

Selanjutnya langkah-langkah perhitungan pola operasi pintu Bendungan Krueng Keureuto dengan menggunakan Rumus Henry-Brooke, untuk bukaan pintu 1,00 meter dan tinggi muka air di hulu 3,50 meter, adalah sebagai berikut:

- a. Menghitung debit bukaan pintu dengan menggunakan rumus pintu:

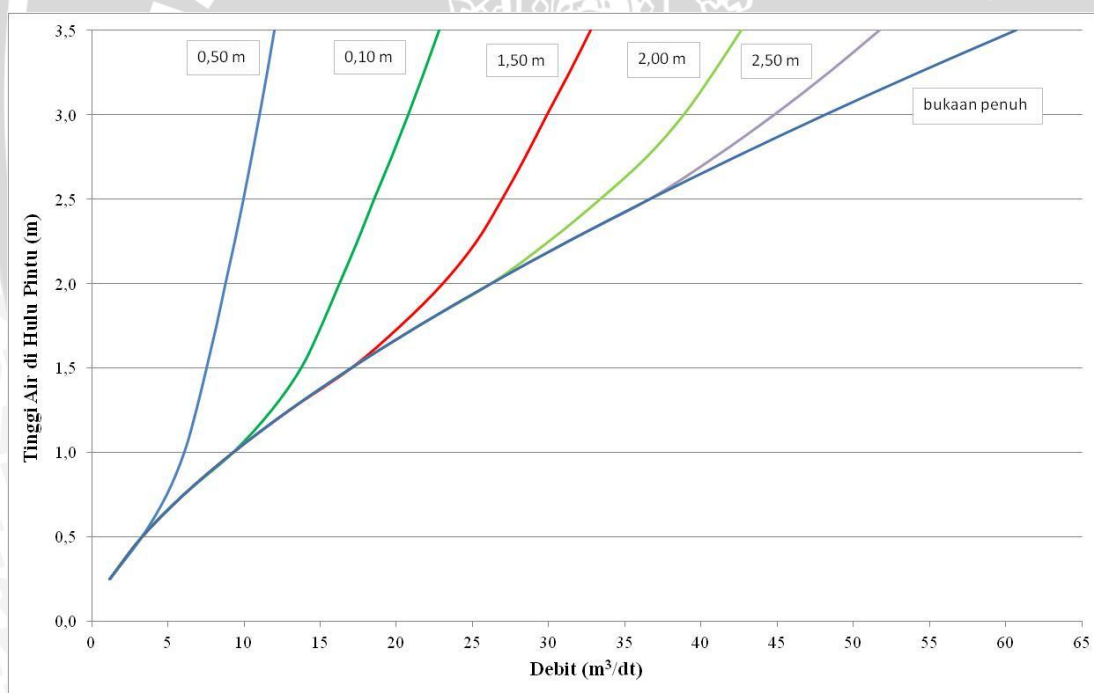
$$\begin{aligned}
 Q &= Cd \cdot b \cdot Yg (2g \cdot (Yo - Cc \cdot Yg))^{0,5} \\
 &= 0,605 \cdot 5,00 \cdot 1,00 (2 \cdot 9,81 \cdot (3,50 - 0,600 \cdot 1,00))^{0,5} \\
 &= 22,82 \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan pola operasi pintu bagian kanan dilakukan seterusnya dalam tabel 4.7. di bawah ini sehingga didapatkan nilai Q untuk seluruh bukaan pintu, sedangkan untuk pola operasi pintu bagian kiri dan interpolasi Yg/Yo terdapat pada lampiran 5.

Tabel 4.6. Perhitungan Pola Operasi Pintu Kanan Metode Henry-Brooke

No	Kedalaman Air di Hulu Pintu	Elevasi Muka Air di Hulu Pintu	Tinggi Bukaannya Pintu Prototipe (V_g)														
			Bukaan Penuh	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50
			Debit Pintu Kanan (Q)														
Prototipe	Prototipe	(m^3/dt)															
(m)	(m)	(m^3/dt)															
1	0,25	101,75	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
2	0,50	102,00	3,28	2,03	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28
3	0,75	102,25	6,02	2,60	4,91	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02
4	1,00	102,50	9,27	3,09	6,06	8,14	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27	9,27
5	1,25	102,75	12,95	3,51	6,85	9,52	11,80	12,95	12,95	12,95	12,95	12,95	12,95	12,95	12,95	12,95	12,95
6	1,50	103,00	17,03	3,88	7,52	10,56	13,74	15,85	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03
7	1,75	103,25	21,46	4,22	8,17	11,57	15,08	18,29	20,25	21,46	21,46	21,46	21,46	21,46	21,46	21,46	21,46
8	2,00	103,50	26,21	4,53	8,77	12,55	16,26	19,98	23,03	24,98	26,21	26,21	26,21	26,21	26,21	26,21	26,21
9	2,25	103,75	31,28	4,82	9,38	13,50	17,44	21,42	25,25	28,06	30,01	31,28	31,28	31,28	31,28	31,28	31,28
10	2,50	104,00	36,63	5,09	9,95	14,39	18,54	22,72	26,92	30,84	33,38	35,34	36,63	36,63	36,63	36,63	36,63
11	2,75	104,25	42,26	5,36	10,49	15,24	19,69	24,06	28,45	32,74	36,44	38,98	40,94	42,26	42,26	42,26	42,26
12	3,00	104,50	48,16	5,61	11,01	16,05	20,78	25,31	29,87	34,49	38,87	42,30	44,83	46,80	48,16	48,16	48,16
13	3,25	104,75	54,30	5,85	11,51	16,81	21,82	26,57	31,34	36,11	40,82	45,28	48,41	50,93	52,91	54,30	54,30
14	3,50	105,00	60,68	6,08	11,98	17,55	22,82	27,83	32,73	37,64	42,65	47,44	51,74	54,76	57,28	59,27	60,68

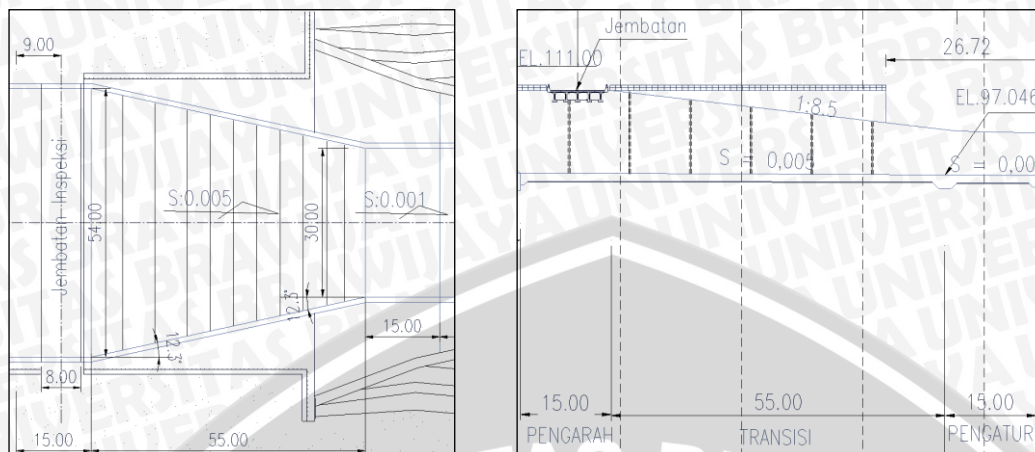
Sumber: Perhitungan



Gambar 4.8. Grafik Lengkung Debit Operasi Pintu

Sumber: Hasil Perhitungan

4.2.4. Perhitungan Profil Muka Air pada Saluran Transisi



Gambar 4.9. Denah dan Potongan Memanjang Saluran Transisi
Sumber: PT. Indra Karya Wilayah III

Berikut ini merupakan contoh perhitungan profil muka air pada saluran

transisi Q_2 :

$$Q_2 = 108,00 \text{ meter}^3/\text{detik}$$

$$B_1 = 30,00 \text{ meter}$$

$$y_1 = 1,097 \text{ meter}$$

$$F_1 = 1,000$$

$$v_1 = 3,281 \text{ meter/detik}$$

$$\alpha = 1,000$$

Sehingga:

$$A_1 = B_1 \cdot y_1 = 32,918 \text{ meter}^2$$

$$P_1 = 2y_1 + B_1 = 32,195 \text{ meter}$$

$$R_1 = \frac{A_1}{P_1} = 1,022 \text{ meter}$$

$$h_{v_1} = \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g} = \frac{1,000 \cdot 3,281^2}{2 \cdot 9,81} = 0,549 \text{ meter}$$

Section 11 saluran transisi,

$$B_2 = 30,000 \text{ meter}$$

$$Q_2 = 108,00 \text{ meter}^3/\text{detik}$$

$$y_c = \sqrt[3]{\alpha \frac{(Q_0/B_2)^2}{g}} = \sqrt[3]{1,00 \cdot \frac{(108,00 / 30,00)^2}{9,81}} = 1,109 \text{ meter}$$

$$v_c = \sqrt{\frac{g \cdot y_c}{\alpha}} = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 1,109}{1,000}} = 3,247 \text{ meter/detik}$$

$$F_c = \frac{v_c}{\sqrt{g \cdot y_c / \alpha}} = \frac{3,247}{\sqrt{9,81 \cdot 1,109 / 1,000}} = 0,985$$

$$h_{v_c} = \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2g} = \frac{1,000 \cdot 3,247^2}{2 \cdot 9,81} = 0,538 \text{ meter}$$

Kehilangan tinggi akibat gesekan:

$$A_c = B_2 \cdot y_c = 33,257 \text{ meter}^2$$

$$P_c = 2y_c + B_2 = 32,217 \text{ meter}$$

$$R_c = \frac{A_c}{P_c} = 1,032 \text{ meter}$$

$$\Delta L = 10,20 \text{ meter}$$

$$n = 0,014$$

$$\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2 = \left(\frac{3,281 + 3,247}{2}\right)^2 = 10,655$$

$$\left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right)^{4/3} = \left(\frac{1,022 + 1,032}{2}\right)^{4/3} = 1,037$$

$$hf = \frac{n^2 \cdot \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2}{\left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right)^{4/3}} \cdot \Delta L = \frac{0,014^2 \cdot 10,655}{1,037} \cdot 10,20 = 0,021$$

Elevasi ambang di akhir saluran pengatur = + 96,925 meter

Perhitungan selanjutnya disajikan pada tabel 4.8. dan untuk perhitungan debit selanjutnya ditabelkan pada lampiran 6. (Bab 5, song)

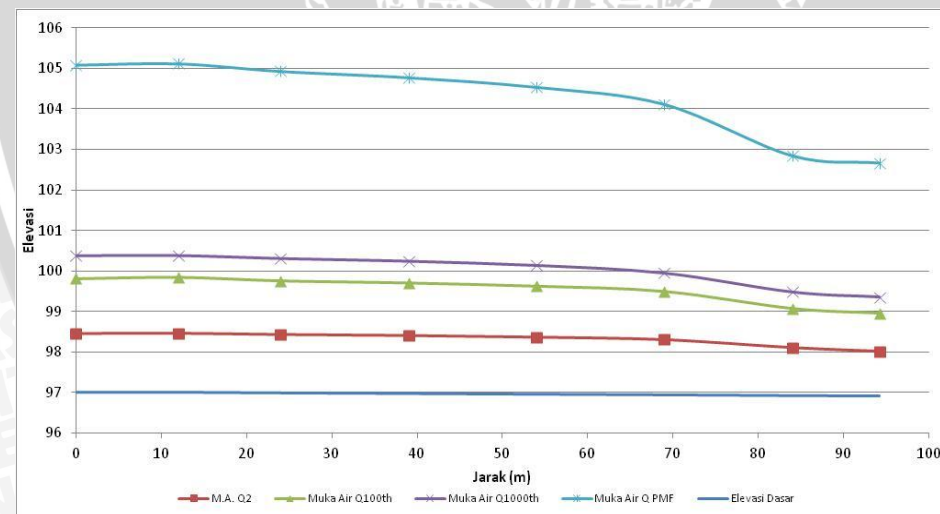
Tabel 4.7. Perhitungan Profil Muka Air pada Saluran Transisi Q2

Section	Kedalaman (m)	Jarak (m)	Jarak Kumulatif (m)	Lebar (m)	Area m ²	Kllg.basah (m)	V m/det	hv	$(V_1+V_2)/2$ (m/dt)	$((V_1+V_2)/2)^2$ (m ² /dt ²)	P (m)	R (m ³ /dt)	$(R_1+R_2)/2$	$((R_1+R_2)/2)^{4/3}$ m ^{4/3}	hf	he	F	Elv. Dsr (m)	Energi
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
12	1,097			30,00	32,918	32,195	3,281	0,549			32,195	1,022					1,0	96,915	98,56
11	1,181	10,2	10,20	30,00	35,444	32,363	3,047	0,473	3,164	10,011	32,363	1,095	1,059	1,079	0,019	0,001	0,9	96,925	98,56
10	1,369	15,0	25,20	34,36	47,052	37,099	2,295	0,269	2,671	7,135	37,099	1,268	1,182	1,249	0,017	0,001	0,6	96,940	98,56
9	1,419	15,0	40,20	38,73	54,945	41,567	1,966	0,197	2,130	4,539	41,567	1,322	1,295	1,412	0,009	0,001	0,5	96,955	98,56
8	1,445	15,0	55,20	43,09	62,245	45,979	1,735	0,153	1,850	3,424	45,979	1,354	1,338	1,474	0,007	0,001	0,5	96,970	98,56
7	1,457	15,0	70,20	47,45	69,140	50,364	1,562	0,124	1,649	2,718	50,364	1,373	1,363	1,512	0,005	0,001	0,4	96,985	98,56
6	1,474	12,0	82,20	54,00	79,576	56,947	1,357	0,094	1,460	2,130	56,947	1,397	1,385	1,544	0,003	0,000	0,4	96,997	98,56
5	1,469	12,0	94,20	54,00	79,310	56,937	1,362	0,095	1,359	1,848	56,937	1,393	1,395	1,559	0,003	0,000	0,4	97,000	98,56

Sumber: Perhitungan

Keterangan:

