

**BAB II**  
**TINJAUAN PUSTAKA**

**2.1 Analisis Hidrologi**

**2.1.1 Uji Konsistensi Data**

Sebelum data hujan digunakan terlebih dahulu harus lewat pengujian untuk konsistensi data tersebut. Metode yang digunakan untuk pengujian data yaitu metode RAPS (Rescaled Adjusted Partial Sums) yaitu pengujian dengan menggunakan data hujan tahunan rata rata dari stasiun itu sendiri yaitu dengan pengujian kumulatif penyimpangan kuadrat terhadap nilai reratanya (Buishand,1982). Untuk lebih jelas lagi bisa dilihat pada rumus di bawah:

$$S_0^* = 0$$

$$S_k^* = \sum_{i=0}^k (Y_i - Y) \quad \text{dengan : } k = 1,2,3,\dots,n$$

$$S_{k^{**}} = \frac{S_k^*}{D_y}$$

$$D_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2}{n}$$

Nilai statistik Q dan R adalah:

$$Q = \max | S_{k^{**}} |$$

$$0 \leq k \leq n$$

$$R = \max S_{k^{**}} - \min S_{k^{**}}$$

$$0 \leq k \leq n \quad 0 \leq k \leq n$$



**2.1.2 Curah Hujan Rerata Daerah**

Curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir adalah curah hujan rerata daerah (*Area Rainfall*), bukan curah hujan pada suatu titik tertentu (*Point Rainfall*). Besarnya curah hujan rerata daerah dinyatakan dalam mm. Terdapat berbagai metode untuk mendapatkan *area rainfall*, yaitu :

1. Metode Rerata Aljabar (*arithmetical mean*).
2. Metode Poligon Thiessen
3. Metode Isohyet

Melihat letak stasiun pengamat hujan yang tersebar tidak merata, maka perhitungan curah hujan rerata daerah digunakan cara Rerata Aljabar, yaitu dengan menghitung rata-rata hujan



yang didapat dari beberapa stasiun pengamat hujan. Adapun cara perhitungannya menggunakan rumus sebagai berikut (CD. Soemarto, 1993: 10):

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n} \quad (2-1)$$

dimana

d = tinggi curah hujan rata-rata

d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, ..., d<sub>n</sub> = tinggi curah hujan pada stasiun penakar 1, 2, ..., n

n = banyaknya stasiun penakar

### 2.1.3 Hujan Rancangan Maksimum

Curah hujan rancangan adalah curah hujan terbesar tahunan dengan peluang tertentu yang mungkin terjadi di suatu daerah. Dalam studi ini dipakai Metode Log Pearson Type III dengan pertimbangan bahwa cara ini lebih fleksibel dan dapat dipakai untuk semua sebaran data, yang mana besarnya harga koefisien Skewness (Cs) dan koefisien Kurtosis (Ck) tidak ada ketentuan.

Persyaratan untuk pemilihan metode frekwensi dapat dilihat pada tabel 2.1

Tahapan untuk menghitung curah hujan rancangan berdasarkan Log Pearson Type III adalah sebagai berikut (CD Sumarto, 1993:152) :

1. Mengubah data hujan harian maksimum tahunan sebanyak n buah X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>, ..., X<sub>n</sub>, menjadi Log X<sub>1</sub>, Log X<sub>2</sub>, Log X<sub>3</sub>, ... .Log X<sub>n</sub>.
2. Hitung rata-rata logaritma dengan rumus :

$$\overline{\log X} = \frac{\sum_{i=1}^n \log Xi}{n} \quad (2-2)$$

3. Hitung harga standard deviasi dengan rumus :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log Xi - \overline{\log X})^2}{n-1}} \quad (2-3)$$

Tabel 2.1 Syarat pemilihan metode frekwensi

Jenis Metode	Ck	Cs
Gumbel	5,402	1, 139
Log Normal	3 000	0,000
Log Pearson Tipe III	bebas	Bebas

Sumber : Shahin, 1976:123



4. Hitung koefisien kepengcengan dengan rumus :

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (\log X_i - \overline{\log X})^3}{(n-1)(n-2)S^3} \quad (2-4)$$

5. Hitung logaritma curah hujan dengan periode ulang tertentu :

$$\log X_T = \overline{\log X} + G.S \quad (2-5)$$

dengan harga G diperoleh berdasarkan harga Cs dan tingkat probabilitasnya.

