

BAB III

STUDI PUSTAKA

3.1 Tinjauan Umum

Embung merupakan bangunan air, yang dalam perencanaannya diperlukan berbagai bidang ilmu pengetahuan yang saling mendukung demi kesempurnaan hasil perencanaan. Bidang ilmu pengetahuan itu antara lain geologi, hidrologi, hidrolika dan mekanika tanah.

Untuk menunjang proses perencanaan embung, maka berbagai teori dan rumus-rumus dari berbagai studi pustaka sangatlah diperlukan, untuk menentukan spesifikasi-spesifikasi yang akan menjadi acuan dalam perencanaan pekerjaan konstruksi tersebut. Dalam tinjauan pustaka ini juga dipaparkan secara singkat mengenai :

- Analisis Hidrologi (curah hujan, debit banjir, debit andalan, analisis sedimen dan kebutuhan air)
- Perencanaan Embung
- Stabilitas Embung

3.2 Analisis Hidrologi

Maksud dari analisis data hidrologi ini dimaksudkan, untuk mengetahui karakteristik hidrologi daerah pengaliran Embung Logung yang akan digunakan sebagai dasar analisis dalam pekerjaan detail desain.

Analisis hidrologi meliputi :

- a. Analisis curah hujan harian maksimum
 - Curah hujan area
 - Analisis curah hujan rencana
- b. Analisis debit banjir rencana
- c. Analisis intensitas curah hujan
- d. Analisis debit andalan (F. J. Mock)
- e. Analisis sedimen (USLE)
- f. Analisis kebutuhan air

3.2.1 Analisis Curah Hujan Harian Maksimum

a. Curah Hujan Area

Curah hujan yang diperlukan untuk acuan dalam perencanaan bangunan air adalah curah hujan rata-rata di seluruh daerah yang bersangkutan, bukan curah hujan pada suatu titik tertentu (*point rainfall*). Curah hujan wilayah ini dapat diperhitungkan dengan beberapa cara, antara lain :

– Metode rata-rata aljabar

Cara ini adalah perhitungan rata-rata secara aljabar curah hujan di dalam dan di sekitar daerah yang bersangkutan.

$$\bar{R} = 1/n (R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$

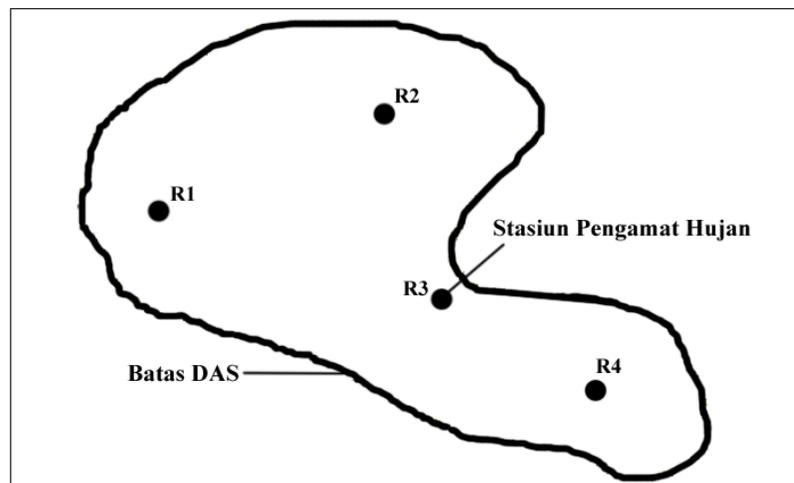
di mana :

\bar{R} = curah hujan daerah (mm)

n = jumlah titik-titik (pos-pos) pengamatan

R_1, R_2, \dots, R_n = curah hujan di tiap titik pengamatan

Hasil yang diperoleh dengan cara ini tidak berbeda jauh dari hasil yang didapat dengan cara lain, jika titik pengamatan itu banyak dan tersebar merata di seluruh daerah.



Gambar 3.1. Gambar Sketsa Perhitungan dengan Metode Rata-rata Aljabar

– **Metode Thiessen**

Jika titik-titik pengamatan di dalam daerah tidak tersebar merata, maka cara perhitungan curah hujan rata-rata dilakukan dengan memperhitungkan daerah pengaruh tiap titik pengamatan. Curah hujan daerah itu dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\bar{R} = \frac{A_1 R_1 + A_2 R_2 + \dots + A_n R_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

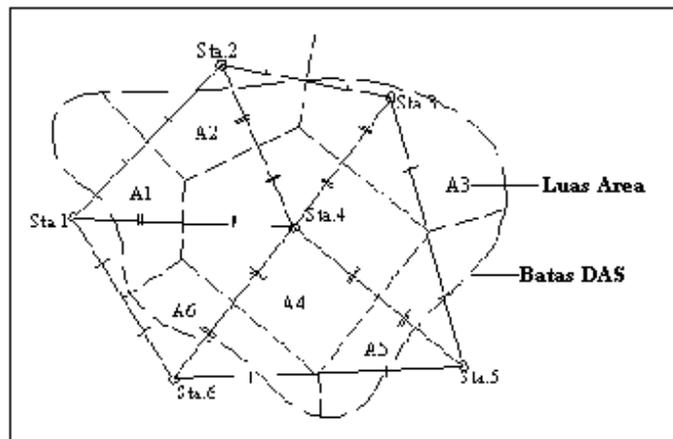
di mana :

\bar{R} = Curah hujan maksimum rata-rata (mm)

R_1, R_2, \dots, R_n = Curah hujan pada stasiun 1, 2, ..., n (mm)

A_1, A_2, \dots, A_n = Luas daerah pada *polygon* 1, 2, ..., n (Km²)

Hal yang perlu diperhatikan dalam Metode *Thiessen* ini adalah stasiun pengamatan minimal tiga stasiun dan penambahan stasiun akan merubah seluruh jaringan.



Gambar 3.2. Gambar Sketsa Perhitungan dengan Metode *Thiessen*

– **Metode Isohyet**

Dengan cara ini, kita dapat menggambar terlebih dahulu kontur tinggi hujan yang sama (*isohyet*). Kemudian luas bagian diantara *isohyet-isohyet* yang berdekatan diukur, dan nilai rata-rata dihitung sebagai nilai rata-rata timbang nilai kontur, kemudian dikalikan dengan masing-masing luasnya. Hasilnya dijumlahkan dan dibagi dengan luas total daerah, maka akan didapat curah hujan areal yang dicari.

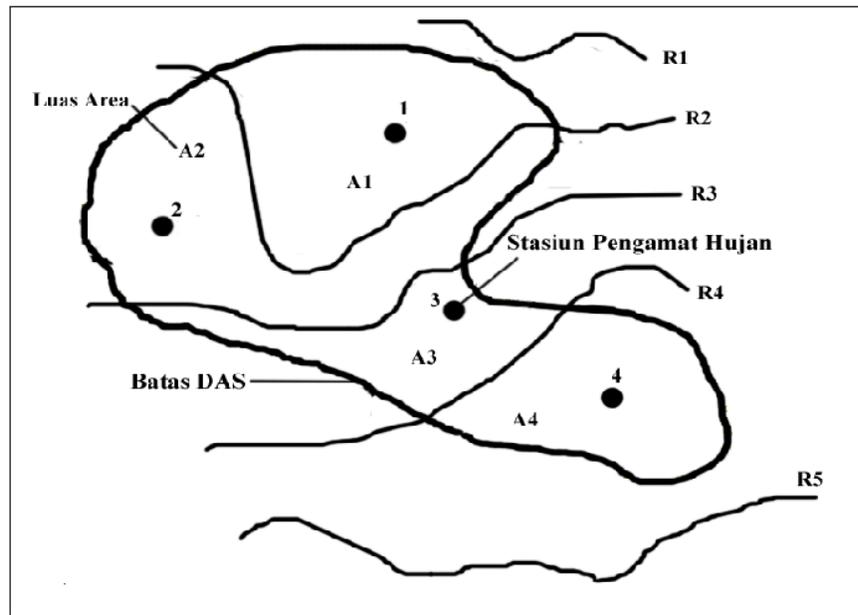
$$\bar{R} = \frac{\frac{R_1 + R_2}{2} A_1 + \frac{R_2 + R_3}{2} A_2 + \dots + \frac{R_n + R_{n-1}}{2} A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

di mana :

\bar{R} = Curah hujan rata-rata (mm)

R_1, R_2, \dots, R_n = Curah hujan stasiun 1, 2, ..., n (mm)

A_1, A_2, \dots, A_n = Luas bagian yang dibatasi oleh *isohyet-isohyet* (Km²)



Gambar 3.3. Gambar Sketsa Perhitungan dengan Metode *Isohyet*

b. Curah Hujan Rencana

Dari curah hujan rata-rata dari berbagai stasiun yang ada di daerah aliran sungai, selanjutnya dianalisis secara statistik untuk mendapatkan pola sebaran data curah hujan yang sesuai dengan pola sebaran data curah hujan rata-rata. Untuk meramal curah hujan rencana dilakukan dengan analisis frekuensi data hujan. Ada beberapa metode analisis frekuensi yang dapat digunakan yaitu :

– Metode Gumbel Tipe I

Untuk menghitung curah hujan rencana dengan metode distribusi Gumbel Tipe I digunakan persamaan distribusi frekuensi empiris sebagai berikut (Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisis Data, Soewarno, 1995) :

$$X_T = \bar{X} + \frac{S}{Sn}(Y_T - Y_n)$$

di mana :

X_T = nilai variat yang diharapkan terjadi.

\bar{X} = nilai rata-rata hitung variat

S = standar deviasi (simpangan baku)

$$= \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Y_T = nilai reduksi variat dari variabel yang diharapkan terjadi pada periode ulang tertentu hubungan antara periode ulang T dengan Y_T dapat dihitung dengan rumus :

$$Y_T = -\ln \left[-\ln \frac{T-1}{T} \right]; \text{ untuk } T \geq 20, \text{ maka } Y = \ln T$$

Y_n = nilai rata-rata dari reduksi variat (*mean of reduce variate*) nilainya tergantung dari jumlah data (n)

S_n = deviasi standar dari reduksi variat (*mean of reduced variate*) nilainya tergantung dari jumlah data (n)

Tabel 3.1. Tabel *Reduced mean* (Y_n)

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,4952	0,4996	0,5035	0,5070	0,5100	0,5128	0,5157	0,5181	0,5202	0,5220
20	0,5236	0,5252	0,5268	0,5283	0,5296	0,5300	0,5820	0,5882	0,5343	0,5353
30	0,5363	0,5371	0,5380	0,5388	0,5396	0,5400	0,5410	0,5418	0,5424	0,5430
40	0,5463	0,5442	0,5448	0,5453	0,5458	0,5468	0,5468	0,5473	0,5477	0,5481
50	0,5485	0,5489	0,5493	0,5497	0,5501	0,5504	0,5508	0,5511	0,5515	0,5518
60	0,5521	0,5524	0,5527	0,5530	0,5533	0,5535	0,5538	0,5540	0,5543	0,5545
70	0,5548	0,5550	0,5552	0,5555	0,5557	0,5559	0,5561	0,5563	0,5565	0,5567
80	0,5569	0,5570	0,5572	0,5574	0,5576	0,5578	0,5580	0,5581	0,5583	0,5585
90	0,5586	0,5587	0,5589	0,5591	0,5592	0,5593	0,5595	0,5596	0,5598	0,5599
100	0,5600									

Sumber : Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisis Data, Soewarno, 1995

Tabel 3.2. Tabel *Reduced Standard Deviation* (S_n)

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,9496	0,9676	0,9833	0,9971	10,095	10,206	10,316	10,411	10,493	10,565
20	10,628	10,696	10,754	10,811	10,864	10,915	10,961	11,004	11,047	11,080
30	11,124	11,159	11,193	11,226	11,255	11,285	11,313	11,339	11,363	11,388
40	11,413	11,436	11,458	11,480	11,499	11,519	11,538	11,557	11,574	11,590
50	11,607	11,623	11,638	11,658	11,667	11,681	11,696	11,708	11,721	11,734
60	11,747	11,759	11,770	11,782	11,793	11,803	11,814	11,824	11,834	11,844
70	11,854	11,863	11,873	11,881	11,890	11,898	11,906	11,915	11,923	11,930
80	11,938	11,945	11,953	11,959	11,967	11,973	11,980	11,987	11,994	12,001
90	12,007	12,013	12,026	12,032	12,038	12,044	12,046	12,049	12,055	12,060
100	12,065									

Sumber : Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisis Data, Soewarno, 1995

Tabel 3.3. Tabel *Reduced Variate* (Y_t)

Periode Ulang	<i>Reduced Variate</i> (Y_t)
2	0,3665
5	14,999
10	22,502
20	29,606
25	31,985
50	39,019
100	46,001
200	52,960
500	62,140
1000	69,190
5000	85,390
10000	99,210

Sumber : Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisis Data, Soewarno, 1995

– **Metode Distribusi Log Pearson III**

Metode Log Pearson III apabila digambarkan pada kertas peluang logaritma akan merupakan persamaan garis lurus, sehingga dapat dinyatakan sebagai model matematik dengan persamaan sebagai berikut (Soewarno, 1995) :

$$Y = \bar{Y} + k.S$$

di mana :

X = curah hujan

Y = nilai logaritma dari X atau log X

\bar{Y} = rata-rata hitung (lebih baik rata-rata geometrik) nilai Y

S = deviasi standar nilai Y

k = karakteristik distribusi peluang log-pearson tipe III (dapat dilihat pada Tabel 3.4)

Langkah-langkah perhitungan kurva distribusi Log Pearson Tipe III adalah sebagai berikut :

- Menentukan logaritma dari semua nilai variat X
- Menghitung nilai rata-ratanya :

$$\overline{\log(X)} = \frac{\sum \log(X)}{n}$$

- Menghitung nilai deviasi standarnya dari log X :

$$S \log(X) = \sqrt{\frac{\sum (\log(X) - \overline{\log(X)})^2}{n-1}}$$

- Menghitung nilai koefisien kemencengan (CS) :

$$CS = \frac{n \sum (\log(X) - \overline{\log(X)})^3}{(n-1)(n-2)(S \log(X))^3}$$

sehingga persamaannya dapat ditulis :

$$\log X = \overline{\log(X)} + k(S \log(X))$$

- Menentukan anti log dari log X, untuk mendapatkan nilai X yang diharapkan terjadi pada tingkat peluang atau periode ulang tertentu sesuai dengan nilai CS-nya. Nilai k dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Tabel Harga k Untuk Distribusi Log Pearson III

Kemencengan (CS)	Periode Ulang (tahun)							
	2	5	10	25	50	100	200	1000
	Peluang (%)							
	50	20	10	4	2	1	0,5	0,1
3,0	-0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051	4,970	7,250
2,5	-0,360	0,518	1,250	2,262	3,048	3,845	4,652	6,600
2,2	-0,330	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705	4,444	6,200
2,0	-0,307	0,609	1,302	2,219	2,912	3,605	4,298	5,910
1,8	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499	4,147	5,660
1,6	-0,254	0,675	1,329	2,163	2,780	3,388	3,990	5,390
1,4	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271	3,828	5,110
1,2	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149	3,661	4,820
1,0	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022	3,489	4,540
0,9	-0,148	0,769	1,339	2,018	2,498	2,957	3,401	4,395
0,8	-0,132	0,780	1,336	1,998	2,453	2,891	3,312	4,250
0,7	-0,116	0,790	1,333	1,967	2,407	2,824	3,223	4,105
0,6	0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755	3,132	3,960
0,5	-0,083	0,808	1,323	1,910	2,311	2,686	3,041	3,815
0,4	-0,066	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615	2,949	3,670
0,3	-0,050	0,824	1,309	1,849	2,211	2,544	2,856	3,525
0,2	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472	2,763	3,380
0,1	-0,017	0,836	1,292	1,785	2,107	2,400	2,670	3,235
0,0	0,000	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326	2,576	3,090
-0,1	0,017	0,836	1,270	1,761	2,000	2,252	2,482	3,950
-0,2	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178	2,388	2,810
-0,3	0,050	0,853	1,245	1,643	1,890	2,104	2,294	2,675
-0,4	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029	2,201	2,540
-0,5	0,083	0,856	1,216	1,567	1,777	1,955	2,108	2,400
-0,6	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880	2,016	2,275
-0,7	0,116	0,857	1,183	1,488	1,663	1,806	1,926	2,150
-0,8	0,132	0,856	1,166	1,488	1,606	1,733	1,837	2,035
-0,9	0,148	0,854	1,147	1,407	1,549	1,660	1,749	1,910
-1,0	0,164	0,852	1,128	1,366	1,492	1,588	1,664	1,800
-1,2	0,195	0,844	1,086	1,282	1,379	1,449	1,501	1,625
-1,4	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318	1,351	1,465
-1,6	0,254	0,817	0,994	1,116	1,166	1,200	1,216	1,280
-1,8	0,282	0,799	0,945	1,035	1,069	1,089	1,097	1,130
-2,0	0,307	0,777	0,895	0,959	0,980	0,990	1,995	1,000
-2,2	0,330	0,752	0,844	0,888	0,900	0,905	0,907	0,910
-2,5	0,360	0,711	0,771	0,793	0,798	0,799	0,800	0,802
-3,0	0,396	0,636	0,660	0,666	0,666	0,667	0,667	0,668

Sumber : Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisis Data, Soewarno, 1995

– **Metode Log Normal**

Metode Log Normal apabila digambarkan pada kertas peluang logaritma akan merupakan persamaan garis lurus, sehingga dapat dinyatakan sebagai model matematik dengan persamaan sebagai berikut (Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisis Data, Soewarno, 1995) :

$$X = \bar{X} + k.S$$

di mana :

X = nilai yang diharapkan akan terjadi pada periode ulang tertentu.