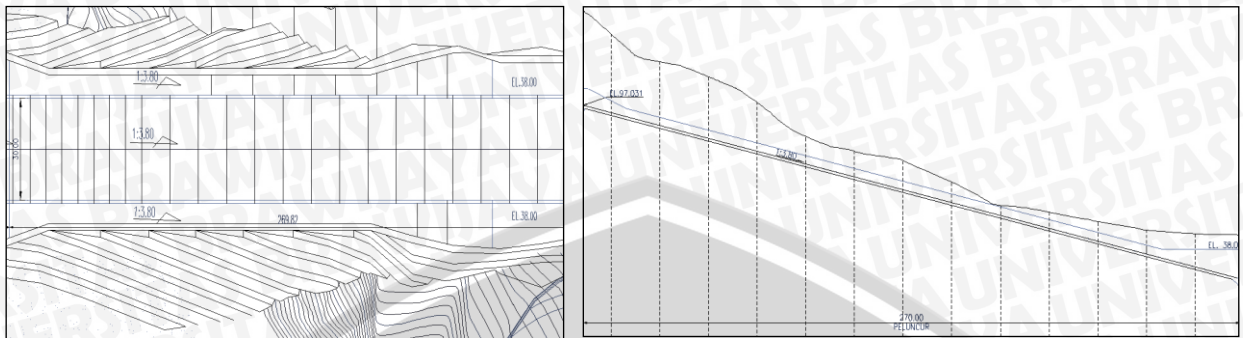
- | | | | | | | |
|--------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|---|---|------------------------|
| 1. Diketahui | 4. $[3]_n + [3]_{n+1}$ | 7. $Q / [6]$ | 10. $[9]^2$ | 13. $([12]_n + [12]_{n+1})/2$ | 16. $0,2 \times ([12]_n^2 - [12]_{n+1}^2) / 2g$ | 19. Diketahui |
| 2. Coba-coba | 5. Gambar | 8. $[7]^2 / 2g$ | 11. $2 \times [2] + [5]$ | 14. $[13]^{4/3}$ | 17. $[7] / (g \times [2])^{0,5}$ | 20. $[2] + [9] + [18]$ |
| 3. Diketahui | 6. $[2] \times [5]$ | 9. $([7]_n + [7]_{n+1})/2$ | 12. $[6] / [11]$ | 15. $(n^2 \times [10] \times [3]) / [14]$ | 18. Diketahui | |



Gambar 4.10. Profil Muka Air pada Saluran Transisi

Sumber: Hasil Perhitungan

4.2.5. Perhitungan Profil Muka Air pada Saluran Peluncur



Gambar 4.11. Denah dan Potongan Memanjang Saluran Peluncur
Sumber: PT. Indra Karya Wilayah III

Contoh perhitungan profil muka air pada saluran peluncur Q_2 :

$$Q_2 = 108,00 \text{ meter}^3/\text{detik}$$

$$B_1 = 30,00 \text{ meter}$$

$$y_1 = 1,097 \text{ meter}$$

$$F_1 = 1,000$$

$$v_1 = 3,281 \text{ meter/detik}$$

$$\alpha = 1,000$$

$$i = 0,263$$

Sehingga:

$$A_1 = B_1 \cdot y_1 = 32,918 \text{ meter}^2$$

$$P_1 = 2y_1 + B_1 = 32,195 \text{ meter}$$

$$R_1 = \frac{A_1}{P_1} = 1,022 \text{ meter}$$

$$h_{v_1} = \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g} = \frac{1,000 \cdot 3,281^2}{2 \cdot 9,81} = 0,549 \text{ meter}$$

Section 14 saluran peluncur,

$$B_2 = 30,000 \text{ meter}$$

$$Q_2 = 108,00 \text{ meter}^3/\text{detik}$$

$$y_c = \sqrt[3]{\alpha \frac{(Q_0/B_2)^2}{g}} = \sqrt[3]{1,00 \cdot \frac{(108,00 / 30,00)^2}{9,81}} = 0,415 \text{ meter}$$

$$v_c = \sqrt{\frac{g \cdot y_c}{\alpha}} = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 0,415}{1,000}} = 8,676 \text{ meter/detik}$$

$$F_c = \frac{v_c}{\sqrt{g \cdot y_c / \alpha}} = \frac{8,676}{\sqrt{9,81 \cdot 0,415 / 1,000}} = 4,300$$

$$h_{v_c} = \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2g} = \frac{1,000 \cdot 8,676^2}{2 \cdot 9,81} = 3,837 \text{ meter}$$

Kehilangan tinggi akibat gesekan:

$$A_c = B_2 \cdot y_c = 12,448 \text{ meter}^2$$

$$P_c = 2y_c + B_2 = 30,830 \text{ meter}$$

$$R_c = \frac{A_c}{P_c} = 0,404 \text{ meter}$$

$$\Delta L = 16,50 \text{ meter}$$

$$n = 0,014$$

$$\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2 = \left(\frac{3,281 + 8,676}{2}\right)^2 = 35,743$$

$$\left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right)^{4/3} = \left(\frac{1,022 + 0,404}{2}\right)^{4/3} = 0,637$$

$$h_f = \frac{n^2 \cdot \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2}{\left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right)^{4/3}} \cdot \Delta L = \frac{0,014^2 \cdot 35,743}{0,637} \cdot 16,50 = 0,109$$

Di tinjau dari nilai bilangan *Froude* tinggi muka air di kaki peluncur (Y_1), maka dapat ditentukan *design* kolam olakan yang tepat adalah USBR tipe III karena $38 > 4,5$.

Elevasi ambang di akhir saluran pengatur = + 94,426 meter

Pada *section* 24, didapat data sebagai berikut:

$$y_1 = 0,095 \text{ meter}$$

$$v = 37,737 \text{ meter/detik}$$

$$Fr = 39,009$$

$$q = 3,60 \text{ meter}^3/\text{detik}$$

$$\text{Sehingga, kedalaman konjugasi } y_2 = \left(\frac{Y_1}{2}\right) x \left(\sqrt[2]{1 + 8F}\right) - 1$$

$$y_2 = \left(\frac{0,095}{2}\right) x \left(\sqrt[2]{1 + 8 \times 39,009}\right) - 1$$

$$y_2 = 5,215 \text{ meter}$$

Perhitungan selanjutnya disajikan pada tabel 4.10. dan untuk perhitungan debit selanjutnya ditabelkan pada lampiran 7.

Tabel 4.8. Perhitungan Profil Muka Air pada Saluran Peluncur Q2

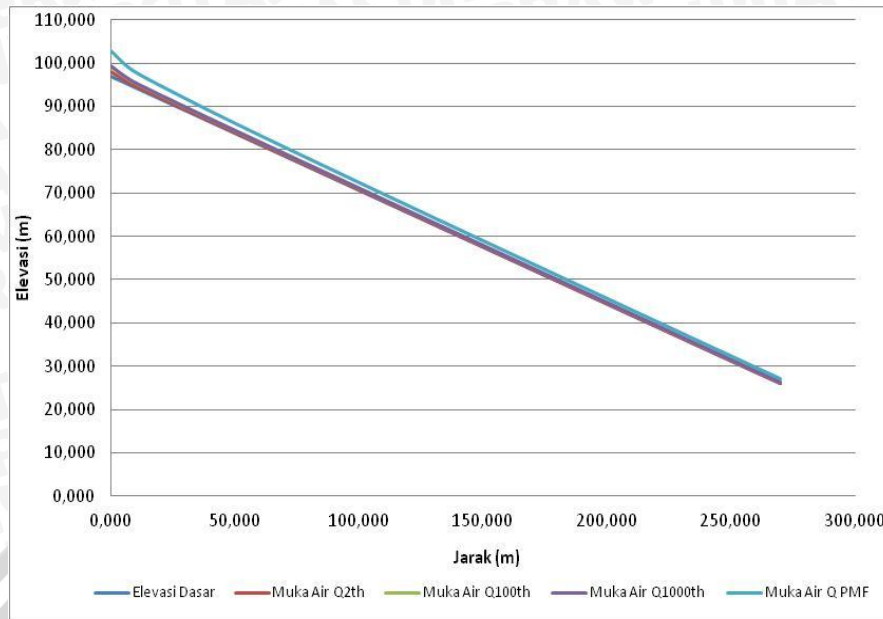
Section	Jarak D (m)	Jarak Kumulatif (m)	Lebar B (m)	Kedalaman Aliran (m)	Penampang Basah (m ²)	Kecepatan V (m/det)	hv	(V ₁ +V ₂)/2	((V ₁ +V ₂)/2) ²	P	R	(R ₁ +R ₂)/2	((R ₁ +R ₂)/2) ^{4/3}	hf	Froude	Elevasi dasar	Energi
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
13	0,0	0,0	30,0	1,097	32,918	3,281	0,549			32,195	1,022				1,0	97,031	98,677
14	7,5	7,5	30,0	0,457	13,711	7,877	3,162	5,579	31,125	30,914	0,444	0,733	0,661	0,069	3,7	95,057	98,677
15	10,5	18,0	30,0	0,330	9,911	10,897	6,052	9,387	88,113	30,661	0,323	0,383	0,279	0,651	6,1	92,294	98,676
16	28,0	46,0	30,0	0,221	6,629	16,293	13,529	13,595	184,815	30,442	0,218	0,271	0,175	5,798	11,1	84,926	98,676
17	28,0	74,0	30,0	0,178	5,328	20,270	20,941	18,281	334,200	30,355	0,176	0,197	0,114	16,040	15,4	77,557	98,676
18	28,0	102,0	30,0	0,153	4,581	23,578	28,334	21,924	480,649	30,305	0,151	0,163	0,089	29,543	19,3	70,189	98,675
19	28,0	130,0	30,0	0,136	4,080	26,473	35,719	25,025	626,260	30,272	0,135	0,143	0,075	45,979	22,9	62,820	98,675
20	28,0	158,0	30,0	0,124	3,714	29,079	43,099	27,776	771,501	30,248	0,123	0,129	0,065	65,108	26,4	55,452	98,675
21	28,0	186,0	30,0	0,114	3,432	31,470	50,476	30,274	916,544	30,229	0,114	0,118	0,058	86,753	29,7	48,084	98,674
22	28,0	214,0	30,0	0,107	3,206	33,691	57,852	32,580	1061,467	30,214	0,106	0,110	0,053	110,775	32,9	40,715	98,674
23	28,0	242,0	30,0	0,101	3,019	35,773	65,226	34,732	1206,311	30,201	0,100	0,103	0,048	137,062	36,0	33,347	98,673
24	28,0	270,0	30,0	0,095	2,862	37,736	72,578	36,755	1350,894	30,191	0,095	0,097	0,045	165,478	39,0	26,000	98,673

Sumber: Perhitungan

Keterangan:

- | | | | | | |
|--------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|---|----------------------------------|
| 1. Diketahui | 4. $[3]_n + [3]_{n+1}$ | 7. $Q / [6]$ | 10. $[9]^2$ | 13. $([12]_n + [12]_{n+1})/2$ | 16. $[7] / (g \times [2])^{0,5}$ |
| 2. Coba-coba | 5. Diketahui | 8. $[7]^2/2g$ | 11. $2 \times [2] + [5]$ | 14. $[13]^{4/3}$ | 17. Diketahui |
| 3. Diketahui | 6. $[2] \times [5]$ | 9. $([7]_n + [7]_{n+1})/2$ | 12. $[6] / [11]$ | 15. $(n^2 \times [10] \times [3]) / [14]$ | 18. $[2] + [8] + [18]$ |

Loncatan hidrolis (*hydraulic jump*) : 5,215 meter



Gambar 4.12. Profil Muka Air pada Saluran Peluncur
Sumber: Hasil Perhitungan

4.3. Perhitungan Indeks Kavitas

Sebagai contoh diambil debit Q_2 pada *section* 13 saluran peluncur dengan data-data tinggi muka air (h) dan kecepatan aliran (v) didapatkan dari perhitungan sebelumnya.

Berikut langkah-langkah perhitungan indeks kavitas:

1. Diketahui massa jenis air pada suhu 22°C adalah sebesar $997,8 \text{ kg/m}^3$
2. Kedalaman aliran di awal saluran peluncur Q_2 , $h = 1,097$ meter
3. Tekanan pada titik yang ditinjau, dalam hal ini menggunakan persamaan:

$$P_g = \rho \times g \times h$$

$$= 997,80 \times 9,81 \times 1,097$$

$$= 10740,50 \text{ N/m}^2$$

4. Tekanan pada titik yang ditinjau dikonversikan kedalam satuan kPa

$$P_g = \frac{10740,50 \text{ N/m}^2}{1000}$$

$$= 10,741 \text{ kPa}$$

5. Tekanan atmosfer (P_a) sebesar 101 kPa

6. Tekanan setempat (P_0) diperoleh dari :

$$P_0 = P_g + P_a$$

$$= 10,741 + 101$$

$$= 111,7405 \text{ kPa}$$

7. Tekanan uap (P_v) untuk suhu 22°C adalah sebesar 2,726 kPa
8. Kecepatan aliran (V_0) = 3,2809 meter/detik

$$9. \frac{V_0^2}{2} = \frac{3,2809^2}{2} = 5,3821 \text{ m}^2/\text{dt}^2$$

10. Indeks kavitasi (σ)

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\rho \cdot \frac{V_0^2}{2}} = \frac{111,7405 - 2,726}{997,80 \cdot \frac{3,2809^2}{2}} = 0,02030$$

11. Angka batas kavitasi (σ_1)

$$\sigma_1 = -\frac{P_g - P_0}{\rho \cdot \frac{V_0^2}{2}} = -\frac{10,741 - 111,7405}{997,80 \cdot \frac{3,2809^2}{2}} = 0,01881$$

12. Karena $\sigma = 0,02030$ dan $\sigma_1 = 0,01881$, maka $\sigma > \sigma_1$ sehingga tidak terjadi kavitasi.

Perhitungan selanjutnya disajikan pada tabel 4.12. dan untuk perhitungan debit selanjutnya ditabelkan pada lampiran 8.