6. Curah hujan rancangan dengan periode ulang tertentu adalah harga antilog  $X_T$ .

### 2.1.4 Uji Kesesuaian Distribusi

Untuk menentukan kecocokan distribusi frekwensi dari sampel data terhadap fungsi distribusi peluang yang diperkirakan dapat menggambarkan/mewakili distribusi frekwensi tersebut diperlukan pengujian parameter (Soewarno, 1995:193).

#### 2.1.4.1 Uji Smirnov Kolmogorof.

Dari grafik pengeplotan data curah hujan pada kertas probabilitas didapat perbedaan yang maksimum antara peluang teoritis dan peluang empiris, yang disebut dengan  $\Delta$  maks.

Dalam bentuk persamaan dapat ditulis (Sri Harto, 1983:180) :

$$\Delta_{maks} = [P_{(T)} - P_{(E)}] \quad (2-6)$$

dimana :

$\Delta$  maks = selisih antara peluang teoritis dengan peluang empiris

$P_{(T)}$  = peluang teoritis

$P_{(E)}$  = peluang empiris

Perhitungan peluang empiris digunakan persamaan Weibull (Imam Subarkah, 1980:28)

$$P = \frac{100.m}{n+1} (\%) \quad (2-7)$$

dimana :

P = probabilitas (%)

m = nomor urut data dari seri yang diurutkan

n = banyaknya data

Apabila  $\Delta$  maks <  $\Delta$  cr berarti distribusi frekuensi tersebut dapat diterapkan untuk semua data.



### 2.1.4.2 Uji Chi Square

Digunakan untuk menguji apakah distribusi pengamatan sama dengan distribusi teoritis.

Perhitungan dengan menggunakan persamaan (Shahin, 1976:186) :

$$(X^2)_{hit} = \frac{\sum_{i=1}^k (EF - OF)^2}{EF} \quad (2-8)$$

dimana :

OF = nilai yang diamati (*Observed Frequency*)

EF = nilai yang diharapkan (*Expected Frequency*)

Agar distribusi frekuensi yang dipilih dapat diterima, maka harga  $X^2 < H^2_{cr}$ . Harga  $X^2_{cr}$  dapat diperoleh dengan menentukan taraf signifikansi  $\alpha$  dengan derajat kebebasannya (*level of significant*).

### 2.1.5 Analisis Distribusi Hujan Jam - Jaman

Untuk menghitung hidrograf banjir rancangan dengan cara hidrograf banjir satuan (unit hidrograf) perlu diketahui sebaran hujan jam jaman dengan suatu interval tertentu. Prosentase distribusi hujan yang terjadi dihitung dengan rumus Dr. Mononobe sebagai berikut (Suyono Sosrodarsono, 1985:146) :

$$R_t = \frac{R_{24}}{24} \left( \frac{24}{t} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2-9)$$

$$R_t = t \cdot R_T = (t-1)R_{(t-1)} \quad (2-10)$$

dimana :

$R_t$  = curah hujan pada jam ke T

T = waktu mulai hujan hingga jam ke T (jam)

$R_{24}$  = curah hujan efektif dalam 24 jam (mm)

t = waktu konsentrasi hujan (jam)

$R_T$  = intensitas hujan rerata dalam T jam (mm/jam)

$R_{(t-1)}$  = rerata hujan dari awal sampai dengan jam ke (t-1)

Tabel 2.2 Nilai Kritis Smirnov Kolmogorov

n/α	0,2	0,1	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	4,49
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