\bar{X} = nilai rata-rata kejadian dari variabel kontinyu X

S = deviasi standar variabel kontinyu X.

k = karakteristik distribusi peluang log-normal 3 parameter yang merupakan fungsi dari koefisien kemencengan CS (lihat Tabel 3.5)

Tabel 3.5. Tabel Faktor Frekuensi k Untuk Distribusi Log Normal

Koefisien Kemencengan (CS)	Peluang kumulatif (%)					
	50	80	90	95	98	99
	Periode Ulang (tahun)					
	2	5	10	20	50	100
-2,00	0,2366	-0,6144	-12,437	-18,916	-27,943	-35,196
-1,80	0,2240	-0,6395	-12,621	-18,928	-27,578	-34,433
-1,60	0,2092	-0,6654	-12,792	-18,901	-27,138	-33,570
-1,40	0,1920	-0,6920	-12,943	-18,827	-26,615	-32,601
-1,20	0,1722	-0,7186	-13,067	-18,696	-26,002	-31,521
-1,00	0,1495	-0,7449	-13,156	-18,501	-25,294	-30,333
-0,80	0,1241	-0,7700	-13,201	-18,235	-24,492	-29,043
-0,60	0,0959	-0,7930	-0,3194	-17,894	-23,600	-27,665
-0,40	0,0654	-0,8131	-0,3128	-17,478	-22,631	-26,223
-0,20	0,0332	-0,8296	-0,3002	-16,993	-21,602	-24,745
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,20	-0,0332	0,8996	0,3002	15,993	21,602	24,745
0,40	-0,0654	0,8131	0,3128	17,478	22,631	26,223
0,60	-0,0959	0,7930	0,3194	17,894	23,600	27,665
0,80	-0,1241	0,7700	13,201	18,235	24,492	29,043
1,00	-0,1495	0,7449	13,156	18,501	25,294	30,333
1,20	-0,1722	0,7186	130,567	18,696	26,002	31,521
1,40	-0,1920	0,6920	12,943	18,827	26,615	32,601
1,60	-0,2092	0,6654	12,792	18,901	27,138	33,570
1,80	-0,2240	0,6395	12,621	18,928	27,578	34,433
2,00	-0,2366	0,6144	12,437	18,916	27,943	35,196

Sumber : Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisis Data, Soewarno, 1995

c. Uji Keselarasan Distribusi Data Curah Hujan

Uji keselarasan distribusi dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi peluang yang telah dipilih, dapat mewakili dari distribusi statistik sampel data yang dianalisis. Ada dua jenis keselarasan (*Goodnes of Fit Test*), yaitu uji keselarasan *Chi Square* dan *Smirnov Kolmogorof*. Pada tes ini biasanya yang diamati adalah nilai hasil perhitungan yang diharapkan.

– Uji keselarasan *Chi Square*

Prinsip pengujian dengan metode ini didasarkan pada jumlah pengamatan yang diharapkan pada pembagian kelas, dan ditentukan terhadap jumlah data pengamatan yang terbaca di dalam kelas tersebut, atau dengan membandingkan nilai *chi square* (X^2) dengan nilai *chi square* kritis (X^2_{cr}).

Rumus :

$$X^2 = \sum_{i=1}^G \frac{(Ef - Of)^2}{Ef}$$

di mana :

X^2 = Harga Chi-Kuadrat

G = Jumlah sub-kelompok

Of = Frekuensi yang terbaca pada kelas yang sama

Ef = Frekuensi yang diharapkan sesuai pembagian kelasnya.

Adapun prosedur pengujian chi-kuadrat adalah sebagai berikut :

- Urutkan data pengamatan dari yang terbesar ke yang terkecil atau sebaliknya
- Hitung jumlah kelas yang ada yaitu $Nc = 1 + 1,33 \ln(N)$
- Dalam pembagian kelas disarankan agar dalam masing-masing kelas terdapat minimal tiga buah data pengamatan.
- Tentukan derajat kebebasan $DK = G - P - 1$ (nilai P = 2 untuk distribusi normal dan binomial, untuk distribusi poisson dan Gumbel nilai P = 1)
- Hitung n
- Nilai EF = jumlah data (N) /Jumlah kelas
- Tentukan nilai Of untuk masing-masing kelas

- Jumlah G Sub-group $\frac{(Ef - Of)^2}{Ef}$ untuk menentukan nilai chi-kuadrat

- Didapat nilai X^2 , harus $< X^2$ CR

Dapat disimpulkan bahwa setelah diuji dengan Chi-kuadrat pemilihan jenis sebaran memenuhi syarat distribusi, maka curah hujan rencana dapat dihitung.

Adapun kriteria penilaian hasilnya adalah sebagai berikut :

- Apabila peluang lebih dari 5% maka persamaan distribusi teoritis yang digunakan dapat diterima.
- Apabila peluang lebih kecil dari 1% maka persamaan distribusi teoritis yang digunakan dapat diterima.
- Apabila peluang lebih kecil dari 1%-5%, maka tidak mungkin mengambil keputusan, perlu penambahan data.

– **Uji keselarasan *Smirnov Kolmogorof***

Pengujian kecocokan sebaran dengan metode ini dilakukan dengan membandingkan probabilitas untuk tiap variabel dari distribusi empiris dan teoritis didapat perbedaan (Δ) tertentu. Perbedaan maksimum yang dihitung (Δ_{maks}) dibandingkan dengan perbedaan kritis (Δ_{cr}) untuk suatu derajat nyata dan banyaknya variat tertentu, maka sebaran sesuai jika ($\Delta_{maks} < \Delta_{cr}$).

Rumus yang dipakai :

$$\alpha = \frac{P_{max} - P_{(xi)}}{P_{(x)} \Delta_{Cr}}$$

Tabel 3.6. Tabel Nilai Delta Maksimum Untuk Uji Keselarasan *Smirnov Kolmogorof*

N	α			
	0,20	0,10	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,30	0,34	0,40
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,20	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,20	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23
n>50	1,07/n	1,22/n	1,36/n	1,63/n

Sumber : Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisis Data, Soewarno, 1995

3.2.2 Intensitas Curah Hujan

Intensitas curah hujan adalah ketinggian curah hujan yang terjadi pada suatu kurun waktu di mana air tersebut berkonsentrasi. Analisis intensitas curah hujan ini dapat diproses dari data curah hujan yang telah terjadi pada masa lampau. Metode yang dipakai adalah menurut Dr. Mononobe adalah sebagai berikut (C.D. Soemarto, 1999) :

$$I = \frac{R_{24}}{24} * \left[\frac{24}{t} \right]^{2/3}$$

di mana :

I = Intensitas curah hujan (mm/jam)

R₂₄ = curah hujan maksimum dalam 24 jam (mm)

t = lamanya curah hujan (jam)

Waktu konsentrasi (*t_c*) didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan oleh limpasan untuk melalui jarak terjauh di daerah tadah hujan, yaitu dari suatu titik di hulu sampai ke titik tinjau paling hilir. Waktu konsentrasi dihitung dengan menggunakan rumus *Kirpich* dan rumus *Giandotti*, kemudian dua harga tersebut dirata-ratakan (Pedoman Kriteria Desain Embung , DPU, 1994).

Rumus *Kirpich* :

$$t_c = 0.945 \frac{L^{1.156}}{D^{0.385}}$$

di mana :

t_c = waktu konsentrasi (jam)

L = panjang sungai utama (km), kalau tidak ada sungai, pilih alur terpanjang di mana aliran permukaan mengalir

D = perbedaan tinggi antara lokasi embung dan titik tertinggi pada daerah tadah hujan (m)

Rumus *Giandotti* :

$$t_c = \frac{4 A^{1/2} + 1,5 L}{0,8 h^{1/2}}$$

di mana :

t_c = waktu konsentrasi (jam)

A = luas daerah tangkapan (km^2)

L = panjang sungai utama atau alur (km)

h = perbedaan antara tinggi rata-rata dari daerah tadah hujan dan ketinggian lokasi embung (m)

3.2.3 Analisis Debit Banjir Rencana

Metode yang digunakan untuk menghitung debit banjir rencana sebagai dasar perencanaan konstruksi embung adalah sebagai berikut :

a. Metode Rasional

Rumus yang dipakai :

$$Q_r = \frac{C \cdot I \cdot A}{3.6} = 0.278 \cdot C \cdot I \cdot A$$

di mana :

Q_r = debit maksimum rencana (m^3/det)

I = intensitas curah hujan selama konsentrasi (mm/jam)

A = luas daerah aliran (km²)

C = koefisien *run off*

b. Metode *Der Weduwen*

Rumus dari metode *Weduwen* adalah sebagai berikut (Loebis, 1980) :

$$Qt = \alpha \cdot \beta \cdot q_n A$$

di mana :

$$t = 0,25LQ^{-0,125}I^{-0,25}$$

$$\beta = \frac{120 + ((t+1)(t+9))A}{120 + A}$$

$$q_n = \frac{R_n}{240} \frac{67,65}{t + 1,45}$$

$$\alpha = 1 - \frac{4,1}{\beta q_n + 7}$$

di mana :

Qt = Debit banjir rencana (m³/det)

Rn = Curah hujan maksimum (mm/hari)

α = Koefisien pengaliran

β = Koefisien pengurangan daerah untuk curah hujan DAS

qn = Debit persatuan luas (m³/det.Km²)

t = Waktu konsentrasi (jam)

A = Luas daerah pengaliran (Km²)

L = Panjang sungai (Km)

I = Gradien sungai atau medan

Adapun syarat dalam perhitungan debit banjir dengan metode *Weduwen* adalah sebagai berikut :

A = Luas daerah pengaliran < 100 Km²

t = 1/6 sampai 12 jam

Langkah kerja perhitungan Metode *Weduwen* :

- Hitung A, L dan I dari peta garis tinggi DAS, substitusikan kedalam persamaan

- Buat harga perkiraan untuk Q_1 dan gunakan persamaan diatas untuk menghitung besarnya t , q_n , α dan β .
- Setelah besarnya t , q_n , α dan β didapat kemudian dilakukan iterasi perhitungan untuk Q_2 .
- Ulangi perhitungan sampai dengan $Q_n = Q_{n-1}$ atau mendekati nilai tersebut.

c. Metode *Haspers*

Untuk menghitung besarnya debit dengan metode *Haspers* digunakan persamaan sebagai berikut (Loebis, 1980) :

$$\text{Rumus } \textit{Haspers} : Q_t = \alpha \cdot \beta \cdot q_n A$$

di mana :

- Koefisien *Runoff* (α)

$$\alpha = \frac{1 + 0.012 f^{0.7}}{1 + 0.75 f^{0.7}}$$

- Koefisien Reduksi (β)

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{t + 3.7 \times 10^{-0.4t}}{t^2 + 15} \times \frac{F^{3/4}}{12}$$

- Waktu Konsentrasi (t)

$$t = 0.1 L^{0.8} I^{-0.3}$$

- Intensitas Hujan

- Untuk $t < 2$ jam

$$Rt = \frac{tR24}{t + 1 - 0.0008 * (260 - R24)(2 - t)^2}$$

- Untuk $2 \text{ jam} \leq t \leq 19$ jam

$$Rt = \frac{tR24}{t + 1}$$

- Untuk $19 \text{ jam} \leq t \leq 30$ jam

$$Rt = 0.707R24\sqrt{t + 1}$$

di mana t dalam jam dan $Rt, R24$ (mm)

- Hujan maksimum (q)

$$q_n = \frac{Rn}{3.6 * t} \quad \text{di mana } t \text{ dalam (jam), } q \text{ (m}^3\text{/km}^2\text{/sec)}$$

di mana :

Qt = Debit banjir rencana (m³/det)

Rn = Curah hujan maksimum (mm/hari)

qn = Debit per satuan luas (m³/det.Km²)

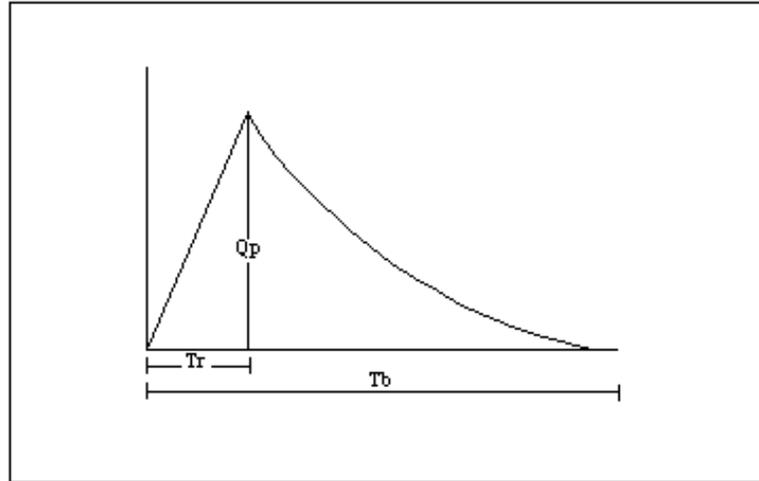
Adapun langkah-langkah dalam menghitung debit puncak adalah sebagai berikut :

1. Menentukan besarnya curah hujan sehari (Rh rencana) untuk periode ulang rencana yang dipilih.
2. Menentukan α , untuk daerah aliran sungai
3. Menghitung A, L ,I, F untuk daerah aliran sungai
4. Menghitung nilai t (waktu konsentrasi)
5. Menghitung β , Rt, qn dan $Qt = \alpha.\beta.qn.A$

d. Metode Analisis Hidrograf Satuan Sintetik Gamma I

Cara ini dipakai sebagai upaya untuk memperoleh *hidrograf* satuan suatu DAS yang belum pernah diukur. Dengan pengertian lain tidak tersedia data pengukuran debit maupun data AWLR (*Automatic Water Level Recorder*) pada suatu tempat tertentu dalam sebuah DAS (tidak ada stasiun hidrometer) (C.D. Soemarto, 1999). *Hidrograf* satuan sintetik secara sederhana dapat disajikan empat sifat dasarnya yang masing-masing disampaikan sebagai berikut :

- Waktu naik (*Time of Rise, TR*), yaitu waktu yang diukur dari saat *hidrograf* mulai naik sampai saat terjadinya debit puncak.
- Debit puncak (*Peak Discharge, Qp*).
- Waktu dasar (*Base Time, TB*), yaitu waktu yang diukur dari saat *hidrograf* mulai naik sampai berakhirnya limpasan langsung atau debit sama dengan nol.
- Koefisien tampungan (*Storage Coefficient*) yang menunjukkan kemampuan DAS dalam fungsinya sebagai tampungan air.