Tabel 4.9. Perhitungan Indeks Kavitas Saluran Peluncur Pada Q_2 :

Saluran	Section	r_w	h	P_g		P_a	P_o	P_v	V_o	$V_o^2/2$	σ	σ_1	Kondisi
		(kg/m^3)	(m)	(N/m^2)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(m/dt)	(kg/m^3)			
Peluncur	13	997,800	1,097	10740,500	10,741	101	111,7405	2,726	3,2809	5,3821	0,02030	0,01881	Tidak Terjadi Kavitasi
	14	997,800	0,457	4473,558	4,474	101	105,4736	2,726	7,8770	31,0237	0,00332	0,00326	Tidak Terjadi Kavitasi
	15	997,800	0,330	3233,842	3,234	101	104,2338	2,726	10,8967	59,3694	0,00171	0,00170	Tidak Terjadi Kavitasi
	16	997,800	0,221	2162,843	2,163	101	103,1628	2,726	16,2926	132,7242	0,00076	0,00076	Terjadi Kavitasi
	17	997,800	0,178	1738,475	1,738	101	102,7385	2,726	20,2697	205,4297	0,00049	0,00049	Terjadi Kavitasi
	18	997,800	0,153	1494,557	1,495	101	102,4946	2,726	23,5778	277,9555	0,00036	0,00036	Terjadi Kavitasi
	19	997,800	0,136	1331,124	1,331	101	102,3311	2,726	26,4726	350,3992	0,00028	0,00029	Terjadi Kavitasi
	20	997,800	0,124	1211,804	1,212	101	102,2118	2,726	29,0792	422,8003	0,00024	0,00024	Terjadi Kavitasi
	21	997,800	0,114	1119,752	1,120	101	102,1198	2,726	31,4697	495,1719	0,00020	0,00020	Terjadi Kavitasi
	22	997,800	0,107	1045,939	1,046	101	102,0459	2,726	33,6906	567,5278	0,00018	0,00018	Terjadi Kavitasi
	23	997,800	0,101	985,042	0,985	101	101,9850	2,726	35,7734	639,8677	0,00016	0,00016	Terjadi Kavitasi
	24	997,800	0,095	933,820	0,934	101	101,9338	2,726	37,7356	711,9892	0,00014	0,00014	Terjadi Kavitasi

Sumber: Perhitungan

Keterangan :

- | | | |
|---|--|-------------------------------|
| 1 Data = massa jenis air = 997,764 kg/m^3 | 5 Data = tekanan atmosfer = 101 kPa | 9 $(8)^2/2$ |
| 2 Data = tinggi muka air pada section yang ditinjau | 6 (6) = (4)+(5) | 10 (10) = {(6)-(7)}/{(1)*(9)} |
| 3 (3) = (1)*9,81*(2) | 7 Data = tekanan uap pada suhu 22° C = 2,662 | 11 Angka batas kavitasi |
| 4 (3)/1000 | 8 Data pengukuran (lembar lampiran) | 12 Kriteria kondisi |

4.4. Analisa Hidraulika Pada Peredam Energi

Perhitungan tinggi muka air pada peredam energi dipengaruhi oleh hukum persamaan momentum.

Contoh perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$Q_2 = 108,00 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Berikut ini adalah langkah perhitungan tinggi muka air di peredam energi :

Tinggi muka air dan kecepatan sebelum loncatan didapat dari perhitungan muka air pelimpah pada tabel 4.4:

$$y_1 = 0,197 \text{ m}$$

$$v_1 = 13,691 \text{ m/dt}$$

Tinggi muka air setelah loncatan adalah

$$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{2gh}} = \frac{13,691}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,197}} = 9,8$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1)$$

$$\frac{y_2}{0,197} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8 \cdot 9,8^2} - 1)$$

$$y_2 = 2,648 \text{ m}$$

Dengan nilai $Fr = 9,8$ maka tipe loncatan hidraulik yang terjadi adalah tipe loncatan kuat.

Untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada lampiran 9.

Tabel 4.10 Perhitungan Kedalaman Konjugasi Pada Peredam Energi Hulu

Kala Ulang	Debit Rencana	Y ₁	Kecepatan (v ₁)	Fr	Y ₂	Tipe Loncatan
		(m)	(m/dt)		(m)	
1	2	3	4	5	6	7
Q ₂	108,00	0,197	13,691	9,8	2,648	Loncatan Kuat
Q ₁₀₀	273,72	0,483	14,159	6,5	4,209	Loncatan Tunak
Q ₁₀₀₀	359,64	0,627	14,331	5,8	4,821	Loncatan Tunak
Q _{PMF}	1295,26	2,107	15,370	3,4	9,075	Loncatan Berisolasi

Sumber: Perhitungan

Keterangan:

1. Diketahui

2. Diketahui

3. Diketahui

4. Diketahui

5. Diketahui

6. $([3] / 2) \times ((1 + 8 \cdot [5]^{2,0,5}) - 1)$

7. Tipe Loncatan:

- $Fr = 1$: Loncatan Berombak

- $1,7 < Fr < 2,5$: Loncatan Lemah

- $2,5 < Fr < 4,5$: Loncatan Berisolasi

- $4,5 < Fr < 9,0$: Loncatan Tunak

- $Fr > 9$: Loncatan Kuat

4.5. Pengambilan Data Pengukuran

4.5.1. Perhitungan Muka Air

Perhitungan tinggi muka air menggunakan alat ukur *point gauge* dengan ketelitian 0,1 mm yang dipasang pada alat ukur debit dan pada titik-titik pengukuran yang ditinjau.

Elevasi muka air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$E = EPG + \left[(b - IPG) \times \left(\frac{\text{skala}}{100} \right) \right]$$

dengan skala model 1:60, maka:

$$E = EPG + \left[(b - IPG) \times \left(\frac{60}{100} \right) \right]$$

dengan:

E = elevasi muka air prototipe

EPG = elevasi yang dipakai sebagai indeks alat ukur (meter)

IPG = bacaan *point gauge* pada elevasi indeks

B = bacaan *point gauge* pada titik yang ditinjau

Contoh perhitungan:

Data Pengukuran *Original Design* pada As Pelimpah:

El. Dasar = +100,00 meter

Q_{2th} = 108,00 meter³/detik

EPG = +100,00 meter

IPG = 0 = 69,5

B = 58,90 meter

Maka:

$$E = 100,00 + \left[(69,50 - 58,90) \times \left(\frac{60}{100} \right) \right]$$

$$= +106,33 \text{ meter}$$

4.5.2. Perhitungan Kecepatan

Pengukuran distribusi kecepatan ini dengan menggunakan alat *pitot tube*. Untuk menghitung kecepatan di prototipe menggunakan persamaan :

$$V_m = C_p \cdot \sqrt{2gh}$$

$$V_p = V_m \cdot n_h^{\frac{1}{2}}$$

dengan :

V_m = Kecepatan di model (meter/detik)

- C_p = Koefisien *pitot tube* = 0,85
 h = Beda tinggi air pada *pitot tube* (meter)
 V_p = Kecepatan di prototipe (meter/detik)
 n_h = Skala model

Data pengukuran kecepatan pada pelimpah *section 0* as (atas) saat debit operasional Q_2 , dengan $h = 0,7 \text{ cm} = 0,007 \text{ meter}$. Maka :

$$V_m = 0,85 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,007} = 0,315 \text{ meter/detik.}$$

Maka, kecepatan aliran pada prototipe :

$$V_p = 0,315 \times (60)^{\frac{1}{2}} = 2,439 \text{ meter/detik.}$$

4.5.3. Perhitungan Tinggi Tekan

Pengukuran tinggi tekan dengan menggunakan pizometer. Untuk menghitung tinggi tekan di prototipe menggunakan persamaan berikut :

$$H_p = H_m \times n_h$$

dengan :

- H_p = Tinggi tekan di prototipe (meter)
 H_m = Tinggi tekan di model (meter)
 n_h = Skala model

Contoh perhitungan :

Data pengukuran tinggi tekan pada pizometer pelimpah *section 1* saat debit operasional Q_2 , dengan $H_m = 2,1 \text{ cm} = 0,021 \text{ m}$. Maka tinggi tekan pada prototipe:

$$H_p = 0,021 \times 60 = 1,26 \text{ meter.}$$

4.6. Kebenaran Model

4.6.1. Kalibrasi

Kalibrasi dapat didefinisikan sebagai penyesuaian parameter yang ada di model dengan parameter yang ada di prototipe, sehingga dapat dipakai sebagai acuan untuk pengukuran selanjutnya.

Verifikasi adalah suatu tahapan uji atau tahap pelaksanaan pengujian kesesuaian parameter model dengan prototipe. Di dalam model ini yang perlu dilakukan adalah kalibrasi muka air, debit dan kondisi aliran.

A. Muka Air

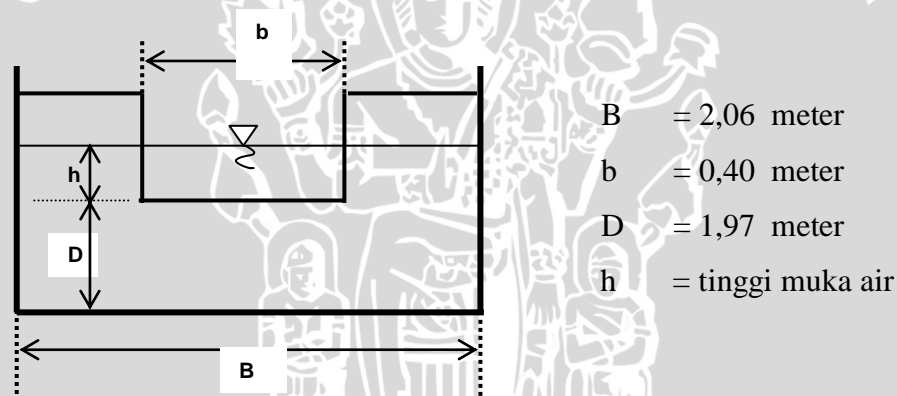
Kalibrasi dilakukan dengan cara memeriksa apakah debit yang melimpas pada pelimpah sudah sesuai dengan debit prototipe, dengan cara mengamati elevasi muka air di hulu bendung.

Kekasaran dasar saluran selalu ditandai dengan ukuran dan bentuk butiran bahan yang membentuk dasar saluran sehingga menimbulkan pengaruh hambatan terhadap aliran yang pada akhirnya akan menaikkan elevasi muka air.

B. Debit Aliran

Untuk mengetahui apakah debit di model sudah sesuai dengan kondisi prototipe, perlu dilakukan uji pendahuluan (*running test*). Elevasi muka air di hulu bendung dicapai hingga konstan kemudian akan diperoleh debit di alat ukur debit rechbox. Hasil debit tersebut akan dibandingkan dengan kondisi debit di prototipe.

Debit aliran yang masuk ke model diukur dengan ambang lebar tipe rechbox dengan dimensi seperti gambar 4.6. berikut :



Gambar 4.13. Dimensi Alat Ukur Debit *Rechbox* yang Digunakan Dalam Uji Model Fisik
Sumber: Pengukuran

Untuk mengetahui berapa besarnya debit aliran yang melalui alat ukur debit *Rechbox* dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$Q = K \cdot b \cdot h^{3/2}$$

dengan :

$$Q = \text{debit (meter}^3 \cdot \text{menit}^{-1}\text{)}$$

$$K = \text{koefisien debit (m}^{1/2} \cdot \text{menit}^{-1}\text{)}$$

$$K = 107.1 + \frac{0.177}{h} + 14.2 \frac{h}{D} - 25.7 \sqrt{\frac{(B-b)h}{DB}} + 2.04 \sqrt{\frac{B}{D}}$$

$$b = \text{lebar mercu (meter)}$$

- h = kedalaman air di atas mercu (meter)
 B = lebar saluran (meter)
 D = tinggi dari dasar saluran ke dasar mercu (meter)

Adapun langkah-langkah perhitungan liku debit alat ukur Rechbox sebagai berikut:

1. Tentukan *index point gauge* (IPG) dengan menyentuhkan ujung jarum point gauge pada crest alat ukur debit.
2. Gerakkan dan atur jarum point gauge sehingga angka nol tepat pada angka meteran taraf pada angka 43, sehingga $IPG = 0 = 43$.
3. Ukur tinggi muka air pada alat ukur dengan menyentuhkan ujung jarum point gauge pada muka air, kemudian point gauge dibaca dan dicatat.
4. Harga k dimasukkan dalam rumus alat ukur debit, maka dapat dihitung besarnya debit percobaan.
5. Besarnya debit percobaan selanjutnya akan dibandingkan dengan tinggi muka air di hulu pelimpah. Jika pada salah satu debit percobaan, tinggi muka air di hulu pelimpah sudah sama atau mendekati nilai tinggi muka air hasil routing waduk, maka debit aliran yang lewat di alat ukur *Rechbox* dianggap benar.
6. Perhitungan selanjutnya disajikan pada tabel 4.13 dan gambar 4.7.