Sumber : Shahin, 1976:188

Tabel 2.3 Nilai Kritis Chi-Kuadrat

n/α	0,2	0,1	0,05	0,01	0,001
1	1,624	2,706	3,841	6,635	10,287
2	3,219	4,605	5,991	9,210	13,815
3	4,642	6,251	7,815	11,345	16,268
4	5,989	7,779	9,448	11,277	18,465
5	7,289	9,236	11,070	15,086	20,517
6	8,558	10,645	12,592	16,812	22,457
7	9,803	12,017	14,067	18,475	24,322
8	11,030	13,362	15,507	20,090	26,125
9	12,242	14,684	16,919	21,666	27,877
10	13,442	15,987	18,307	23,209	29,588
11	14,631	17,275	19,675	24,725	31,264
12	15,812	18,549	21,026	26,217	32,909
13	16,985	19,812	22,362	27,688	34,528
14	18,151	21,064	23,635	29,141	36,123
15	19,311	22,307	24,996	30,578	37,697
16	20,465	23,542	26,296	32,000	39,252
17	21,615	24,769	27,587	33,409	40,790
18	22,760	25,989	28,869	34,805	42,312
19	23,900	27,204	30,144	36,191	43,312
20	25,038	28,412	31,410	37,586	45,312

Sumber : Shahin, 1976 : 188

### 2.1.6 Koefisien Pengaliran

Koefisien pengaliran adalah suatu variabel yang didasarkan pada kondisi daerah dan karakteristik hujan. Koefisien pengaliran dirumuskan sebagai berikut :

$$C = \frac{\text{Volume Runoff}}{\text{Volume Hujan}} \quad (2-11)$$

Koefisien pengaliran pada suatu daerah dipengaruhi oleh karakteristik, yaitu :

- Koefisien hujan
- Luas dan bentuk daerah pengaliran
- Kemiringan daerah aliran dan kemiringan dasar sungai
- Daya infiltrasi dan perkolasi tanah

- e. Kebasahan tanah
- f. Suhu udara dan angin serta evaporasi
- g. Tata guna tanah

Seandainya pada suatu daerah aliran sungai belum pernah ada studi tentang nilai C ini, maka besarnya C dapat didekati dengan tabel 2.4.

### 2.1.7 Curah Hujan Netto Jam-Jaman

Hujan netto adalah bagian hujan total yang menghasilkan limpasan langsung (*direct run-off*), yang terdiri dari limpasan permukaan dan limpasan bawah permukaan. Dengan menganggap bahwa proses transformasi hujan menjadi limpasan langsung mengikuti proses linier dan tidak berubah oleh waktu (*linier and time invariant process*), maka hujan netto dinyatakan sebagai berikut :

$$R_n = CR \quad (2-12)$$

dengan:

$R_n$  = Hujan netto

$R$  = Intensitas curah hujan

$C$  = Koefisien

Tabel 2.4 Koefisien Pengaliran Sungai

Kondisi Daerah Pengaliran Sungai	Angka C
Daerah pegunungan berlereng terjal	0,75-0,90
Daerah perbukitan	0,70-0,80
Daerah bergelombang dan bersemak	0,50-0,75
Daerah datar yang digarap	0,45-0,60
Daerah persawahan irigasi	0,70-0,80
Sungai di daerah pegunungan	0,75-0,85
Sungai kecil di daerah dataran	0,45-0,75
Sungai yang besar dengan wilayah pengaliran yang lebih dari seperduanya terdiri dari dataran	0,50-0,75