Gambar 3.4. Gambar Sketsa *Hidrograf* Satuan Sintetis (Soediby, 1993)

Sisi naik *hidrograf* satuan diperhitungkan sebagai garis lurus sedang sisi resesi (*recession limb*) *hidrograf* satuan disajikan dalam persamaan *exponensial* berikut:

$$Q_t = Q_p \cdot e^{-t/k}$$

di mana :

Q_t = debit yang diukur dalam jam ke-t sesudah debit puncak (m^3/det)

Q_p = debit puncak (m^3/det)

t = waktu yang diukur dari saat terjadinya debit puncak (jam)

k = koefisien tampungan (jam)

– Waktu capai puncak

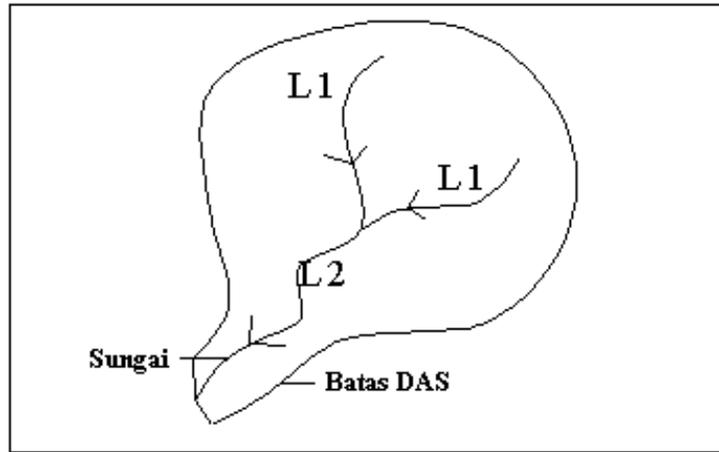
$$TR = 0,43 \left[\frac{L}{100.SF} \right]^3 + 1,06665.SIM + 1,2775$$

di mana :

TR = waktu naik

L = panjang sungai

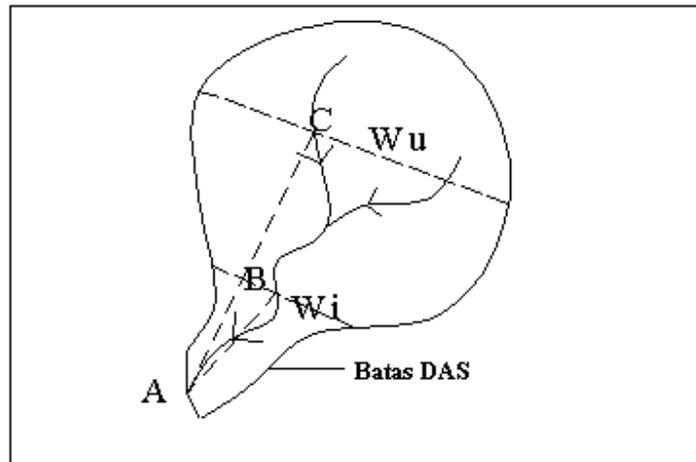
SF = faktor sumber yaitu perbandingan antara jumlah semua panjang sungai tingkat 1 dengan jumlah semua panjang sungai semua tingkat



Gambar 3.5. Gambar Sketsa Penetapan Panjang Dan Tingkat Sungai

$$SF = (L1+L1) / (L1+L1+L2)$$

SIM = faktor simetri ditetapkan sebagai hasil kali antara faktor lebar (WF) dengan luas relatif DAS sebelah hulu (RUA)



Gambar 3.6. Gambar Sketsa Penetapan WF

$$A-B = 0,25 L$$

$$A-C = 0,75 L$$

$$WF = Wu/Wi$$

– Debit puncak

$$Q_p = 0,1836.A^{0,5886}.T_R^{-0,0986}.JN^{0,2381}$$

di mana :

Q_p = debit puncak (m^3/det)

JN = jumlah pertemuan sungai

– Waktu dasar

$$TB = 27,4132.T_R^{0,1457} .S^{-0,0986} .SN^{0,7344} RUA^{0,2574}$$

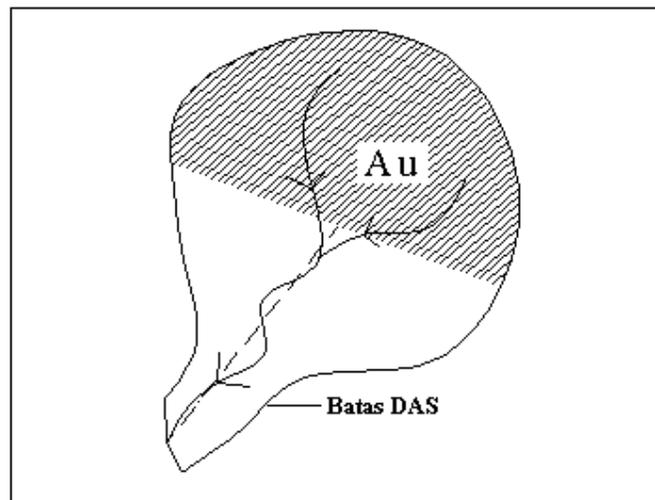
di mana :

TB = waktu dasar (jam)

S = landai sungai rata-rata

SN = frekuensi sumber yaitu perbandingan antara jumlah segmen sungai-sungai tingkat 1 dengan jumlah segmen sungai semua tingkat

RUA = perbandingan antara luas DAS yang diukur di hulu garis yang ditarik tegak lurus garis hubung antara stasiun pengukuran dengan titik yang paling dekat dengan titik berat DAS melewati titik tersebut dengan luas DAS total



Gambar 3.7. Gambar Sketsa Penetapan RUA

$$RUA = Au/A$$

– Φ indeks

Penetapan hujan efektif untuk memperoleh hidrograf dilakukan dengan menggunakan indeks-infiltrasi. Untuk memperoleh indeks ini agak sulit, untuk itu dipergunakan pendekatan dengan mengikuti petunjuk Barnes (1959). Perkiraan dilakukan dengan mempertimbangkan pengaruh parameter DAS

yang secara hidrologi dapat diketahui pengaruhnya terhadap indeks infiltrasi.

Persamaan pendekatannya adalah sebagai berikut :

$$\Phi = 10,4903 - 3,859 \times 10^{-6} \cdot A^2 + 1,6985 \times 10^{-13} (A/SN)^4$$

– Aliran dasar

Untuk memperkirakan aliran dasar digunakan persamaan pendekatan berikut ini. Persamaan ini merupakan pendekatan untuk aliran dasar yang tetap, dengan memperhatikan pendekatan Kraijenhoff Van Der Leur (1967) tentang *hidrograf* air tanah :

$$QB = 0,4751 \cdot A^{0,6444} \cdot D^{0,9430}$$

di mana :

QB = aliran dasar

A = luas DAS dalam km²

D = kerapatan jaringan kurus (*drainage density*)/indeks kerapatan sungai yaitu perbandingan jumlah panjang sungai semua tingkat dibagi dengan luas DAS

– Faktor tampungan

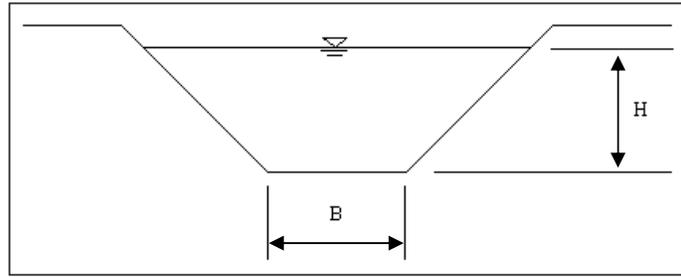
$$k = 0,5617 \cdot A^{0,1798} \cdot S^{-0,1446} \cdot SF^{-1,0897} \cdot D^{0,0452}$$

di mana :

k = koefisien tampungan

e. Metode *Passing Capacity*

Metode ini digunakan sebagai kontrol terhadap hasil perhitungan debit banjir rencana yang diperoleh dari data curah hujan. Perhitungan debit *passing capacity* dilakukan pada penampang sungai dari Sungai Logung pada as tubuh embung. Penampang melintang pada lokasi tersebut diasumsikan berbentuk penampang tunggal trapesium sedangkan tinggi muka air merupakan tinggi muka air banjir yang pernah terjadi, dengan dimensi sebagai berikut :



Gambar 3.8. Gambar Penampang Trapesium Metode *Passing Capacity*

Rumus yang digunakan :

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} A$$

$$A = H(B + mH)$$

$$P = B + 2H \sqrt{(1 + m)^2}$$

$$R = \frac{A}{P}$$

di mana :

Q = debit aliran (m³/det)

n = koefisien manning

R = jari-jari hidraulic (m)

I = kemiringan dasar sungai

A = luas tampang aliran (m²)

P = keliling basah (m)

H = kedalaman aliran (m)

B = lebar dasar sungai (m)

3.2.4 Analisis Debit Andalan

Debit andalan merupakan debit minimal yang sudah ditentukan yang dapat dipakai untuk memenuhi kebutuhan air. Perhitungan ini menggunakan cara analisis *water balance* dari Dr.F.J. Mock berdasarkan data curah hujan bulanan, jumlah hari hujan, evapotranspirasi dan karakteristik hidrologi daerah pengaliran.

Prinsip perhitungan ini adalah bahwa hujan yang jatuh di atas tanah (presipitasi) sebagian akan hilang karena penguapan (evaporasi), sebagian akan hilang menjadi aliran permukaan (*direct run off*) dan sebagian akan masuk tanah (infiltrasi). Infiltrasi mula-mula menjenuhkan permukaan (*top soil*) yang kemudian menjadi perkolasi dan akhirnya keluar ke sungai sebagai *base flow*.

Perhitungan debit andalan meliputi :

a. Data Curah Hujan

R_{20} = curah hujan bulanan (mm)

n = jumlah hari hujan.

b. Evapotranspirasi

Evapotranspirasi terbatas dihitung dari evapotranspirasi potensial metode Penman.

$$dE / E_{to} = (m/20) \times (18-n)$$

$$dE = (m/20) \times (18-n) \times E_{to}$$

$$E_{tl} = E_{to} - dE$$

di mana :

dE = selisih evapotranspirasi potensial dan evapotranspirasi terbatas.

E_{to} = evapotranspirasi potensial.

E_{tl} = evapotranspirasi terbatas

m = prosentase lahan yang tidak tertutup vegetasi.

= 10 – 40 % untuk lahan yang tererosi

= 30 – 50 % untuk lahan pertanian yang diolah

c. Keseimbangan air pada permukaan tanah

Rumus mengenai air hujan yang mencapai permukaan tanah, yaitu :

$$S = R_s - E_{tl}$$

$$SMC(n) = SMC(n-1) + IS(n)$$

$$WS = S - IS$$

di mana :

S = kandungan air tanah

R_s = curah hujan bulanan

E_{tl} = evapotranspirasi terbatas

IS = tampungan awal / *Soil Storage* (mm)
 IS (n) = tampungan awal / *Soil Storage* bulan ke-n (mm)
 SMC = kelembaban tanah/ *Soil Storage Moisture* (mm) diambil antara 50 -250 mm
 SMC (n) = kelembaban tanah bulan ke-n
 SMC (n-1) = kelembaban tanah bulan ke-(n-1)
 WS = *water surplus* / volume air berlebih

d. Limpasan (*run off*) dan tampungan air tanah (*ground water storage*)

$V(n) = k.V(n-1) + 0,5.(1-k). I(n)$
 $dV_n = V(n) - V(n-1)$

di mana :

$V(n)$ = volume air tanah bulan ke-n
 $V(n-1)$ = volume air tanah bulan ke-(n-1)
 k = faktor resesi aliran air tanah diambil antara 0-1,0
 I = koefisien infiltrasi diambil antara 0-1,0

Harga k yang tinggi akan memberikan resesi yang lambat seperti pada kondisi geologi lapisan bawah yang sangat lulus air. Koefisien infiltrasi ditaksir berdasarkan kondisi porositas tanah dan kemiringan daerah pengaliran.

Lahan yang porus mempunyai infiltrasi lebih tinggi dibanding tanah lempung berat. Lahan yang terjal menyebabkan air tidak sempat berinfiltrasi ke dalam tanah sehingga koefisien infiltrasi akan kecil.

e. Aliran Sungai

Aliran dasar = infiltrasi-perubahan volume air dalam tanah
 $B(n) = I - dV(n)$
 Aliran permukaan = volume air lebih-infiltrasi
 $D(ro) = WS - I$
 Aliran sungai = aliran permukaan + aliran dasar
 Run off = $D(ro) + B(n)$

$$\text{Debit} = \frac{\text{aliransungai} \times \text{luasDAS}}{\text{satu bulan (dtk)}}$$

3.3 Analisis Sedimen

3.3.1 Tinjauan Umum

Pendekatan terbaik untuk menghitung laju sedimentasi adalah dengan pengukuran sedimen transpor (*transport sediment*) di lokasi tapak Embung. Namun karena pekerjaan tersebut belum pernah dilakukan, maka estimasi sedimentasi yang terjadi dilakukan dengan perhitungan empiris, yaitu dengan metode USLE.

3.3.2 Laju Erosi dan *Sediment Yield* Metode USLE

Untuk memperkirakan laju sedimentasi pada DPS Sungai Logung digunakan metode Wischmeier dan Smith. Metode ini akan menghasilkan perkiraan besarnya erosi *gross*. Untuk menetapkan besarnya sedimen yang sampai di lokasi Embung, erosi *gross* akan dikalikan dengan ratio pelepasan sedimen (*sediment delivery ratio*). Metode Wischmeier dan Smith atau yang lebih dikenal dengan metode USLE (*Universal Soil Losses Equation*) telah diteliti lebih lanjut jenis tanah dan kondisi di Indonesia oleh Balai Penelitian Tanah Bogor.