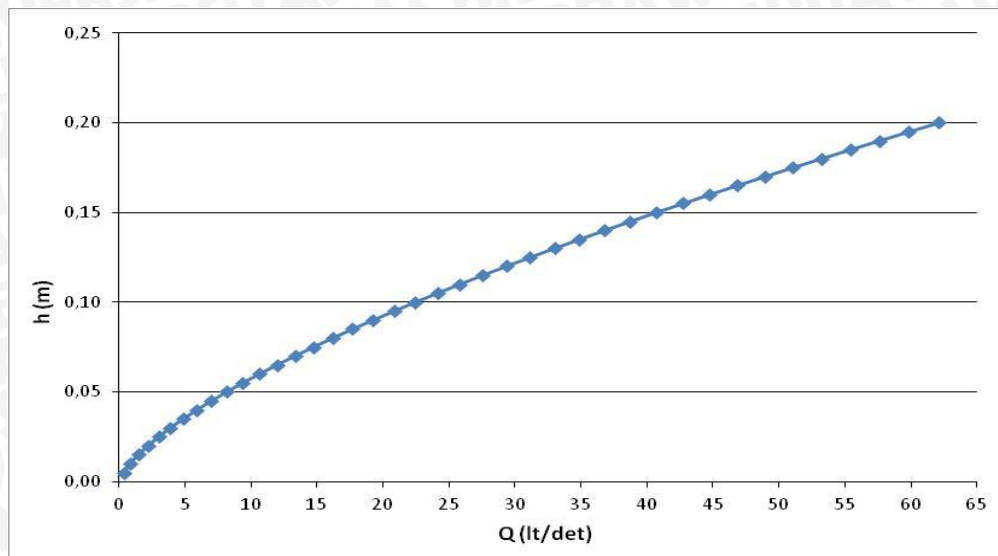
Tabel 4.11. Perhitungan Liku Debit Alat Ukur Rechbox

No.	Tinggi air di atas ambang pelimpah Rechbox		Koefisien pelimpah Rechbox K	Debit Rechbox		
	h (m)	h (cm)		Q (m ³ /menit)	Q (m ³ /dt)	Q (lt/det)
1	0,005	0,500	143,460	0,020	0,00034	0,338
2	0,010	1,000	125,314	0,050	0,00084	0,835
3	0,015	1,500	119,081	0,088	0,00146	1,458
4	0,020	2,000	115,856	0,131	0,00218	2,185
5	0,025	2,500	113,847	0,180	0,00300	3,000
6	0,030	3,000	112,455	0,234	0,00390	3,896
7	0,035	3,500	111,420	0,292	0,00486	4,864
8	0,040	4,000	110,612	0,354	0,00590	5,899
9	0,045	4,500	109,957	0,420	0,00700	6,998
10	0,050	5,000	109,411	0,489	0,00816	8,155
11	0,055	5,500	108,946	0,562	0,00937	9,368
12	0,060	6,000	108,542	0,638	0,01063	10,635

Tabel 4.11. Lanjutan

No.	Tinggi air di atas ambang pelimpah Rechbox		Koefisien pelimpah Rechbox K	Debit Rechbox		
	h (m)	h (cm)		Q (m ³ /menit)	Q (m ³ /dt)	Q (lt/det)
13	0,065	6,500	108,187	0,717	0,01195	11,952
14	0,070	7,000	107,870	0,799	0,01332	13,319
15	0,075	7,500	107,585	0,884	0,01473	14,732
16	0,080	8,000	107,326	0,971	0,01619	16,190
17	0,085	8,500	107,089	1,062	0,01769	17,692
18	0,090	9,000	106,870	1,154	0,01924	19,237
19	0,095	9,500	106,668	1,249	0,02082	20,822
20	0,100	10,000	106,479	1,347	0,02245	22,448
21	0,105	10,500	106,302	1,447	0,02411	24,112
22	0,110	11,000	106,137	1,549	0,02581	25,814
23	0,115	11,500	105,980	1,653	0,02755	27,554
24	0,120	12,000	105,832	1,760	0,02933	29,329
25	0,125	12,500	105,692	1,868	0,03114	31,140
26	0,130	13,000	105,558	1,979	0,03298	32,985
27	0,135	13,500	105,431	2,092	0,03486	34,864
28	0,140	14,000	105,309	2,207	0,03678	36,776
29	0,145	14,500	105,193	2,323	0,03872	38,721
30	0,150	15,000	105,081	2,442	0,04070	40,698
31	0,155	15,500	104,974	2,562	0,04271	42,706
32	0,160	16,000	104,871	2,685	0,04474	44,745
33	0,165	16,500	104,771	2,809	0,04681	46,814
34	0,170	17,000	104,676	2,935	0,04891	48,913
35	0,175	17,500	104,583	3,063	0,05104	51,042
36	0,180	18,000	104,493	3,192	0,05320	53,199
37	0,185	18,500	104,407	3,323	0,05539	55,385
38	0,190	19,000	104,323	3,456	0,05760	57,599
39	0,195	19,500	104,241	3,590	0,05984	59,841
40	0,200	20,000	104,162	3,727	0,06211	62,110

Sumber: Perhitungan



Gambar 4.14. Lengkung debit alat ukur Rechbox
 Sumber: Hasil Perhitungan

C. Tail Water Level

Pada kalibrasi, melihat kondisi aliran adalah pada TWL (*Tail Water Level*).

Contoh langkah perhitungan parameter hidraulik (F) pada TWL sebagai berikut :

$n = 0,014 ; z = 1,1818$

dari tabel 4.10. dan gambar 4.7. dengan $Q_2 = 108,00 \text{ m}^3/\text{dt}$ didapatkan $h = 1,06 \text{ m}$,
 maka :

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{108,00}{33,33} = 3,20 \text{ m/dt}$$

$$\text{Kondisi aliran} = F = \frac{3,20}{\sqrt{9,81 \times 1,06}} = 0,899 \text{ (aliran subkritis)}$$

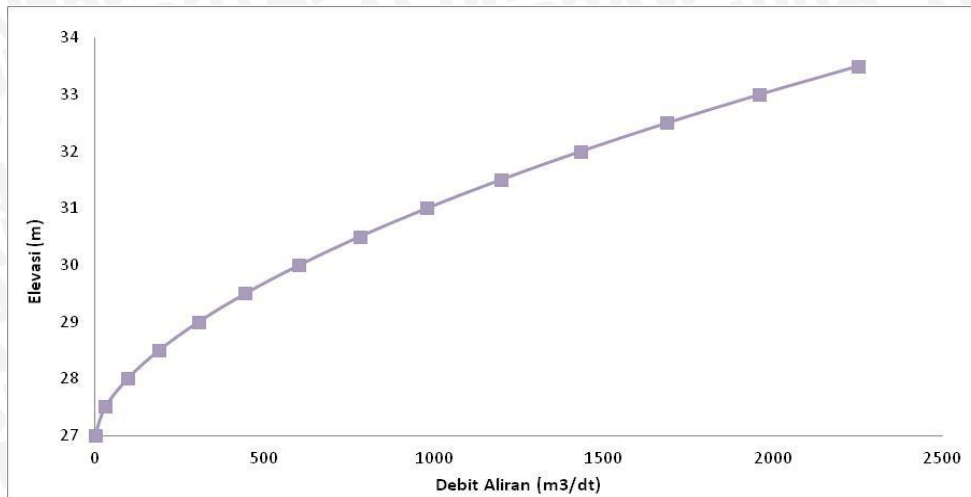
Hasil perhitungan selanjutnya disajikan pada tabel 4.14. dan gambar 4.8 berikut ini:



Tabel 4.12. Liku Debit *Tail Water Level* (TWL)

No	Elevasi	H (m)	Lebar (B) (m)	A (m ²)	P (m)	R (m)	V (m/dt)	Q (m ³ /dt)	T (m)	D (m)	Froude	Keterangan Aliran
0	27,000	0,000	30,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	30,000	0,000	-	-
1	27,500	0,500	30,000	15,295	31,548	0,485	1,971	30,154	31,182	0,491	0,899	sub kritis
2	28,000	1,000	30,000	31,182	33,096	0,942	3,070	95,728	32,364	0,963	0,999	sub kritis
3	28,500	1,500	30,000	47,659	34,644	1,376	3,951	188,311	33,545	1,421	1,058	super kritis
4	29,000	2,000	30,000	64,727	36,193	1,788	4,707	304,640	34,727	1,864	1,101	super kritis
5	29,500	2,500	30,000	82,386	37,741	2,183	5,375	442,867	35,909	2,294	1,133	super kritis
6	30,000	3,000	30,000	100,636	39,289	2,561	5,980	601,820	37,091	2,713	1,159	super kritis
7	30,500	3,500	30,000	119,477	40,837	2,926	6,534	780,718	38,273	3,122	1,181	super kritis
8	31,000	4,000	30,000	138,909	42,385	3,277	7,048	979,031	39,455	3,521	1,199	super kritis
9	31,500	4,500	30,000	158,932	43,933	3,618	7,528	1196,401	40,636	3,911	1,215	super kritis
10	32,000	5,000	30,000	179,545	45,481	3,948	7,979	1432,592	41,818	4,293	1,229	super kritis
11	32,500	5,500	30,000	200,750	47,029	4,269	8,406	1687,459	43,000	4,669	1,242	super kritis
12	33,000	6,000	30,000	222,545	48,578	4,581	8,811	1960,927	44,182	5,037	1,253	super kritis
13	33,500	6,500	30,000	244,932	50,126	4,886	9,198	2252,971	45,364	5,399	1,264	super kritis
14	34,000	7,000	30,000	267,909	51,674	5,185	9,569	2563,614	46,545	5,756	1,273	super kritis
15	34,500	7,500	30,000	291,477	53,222	5,477	9,925	2892,908	47,727	6,107	1,282	super kritis
16	35,000	8,000	30,000	315,636	54,770	5,763	10,268	3240,933	48,909	6,454	1,290	super kritis
17	35,500	8,500	30,000	340,386	56,318	6,044	10,599	3607,793	50,091	6,795	1,298	super kritis
18	36,000	9,000	30,000	365,727	57,866	6,320	10,920	3993,609	51,273	7,133	1,305	super kritis
19	36,500	9,500	30,000	391,659	59,414	6,592	11,230	4398,516	52,455	7,467	1,312	super kritis
20	37,000	10,000	30,000	418,182	60,963	6,860	11,532	4822,663	53,636	7,797	1,319	super kritis
21	37,500	10,500	30,000	445,295	62,511	7,124	11,826	5266,209	54,818	8,123	1,325	super kritis
22	38,000	11,000	30,000	473,000	64,059	7,384	12,113	5729,321	56,000	8,446	1,331	super kritis

Sumber: Perhitungan



Gambar 4.15. Grafik Liku Debit Tail Water Level
Sumber: Hasil Perhitungan

4.6.2. Verifikasi

Verifikasi adalah suatu tahapan pembuktian kebenaran parameter model dan prototipe sehingga diperoleh validasi sesuai dengan ketelitian yang diharapkan.

Untuk mengetahui apakah model dibuat sudah sesuai dengan kondisi prototipe, perlu dilakukan uji pendahuluan (*running test*). Tolak ukur kebenaran dan kesesuaian antara model dan prototipe ini didasarkan pada perbandingan parameter hasil yang diperoleh dari pengukuran model dengan desain dan pengamatan di lapangan (prototipe).

Nilai kebenaran model didasarkan pada perbandingan tinggi muka air di atas pelimpah (H_d) yang merupakan hasil pengujian model dengan penghitungan yang telah dilakukan. Adapun kebenaran model tersebut ditabelkan pada tabel 4.21 berikut.

Tabel 4.13 Tingkat Kesalahan Relatif H_d Pelimpah dan H_c Transisi Hasil Pengujian.

No.	Variabel Debit	Hd Pelimpah		Kr	Hc Transisi		Kr
		Perhitungan	Pengukuran		Perhitungan	Pengukuran	
		(meter)	(meter)	(%)	(meter)	(meter)	(%)
1.	Q2	1,260	1,380	9,524	1,097	1,100	0,249
2.	Q100	2,170	2,250	3,687	2,040	1,980	2,927
3.	Q1000	2,540	2,620	3,150	2,447	2,400	1,915
4.	QPMF	5,220	5,250	0,575	5,749	5,800	0,885

Sumber: Pengukuran dan Perhitungan

4.7. Kesalahan Relatif

4.7.1. Analisa Perambatan Kesalahan

Dalam menganalisis perambatan kesalahan pada suatu uji model ke hasil penelitian dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Quadratic error propagation* berikut ini:

- a. Kesalahan Relatif pada Alat ukur Debit pada Alat ukur Rechbox

$$Q = kbh^{3/2}$$

$$\text{Kesalahan dari } k (r_k) = 1\%$$

$$\text{Kesalahan dari } b (r_b) = 0,1\%$$

$$\text{Kesalahan dari } h (r_h) = \frac{100}{150}\% = \frac{2}{3}\%$$

Dengan menggunakan metode *Quadratic error propagation*, maka persamaannya menjadi:

$$r_Q^2 = r_k^2 + r_b^2 + \frac{9}{4}(r_h)^2$$

$$r_Q = \sqrt{1,0^2 + 0,1^2 + \frac{9}{4}\left(\frac{2}{3}\right)^2} = \sqrt{2,01} = 1,4\%$$

Kesalahan debit sebesar 1,4% berlaku apabila nilai h_{rechbox} sesuai dengan ketentuan yang ada yaitu antara $0,03\sqrt{b_{\text{rechbox}}} - 0,45\sqrt{b_{\text{rechbox}}}$. Pada uji model pelimpah Bendungan Krueng Keureuto ini menggunakan alat ukur rechbox dengan $b = 0,40$ meter = 40 sentimeter. Sehingga batas tinggi muka air di rechbox agar kesalahan yang terjadi sebesar 1,4% adalah 2,32 – 13,50 centimeter. Tinggi muka air di rechbox pada debit $Q_2 = 2,99$ centimeter dan $Q_{100} = 5,68$ centimeter. Dikarenakan tinggi muka air pada Q_2 dan Q_{100} sudah sesuai batas yang ditentukan, maka kesalahan debit pada Q_2 dan Q_{100} sebesar 1,4%.

- b. Kesalahan relatif pada Pelimpah

1. Kesalahan relatif pada penentuan H

$$\frac{\Delta q}{q} = 1 - \left\{ \frac{H_e}{H} \right\}^{3/2}$$

$$5\% = 1 - \left\{ \frac{H - 0,457}{H} \right\}^{3/2}$$

$$H = 13,326 \text{ milimeter}$$

$$\text{Skala model } L_r = \frac{13,326}{1150} = \frac{1}{86,299}$$

Dari perhitungan di atas maka di ambil skala model sebesar 1 : 60

2. Kesalahan relatif pada penentuan C

$$Q = CLH^{3/2}$$

$$C = Q \times L^{-1} \times H^{3/2}$$

L dianggap tidak terdapat kesalahan sehingga $r_l = 0$, maka:

$$r_c^2 = r_Q^2 + \frac{9}{4}(r_h)^2$$

Jadi kesalahan relatif dalam penentuan C pada pelimpah adalah sebagai berikut:

$$r_c = \sqrt{1,4^2 + \frac{9}{4} \cdot 5^2} = \sqrt{58,21} = 7,63\%$$

3. Kesalahan menentukan bilangan Froude

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

$$Fr = v \cdot g^{-1/2} \cdot h^{-1/2}$$

Nilai g dianggap tidak terjadi kesalahan sehingga $r_g = 0$, maka:

$$r_F^2 = r_v^2 + \frac{1}{4}(r_h)^2$$

$$r_F = \sqrt{7^2 + \frac{1}{4} \cdot 5^2} = \sqrt{55,25} = 7,43\%$$

4.7.2. Perbandingan Data Hasil Perhitungan dengan Hasil Pengukuran Model (Final Design)

Perhitungan kesalahan relatif dari hasil perhitungan debit dan hasil pengukuran pada pintu *sluice gate* ditabelkan berikut ini.