Sumber : Suyono Sosrodarsono: 1993 : 145

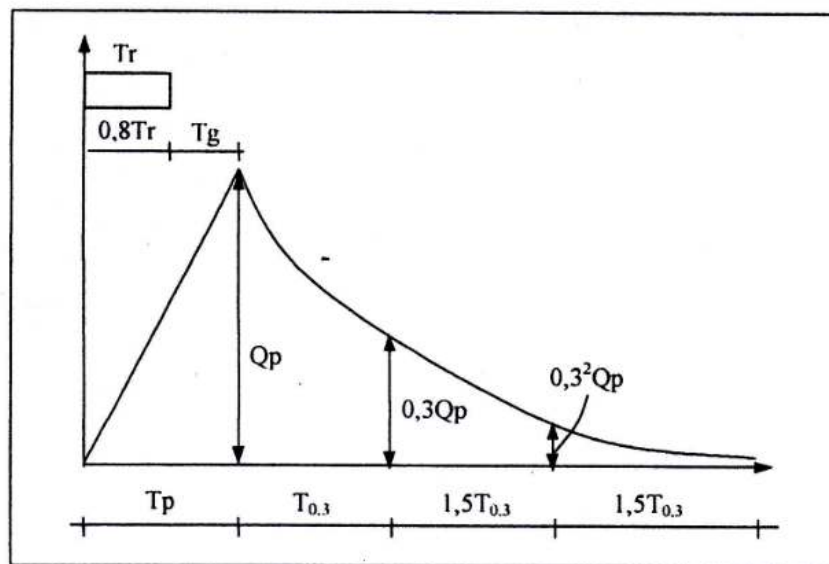


### 2.1.8 Hidrograf Satuan Sintentik atau Debit Banjir Rancangan

Menganalisa debit banjir rancangan, terlebih dahulu harus dibuat hidrograf banjir pada sungai yang bersangkutan. Parameter yang mempengaruhi unit hidrograf adalah :

1. Tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak hidrograf (*time to peak magnitude*).
2. Tenggang waktu dari titik berat hujan sampai titik berat hidrograf (*time lag*).
3. Tenggang waktu hidrognaf (*time base of hydrograph*).
4. Luas daerah pengaliran.
5. Panjang alur sungai utama terpanjang (*length of long set channel*).
6. Koefisien pengaliran (*run-off coefficient*).

Perhitungan unit hidrograf dalam studi ini memakai metode hidrograf satuan sintetik Nakayasu, dengan bentuk kurva dinyatakan sebagai berikut :



Gambar 2.1 Hidrograf sintetik Nakayasu

$$Q_p = \frac{C.A.R_0}{3,6x(0,3T_p + T_{0,3})} \quad (2-13)$$

dimana :

$Q_p$  = debit puncak banjir ( $m^3/dt/mm$ )

$C$  = koefisien pengaliran

$A$  = luas daerah pengaliran ( $Km^2$ )

$R_0$  = curah hujan satuan ( $mm$ )

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

$T_{0,3}$  = waktu yang diperlukan pada penurunan debit puncak sampai ke debit sebesar 30 %

dari debit puncak (jam)

Untuk menentukan  $T_p$  dan  $T_{0.3}$  digunakan rumus :

$$T_p = T_g + 0,8.T_r \quad (2-14)$$

$$T_{0.3} = \alpha.T_g \quad (2-15)$$

$T_g$  dihitung berdasar rumus :

$$T_g = 0,4 + 0,058.L, \text{ untuk } L > 15 \text{ km} \quad (2-16)$$

$$T_g = 0,21 L^{0.4}, \text{ untuk } L > 15 \text{ km} \quad (2-17)$$

Dimana :

$T_g$  = waktu konsentrasi (jam)

$L$  = panjang alur sungai (km)

$T_r$  = satuan waktu hujan (jam)

$\alpha$  = parameter yang bernilai antara 1,5 - 3,5

Harga  $\alpha$  mempunyai kriteria sebagai berikut :

- Untuk daerah pengaliran biasa  $\alpha = 2$
- Untuk bagian naik hidrograf yang lambat dan bagian turun yang cepat harga  $\alpha = 1,5$
- Untuk bagian yang naik hidrograf yang cepat dan bagian turun yang lambat harga  $\alpha = 3$

Untuk menentukan parameter tersebut digunakan rumus pendekatan sebagai berikut :

$$T_{0.3} = 0,47.(A.L)^{0.25} \quad (2-18)$$

$$T_{0.3} = \alpha.T_g \quad (2-19)$$

Dari dua persamaan di atas, maka nilai  $\alpha$  dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{0,47.(A.L)^{0.25}}{T_g} \quad (2-20)$$

dimana :

$L$  = panjang alur sungai utama terpanjang (km)

$A$  = luas daerah aliran ( $\text{km}^2$ )

Namun tidak tertutup kemungkinan untuk mengambil harga  $\alpha$  yang bervariasi guna mendapatkan hidrograf yang sesuai dengan hasil pengamatan. Persamaan hidrograf satuan adalah sebagai berikut :