Faktor-faktor yang mempengaruhi laju sedimentasi adalah sebagai berikut :

1. Erosivitas hujan
2. Erodibilitas tanah
3. Panjang dan kemiringan lereng
4. Konservasi tanah dan pengelolaan tanaman
5. Laju erosi potensial
6. Laju sedimen potensial

a. Erosivitas Hujan

Erosi rembesan sangat tergantung dari sifat hujan yang jatuh dan ketahanan tanah terhadap pukulan butir-butir hujan serta sifat gerakan aliran air di atas permukaan tanah sebagai limpasan permukaan. Untuk menghitung besarnya indeks erosivitas hujan digunakan rumus empiris sebagai berikut :

$$\begin{aligned}EI_{30} &= E \times I_{30} \times 10^{-2} \\ E &= 14,374 R^{1,075} \\ I_{30} &= \frac{R}{77,178 + 1,010R}\end{aligned}$$

Keterangan :

$E I_{30}$ = Indeks erosivitas hujan (ton cm/ Ha.jam)

E = Energi kinetik curah hujan (ton m/Ha.cm)

R = Curah hujan bulanan

I_{30} = Intensitas hujan maksimum selama 30 menit

b. Erodibilitas Tanah

Erodibilitas merupakan tingkat rembesan suatu tanah yang tererosi akibat curah hujan. Tanah yang mudah tererosi pada saat dipukul oleh butir-butir hujan mempunyai erodibilitas yang tinggi. Erodibilitas dapat dipelajari hanya kalau terjadi erosi. Erodibilitas dari berbagai macam tanah hanya dapat diukur dan dibandingkan pada saat terjadi hujan.

Tanah yang mempunyai erodibilitas tinggi akan tererosi lebih cepat, bila dibandingkan dengan tanah yang mempunyai erodibilitas rendah. Erodibilitas tanah merupakan ukuran kepekaan tanah terhadap erosi, dan hal ini sangat ditentukan oleh sifat tanah itu sendiri, khususnya sifat fisik dan kandungan mineral liatnya.

Faktor kepekaan tanah juga dipengaruhi oleh struktur dan teksturnya, dan semakin kuat bentuk agregasi tanah dan semakin halus butir tanah, maka tanahnya tidak mudah lepas satu sama lain sehingga menjadi lebih tahan terhadap pukulan air hujan.

Erodibilitas tanah dapat dinilai berdasarkan sifat-sifat fisik tanah sebagai berikut:

1. Tekstur tanah yang meliputi :
 - fraksi debu (ukuran 2 - 50 μ m)
 - fraksi pasir sangat halus (50 - 100 μ m)
 - fraksi pasir (100 - 2000 μ m)
2. Kadar bahan organik yang dinyatakan dalam %
3. Permeabilitas yang dinyatakan sebagai berikut :
 - sangat lambat (< 0,12 cm/jam)
 - lambat (0,125 - 0,5 cm/jam)
 - agak lambat (0,5 - 2,0 cm/jam)
 - sedang (2,0 - 6,25 cm/jam)

- agak cepat (6,25 - 12,25 cm/jam)
 - cepat (> 12,5 cm/jam)
4. Struktur dinyatakan sebagai berikut :
- granular sangat halus : tanah liat berdebu
 - granular halus : tanah liat berpasir
 - granular sedang : lempung berdebu
 - granular kasar : lempung berpasir

c. Faktor Panjang dan Kemiringan Lereng (LS)

Dari penelitian-penelitian yang telah ada, dapat diketahui bahwa proses erosi dapat terjadi pada lahan dengan kemiringan lebih besar dari 2%. Derajat kemiringan lereng sangat penting, karena kecepatan air dan kemampuan untuk memecah/melepas dan mengangkut partikel-partikel tanah tersebut akan bertambah besar secara eksponensial dari sudut kemiringan lereng.

Secara matematis dapat ditulis :

$$\text{Kehilangan tanah} = c \cdot S^k$$

dengan :

c = konstanta

k = konstanta

S = kemiringan lereng (%)

Pada kondisi tanah yang sudah dibajak tetapi tidak ditanami, eksponen K berkisar antara 1,1 sampai dengan 1,2. Menurut Weischmeier dan kawan-kawan dari Universitas Purdue (Hudson 1976) menyatakan bahwa nilai faktor LS dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

- Untuk kemiringan lereng lebih kecil 20% :

$$LS = L / 100 (0,76 + 0,53 + 0,076 S^2)$$

Dalam sistem metrik rumus tersebut berbentuk :

$$LS = L / 100 (1,38 + 0,965 S + 0,138 S^2)$$

- Untuk kemiringan lereng lebih besar dari 20% :

$$LS = \left(\frac{L}{22,1} \right)^{0,6} \times \left(\frac{S}{9} \right)^{1,4}$$

dengan :

L = panjang lereng (m)

S = kemiringan lereng (%)

Nilai faktor LS sama dengan 1 jika panjang lereng 22 meter dan kemiringan lereng 9 %.

Panjang lereng dapat diukur pada peta topografi, tetapi untuk menentukan batas awal dan ujung dari lereng tersebut mengalami kesukaran. Atas dasar pengertian bahwa erosi dapat terjadi dengan adanya *run off (overland flow)* maka panjang lereng dapat diartikan sebagai panjang lereng *overland flow*.

d. Faktor Konservasi Tanah dan Pengelolaan Tanaman

1. Faktor Indeks Konservasi Tanah (Faktor P)

Nilai indeks konservasi tanah dapat diperoleh dengan membagi kehilangan tanah dari lahan yang diberi perlakuan pengawetan, terhadap tanah tanpa pengawetan.

2. Faktor indeks pengelolaan tanaman (C), merupakan angka perbandingan antara erosi dari lahan yang ditanami sesuatu jenis tanaman dan pengelolaan tertentu dengan lahan serupa dalam kondisi dibajak tetapi tidak ditanami.

3. Faktor Indeks Pengelolaan Tanaman dan Konservasi Tanah (Faktor CP). Jika faktor C dan P tidak bisa dicari tersendiri, maka faktor indeks C dan P digabung menjadi faktor CP.

e. Pendugaan Laju Erosi Potensial (E-Pot)

Erosi potensial adalah erosi maksimum yang mungkin terjadi di suatu tempat dengan keadaan permukaan tanah gundul sempurna, sehingga terjadinya proses erosi hanya disebabkan oleh faktor alam (tanpa adanya keterlibatan manusia maupun faktor penutup permukaan tanah, seperti tumbuhan dan sebagainya), yaitu iklim, khususnya curah hujan, sifat-sifat internal tanah dan keadaan topografi tanah.

Dengan demikian, maka erosi potensial dapat dinyatakan sebagai hasil ganda antara faktor-faktor curah hujan, erodibilitas tanah dan topografi (kemiringan dan panjang lereng). Pendugaan erosi potensial dapat dihitung dengan pendekatan rumus berikut :

$$E - \text{pot} = R \times K \times LS \times A$$

dengan :

E-pot = Erosi potensial (ton/tahun)

R = Indeks erosivitas hujan

K = Erodibilitas tanah

LS = Faktor panjang dan kemiringan lereng

A = Luas daerah aliran sungai (Ha)

f. Pendugaan Laju Erosi Aktual (E-Akt)

Erosi aktual terjadi karena adanya campur tangan manusia dalam kegiatannya sehari-hari, misalnya pengolahan tanah untuk pertanian dan adanya unsur-unsur penutup tanah, baik yang tumbuh secara alamiah maupun yang dibudidayakan oleh manusia.

Penutupan permukaan tanah gundul dengan tanaman, akan memperkecil terjadinya erosi, sehingga dapat dikatakan bahwa laju erosi aktual selalu lebih kecil dari pada laju erosi potensial. Ini berarti bahwa adanya keterlibatan manusia, misalnya dengan usaha pertanian, akan selalu memperkecil laju erosi potensial. Dapat dikatakan bahwa erosi aktual adalah hasil ganda antara erosi potensial dengan pola penggunaan lahan tertentu, sehingga dapat dihitung dengan rumus (Weischmeier dan Smith, 1958) berikut :

$$\mathbf{E-Akt = E-pot \times CP}$$

dengan:

E-Akt = Erosi aktual di DAS (ton/ha/th)

E-pot = Erosi potensial (ton/ha/th)

CP = Faktor tanaman dan pengawetan tanah

g. Pendugaan Laju Sedimentasi Potensial

Sedimentasi potensial adalah proses pengangkutan sedimen hasil dari proses erosi potensial untuk diendapkan di jaringan irigasi dan lahan persawahan atau tempat-tempat tertentu.

Tidak semua sedimen yang dihasilkan erosi aktual menjadi sedimen, dan ini tergantung dari nisbah antara volume sedimen hasil erosi aktual yang mampu mencapai aliran sungai dengan volume sedimen yang bisa diendapkan dari lahan

di atasnya (**SDR = *Sediment Delivery Ratio***). Nilai SDR ini tergantung dari luas DAS, yang erat hubungannya dengan pola penggunaan lahan. Dan dapat dirumuskan dalam suatu hubungan fungsional, sebagai berikut :

$$SDR = \frac{S(1 - 0,8683A^{-0,2018})}{2(S + 50n)}$$

dengan :

SDR = Nisbah Pelepasan Sedimen, nilainya $0 < SDR < 1$

A = Luas DAS (Ha)

S = Kemiringan lereng rata-rata permukaan DAS (%)

n = Koefisien kekasaran Manning

Pendugaan laju sedimen potensial yang terjadi di suatu DAS dihitung dengan persamaan Weischmeier dan Smith, 1958 sebagai berikut :

$$S\text{-pot} = E\text{-Akt} \times SDR$$

dengan :

SDR = *Sediment Delivery Ratio*

S-pot = Sedimentasi potensial

E-Akt = Erosi aktual

3.4 Analisis Kebutuhan Air

3.4.1. Kebutuhan Air Irigasi

Kebutuhan air irigasi adalah besarnya debit air yang akan dipakai untuk mengairi lahan di daerah irigasi. Metode yang digunakan untuk menganalisis kebutuhan air ini adalah metode Penman. Menurut jenisnya ada dua macam pengertian kebutuhan air, yaitu :

- a. **Kebutuhan air bagi tanaman (*Consumptive Use*)**, yaitu banyaknya air yang dibutuhkan tanaman untuk membuat jaringan tanaman (batang dan daun) dan untuk diuapkan (evapotranspirasi), perkolasi, curah hujan, pengolahan lahan, dan pertumbuhan tanaman.

Rumus :

$$I_r = ET_c + P - R_e + WLR$$

di mana :

Ir = kebutuhan air (mm/hari)

E = evaporasi (mm/hari)

T = transpirasi (mm)

P = perkolasi (mm)

B = infiltrasi (mm)

W = tinggi genangan (mm)

Re = Hujan efektif (mm/hari)

- b. Kebutuhan air untuk irigasi**, yaitu kebutuhan air yang digunakan untuk menentukan pola tanaman untuk menentukan tingkat efisiensi saluran irigasi sehingga didapat kebutuhan air untuk masing-masing jaringan.

Perhitungan kebutuhan air irigasi ini dimaksudkan untuk menentukan besarnya debit yang akan dipakai untuk mengairi daerah irigasi. Setelah sebelumnya diketahui besarnya efisiensi irigasi. Besarnya efisiensi irigasi tergantung dari besarnya kehilangan air yang terjadi pada saluran pembawa, mulut dari bendung sampai petak sawah. Kehilangan air tersebut disebabkan karena penguapan, perkolasi, kebocoran dan sadap liar.

3.4.2. Kebutuhan Air Untuk Tanaman

a. Evapotranspirasi

Besarnya evapotranspirasi dihitung dengan menggunakan metode Penman yang dimodifikasi oleh *Nedeco/Prosida* seperti diuraikan dalam PSA-010. Evapotranspirasi dihitung dengan menggunakan rumus-rumus teoritis empiris dengan memperhatikan faktor-faktor meteorologi yang terkait seperti suhu udara, kelembaban, kecepatan angin dan penyinaran matahari.

Evapotranspirasi tanaman yang dijadikan acuan adalah rerumputan pendek ($abeldo = 0,25$). Selanjutnya untuk mendapatkan harga evapotranspirasi harus dikalikan dengan koefisien tanaman tertentu. Sehingga evapotranspirasi sama dengan evapotranspirasi potensial hasil perhitungan Penman \times *crop factor*. Dari harga evapotranspirasi yang diperoleh, kemudian digunakan untuk

menghitung kebutuhan air bagi pertumbuhan dengan menyertakan data curah hujan efektif.

Rumus evapotranspirasi Penman yang telah dimodifikasi adalah sebagai berikut :

$$E_{to} = \frac{1}{L^{-1} \delta + \Delta (H_{sh}^{ne} - H_{lo}^{ne})} + \frac{\delta E_q}{\delta + A}$$

di mana :

E_{to} = Indek evaporasi yang besarnya sama dengan evapotranspirasi dari rumput yang dipotong pendek (mm/hr)

$$\begin{aligned} H_{sh}^{ne} &= \text{Jaringan radiasi gelombang pendek (longley/day)} \\ &= \{ 1,75 \{ 0,29 \cos \Omega + 0,52 r \times 10^{-2} \} \} \times \alpha a^h \times 10^{-2} \\ &= \{ a_{ah} \times f(r) \} \times \alpha a^h \times 10^{-2} \\ &= a_{ah} \times f(r) \text{ (Tabel Penman 5)} \end{aligned}$$

α = albedo (koefisien reaksi), tergantung pada lapisan permukaan yang ada untuk rumput = 0,25

$$\begin{aligned} R_a &= \alpha a^h \times 10^{-2} \\ &= \text{Radiasi gelombang pendek maksimum secara teori (Longley/day)} \\ &= \text{jaringan radiasi gelombang panjang (Longley/day)} \\ &= 0,97 \alpha T_{ai}^4 \times (0,47 - 0,770 \sqrt{ed} \times \{ 1 - 8/10(1 - r) \}) \end{aligned}$$

$$H_{sh}^{ne} = f(T_{ai}) \times f(T_{dp}) \times f(m)$$

$$f(T_{ai}) = \alpha T_{ai}^4 \text{ (Tabel Penman 1)}$$

= efek dari temperatur radiasi gelombang panjang

$$m = 8(1 - r)$$

$$f(m) = 1 - m/10$$

= efek dari angka nyata dan jam penyinaran matahari terang maksimum pada radiasi gelombang panjang

r = lama penyinaran matahari relatif

E_q = evaporasi terhitung pada saat temperatur permukaan sama dengan temperatur udara (mm/hr)

$$= 0,35 (0,50 + 0,54 \mu_2) \times (e_a - e_d)$$

$$= f(\mu_2) \times PZ^{wa} - PZ^{wa}$$

μ_2 = kecepatan angin pada ketinggian 2m diatas tanah (Tabel Penman 3)

PZ^{wa} = e_a = tekanan uap jenuh (mmHg) (Tabel Penman 3)

= e_d = tekanan uap yang terjadi (mmHg) (Tabel Penman 3)

L = panas laten dari penguapan (*longley/minutes*)

Δ = kemiringan tekanan uap air jenuh yang berlawanan dengan kurva temperatur pada temperatur udara (mmHg/ $^{\circ}$ C)

δ = konstanta Bowen (0,49 mmHg/ $^{\circ}$ C), kemudian dihitung Eto.

catatan : 1 *longley/day* = 1 kal/cm²hari

b. Perkolasi

Perkolasi adalah meresapnya air ke dalam tanah dengan arah vertikal ke bawah, dari lapisan tidak jenuh. Besarnya perkolasi dipengaruhi oleh sifat-sifat tanah, kedalaman air tanah dan sistem perakarannya. Koefisien perkolasi adalah sebagai berikut :

- Berdasarkan kemiringan :
 - lahan datar = 1 mm/hari
 - lahan miring > 5% = 2 – 5 mm/hari
- Berdasarkan Tekstur :
 - berat (lempung) = 1 – 2 mm/hari
 - sedang (lempung kepasiran) = 2 -3 mm/hari
 - ringan = 3 – 6 mm/hari

c. Koefisien Tanaman (Kc)

Besarnya koefisien tanaman (Kc) tergantung dari jenis tanaman dan fase pertumbuhan. Pada perhitungani ini digunakan koefisien tanaman untuk padi dengan varietas unggul mengikuti ketentuan *Nedeco/Prosida*. Harga-harga koefisien tanaman padi dan palawija disajikan pada Tabel 3.7 sebagai berikut ini.