Tabel 4.14 Perhitungan Kesalahan Relatif Debit yang Melalui *Sluice Gate*

No.	Tinggi Bukaan <i>Sluice</i> Gate (m)	Debit				Debit yang melewati 2 Pintu			Kr	
		Debit Pintu Kanan MG. Bos (m)	Debit Pintu Kiri (m)	Debit Pintu Kanan (m)	Debit Pintu Kiri (m)	Perhitungan		Pengukuran (m ³ /dt)	MG. Bos (%)	Henry-Brooke (%)
		MG. Bos		Henry-Brooke		MG. Bos	Henry-Brooke			
		(m ³ /dt)	(m ³ /dt)	(m ³ /dt)	(m ³ /dt)	(m ³ /dt)	(m ³ /dt)			
1.	0,50	11,98	11,98	11,61	11,61	23,97	23,22	27,11	13,10	16,74
2.	1,00	22,82	22,82	21,87	21,87	45,63	43,74	43,11	5,54	1,45
3.	1,50	32,73	32,73	30,65	30,65	65,47	61,30	59,10	9,72	3,59
4.	2,00	42,65	42,65	38,22	38,22	85,29	76,43	77,02	9,70	0,77
5.	2,50	51,74	51,74	44,06	44,06	103,49	88,13	108,00	4,36	22,55

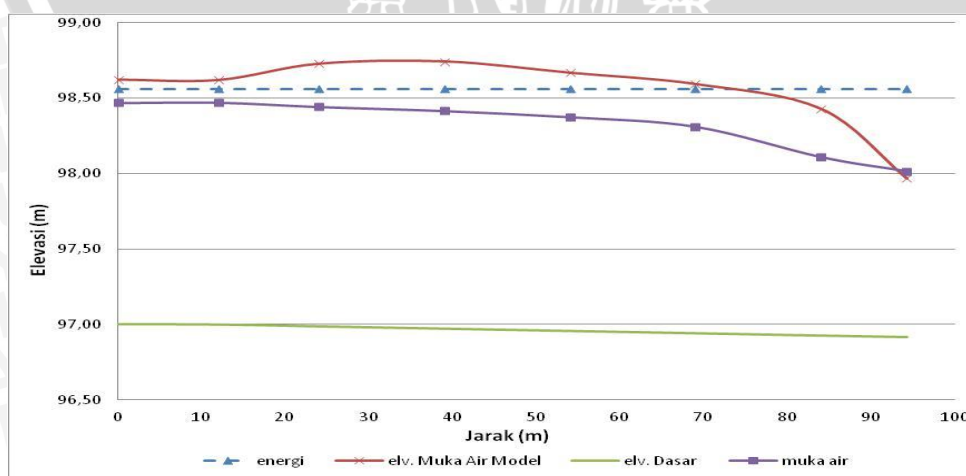
Sumber: Pengukuran dan Perhitungan

Perhitungan kesalahan relatif dari hasil perhitungan dan hasil pengukuran pada saluran transisi dan saluran peluncur untuk debit Q_2 , Q_{100} , Q_{1000} dan Q_{PMF} selanjutnya dapat dilihat pada tabel 4.22 – 4.29 dan gambar 4.10 - 4.19 berikut ini.

Tabel 4.15 Perhitungan Kesalahan Relatif pada Saluran Transisi pada Debit Q_2

Section	Tinggi Muka Air (m)		Kecepatan (m)		KR (%)	
	Hitungan	Model	Hitungan	Model	Tinggi Muka Air	Kecepatan
5	1,469	1,62	1,362	1,73	10,30	27,04
6	1,474	1,62	1,357	1,70	9,93	25,56
7	1,457	1,74	1,562	1,83	19,41	17,36
8	1,445	1,77	1,735	1,96	22,53	13,10
9	1,419	1,71	1,966	2,12	20,54	7,71
10	1,369	1,65	2,295	2,43	20,49	5,74
11	1,181	1,50	3,047	3,20	26,96	5,07
12	1,097	1,05	3,281	3,20	4,31	2,41

Sumber: Pengukuran dan Perhitungan

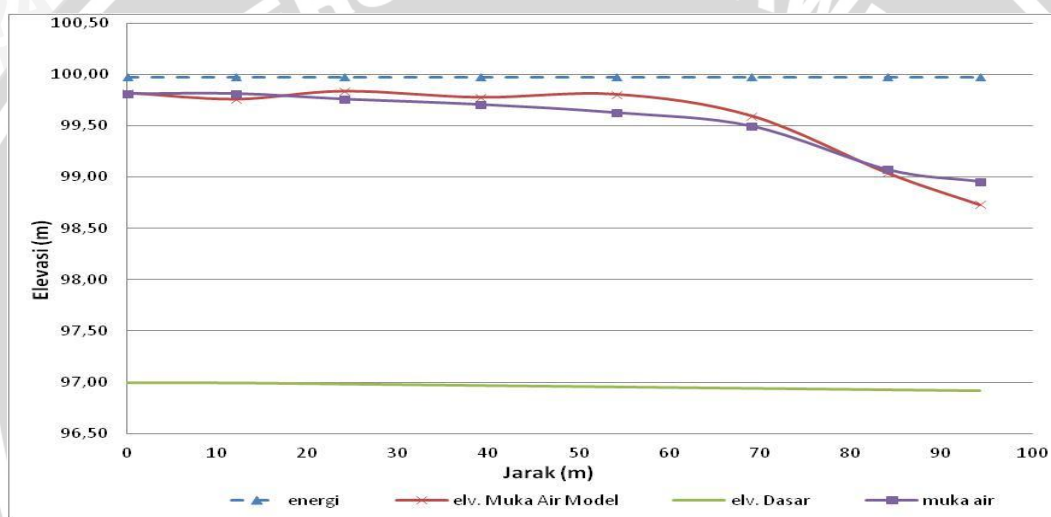
Gambar 4.16. Profil Muka Air Saluran Transisi Q_2

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.16 Perhitungan Kesalahan Relatif pada Saluran Transisi Debit Q_{100}

Section	Tinggi Muka Air (m)		Kecepatan (m)		KR (%)	
	Hitungan	Model	Hitungan	Model	Tinggi Muka Air	Kecepatan
5	2,811	2,82	1,803	2,01	0,31	7,48
6	2,816	2,76	1,800	2,01	1,98	7,75
7	2,774	2,85	2,079	2,22	2,72	4,96
8	2,737	2,81	2,321	2,45	2,50	4,69
9	2,672	2,85	2,645	2,71	6,66	2,32
10	2,556	2,66	3,117	3,20	3,89	3,18
11	2,147	2,12	4,250	4,21	1,49	1,95
12	2,040	1,82	4,473	4,42	11,02	3,20

Sumber: Pengukuran dan Perhitungan

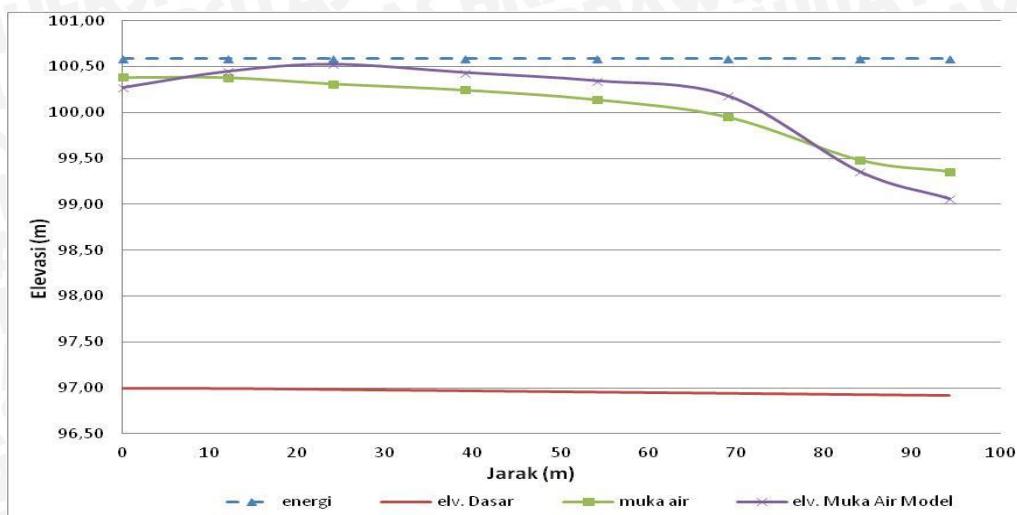
Gambar 4.17. Profil Muka Air Saluran Transisi Q_{100}

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.17 Perhitungan Kesalahan Relatif pada Saluran Transisi Debit Q_{1000}

Section	Tinggi Muka Air (m)		Kecepatan (m)		KR (%)	
	Hitungan	Model	Hitungan	Model	Tinggi Muka Air	Kecepatan
5	3,387	3,27	1,967	2,12	3,442	4,607
6	3,388	3,45	1,966	2,12	1,836	4,387
7	3,332	3,54	2,275	2,25	6,247	0,805
8	3,279	3,47	2,546	2,50	5,685	1,187
9	3,189	3,39	2,912	2,84	6,296	2,108
10	3,015	3,24	3,472	3,30	7,477	5,158
11	2,561	2,43	4,680	4,39	5,130	11,970
12	2,447	2,15	4,899	4,70	12,337	9,330

Sumber: Pengukuran dan Perhitungan

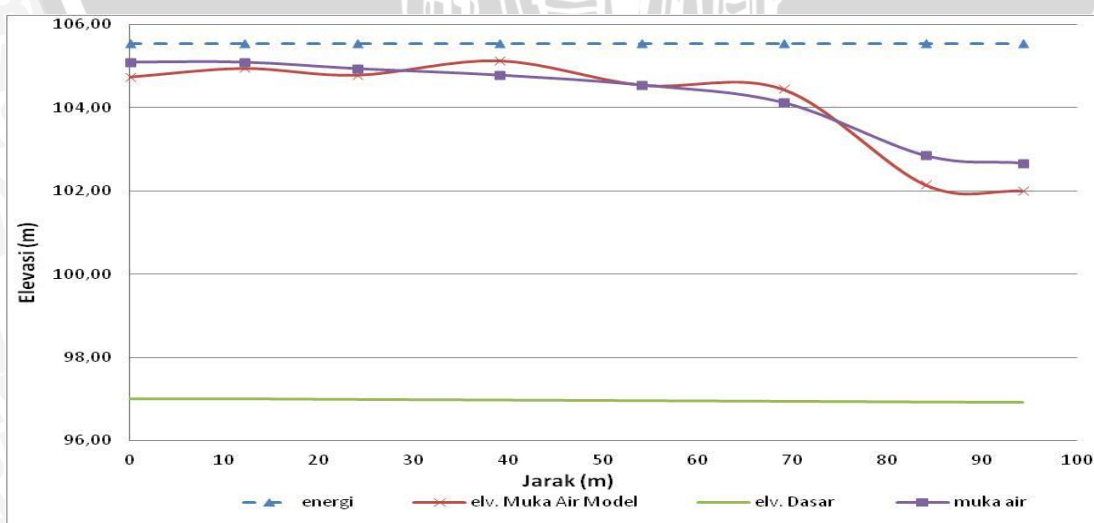


Gambar 4.18. Profil Muka Air Saluran Transisi Q_{1000}
 Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.18 Perhitungan Kesalahan Relatif pada Saluran Transisi Debit Q_{PMF}

Section	Tinggi Muka Air (m)		Kecepatan (m)		KR	
	Hitungan	Model	Hitungan	Model	Tinggi Muka Air	Kecepatan
5	8,089	7,74	2,965	2,76	4,311	2,619
6	8,090	7,95	2,965	2,74	1,735	2,867
7	7,947	7,80	3,435	3,25	1,853	2,327
8	7,807	8,16	3,850	3,64	4,526	2,572
9	7,584	7,59	4,410	4,00	0,083	5,373
10	7,176	7,50	5,253	4,73	4,513	7,040
11	5,917	5,22	7,296	6,76	11,784	10,185
12	5,749	5,09	7,510	7,33	11,552	3,482

Sumber: Pengukuran dan Perhitungan

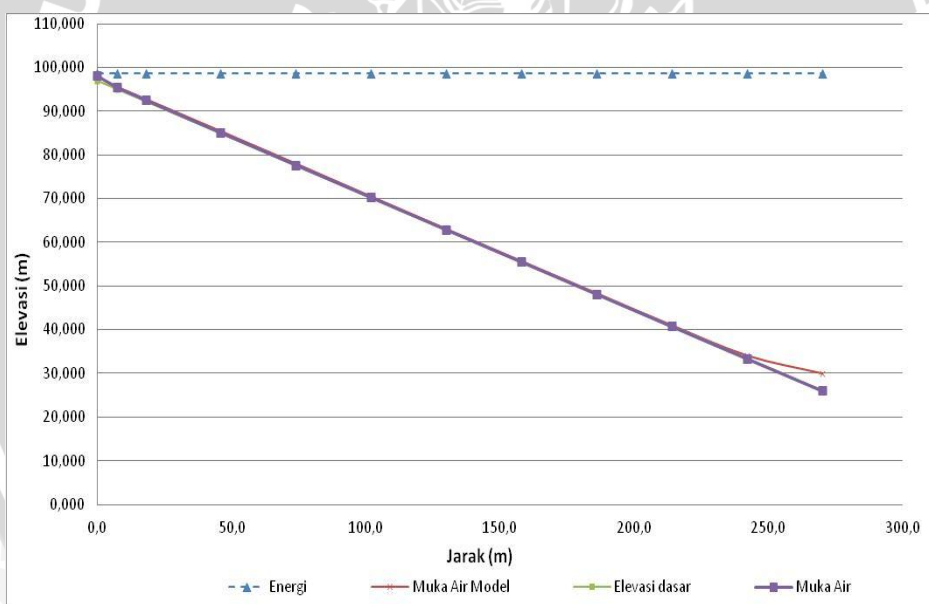


Gambar 4.19. Profil Muka Air Saluran Transisi Q_{PMF}
 Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.19 Perhitungan Kesalahan Relatif pada Saluran Peluncur Debit Q_2