1. Pada kurva naik (*rising line*)

$$0 \leq t \leq T_p$$



$$Q_T = Q_{maks} \left[ \frac{t}{T_P} \right]^{2.4} \quad (2-21)$$

- a.  $T_P \leq t \leq (T_P + T_{0.3})$
- b.  $(T_P + T_{0.3}) \leq t \leq (T_P + T_{0.3} + T_{0.3}^2)$

$$Q_i = Q_{maks} (0,3)^{\frac{t-t_r+1.5.T_{0.3}}{1.5T_{0.3}}} \quad (2-22)$$

- c.  $t \geq (T_P + T_{0.3} + 15.T_{0.3})$

$$Q_i = Q_{maks} (0,3)^{\frac{t-t_r+1.5.T_{0.3}}{2.T_{0.3}}} \quad (2-23)$$

### 2.1.9 Debit Banjir Rencana

Analisa debit banjir digunakan untuk menentukan besarnya debit banjir rencana pada suatu DAS. Debit banjir rencana merupakan debit banjir maksimum rencana pada sungai atau saluran alamiah dengan periode ulang tertentu yang dapat dialirkan tanpa membahayakan lingkungan sekitar dan stabilitas sungai. Data yang dibutuhkan untuk penentuan debit banjir rencana antara lain data curah hujan. Data curah hujan merupakan salah satu data yg dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya debit banjir rencana baik secara rasional, empiris maupun statistik.

Adapun langkah-langkah dalam menentukan debit banjir adalah:

1. Menentukan DAS dan luasnya
2. Menentukan curah hujan maksimum pada DAS yang ditinjau tiap tahunnya dari data curah hujan
3. Menganalisis curah hujan rencana dengan periode ulang T tahun
4. Menghitung debit banjir rencana pada periode ulang T tahun.

### 2.1.10 Debit Andalan

Analisa debit andalan dalam studi ini dimaksudkan untuk mencari ketersediaan besar debit di sungai guna mensuplay air embung sesuai dengan kapasitas yang direncanakan. Debit andalan adalah debit yang dipakai sebagai andalan persediaan air sungai pada daerah studi. Debit andalan dihitung dengan menggunakan metode simulasi hujan menjadi aliran (*Rainfall -- runoff model*). Pada studi ini untuk memperkirakan debit sungai dipakai metode F.J. Mock.

Kriteria perhitungan dan asumsi yang digunakan dalam metode F.J. Mock diuraikan sebagai berikut (Radhi S, 1987:2) :

1. Evapotranspirasi terbatas (ET)

$$ET = Fp - (E_p \cdot \left(\frac{m}{20}\right) \cdot (18-n)) \quad (2-24)$$

dimana :

$E_p$  = Evapotranspirasi potensial (mm)

$n$  = Jumlah hujan harian

$m$  = Areal yang tidak tertutupi tanaman (*exposed surface*), ditaksir berdasarkan peta tata guna lahan atau dengan asumsi.

$m = 0\%$  untuk lahan dengan hutan lebat

$m = 0\%$  pada akhir musim hujan dan bertambah 10 % setiap bulan kering untuk lahan sekunder

$m = 10\% - 40\%$  untuk lahan tererosi

$m = 20\% - 50\%$  untuk lahan pertanian yang diolah

2. Keseimbangan air di permukaan tanah

Dipengaruhi oleh jumlah air yang masuk kedalam permukaan tanah dan kondisi tanah itu sendiri. Data yang diperlukan adalah :

- $P - E_t$  adalah volume air yang masuk ke permukaan tanah merupakan pengurangan dari curah hujan ( $P$ ) dengan evapotranspirasi terbatas ( $E_t$ )
- *Soil Moisture* adalah volume air untuk melembabkan tanah yang besarnya tergantung pada ( $P - E_t$ ) dan *Soil Moisture* bulan lalu
- *Soil Moisture Capacity (SMC)* adalah volume air yang diperlukan untuk mencapai kapasitas kelengasan tanah. Biasanya ditaksir 50 s/d 250 mm
- *Water Surplus (WS)* adalah volume air yang akan masuk ke permukaan tanah.  $WS + (P - E_t) < \text{soil storage}$

3. Tampung air tanah (*ground water storage*) yang besarnya tergantung keseimbangan air dan kondisi tanah. Data yang diperlukan adalah :

- Koefisien infiltrasi ( $I$ ), ditaksir berdasarkan kondisi porositas tanah dan kemiringan daerah pengaliran. Besarnya koefisien infiltrasi ( $I$ ) kurang dari 1
- Faktor resesi air tanah ( $k$ )
- *Initial Storage* adalah volume air tanah yang tersedia di awal perhitungan.