Tabel 3.7. Tabel Koefisien Tanaman Untuk Padi dan Palawija Menurut *Nedeco/Proside*

Bulan	Padi		Palawija	
	Varietas Biasa	Varietas Unggul	Jagung	Kacang Tanah
0,50	1,20	1,20	0,50	0,50
1,00	1,20	1,27	0,59	0,51
1,50	1,32	1,33	0,96	0,66
2,00	1,40	1,30	1,05	0,85
2,50	1,35	1,15	1,02	0,95
3,00	1,24	0,00	0,95	0,95
3,50	1,12			0,95
4,00	0,00			0,55
4,50				0,55

Sumber : Dirjen Pengairan, Bina Program PSA 010, 1985

d. Curah Hujan Efektif (Re)

– Besarnya Curah Hujan Efektif

Curah hujan efektif adalah bagian dari curah hujan total yang digunakan oleh akar-akar tanaman selama masa pertumbuhan. Besarnya curah hujan efektif dipengaruhi oleh :

- Cara pemberian air irigasi (rotasi, menerus atau berselang)
- Laju pengurangan air genangan di sawah yang harus ditanggulangi
- Kedalaman lapisan air yang harus dipertahankan di sawah
- Cara pemberian air di petak
- Jenis tanaman dan tingkat ketahanan tanaman terhadap kekurangan air

Untuk irigasi tanaman padi, curah hujan efektif diambil 20% kemungkinan curah hujan bulanan rata-rata tak terpenuhi.

– Koefisien Curah Hujan Efektif

Besarnya koefisien curah hujan efektif untuk tanaman padi berdasarkan Tabel 3.8.

Tabel 3.8. Tabel Koefisien Curah Hujan Untuk Padi

Bulan	Golongan					
	1	2	3	4	5	6
0,50	0,36	0,18	0,12	0,09	0,07	0,06
1,00	0,70	0,53	0,35	0,26	0,21	0,18
1,50	0,40	0,55	0,46	0,36	0,29	0,24
2,00	0,40	0,40	0,50	0,46	0,37	0,31
2,50	0,40	0,40	0,40	0,48	0,45	0,37
3,00	0,40	0,40	0,40	0,40	0,46	0,44
3,50	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45
4,00	0,00	0,20	0,27	0,30	0,32	0,33
4,50			0,13	0,20	0,24	0,27
5,00				0,10	0,16	0,20
5,50					0,08	0,13
6,00						0,07

Sumber : Dirjen Pengairan, Bina Program PSA 010, 1985

Sedangkan untuk tanaman palawija besarnya curah hujan efektif ditentukan dengan metode curah hujan bulanan yang dihubungkan dengan curah hujan rata-rata bulanan serta evapotranspirasi tanaman rata-rata bulanan berdasarkan Tabel 3.9.

Tabel 3.9. Tabel Koefisien Curah Hujan Rata-rata Bulanan dengan ET Tanaman Palawija Rata-rata Bulanan dan Curah Hujan Rata-rata Bulanan

Curah Hujan	mean	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100	112,5	125	137,5	150	162,5	175	187,5	200
Bulanan/mm	mm																
ET tanaman rata-rata bulanan/mm	25	8	16	24	Curah Hujan rata-rata bulanan/mm												
	50	8	17	25	32	39	46										
	75	9	18	27	34	41	48	56	62	69							
	100	9	19	28	35	43	52	59	66	73	80	87	94	100			
	125	10	20	30	37	46	54	62	70	76	85	97	98	107	116	120	
	150	10	21	31	39	49	57	66	74	81	89	97	104	112	119	127	133
	175	11	23	32	42	52	61	69	78	86	95	103	111	118	126	134	141
	200	11	24	33	44	54	64	73	82	91	100	106	117	125	134	142	150
	225	12	25	35	47	57	68	78	87	96	106	115	124	132	141	150	159
250	13	25	38	50	61	72	84	92	102	112	121	132	140	150	158	167	
Tampungan Efektif		20	25	37,5	50	75	100	125	150	175	200						
Faktor tampungan		0,73	0,77	0,86	0,93	1,00	1,02	1,04	1,06	1,07	1,08						

Sumber : Ref FAO, 1977

3.4.3. Kebutuhan Air Untuk Pengolahan Lahan

a. Pengolahan Lahan Untuk Padi

Kebutuhan air untuk pengolahan atau penyiraman lahan menentukan kebutuhan maksimum air irigasi. Faktor-faktor yang menentukan besarnya kebutuhan air untuk pengolahan tanah, yaitu besarnya penjemuran, lamanya pengolahan (periode pengolahan) dan besarnya evaporasi dan perkolasi yang terjadi.

Menurut PSA-010, waktu yang diperlukan untuk pekerjaan penyiapan lahan adalah selama satu bulan (30 hari). Kebutuhan air untuk pengolahan tanah bagi tanaman padi diambil 200 mm, setelah tanam selesai lapisan air di sawah ditambah 50 mm. Jadi kebutuhan air yang diperlukan untuk penyiapan lahan dan untuk lapisan air awal setelah tanam selesai seluruhnya menjadi 250 mm. Sedangkan untuk lahan yang tidak ditanami (sawah bero) dalam jangka waktu 2,5 bulan diambil 300 mm.

Untuk memudahkan perhitungan angka pengolahan tanah digunakan tabel koefisien *Van De Goor dan Zijlstra* pada Tabel 3.10 berikut ini.

Tabel 3.10. Tabel Koefisien Kebutuhan Air Selama Penyiapan Lahan

Eo + P mm/hari	T = 30 hari		T = 45 hari	
	S = 250 mm	S = 300 mm	S = 250 mm	S = 300 mm
5,0	11,1	12,7	8,4	9,5
5,5	11,4	13,0	8,8	9,8
6,0	11,7	13,3	9,1	10,1
6,5	12,0	13,6	9,4	10,4
7,0	12,3	13,9	9,8	10,8
7,5	12,6	14,2	10,1	11,1
8,0	13,0	14,5	10,5	11,4
8,5	13,3	14,8	10,8	11,8
9,0	13,6	15,2	11,2	12,1
9,5	14,0	15,5	11,6	12,5
10,0	14,3	15,8	12,0	12,9
10,5	14,7	16,2	12,4	13,2
11,0	15,0	16,5	12,8	13,6

Sumber : Buku *Petunjuk Perencanaan Irigasi*, 1986

b. Pengolahan Lahan Untuk Palawija

Kebutuhan air untuk penyiapan lahan bagi palawija sebesar 50 mm selama 15 hari yaitu 3,33 mm/hari, yang digunakan untuk menggarap lahan yang ditanami dan untuk menciptakan kondisi lembab yang memadai untuk persemian yang baru tumbuh.

3.4.4. Kebutuhan Air Untuk Pertumbuhan

Kebutuhan air untuk pertumbuhan padi dipengaruhi oleh besarnya evapotranspirasi tanaman (Etc), perkolasi tanah (p), penggantian air genangan (W) dan hujan efektif (Re).

3.4.5. Kebutuhan Air Untuk Irigasi

a. Pola Tanaman dan Perencanaan Tata Tanam

Pola tanam adalah suatu pola penanaman jenis tanaman selama satu tahun yang merupakan kombinasi urutan penanaman. Rencana pola dan tata tanam dimaksudkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air, serta menambah intensitas luas tanam. Suatu daerah irigasi pada umumnya mempunyai pola tanam tertentu, tetapi bila tidak ada pola yang bias pada daerah tersebut direkomendasikan pola tanaman padi-padi-palawija.

Pemilihan pola tanam ini didasarkan pada sifat tanaman hujan dan kebutuhan air.

- Sifat tanaman padi terhadap hujan dan kebutuhan air
 - Pada waktu pengolahan memerlukan banyak air
 - Pada waktu pertumbuhannya memerlukan banyak air dan pada saat berbunga diharapkan hujan tidak banyak agar bunga tidak rusak dan padi baik.
- Palawija
 - Pada waktu pengolahan membutuhkan air lebih sedikit daripada padi
 - Pada pertumbuhan sedikit air dan lebih baik lagi bila tidak turun hujan.

Setelah diperoleh kebutuhan air untuk pengolahan lahan dan pertumbuhan, kemudian dicari besarnya kebutuhan air untuk irigasi berdasarkan pola tanam dan rencana tata tanam dari daerah yang bersangkutan.

b. Efisiensi Irigasi

Besarnya efisiensi irigasi tergantung dari besarnya kehilangan air yang terjadi pada saluran pembawa, mulai dari bendung sampai petak sawah. Kehilangan air tersebut disebabkan karena penguapan, perkolasi, kebocoran dan sadap liar. Besarnya angka efisiensi tergantung pada penelitian lapangan pada daerah irigasi.

Pada perencanaan jaringan irigasi, tingkat efisiensi ditentukan menurut kriteria standar perencanaan yaitu sebagai berikut ;

- Kehilangan air pada saluran primer adalah 10 – 15 %, diambil 10%
Faktor koefisien = $100/90 = 1,11$
- Kehilangan air pada saluran sekunder adalah 20 – 25 %, diambil 20%
Faktor koefisien = $100/80 = 1,25$.

3.4.6. Analisis Kebutuhan Air Baku

Kebutuhan air baku di sini dititik beratkan pada penyediaan air baku untuk diolah menjadi air bersih (Ditjen Cipta Karya, 2000).

a. Standar Kebutuhan Air

Menurut Ditjen Cipta Karya (2000) standar kebutuhan air ada 2 (dua) macam yaitu :

- Standar kebutuhan air domestik
Standar kebutuhan air domestik yaitu kebutuhan air yang digunakan pada tempat-tempat hunian pribadi untuk memenuhi keperluan sehari-hari seperti : memasak, minum, mencuci dan keperluan rumah tangga lainnya. Satuan yang dipakai adalah liter/orang/hari.
- Standar kebutuhan air non domestik
Standar kebutuhan air non domestik adalah kebutuhan air bersih diluar keperluan rumah tangga. Kebutuhan air non domestik antara lain :
 - Penggunaan komersil dan industri

Yaitu penggunaan air oleh badan-badan komersil dan industri.

- Penggunaan umum

Yaitu penggunaan air untuk bangunan-bangunan pemerintah, rumah sakit, sekolah-sekolah dan tempat-tempat ibadah.

Kebutuhan air non domestik untuk kota dapat dibagi dalam beberapa kategori antara lain :

- Kota kategori I (Metro)
- Kota kategori II (Kota besar)
- Kota kategori III (Kota sedang)
- Kota kategori IV (Kota kecil)
- Kota kategori V (Desa)

Tabel 3.11. Tabel Kategori Kebutuhan Air Non Domestik

NO	URAIAN	KATEGORI KOTA BERDASARKAN JUMLAH JIWA				
		>1.000.000	500.000 S/D 1.000.000	100.000 S/D 500.000	20.000 S/D 100.000	<20.000
		METRO	BESAR	SEDANG	KECIL	DESA
1	Konsumsi unit sambungan rumah (SR) l/o/h	190	170	130	100	80
2	Konsumsi unit hidran umum (HU) l/o/h	30	30	30	30	30
3	Konsumsi unit non domestic l/o/h (%)	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30
4	Kehilangan air (%)	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30
5	Faktor hari maksimum	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
6	Faktor jam puncak	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
7	Jumlah jiwa per SR	5	5	5	5	5
8	Jumlah jiwa per HU	100	100	100	100	100
9	Sisa tekan di penyediaan distribusi (mka)	10	10	10	10	10
10	Jam operasi	24	24	24	24	24

11	Volume reservoir (% max day demand)	20	20	20	20	20
12	SR : HR	50:50 s/d 80:20	50:50 s/d 80:20	80:20	70:30	70:30
13	Cakupan pelayanan (%)	*) 90	90	90	90	***) 70

Sumber : Ditjen Cipta Karya, 2000

*) 60% perpipaan, 30% non perpipaan

**) 25% perpipaan, 45% non perpipaan

Kebutuhan air bersih non domestik untuk kategori I sampai dengan V dan beberapa sektor lain adalah sebagai berikut :

Tabel 3.12. Tabel Kebutuhan Air Non Domestik Kota Kategori I, II, III Dan IV

NO	SEKTOR	NILAI	SATUAN
1	Sekolah	10	Liter/murid/hari
2	Rumah sakit	200	Liter/bed/hari
3	Puskesmas	2000	Liter/hari
4	Masjid	3000	Liter/hari
5	Kantor	10	Liter/pegawai/hari
6	Pasar	12000	Liter/hektar/hari
7	Hotel	150	Liter/bed/hari
8	Rumah makan	100	Liter/tempat duduk/hari
9	Kompleks militer	60	Liter/orang/hari
10	Kawasan industri	0,2-0,8	Liter/detik/hari
11	Kawasan pariwisata	0,1-0,3	Liter/detik/hari

Sumber : Ditjen Cipta Karya, 2000

Tabel 3.13. Tabel Kebutuhan Air Bersih Kategori V

NO	SEKTOR	NILAI	SATUAN
1	Sekolah	5	Liter/murid/hari
2	Rumah sakit	200	Liter/bed/hari
3	Puskesmas	1200	Liter/hari
4	Hotel/losmen	90	Liter/hari
5	Komersial/industri	10	Liter/hari

Sumber : Ditjen Cipta Karya, 2000

Tabel 3.14. Tabel Kebutuhan Air Bersih Domestik Kategori Lain

NO	SEKTOR	NILAI	SATUAN
1	Lapangan terbang	10	Liter/det
2	Pelabuhan	50	Liter/det
3	Stasiun KA-Terminal bus	1200	Liter/det
4	Kawasan industri	0,75	Liter/det/ha

Sumber : Ditjen Cipta Karya, 2000

b. Proyeksi Kebutuhan Air Bersih

Proyeksi kebutuhan air bersih dapat ditentukan dengan memperhatikan pertumbuhan penduduk untuk diproyeksikan terhadap kebutuhan air bersih sampai dengan lima puluh tahun mendatang atau tergantung dari proyeksi yang dikehendaki. Adapun yang berkaitan dengan proyeksi kebutuhan tersebut adalah :

- Angka Pertumbuhan Penduduk

Angka pertumbuhan penduduk dihitung dengan prosentase memakai rumus :

$$\text{Angka Pertumbuhan (\%)} = \frac{\sum \text{AngkaPertumbuhan(\%)}}{\sum \text{Data}}$$

- Proyeksi Jumlah Penduduk

Dari angka pertumbuhan penduduk diatas dalam prosen digunakan untuk memproyeksikan jumlah penduduk sampai dengan lima puluh tahun mendatang. Meskipun pada kenyataannya tidak selalu tepat tetapi perkiraan ini dapat dijadikan sebagai dasar perhitungan volume kebutuhan

air dimasa mendatang. Ada beberapa metode yang digunakan untuk memproyeksikan jumlah penduduk antara lain yaitu:

- Metode *Geometrical Increase*

Rumus yang digunakan :

$$P_n = P_o + (1 + r)^n$$

dimana :

P_n = Jumlah penduduk pada tahun ke-n

P_o = Jumlah penduduk pada awal tahun

r = Prosentase pertumbuhan *geometrical* penduduk tiap tahun

n = Periode waktu yang ditinjau

- Metode *Arithmetical Increase*

Rumus yang digunakan :

$$P_n = P_o + n.r$$

$$r = \frac{P_o - P_t}{t}$$

dimana :

P_n = Jumlah penduduk pada tahun ke-n

P_o = Jumlah penduduk pada awal tahun proyeksi

r = Angka pertumbuhan penduduk tiap tahun

n = Periode waktu yang ditinjau

t = Banyak tahun sebelum tahun analisis

- Metode Proyeksi *Least Square*

Rumus yang digunakan

$$Y = a + b.x$$

$$a = \frac{\sum Y_i}{n}$$

$$b = \frac{\sum X_i Y_i}{\sum X_i^2}$$

dimana :

Y = Jumlah penduduk pada tahun proyeksi ke-n

- a = Jumlah penduduk pada awal tahun
- b = Pertambahan penduduk tiap tahun
- n = Jumlah tahun proyeksi dasar
- x = Jumlah tahun proyeksi mendatang
- X_i = *Variable Coding*
- Y_i = Data jumlah penduduk awal

3.5 Neraca Air

Perhitungan neraca air dilakukan untuk mengecek apakah air yang tersedia cukup memadai untuk memenuhi kebutuhan air irigasi atau tidak. Perhitungan neraca air ini pada akhirnya akan menghasilkan kesimpulan mengenai :

- Pola tanam akhir yang akan dipakai untuk jaringan irigasi yang sedang di rencanakan
- Penggambaran akhir daerah proyek irigasi.