Section	Tinggi Muka Air (m)		Kecepatan (m)		KR (%)	
	Hitungan	Model	Hitungan	Model	Tinggi Muka Air	Kecepatan
13	1,097	0,960	3,281	3,202	12,51	2,41
14	0,457	0,540	7,877	5,603	18,16	28,87
15	0,330	0,525	10,897	8,521	58,91	21,81
16	0,221	0,525	16,293	10,250	13,76	37,08
17	0,178	0,480	20,270	13,426	17,03	33,76
18	0,153	0,330	23,578	15,053	11,61	36,16
19	0,136	0,270	26,473	19,855	9,85	25,00
20	0,124	0,300	29,079	27,137	14,23	6,68
21	0,114	0,300	31,470	27,860	16,22	11,47
22	0,107	0,360	33,691	31,758	23,69	5,73
23	0,101	0,810	35,773	34,340	70,49	4,01
24	0,095	1,050	37,736	35,631	100,06	5,58

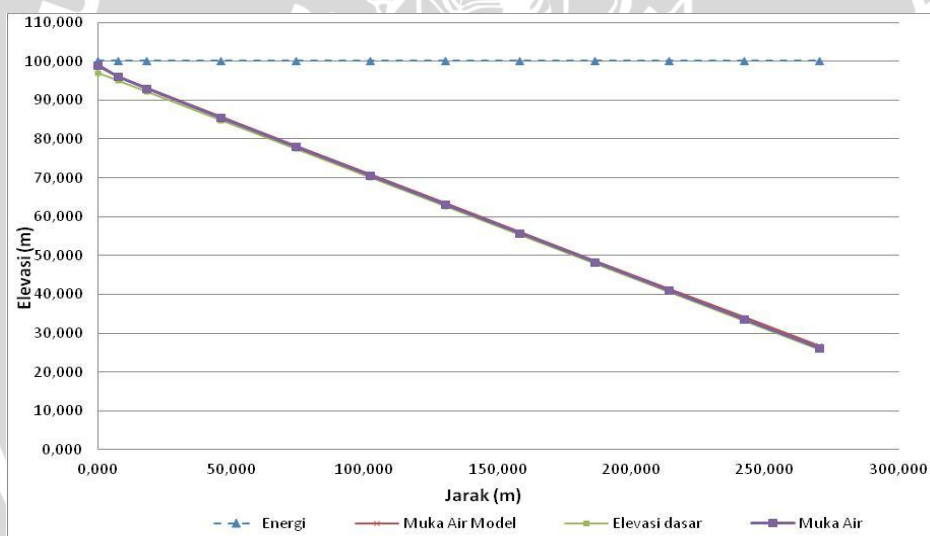
Sumber: Pengukuran dan Perhitungan

Gambar 4.20. Profil Muka Air Saluran Peluncur Q_2
Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.20 Perhitungan Kesalahan Relatif pada Saluran Peluncur Debit Q_{100}

Section	Tinggi Muka Air (m)		Kecepatan (m)		KR (%)	
	Hitungan	Model	Hitungan	Model	Tinggi Muka Air	Kecepatan
13	2,040	1,620	4,473	3,666	20,58	18,04
14	1,029	1,095	8,864	6,223	6,38	29,80
15	0,777	0,960	11,735	9,398	23,47	19,91
16	0,539	0,840	16,941	16,783	5,60	0,93
17	0,438	0,720	20,821	18,332	6,43	11,95
18	0,379	0,720	24,068	21,689	8,99	9,89
19	0,339	0,720	26,918	24,529	11,24	8,88
20	0,309	0,630	29,492	27,137	10,36	7,99
21	0,286	0,570	31,855	27,885	9,90	12,46
22	0,268	0,660	34,055	31,242	14,63	8,26
23	0,253	0,810	36,119	33,824	22,07	6,35
24	0,240	0,780	38,066	36,148	22,54	5,04

Sumber: Pengukuran dan Perhitungan

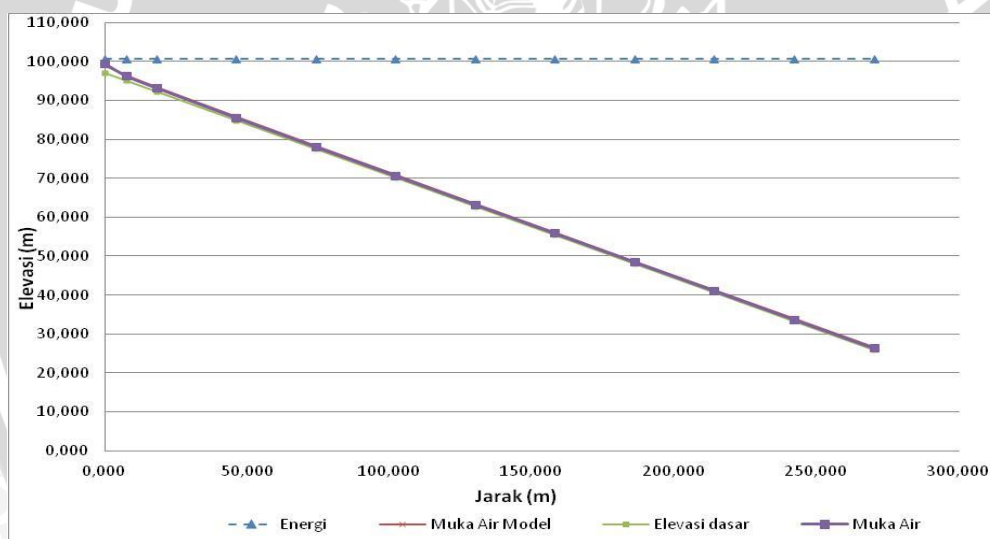
Gambar 4.21. Profil Muka Air Saluran Peluncur Q_{100}

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.21 Perhitungan Kesalahan Relatif pada Saluran Peluncur Debit Q_{1000}

Section	Tinggi Muka Air (m)		Kecepatan (m)		KR (%)	
	Hitungan	Model	Hitungan	Model	Tinggi Muka Air	Kecepatan
13	2,447	1,620	4,899	3,692	33,79	24,64
14	1,298	1,095	9,234	6,223	15,66	32,61
15	0,994	0,960	12,060	9,321	3,43	22,71
16	0,697	0,840	17,200	15,234	20,52	11,43
17	0,570	0,720	21,045	18,074	26,40	14,12
18	0,494	0,720	24,269	21,431	45,76	11,69
19	0,442	0,720	27,102	24,271	6,28	10,45
20	0,404	0,630	29,662	27,111	5,59	8,60
21	0,374	0,570	32,016	27,860	5,22	12,98
22	0,350	0,660	34,206	31,242	8,83	8,67
23	0,331	0,810	36,263	33,566	14,50	7,44
24	0,314	0,780	38,203	35,890	14,86	6,06

Sumber: Pengukuran dan Perhitungan

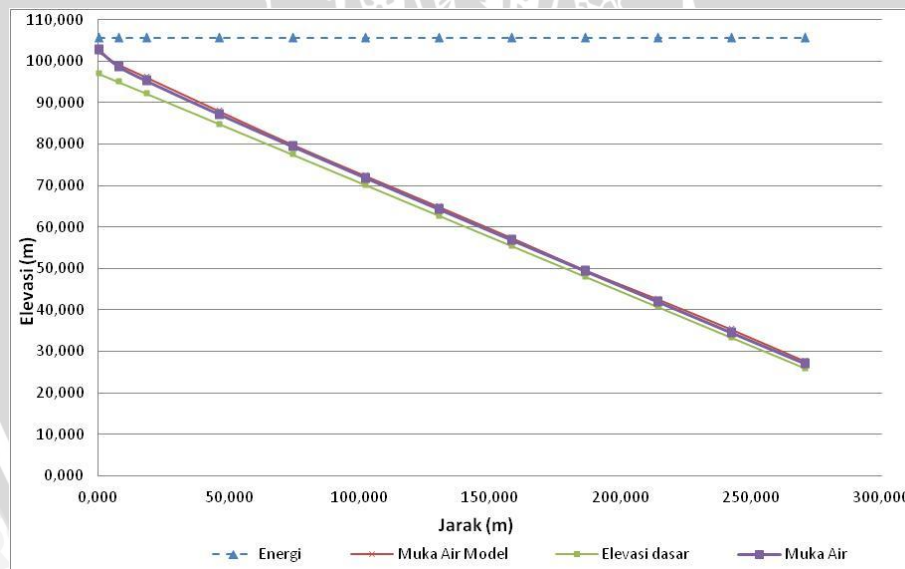
Gambar 4.22. Profil Muka Air Saluran Peluncur Q_{1000}

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.22 Perhitungan Kesalahan Relatif pada Saluran Peluncur Debit Q_{PMF}

Section	Tinggi Muka Air (m)		Kecepatan (m)		KR (%)	
	Hitungan	Model	Hitungan	Model	Tinggi Muka Air	Kecepatan
13	5,749	5,310	7,510	6,416	7,64	14,56
14	3,716	4,270	11,620	10,586	14,92	8,90
15	3,033	3,970	14,235	11,361	30,89	20,19
16	2,269	3,150	19,031	16,008	38,85	15,88
17	1,905	2,450	22,669	20,656	28,64	8,88
18	1,677	2,260	25,747	24,271	34,77	5,74
19	1,516	2,200	28,472	26,724	45,08	6,14
20	1,395	2,030	30,945	29,693	45,50	4,05
21	1,299	1,650	33,227	32,533	26,98	2,09
22	1,221	1,970	35,357	33,308	61,33	5,80
23	1,156	2,090	37,363	35,373	80,87	5,33
24	1,100	1,810	39,259	35,373	64,58	9,90

Sumber: Pengukuran dan Perhitungan



Gambar 4.23. Profil Muka Air Saluran Peluncur Q_{PMF}
Sumber: Hasil Perhitungan

4.8. Analisa Hidraulika Menggunakan Aplikasi *Surface Water Modeling System*

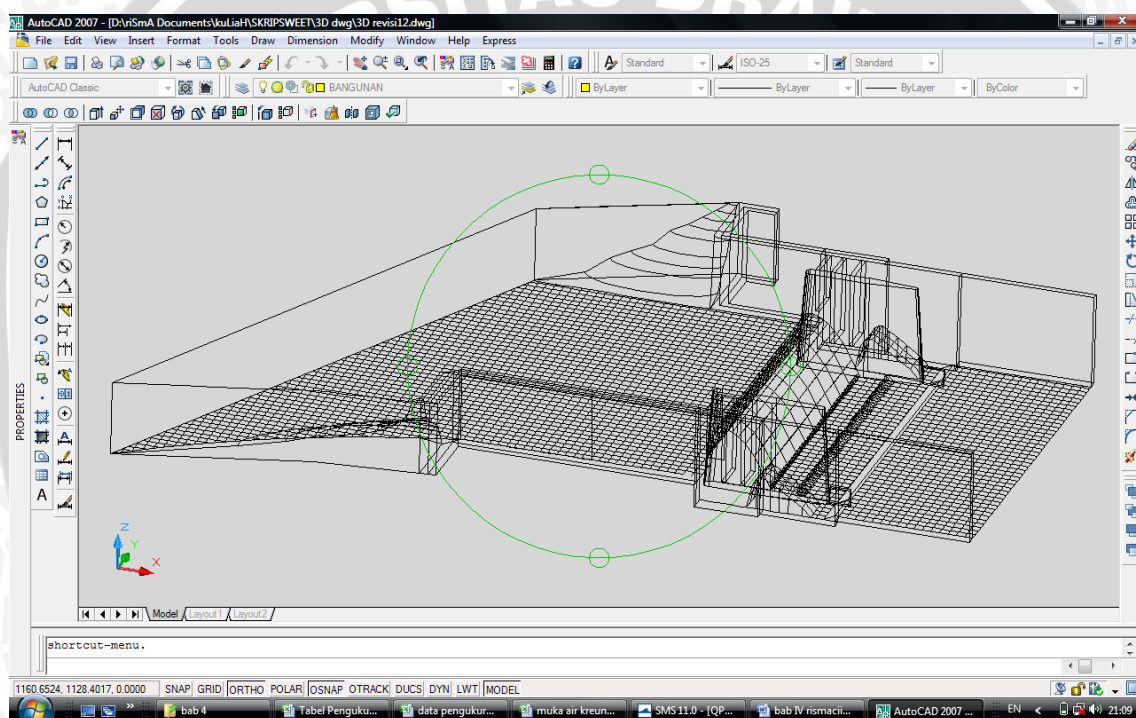
4.8.1. Umum

Surface Water Modeling System (SMS) merupakan induk dari beberapa program aplikasi numerik seperti *Adaptive Hydraulic* (ADH), *Finite Element Surface Water Modeling System* (FESWMS), ataupun RMA2 WES. Program-program ini merupakan *software* yang dapat membantu untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang

hidraulik khususnya untuk menganalisa pola kecepatan, kontur aliran, dan tinggi muka air dari suatu sungai atau saluran terbuka melalui metode numerik sehingga lebih efisien dan efektif.