Ada tiga unsur pokok dalam perhitungan Neraca Air yaitu:

- Kebutuhan Air
- Tersedianya Air
- Neraca Air

3.6 Penelusuran Banjir (*Flood Routing*)

Penelusuran banjir dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik *hidrograf outflow*/keluaran, yang sangat diperlukan dalam pengendalian banjir. Perubahan *hidrograf* banjir antara *inflow* (I) dan *outflow* (O) karena adanya faktor tampungan atau adanya penampang sungai yang tidak seragam atau akibat adanya *meander* sungai. Jadi penelusuran banjir ada dua, untuk mengetahui perubahan *inflow* dan *outflow* pada waduk dan *inflow* pada satu titik dengan suatu titik di tempat lain pada sungai.

Perubahan *inflow* dan *outflow* akibat adanya tampungan. Maka pada suatu waduk terdapat *inflow* banjir (I) akibat adanya banjir dan *outflow* (O) apabila muka air waduk naik, di atas *spillway* (terdapat limpasan)

$I > O$ tampungan waduk naik Elevasi muka air waduk naik.

$I < O$ tampungan waduk turun Elevasi muka waduk turun.

Pada penelusuran banjir berlaku persamaan kontinuitas :

$$I - O = \Delta S$$

ΔS = Perubahan tampungan air di waduk

Persamaan kontinuitas pada periode $\Delta t = t_1 - t_2$ adalah :

$$\left[\frac{I1 + I2}{2} \right] * \Delta t - \left[\frac{O1 + O2}{2} \right] * \Delta t = S2 - S1$$

3.6.1 Penelusuran Banjir Melalui Pengelak

Penelusuran banjir melalui pengelak bertujuan untuk mengetahui dimensi pengelak (lebar dan tinggi pengelak). Dan debit banjir yang digunakan adalah debit banjir Q_1 tahun. Dalam perhitungan *flood routing* pada *coffer dam* diharuskan mendimensi pintu dan terowongan aliran bebas. Prinsip dari perhitungan ini yaitu menetapkan dimensi pintu sehingga Q_{inflow} dan $Q_{outflow}$ bisa diketahui, kemudian tinggi muka air maksimum dapat diketahui. Apabila tinggi muka air maksimum lebih besar dari setengah tinggi embung maka dimensi pintu diperbesar lagi. Perhitungan ini dihentikan ketika sudah mendapatkan tinggi muka air yang efektif. Pertimbangan keamanan dan ekonomis sangat diperhitungkan dalam analisis *flood routing* ini.

3.6.2 Penelusuran Banjir Melalui Pelimpah

Penelusuran banjir melalui pelimpah bertujuan untuk mengetahui dimensi pelimpah (lebar dan tinggi pelimpah). Dan debit banjir yang digunakan dalam perhitungan *flood routing* metode *step by step* adalah Q_{50} tahun. Prinsip dari perhitungan ini adalah dengan menetapkan salah satu parameter hitung apakah B (lebar pelimpah) atau H (tinggi pelimpah). Jika B ditentukan maka variabel H harus di trial sehingga mendapatkan tinggi limpasan air banjir maksimum yang cukup dan efisien. Tinggi *spillway* didapatkan dari elevasi muka air limpasan maksimum – tinggi jagaan rencana. Perhitungan ini terhenti ketika elevasi muka air limpasan sudah mengalami penurunan dan volume kumulatif mulai berkurang

dari volume kumulatif sebelumnya atau ΔV negatif yang artinya $Q_{outflow} > Q_{inflow}$. Prosedur perhitungan *flood routing spillway* sebagai berikut ;

- a. Memasukkan data jam ke-n(jam)
- b. Selisih waktu (Δt) dalam detik
- c. $Q_{inflow} = Q_{50 \text{ tahun banjir rencana}} \text{ (m}^3/\text{dt)}$
- d. $Q_{inflow \text{ rerata}} = (Q_{inflow \ n} + Q_{inflow \ (n-1)})/2$ dalam m^3/dt
- e. $\text{Volume}_{inflow} = Q_{inflow \text{ rerata}} \times \Delta t \text{ (m}^3/\text{dt)}$
- f. Asumsi muka air hulu dengan cara *men-trial* dan dimulai dari elevasi *spillway* coba-coba (m)
- g. $H = \text{tinggi muka air hulu} - \text{tinggi elevasi}_{spillway}$
- h. $Q_{outflow} = 2,23 \times B H^{3/2} \text{ (m}^3/\text{dt)}$
- i. $Q_{outflow \text{ rerata}} = (Q_{output \ n} + Q_{output \ (n-1)})/2$ dalam m^3/dt
- j. $\text{Volume}_{outflow} = Q_{outflow \text{ rerata}} \times \Delta t \text{ (m}^3/\text{dt)}$
- k. $\Delta V = \text{selisih volume} (Q_{inflow \text{ rerata}} - Q_{outflow \text{ rerata}})$
- l. Volume kumulatif yaitu volume tampungan tiap tinggi muka air limpasan yang terjadi. $V_{kum} = V_n + V_{(n+1)}$ dalam m^3 .
- m. Elevasi muka air limpasan, harus sama dengan elevasi muka air coba-coba.

3.7 Perhitungan Volume Tampungan Embung

Kapasitas tampung yang diperlukan untuk sebuah embung adalah :

$$V_n = V_u + V_e + V_i + V_s$$

di mana :

- V_n = volume tampungan embung total (m^3)
- V_u = volume hidup untuk melayani berbagai kebutuhan (m^3)
- V_e = volume penguapan dari kolam embung (m^3)
- V_i = jumlah resapan melalui dasar, dinding, dan tubuh embung (m^3)
- V_s = ruangan yang disediakan untuk sedimen (m^3)

3.7.1. Volume Tampungan Hidup Untuk Melayani Kebutuhan

Penentuan volume tampungan embung dapat digambarkan pada *mass curve* kapasitas tampungan. Volume tampungan merupakan selisih maksimum yang terjadi antara komulatif kebutuhan terhadap kumulatif *inflow*.

3.7.2. Volume Kehilangan Air Oleh Penguapan

Untuk mengetahui besarnya volume penguapan yang terjadi pada muka embung dihitung dengan rumus :

$$V_e = E_a \times S \times A_g \times d$$

di mana :

V_e = volume air yang menguap tiap bulan (m^3)

E_a = evaporasi hasil perhitungan (mm/hari)

S = penyinaran matahari hasil pengamatan (%)

A_g = luas permukaan kolam embung pada setengah tinggi tubuh embung (m^2)

d = jumlah hari dalam satu bulan

Untuk memperoleh nilai evaporasi dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$E_a = 0,35(e_a - e_d) (1 - 0,01V)$$

di mana :

e_a = tekanan uap jenuh pada suhu rata-rata harian (mm/Hg)

e_d = tekanan uap sebenarnya (mm/Hg)

V = kecepatan angin pada ketinggian 2 m di atas permukaan tanah

3.7.3. Volume Resapan Embung

Besarnya volume kehilangan air akibat resapan melalui dasar, dinding, dan tubuh embung tergantung dari sifat lulu air material dasar dan dinding kolam. Sedangkan sifat ini tergantung pada jenis butiran tanah atau struktur batu pembentuk dasar dan dinding kolam. Perhitungan resapan air ini menggunakan Rumus praktis untuk menentukan besarnya volume resapan air kolam embung, sebagai berikut :

$$V_i = K.V_u$$

di mana :

V_i = jumlah resapan tahunan (m^3)

V_u = volume hidup untuk melayani berbagai kebutuhan (m^3)

K = faktor yang nilainya tergantung dari sifat lulus air material dasar dan dinding kolam embung.

K = 10%, bila dasar dan dinding kolam embung praktis rapat air ($k \leq 10^{-5}$ cm/d) termasuk penggunaan lapisan buatan (selimut lempung, *geomembran*, “*rubber sheet*”, semen tanah).

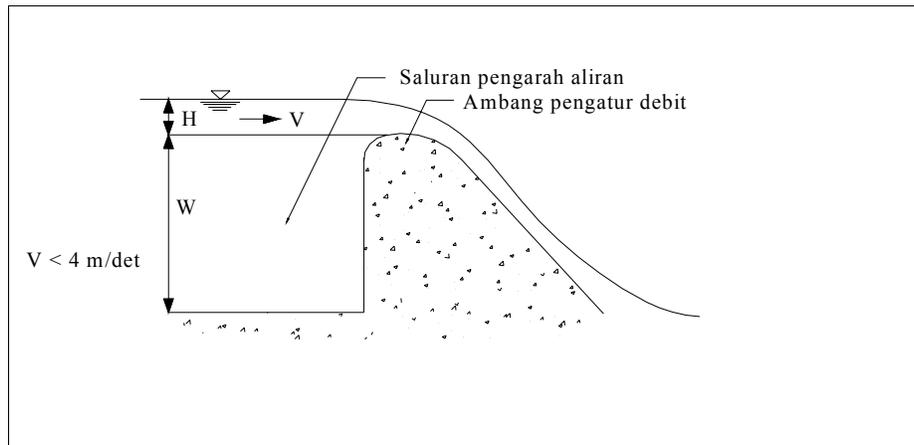
3.8 Perencanaan Bangunan Pelimpah

Bangunan pelimpah adalah bangunan beserta instalasinya untuk mengalirkan air banjir yang masuk kedalam embung agar tidak membahayakan keamanan embung. Apabila terjadi kecepatan aliran air yang besar akan terjadi olakan (*turbulensi*) yang dapat mengganggu jalannya air sehingga menyebabkan berkurangnya aliran air yang masuk ke bangunan pelimpah. Kecepatan aliran air harus dibatasi, yaitu tidak boleh melebihi kecepatan kritisnya. Bangunan pelimpah yang biasa digunakan yaitu bangunan pelimpah terbuka dengan ambang tetap. Bangunan pelimpah ini biasanya terdiri dari tiga bagian utama yaitu :

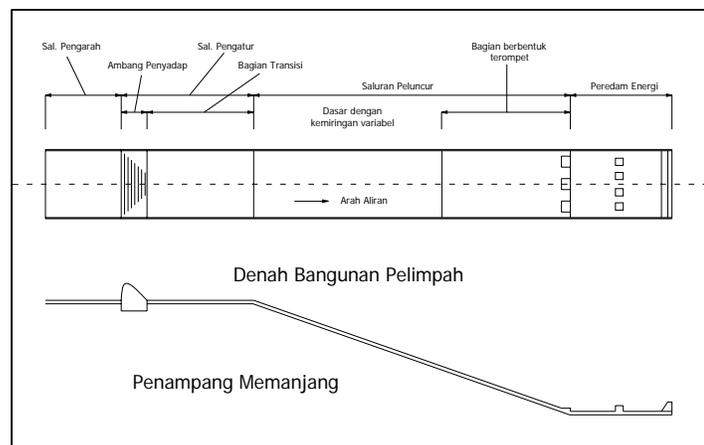
- Saluran pengarah dan pengatur aliran
- Saluran peluncur
- Peredam energi

3.8.1. Saluran Pengarah Dan Pengatur Aliran

Bagian ini berfungsi sebagai penuntun dan pengarah aliran agar aliran tersebut senantiasa dalam kondisi hidrolika yang baik. Pada saluran pengarah aliran ini, kecepatan masuk aliran air tidak melebihi 4 m/det dan lebar saluran makin mengecil ke arah hilir. Kedalaman dasar saluran pengarah aliran biasanya diambil lebih besar dari $1/5$ x tinggi rencana limpasan di atas mercu ambang pelimpah.



Gambar 3.9. Gambar Saluran Pengarah Aliran dan Ambang Pengatur Debit Pada Sebuah Pelimpah



Gambar 3.10. Gambar Bangunan Pelimpah

3.8.2. Saluran Peluncur

Dalam merencanakan saluran peluncur harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- Air yang melimpah dari saluran pengatur harus mengalir dengan lancar tanpa hambatan-hambatan.
- Konstruksi saluran peluncur harus kokoh dan stabil dalam menampung semua beban yang timbul.
- Biaya konstruksi diusahakan se-ekonomis mungkin.

Semakin kecil penampang lintang saluran peluncur, maka akan memberikan keuntungan ditinjau dari segi volume pekerjaan, tetapi akan menimbulkan masalah-masalah yang lebih besar pada usaha peredaman energi yang timbul per-unit lebar aliran tersebut. Sebaliknya pelebaran penampang lintang saluran akan mengakibatkan besarnya volume pekerjaan untuk pembuatan saluran peluncur, tetapi peredaman energi per-unit lebar alirannya akan lebih ringan.

3.8.3. Peredam energi

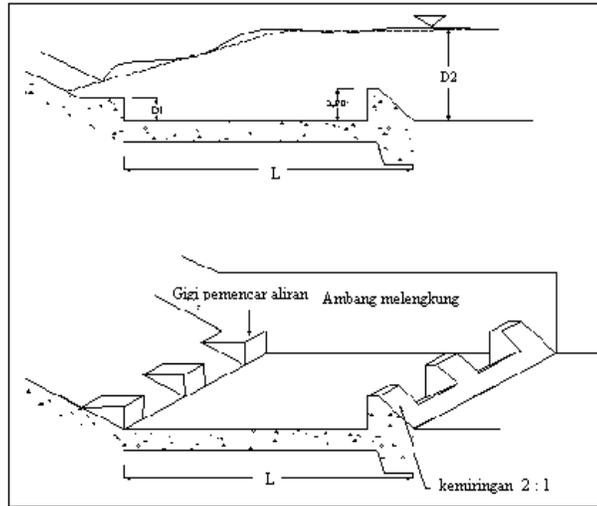
Bangunan peredam energi digunakan untuk menghilangkan atau setidaknya mengurangi energi air agar tidak merusak tebing, jembatan, jalan, bangunan dan instalasi lain di sebelah hilir bangunan pelimpah. Sebelum aliran yang melintasi bangunan pelimpah dikembalikan ke dalam sungai, maka aliran dengan kecepatan yang tinggi dalam kondisi super-kritis tersebut harus diperlambat dan diubah pada kondisi aliran sub-kritis. Guna meredusir energi yang terdapat di dalam aliran tersebut, maka di ujung hilir saluran peluncur biasanya dibuat suatu bangunan yang disebut peredam energi pencegah gerusan (Gunadarma, 1997). Dalam perencanaan dipakai tipe kolam olakan, dan yang paling umum dipergunakan adalah kolam olakan datar. Macam tipe kolam olakan datar yaitu :

a. Kolam olakan datar tipe I

Kolam olakan datar tipe I adalah suatu kolam olakan dengan dasar yang datar dan terjadinya peredaman energi yang terkandung dalam aliran air dengan benturan secara langsung aliran tersebut ke atas permukaan dasar kolam. Benturan langsung tersebut menghasilkan peredaman energi yang cukup tinggi, sehingga perlengkapan-perengkapan lainnya guna penyempurnaan peredaman tidak diperlukan lagi pada kolam olakan tersebut.

b. Kolam olakan datar tipe II

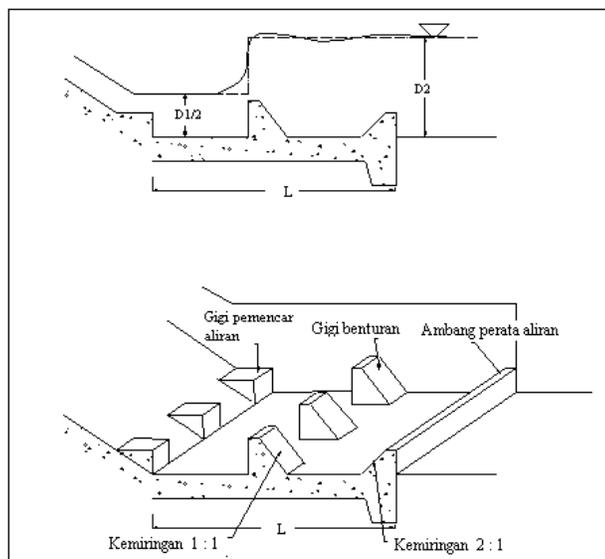
Kolam olakan datar tipe II ini cocok untuk aliran dengan tekanan hidrostatis yang tinggi dan dengan debit yang besar ($q > 45 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$, tekanan hidrostatis $> 60 \text{ m}$ dan bilangan *Froude* $> 4,5$). Perlengkapan-perengkapan yang dibuat berupa gigi-gigi pemencar aliran di pinggir hulu dasar kolam dan ambang berberigi di pinggir hilirnya.



Gambar 3.11. Gambar Kolam Olakan Datar Tipe II USBR

c. Kolam olakan datar tipe III

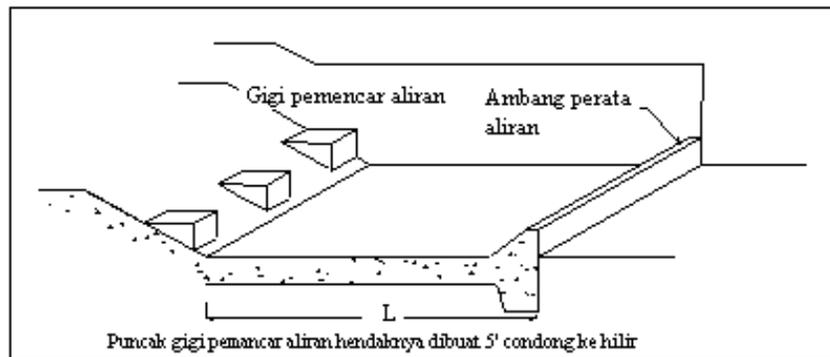
Prinsip kerja dari kolam olakan ini sangat mirip dengan sistim kerja dari kolam olakan datar tipe II, akan tetapi lebih sesuai untuk mengalirkan air dengan tekanan hidrostatik yang rendah dan debit yang agak kecil ($q < 18,5 \text{ m}^3/\text{dt/m}$, $V < 18,0 \text{ m/dt}$ dan bilangan *Froude* $> 4,5$). Untuk mengurangi panjang kolam olakan, biasanya dibuatkan gigi pemencar aliran di tepi hulu dasar kolam, gigi penghadang aliran (gigi benturan) pada dasar kolam olakan.



Gambar 3.12. Gambar Kolam Olakan Datar Tipe III USBR

d. Kolam olakan datar tipe IV

Sistem kerja kolam olakan tipe ini sama dengan sistem kerja kolam olakan tipe III, akan tetapi penggunaannya yang paling cocok adalah untuk aliran dengan tekanan hidrostatik yang rendah dan debit yang besar per-unit lebar, yaitu untuk aliran dalam kondisi super kritis dengan bilangan *Froude* antara 2,5 s/d 4,5. Peredaman energi untuk aliran dengan bilangan *Froude* antara 2,5 s/d 4,5 umumnya sangat sulit, karena getaran hidrolis yang timbul pada aliran tersebut tidak dapat dicegah secara sempurna. Apabila keadaannya memungkinkan, sebaiknya lebar kolam olakan diperbesar, agar bilangan *Froude*-nya berada diluar angka-angka tersebut.



Gambar 3.13. Gambar Kolam Olakan Datar Tipe IV USBR

3.8.4. Tinjauan Terhadap Gerusan

Tinjauan terhadap gerusan digunakan untuk menentukan tinggi dinding halang di ujung hilir bendung. Untuk mengatasi gerusan tersebut dipasang apron yang berupa pasangan batu kosong sebagai selimut lintang bagi tanah asli. Untuk menghitung kedalaman gerusan digunakan Metoda *Lacey* (Standar Perencanaan Irigasi KP-02) sebagai berikut :

$$R = 0,47 \left[\frac{Q}{f} \right]^{1/3}$$

$$f = 1,76 \cdot Dm^{1/2}$$

di mana :

R = kedalaman gerusan di bawah permukaan air banjir (m)

D_m = diameter rata-rata material dasar sungai (m)

Q = debit yang melimpah diatas mercu (m^3/det)

f = faktor lumpur *Lacey*

Menurut *Lacey*, kedalaman gerusan bersifat empiris, maka dalam penggunaannya dikalikan dengan angka keamanan sebesar 1,5.

3.9 Perencanaan Konstruksi

3.9.1. Tipe Embung

Tubuh embung dapat didesain menurut beberapa tipe (Pedoman Kriteria Desain Embung, DPU, 1994), yaitu :

a. Tipe Urugan Homogen

Tubuh embung dapat didesain sebagai urugan homogen, di mana bahan urugan seluruhnya atau sebagian besar hanya menggunakan satu macam material saja yaitu lempung atau tanah berlempung. Tubuh embung yang didesain dengan tipe ini harus memperhatikan kemiringan lereng dan muka garis preatik atau rembesan. Kemiringan lereng umumnya cukup landai terutama untuk menghindari terjadinya longsoran di lereng hulu pada kondisi surut cepat serta menjaga stabilitas lereng hilir pada kondisi rembesan langgeng. Untuk mengontrol rembesan diperlukan pembuatan system penyalir di kaki hilir urugan.

b. Tipe Urugan Majemuk

Tubuh embung dapat didesain sebagai urugan majemuk apabila tersedia material urugan lebih dari satu macam. Urugan terdiri dari urugan kedap air, urugan semi kedap air (transisi), dan urugan lulus air. Urugan kedap air atau inti kedap air umumnya dari lempung atau tanah berlempung, dan ditempatkan vertikal didesain di bagian tengah. Tanah bahan urugan inti harus mengandung lempung minimal 25% (perbandingan berat). Bagian inti tanah ini dilindungi dengan urugan semi kedap air di bagian hulu dan hilirnya. Sedangkan bagian paling luar terdiri dari urugan lulus air. Dengan susunan seperti itu koefisien kelulusan air dan gradasi material berubah secara bertahap, makin ke luar makin besar.

Untuk mencegah terangkutnya butiran halus material urugan inti ke dalam urugan paling luar yang lulus air oleh aliran rembesan, maka urugan semi kedap air di

hulu dan di hilir inti kedap air harus dapat berfungsi sebagai *filter* dan transisi. Apabila tanah bahan inti tidak dapat diperoleh di tempat, maka inti dapat dibuat dari bahan substitusi, misal : beton atau semen tanah. Bila bahan substitusi dipakai maka inti menjadi relatif tipis, tebal minimal 0,60 m, dan disebut dinding diafragma.

c. Tipe Pasangan Batu atau Beton

Apabila fondasi tubuh embung terdiri atas satuan batu, maka tubuh embung dapat dibuat dari pasangan batu atau beton. Pada lembah yang sempit dan curam, berbentuk V, tubuh embung tipe ini umumnya didesain menjadi satu dengan bangunan pelimpah yang terbuat dari material yang sama. Agar keamanan terhadap stabilitas dapat terpenuhi maka tubuh embung didesain berbentuk *gravity*, sehingga stabilitasnya dapat diperoleh dari berat strukturnya sendiri. Tubuh embung bagian hilir didesain dengan kemiringan tidak lebih curam dari 1H : 1V, sedang tingginya maksimum diambil 7,00 m dari galian pondasi.

d. Tipe Komposit

Tipe komposit dibangun pada fondasi yang terdiri dari satuan batu, dengan lembah yang cukup panjang. Bangunan pelimpah dibangun menjadi satu dengan tubuh embung. Bangunan pelimpah didesain sebagai pelimpah dari pasangan batu atau beton, sedang tubuh embung dibangun di kiri kanan pelimpah yang dapat didesain sebagai urugan homogen atau urugan majemuk.

Yang perlu diperhatikan di sini yaitu hubungan antara pelimpah dengan urugan tubuh embung, karena bagian kontak ini merupakan tempat yang kritis terhadap rembesan. Di bidang kontak antara pasangan batu/beton dengan urugan inti perlu diberi tanah lempung yang sangat plastik dan dipadatkan dalam keadaan basah.

3.9.2. Rencana Teknis Pondasi

Keadaan geologi pada pondasi embung sangat mempengaruhi pemilihan tipe embung, oleh karena itu penelitian dan penyelidikan geologi perlu dilaksanakan dengan baik. Sesuai dengan jenis batuan yang membentuk lapisan pondasi, maka secara umum pondasi embung dapat dibedakan menjadi 3 jenis (Teknik Bendungan, Soedibyo, 1993).

a. Pondasi batuan (*Rock foundation*)

b. Pondasi pasir atau kerikil

c. Pondasi tanah.

Daya dukung tanah (*bearing capacity*) adalah kemampuan tanah untuk mendukung beban baik dari segi struktur pondasi maupun bangunan di atasnya tanpa terjadinya keruntuhan geser (Mekanika Tanah, Braja M. Das, 1985).

Daya dukung batas (*ultimate bearing capacity*) adalah daya dukung terbesar dari tanah mendukung beban dan diasumsikan tanah mulai terjadi keruntuhan (Mekanika Tanah, Braja M. Das, 1985).

Besarnya daya dukung batas terutama ditentukan oleh :

a. Parameter kekuatan geser tanah yang terdiri dari kohesi (C) dan sudut geser dalam (ϕ)

b. Berat isi tanah (γ)

c. Kedalaman pondasi dari permukaan tanah (Z_f)

d. Lebar dasar pondasi (B)

Menurut Sosrodarsono & Takeda (1984) besarnya daya dukung yang diijinkan sama dengan daya dukung batas dibagi angka keamanan, dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$qa = \frac{q_{ult}}{FK}$$

Perhitungan daya dukung batas untuk pondasi dangkal pada kondisi umum :

1. Pondasi menerus

$$q_{ult} = c * N_c + \gamma * D * N_q + \left(\frac{B}{2}\right) * \gamma * N_\gamma$$

2. Pondasi persegi

$$q_{ult} = c * N_c \left(1 + 0.3 * \left(\frac{B}{2}\right)\right) + \gamma * D * N_q + B * 0.4 \gamma * N_\gamma$$

3.9.3. Perencanaan Tubuh Embung

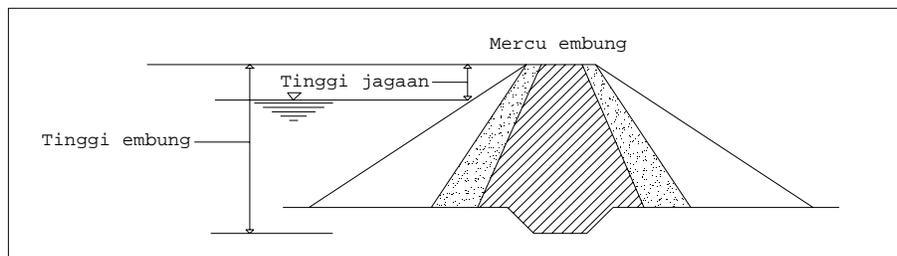
a. Tinggi Embung

Tinggi embung adalah perbedaan antara elevasi permukaan pondasi dan elevasi mercu embung. Apabila pada embung dasar dinding kedap air atau zona kedap

air, maka yang dianggap permukaan pondasi adalah garis perpotongan antara bidang vertikal yang melalui hulu mercu embung dengan permukaan pondasi alas embung tersebut.

b. Tinggi Jagaan (*Free Board*)

Tinggi jagaan adalah perbedaan antara elevasi permukaan maksimum rencana air dalam embung dan elevasi mercu embung. Elevasi permukaan air maksimum rencana biasanya merupakan elevasi banjir rencana embung. Tinggi jagaan diambil 1,00 m.



Gambar 3.14. Gambar Tinggi Embung dan Tinggi Jagaan Embung

c. Panjang Embung

Panjang embung adalah seluruh panjang mercu embung yang bersangkutan, termasuk bagian yang digali pada tebing-tebing sungai di kedua ujung mercu tersebut. Apabila bangunan pelimpah atau bangunan penyadap terdapat pada ujung-ujung mercu, maka lebar bangunan-bangunan pelimpah tersebut diperhitungkan pula dalam menentukan panjang embung.

d. Lebar Mercu Embung

Lebar mercu embung yang memadai diperlukan agar puncak embung dapat tahan terhadap hempasan ombak dan dapat tahan terhadap aliran filtrasi yang melalui puncak tubuh embung. Di samping itu, pada penentuan lebar mercu perlu diperhatikan kegunaannya sebagai jalan inspeksi dan pemeliharaan embung. Penentuan lebar mercu dirumuskan (Suyono Sosrodarsono,1989) sebagai berikut :

$$b = 3,6 H^{1/3} - 3$$

di mana :

b = lebar mercu (m)

H = tinggi embung (m)

e. Kemiringan Lereng Urugan (*Slope Gradient*)

Kemiringan lereng urugan harus ditentukan sedemikian rupa agar stabil terhadap longsoran. Hal ini sangat tergantung pada jenis material urugan yang hendak dipakai. Kestabilan urugan harus diperhitungkan terhadap surut cepat muka air kolam dan rembesan langgeng, serta harus tahan terhadap gempa (Pedoman Kriteria Desain Embung, DPU, 1994).

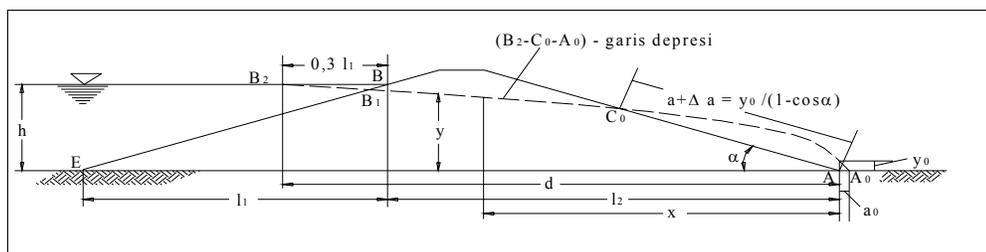
3.9.4. Stabilitas Tubuh Embung

Merupakan perhitungan konstruksi untuk menentukan ukuran (dimensi) embung agar mampu menahan muatan-muatan dan gaya-gaya yang bekerja padanya dalam keadaan apapun juga. Selain itu, konstruksi juga harus dicek terhadap stabilitas konstruksi, stabilitas geser, stabilitas guling, stabilitas daya dukung dan stabilitas terhadap erosi bawah tanah (*piping*). Konstruksi juga harus aman terhadap rembesan baik pada saat embung dalam keadaan kering (γ_k), penuh air (γ_{sub}) maupun permukaan air turun tiba-tiba / *rapid drawdown* (γ_{sat}).

a. Stabilitas Tubuh Embung Terhadap Rembesan

Baik embung maupun pondasinya diharuskan mampu menahan gaya-gaya yang ditimbulkan oleh adanya air filtrasi yang mengalir melalui celah-celah antara butiran-butiran tanah pembentuk tubuh embung dan pondasi tersebut.