4.8.2. Menjalankan Program SMS

Dalam menjalankan program SMS, diperlukan *input* data berupa penampang sungai atau saluran terbuka yang telah di beri *grid* agar mudah menjalankan analisa metode numerik. Dalam membentuk jaringan *grid*, sebaiknya *grid* memiliki sisi-sisi yang sama panjang, karena dapat mempengaruhi perhitungan dalam analisa numerik. Program SMS dapat dijalankan dalam bentuk *file* .dxf yang merupakan konversi gambar tiga dimensi dari program *AutoCad* yang berbentuk *file* .dwg seperti berikut ini:

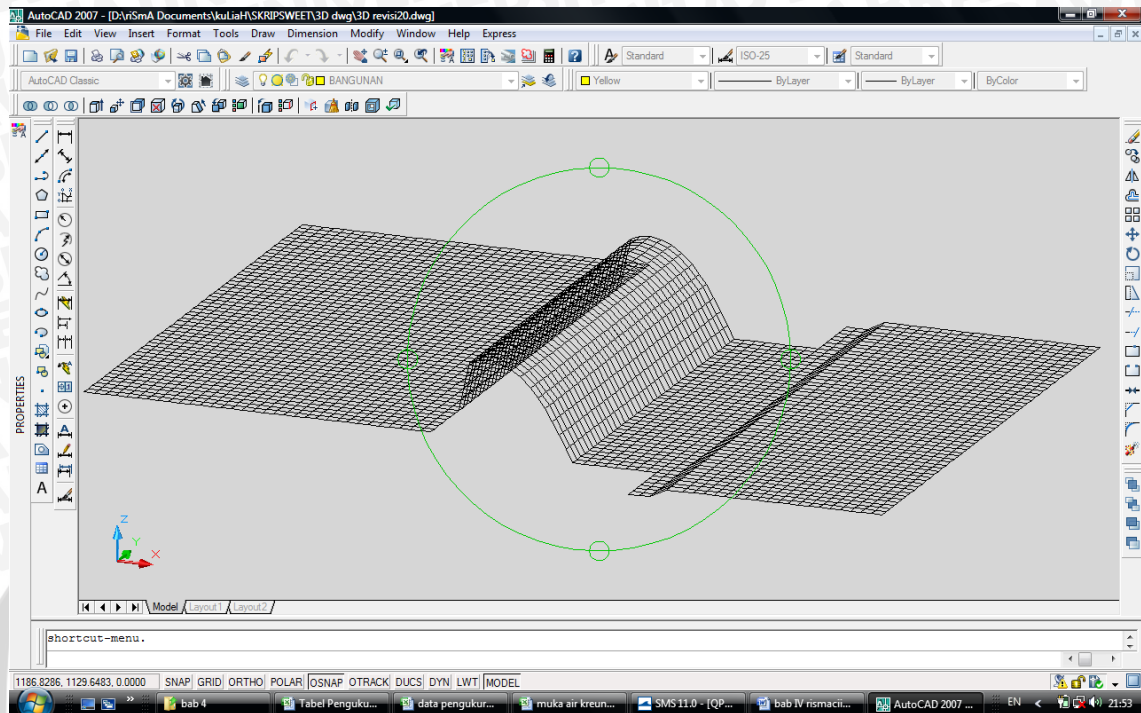


Gambar 4.24. Tampilan *Input* Awal SMS

Pada mulanya, program SMS akan dijalankan dengan *input* seperti pada Gambar 4.14. akan tetapi, karena keterbatasan analisa numerik yang dapat dilakukan oleh program SMS, maka *input* penampang dipersempit ruang lingkungnya. Hal-hal yang disederhanakan dalam pemodelan pelimpah adalah:

- Pintu dalam keadaan tertutup
- Saluran pengarah hulu diambil pada kondisi dimana kecepatan aliran sudah terdistribusi merata ke arah horisontal
- Peredam energi bagian hilir ambang pelimpah disederhanakan karena saat membentuk jaringan *mesh*, program SMS memiliki keterbatasan.

Meninjau kendala-kendala yang ada, maka *input* data analisa numerik menjadi lebih sederhana seperti tampak pada gambar berikut ini:

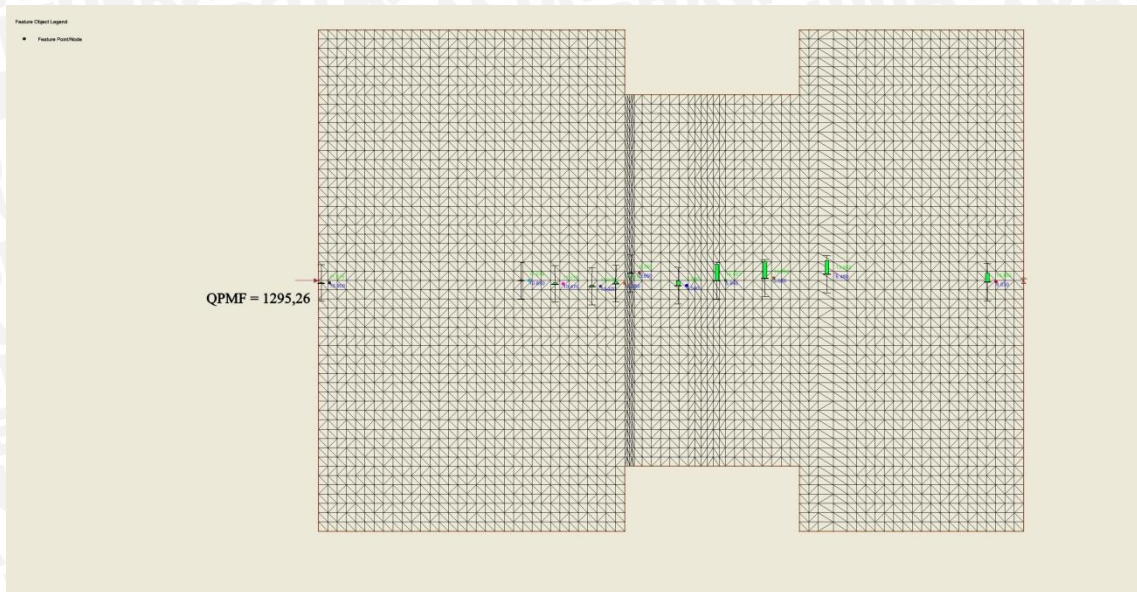


Gambar 4.25. Tampilan *Input* Setelah Disederhanakan.



Gambar 4.26. Tampilan *Input* Data SMS dalam bentuk .dxf.

Langkah selanjutnya adalah mengubah tampilan *input scatter* menjadi *mesh module* yang berupa *elements linear* seperti pada gambar 4.17 berikut,



Gambar 4.27. Tampilan *mesh module*.

Jika *file* sudah berbentuk jaringan *mesh*, langkah selanjutnya adalah memasukkan data-data seperti debit rancangan pada penampang bagian hulu dan elevasi saluran bagian hilir. Selanjutnya adalah me-*running* program ADH.

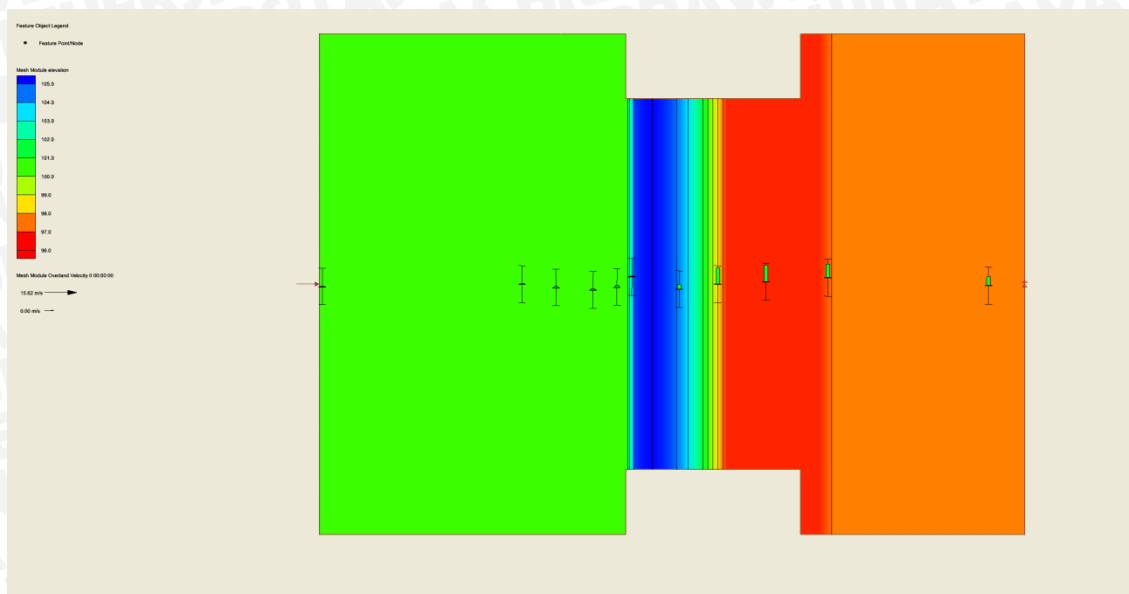
Pada studi ini, *running* program hanya dilakukan pada kondisi Q_{PMF} yang disimulasikan, karena pada debit Q_{PMF} tersebut aliran pada ambang pelimpah relatif tenggelam (*submerged*) sehingga disimulasikan gradien energi hulu dan hilir tidak tinggi.

Untuk model numerik 2DH yang ada pada SMS (RMA2, FESWMS, ADH, dll) memiliki keterbatasan bahwa *slope*/ gradien hidraulik maksimum $\leq 30\%$. Bila dipaksakan pada kondisi tersebut, maka program masih akan berjalan tetapi hasil/*output*nya kacau (*erratic*), dan tidak akan stabil secara numerik. Sehingga untuk debit-debit rendah Q_2 , Q_{100} , dan Q_{1000} tidak dapat dimodelkan.

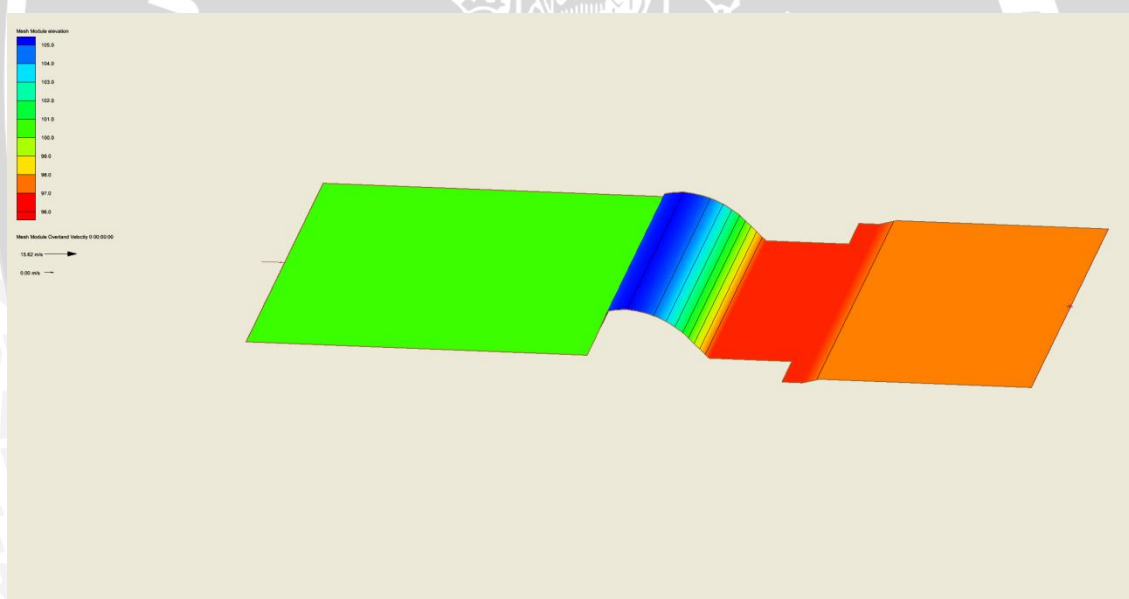
4.8.3. Hasil Keluaran/*Output* Program

Hasil *output* program ADH terdiri dari gambar-gambar penampakan dua dan tiga dimensi dan data-data yang ditampilkan pada gambar 4.18 – 4.

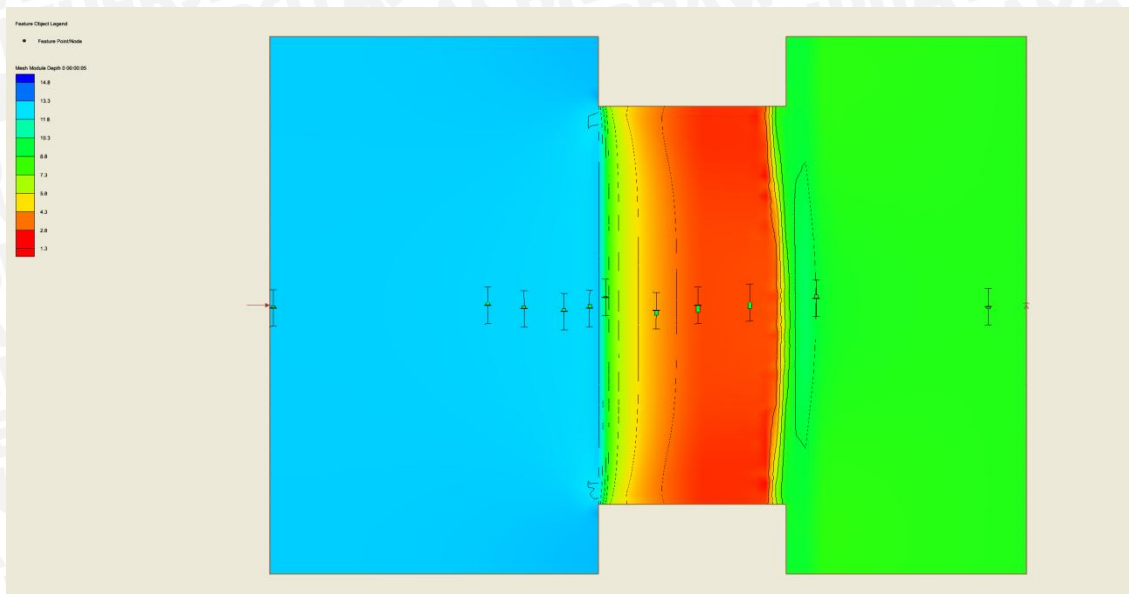
Hasil *running* ADH dengan *input* Q_{PMF} , adalah sebagai berikut:



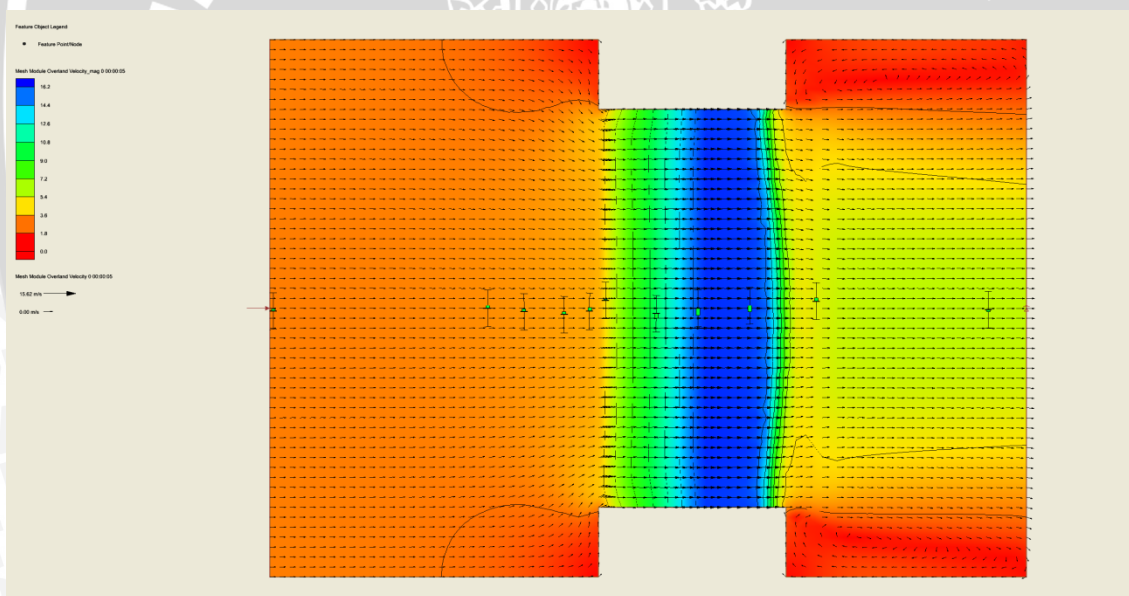
Gambar 4.28. Tampilan Awal Elevasi Dua Dimensi Pelimpah dan Saluran Transisi pada saat $Q_{PMF} = 1295,26$ meter³/detik



Gambar 4.29. Tampilan Awal Elevasi Tiga Dimensi Pelimpah dan Saluran Transisi pada saat $Q_{PMF} = 1295,26$ meter³/detik



Gambar 4.30. Tampilan Dua Dimensi Tinggi Muka Air pada saat $Q_{PMF} = 1295,26$ meter³/detik



Gambar 4.32. Tampilan Dua Dimensi Kecepatan dan Arah Aliran pada saat $Q_{PMF} = 1295,26$ meter³/detik

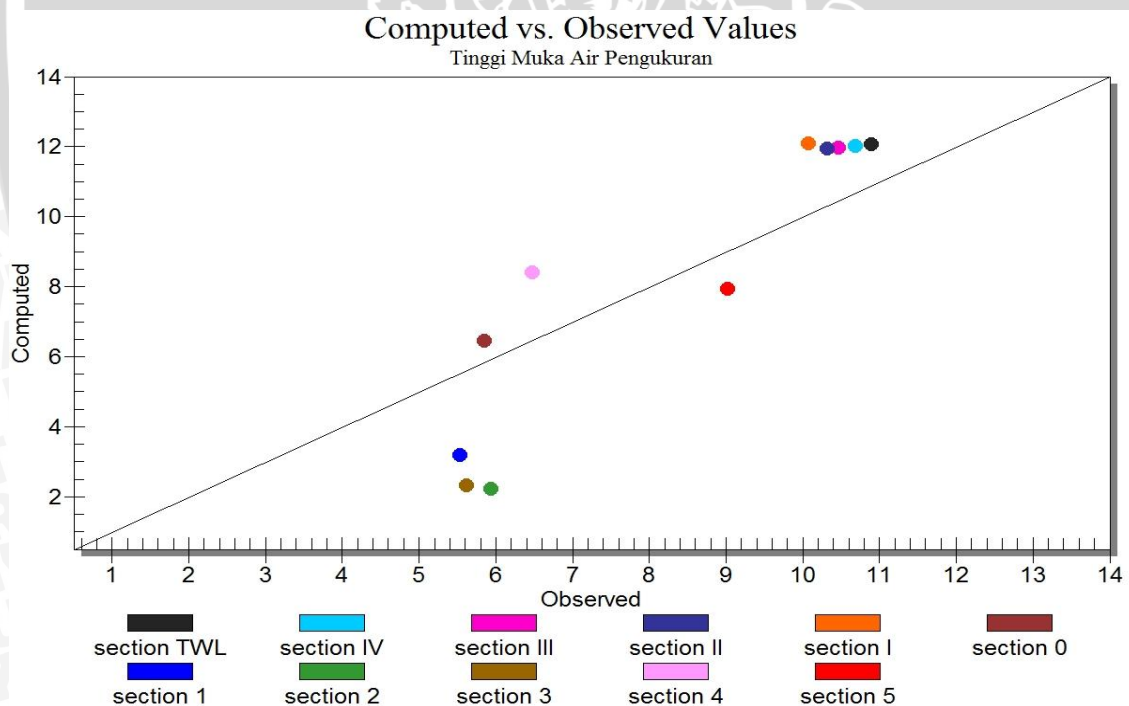
4.8.4. Hasil Analisa Numerik

Berikut ini merupakan perbandingan hasil analisa numerik, perhitungan toeritik, dan hasil pengukuran. Sehingga diperoleh kesalahan relatif untuk masing-masing titik yang ditinjau berikut ini:

Tabel 4.23. Perbandingan Tinggi Muka Air Hasil Analisa Numerik dan Hasil Pengukuran.

No.	Section	Tinggi Muka Air		Kr
		Pengukuran	ADH	
		(m)	(m)	(%)
1	HWL	10,90	12,06	10,63
2	IV	10,69	12,00	12,25
3	III	10,47	11,97	14,32
4	II	10,32	11,93	15,57
5	I	10,08	12,09	19,96
6	0	5,85	6,45	10,27
7	1	5,54	3,17	42,71
8	2	5,94	2,23	62,51
9	3	5,62	2,32	58,81
10	4	6,48	8,40	29,65
11	5	9,03	7,93	12,14

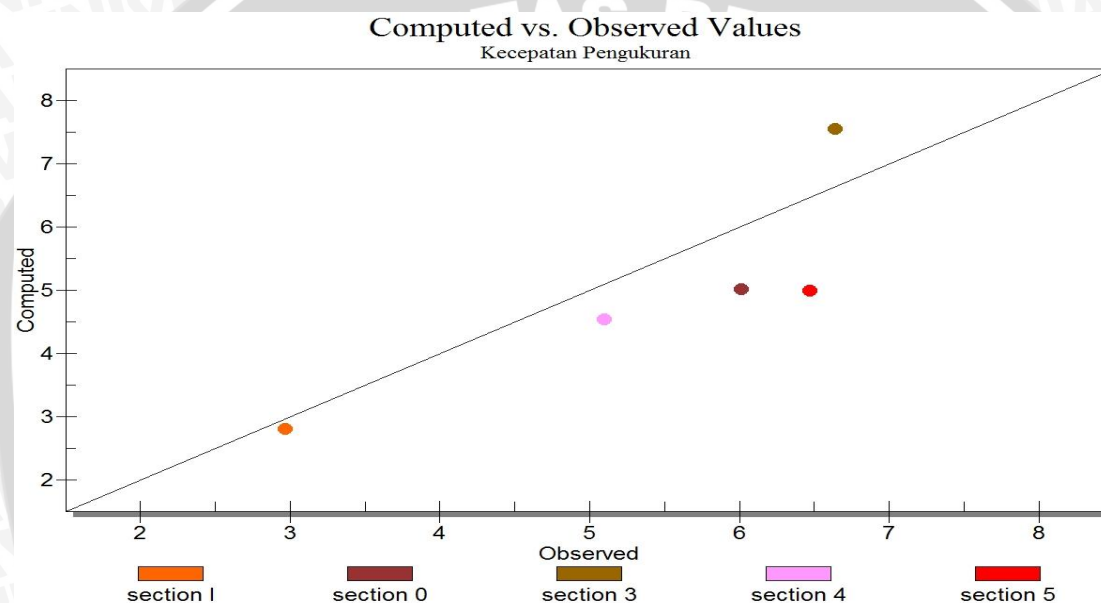
Sumber: Pengukuran dan *Running Model*



Gambar 4.33. Grafik Perbandingan Tinggi Muka Air Analisa Numerik dan Pengukuran
Sumber: Pengukuran dan *Running Model*

Tabel 4.24. Perbandingan Kecepatan Hasil Analisa Numerik dan Hasil Pengukuran.

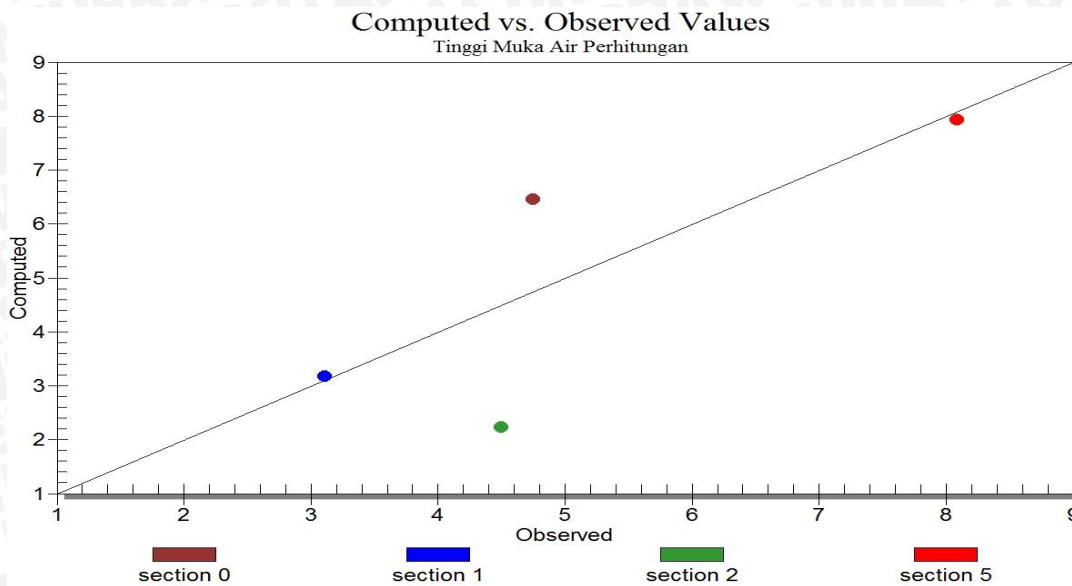
No.	Section	Kecepatan		Kr
		Pengukuran	ADH	
		(m)	(m)	(%)
1	I	2,97	2,80	5,69
2	0	6,01	5,01	16,75
3	3	6,64	7,54	13,52
4	4	5,10	4,53	11,22
5	5	6,47	4,98	22,97

Sumber: Pengukuran dan *Running Model*Gambar 4.34. Grafik Perbandingan Kecepatan Analisa Numerik dan Pengukuran
Sumber: Pengukuran dan *Running Model*

Tabel 4.25. Perbandingan Tinggi Muka Air Hasil Analisa Numerik dan Hasil Perhitungan.

No.	Section	Tinggi Muka Air		Kr
		Perhitungan	ADH	
		(m)	(m)	(%)
1	0	4,75	6,45	35,81
2	1	3,11	3,17	2,06
3	2	4,50	2,23	50,51
4	5	8,09	7,93	1,92

Sumber: Pengukuran dan *Running Model*

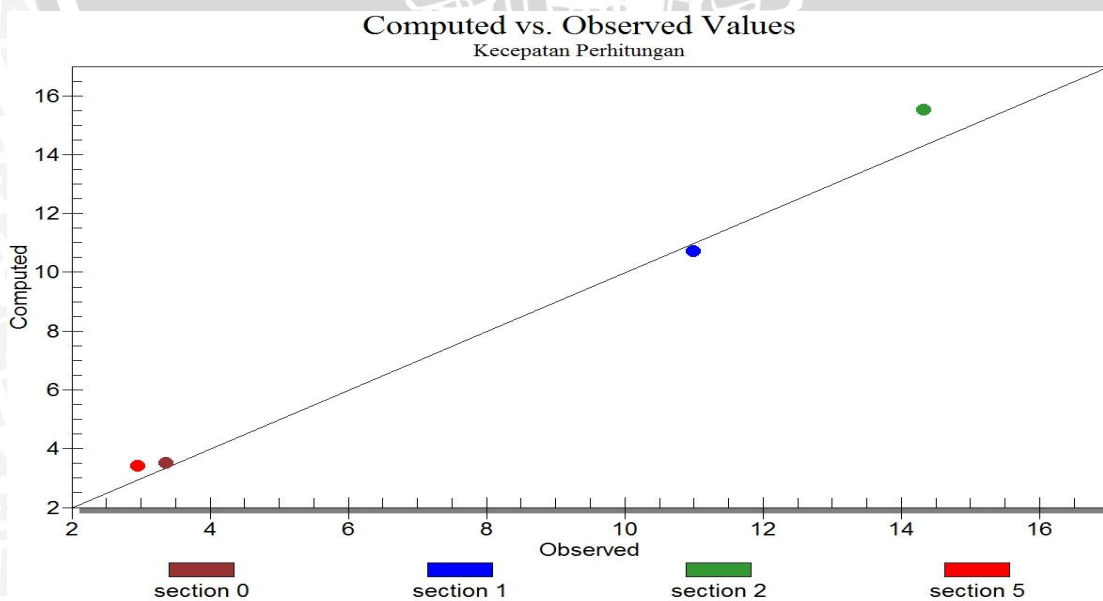


Gambar 4.35. Grafik Perbandingan Tinggi Muka Air Analisa Numerik dan Perhitungan
 Sumber: Pengukuran dan *Running Model*

Tabel 4.26. Perbandingan Kecepatan Hasil Analisa Numerik dan Hasil Perhitungan.

No.	Section	Tinggi Muka Air		Kr
		Perhitungan	ADH	
		(m)	(m)	(%)
1	0	3,36	5,01	48,94
2	1	11,00	10,71	2,62
3	2	14,33	15,52	8,30
4	5	2,97	4,98	68,09

Sumber: Pengukuran dan *Running Model*



Gambar 4.36. Grafik Perbandingan Kecepatan Analisa Numerik dan Perhitungan
 Sumber: Pengukuran dan *Running Model*