Hal tersebut dapat diketahui dengan mendapatkan formasi garis depresi (*seepage flow-net*) yang terjadi dalam tubuh dan pondasi embung tersebut. Garis depresi didapat dengan persamaan parabola bentuk dasar seperti di bawah ini :



Gambar 3.15. Gambar Garis Depresi Pada Embung Homogen

Untuk perhitungan selanjutnya maka digunakan persamaan-persamaan berikut :

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0}$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

Untuk zone inti kedap air garis depresi digambarkan sebagai kurva dengan persamaan berikut :

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2}$$

di mana :

h = jarak vertikal antara titik A dan B

d = jarak horisontal antara titik B₂ dan A

l₁ = jarak horisontal antara titik B dan E

l₂ = jarak horisontal antara titik B dan A

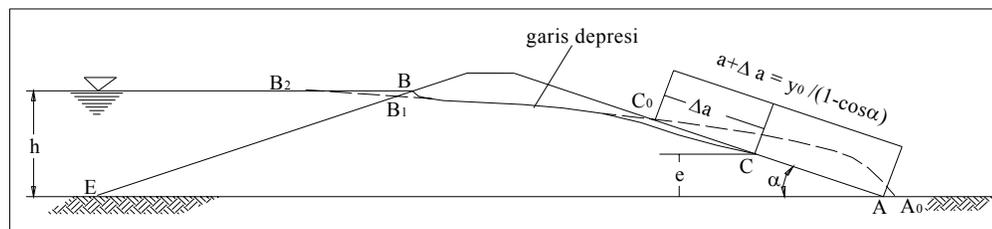
A = ujung tumit hilir embung

B = titik perpotongan permukaan air waduk dan lereng hulu embung.

A₁ = titik perpotongan antara parabola bentuk besar garis depresi dengan garis vertikal melalui titik B

B₂ = titik yang terletak sejauh 0,3 l₁ horisontal kearah hulu dari titik B

Akan tetapi garis parabola bentuk dasar (B₂-C₀-A₀) diperoleh dari persamaan tersebut, bukanlah garis depresi sesungguhnya, masih diperlukan penyesuaian menjadi garis B-C-A yang merupakan bentuk garis depresi yang sesungguhnya seperti tertera pada berikut :



Gambar 3.16. Gambar Garis Depresi pada Embung Homogen (sesuai dengan garis parabola yang dimodifikasi)

Panjang Δa tergantung dari kemiringan lereng hilir embung, dimana air filtrasi tersembul keluar yang dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha}$$

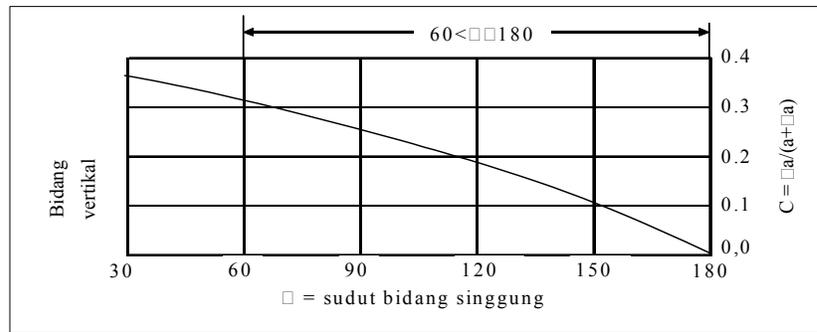
di mana :

a = jarak \overline{AC}

Δa = jarak $\overline{C_0C}$

α = sudut kemiringan lereng hilir embung

Untuk memperoleh nilai a dan Δa dapat dicari berdasarkan nilai α dengan menggunakan grafik sebagai berikut :



Gambar 3.17. Grafik hubungan antara sudut bidang singgung (α) dengan $\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$

b. Stabilitas Lereng Embung Urugan Menggunakan Metode Irisan Bidang Luncur Bundar.

Menurut Sodiby (1993) faktor keamanan dari kemungkinan terjadinya longsor dapat diperoleh dengan menggunakan rumus keseimbangan sebagai berikut :

$$F_s = \frac{\sum \{C.l + (N - U - N_e) \tan \phi\}}{\sum (T + T_e)}$$

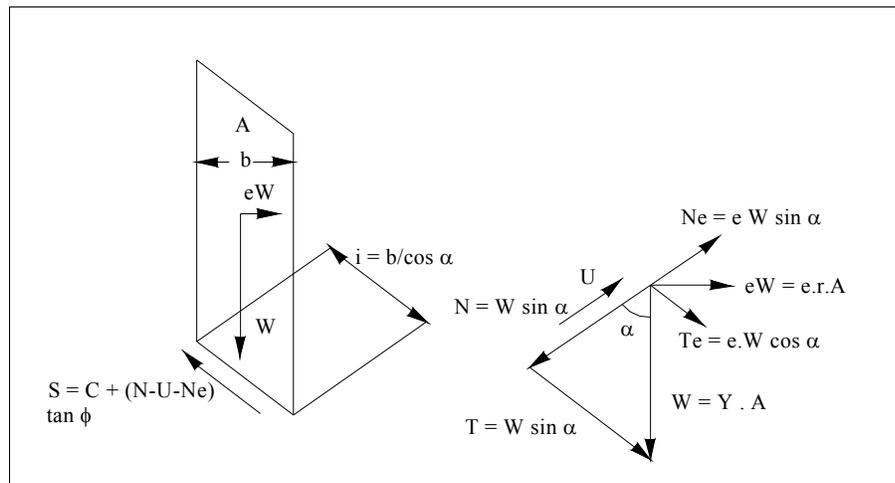
$$= \frac{\sum C.l + \sum \{\gamma.A(\cos \alpha - e.\sin \alpha) - V\} \tan \phi}{\sum \gamma.A(\sin \alpha + e.\cos \alpha)}$$

di mana :

F_s = faktor keamanan

N = beban komponen vertikal yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur ($= \gamma.A.\cos \alpha$)

- T = beban komponen tangensial yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur ($= \gamma.A.\sin \alpha$)
- U = tekanan air pori yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur
- Ne = komponen vertikal beban *seismic* yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur ($= e.\gamma.A.\sin \alpha$)
- Te = komponen tangensial beban *seismic* yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur ($= e.\gamma.A.\cos \alpha$)
- ϕ = sudut gesekan dalam bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur.
- C = Angka kohesi bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur
- Z = lebar setiap irisan bidang luncur
- E = intensitas seismis horisontal
- γ = berat isi dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur
- A = luas dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur
- α = sudut kemiringan rata-rata dasar setiap irisan bidang luncur
- V = tekanan air pori



Gambar 3.18. Gambar Cara Menentukan Harga-Harga N dan T

Prosedur perhitungan metode irisan bidang luncur bundar :

- Andaikan bidang luncur bundar dibagi menjadi beberapa irisan vertikal dan walaupun bukan merupakan persyaratan yang mutlak, biasanya setiap irisan lebarnya dibuat sama. Disarankan agar irisan bidang luncur tersebut dapat

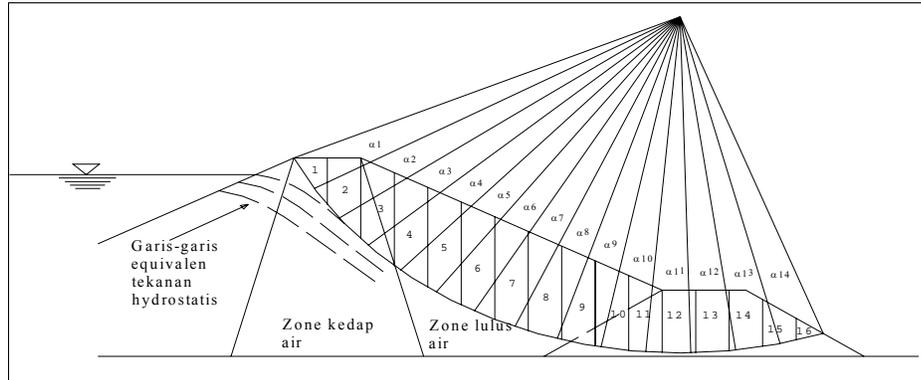
melintasi perbatasan dari dua buah zone penimbunan atau supaya memotong garis depresi aliran filtrasi.

- b. Gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan adalah sebagai berikut :
- c. Berat irisan (W), dihitung berdasarkan hasil perkalian antara luas irisan (A) dengan berat isi bahan pembentuk irisan (γ), jadi $W = A \cdot \gamma$
- d. Beban berat komponen vertikal yang bekerja pada dasar irisan (N) dapat diperoleh dari hasil perkalian antara berat irisan (W) dengan cosinus sudut rata-rata tumpuan (α) pada dasar irisan yang bersangkutan jadi $N = W \cdot \cos \alpha$
- e. Beban dari tekanan hidrostatis yang bekerja pada dasar irisan (U) dapat diperoleh dari hasil perkalian antara panjang dasar irisan (b) dengan tekanan air rata-rata ($U/\cos\alpha$) pada dasar irisan tersebut, jadi: $U = U \cdot b/\cos\alpha$
- f. Beban berat komponen tangensial (T) diperoleh dari hasil perkalian antara berat irisan (W) dengan sinus sudut rata-rata tumpuan dasar irisan tersebut jadi $T = W \sin\alpha$
- g. Kekuatan tahanan kohesi terhadap gejala peluncuran (C) diperoleh dari hasil perkalian antara angka kohesi bahan (c') dengan panjang dasar irisan (b) dibagi lagi dengan $\cos \alpha$, jadi $C = c' \cdot b/\cos\alpha$
- h. Kekuatan tahanan geseran terhadap gejala peluncuran irisan adalah kekuatan tahanan geser yang terjadi pada saat irisan akan meluncur meninggalkan tumpuannya
- i. Kemudian jumlahkan semua kekuatan-kekuatan yang menahan (T) dan gaya-gaya yang mendorong (S) dari setiap irisan bidang luncur, dimana T dan S dari masing-masing irisan dinyatakan sebagai $T = W \sin \alpha$ dan $S = C + (N-U) \tan \phi$.
- j. Faktor keamanan dari bidang luncur tersebut adalah perbandingan antara jumlah gaya pendorong dan jumlah gaya penahan yang dirumuskan (Soedibyo, 1993) :

$$F_s = \frac{\sum S}{\sum T}$$

di mana :

- F_s = faktor aman
 $\sum S$ = jumlah gaya pendorong
 $\sum T$ = jumlah gaya penahan



Gambar 3.19. Gambar Skema Perhitungan Bidang Lurur Dalam Kondisi Waduk Penuh Air

c. Kapasitas Aliran Filtrasi

Kapasitas filtrasi yang mengalir melalui tubuh dan pondasi embung yang didasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} \times K \times H \times L$$

di mana :

- Q_f = kapasitas aliran filtrasi
 N_f = angka pembagi dari garis trayektori aliran filtrasi
 N_p = angka pembagi dari garis equipotensial
 K = koefisien filtrasi
 H = tinggi tekan air total
 L = panjang profil melintang tubuh embung

d. Gejala Sufosi (*Piping*) Dan Sembulan (*Boiling*)

Adalah erosi yang cepat sebagai akibat rembesan terpusat berat tubuh dan atau pondasi embung. Air meresap melalui timbunan tanah lapisan kedap air atau pondasi embung. Dengan adanya tekanan air di sebelah hulu maka ada kecenderungan terjadinya aliran air melewati pori-pori di dalam tanah. Kecepatan

aliran keluar ke atas permukaan lereng hilir yang komponen vertikalnya dapat mengakibatkan terjadinya perpindahan butiran-butiran bahan embung, kecepatannya dirumuskan sebagai berikut :

$$c = \sqrt{\frac{w_1 \times g}{F \times \gamma}}$$

di mana :

c = kecepatan kritis (m/det)

w₁ = berat butiran bahan dalam air (t/m³)

g = percepatan gravitasi (m/det²)

F = luas permukaan yang menampung aliran filtrasi (m²)

γ = berat isi air (t/m³)

3.9.5. Stabilitas Bangunan Pelimpah

Merupakan perhitungan konstruksi untuk menentukan ukuran (dimensi) embung agar mampu menahan muatan-muatan dan gaya-gaya yang bekerja padanya dalam keadaan apapun juga. Konstruksi harus aman terhadap guling, geser, eksentrisitas dan daya dukung tanah.

Gaya-gaya yang bekerja pada embung urugan (Teknik Bendungan, Soedibyo, 1993) :

a. Berat Tubuh Embung Sendiri

Berat tubuh embung dihitung dalam beberapa kondisi yang tidak menguntungkan yaitu :

- Pada kondisi lembab segera setelah tubuh embung selesai dibangun.
- Pada kondisi sesudah permukaan waduk mencapai elevasi penuh, di mana bagian embung yang terletak di sebelah atas garis depresi dalam keadaan jenuh.
- Pada kondisi di mana terjadi gejala penurunan mendadak (*rapid drawdown*) permukaan air embung, sehingga semua bagian embung yang semula terletak di sebelah bawah garis depresi tetap dianggap jenuh.

b. Tekanan Hidrostatik

Pada perhitungan stabilitas embung dengan metode irisan (*slice methode*) biasanya beban hidrostatik yang bekerja pada lereng sebelah hulu embung dapat digambarkan dalam tiga cara pembebanan. Pemilihan cara pembebanan yang cocok untuk suatu perhitungan, harus disesuaikan dengan semua pola gaya-gaya yang bekerja pada embung, yang akan diikut sertakan dalam perhitungan.

Pada kondisi di mana garis depresi mendekati bentuk horizontal, maka dalam perhitungan langsung dapat dianggap horisontal dan berat bagian tubuh embung yang terletak di bawah garis depresi tersebut diperhitungkan sebagai berat bahan yang terletak dalam air. Tetapi dalam kondisi perhitungan yang berhubungan dengan gempa, biasanya berat bagian ini dianggap dalam kondisi jenuh.

c. Tekanan Air Pori

Tekanan air pori adalah gaya-gaya yang timbul dari tekanan air pori di embung terhadap lingkaran bidang luncur. Tekanan air pori dihitung dengan beberapa kondisi yaitu :

- Gaya-gaya yang timbul dari tekanan air pori dalam kondisi tubuh embung baru dibangun.
- Gaya-gaya yang timbul dari tekanan air pori dalam kondisi embung terisi penuh dan permukaan air sedang menurun secara berangsur-angsur.
- Gaya-gaya yang timbul dari tekanan air pori dalam kondisi terjadinya penurunan mendadak permukaan embung mencapai permukaan terendah, sehingga besarnya tekanan air pori dalam tubuh embung masih dalam kondisi embung penuh.

d. Beban Seismis (*Seismic Force*)

Beban seismis akan timbul pada saat terjadinya gempa bumi dan penetapan suatu kapasitas beban *seismis* secara pasti sangat sulit. Komponen horisontal beban seismis dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Suyono Sosrodarsono, 1989) :

$$M \cdot \alpha = e (M \cdot g)$$

di mana :

M = massa tubuh embung

α = percepatan horisontal

e = intensitas *seismic* horisontal

g = percepatan gravitasi bumi (m/detik²)