4. Aliran sungai yang merupakan jumlah dari aliran langsung (*direct run off*), aliran dalam tanah (*interflow*) dan aliran air tanah (*base flow*). Besarnya masing-masing aliran tersebut adalah :

- *Base flow* = aliran yang ada sepanjang tahun



= infiltrasi - volume air tanah

- *Direct run off* = *water surplus* - infiltrasi
- *Run off* = *direct run off* - *base flow*

### 2.1.11 Analisis Tampung Mati

Rencana ruang kapasitas tampungan mati merupakan suatu ruangan yang diperlukan sebagai penampung sedimen dari hasil proses erosi tanah daerah aliran sungai hulu yang terangkut oleh aliran air masuk ke waduk. Besarnya kapasitas tampungan ini tergantung dari :

1. Besarnya jumlah sedimen yang masuk.
2. Efisiensi tangkapan.
3. Berat jenis sedimen yang diendapkan.
4. Waktu yang direncanakan.

### 2.1.12 Kapasitas Tampungan

Kajian data kedalaman, luas dan kapasitas genangan merupakan bagian pokok dalam aspek perhitungan perencanaan serta pola pengelolaan pengoperasian waduk. Besar kecilnya kapasitas tampungan ini dari segi kuantitas ditentukan oleh bentuk serta kondisi topografi daerah yang direncanakan. Lengkung Kapasitas merupakan hubungan ketinggian muka air dengan volume waduk serta luas genangan.

### 2.1.13 Sedimentasi

Erosi dan sedimentasi merupakan dua masalah yang saling berkaitan satu dengan yang lainnya. Erosi dan sedimentasi dapat disebabkan oleh angin, air atau limpasan oleh gletser (es). Di sebagian besar daerah di Indonesia erosi disebabkan oleh air. Erosi yang disebabkan oleh air dapat berupa erosi lembaran (*sheet erosion*), gully dan erosi tebing sungai.

Sedimentasi dapat diartikan sebagai pengangkutan, melayani atau mengendapnya material fragmental oleh air. Sedimentasi merupakan akibat dari adanya erosi, dan memberikan akibat yang besar, antara lain :

- Di sungai, pengendapan sedimen di dasar sungai menyebabkan naiknya dasar sungai dan tingginya muka air sehingga mengakibatkan banjir, aliran meandering dan membentuk alur baru.
- Di saluran, pengendapan sedimen di saluran menyebabkan terhentinya operasi



saluran.

- Di waduk, pengendapan sedimen di waduk menyebabkan berkurangnya volume efektif.
- Di bendung atau pintu, menyebabkan kesulitan dalam pengoperasian pintu.

Dari keterangan di atas dapat diketahui bahwa data sedimentasi sangat diperlukan dalam perencanaan bangunan air. Namun demikian tidak diseluruh daerah terdapat data mengenai sedimentasi secara lengkap. Oleh karena itu dalam analisa sedimentasi dapat digunakan pendekatan erosi permukaan dengan metode perhitungan USLE (*Universal Soil Lost Equation*).

### 2.1.13.1 Erosivitas Hujan

Erosivitas hujan merupakan curah hujan yang dipandang sebagai energi kinetik butir-butir hujan menumbuk permukaan tanah. Akibat jatuhnya massa air ke permukaan tanah menyebabkan terjadinya erosi. Semakin besar intensitas curah hujan maka jumlah tanah yang tererosi akan semakin besar.

Perhitungan besarnya indeks erosivitas 4iujan dilakukan pada setiap stasiun pengamatan curah hujan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (VA. Vanoni,1983:446) :

$$EI_{30} = E \times I_{30} \times 10^{-2} \quad (2-25)$$

$$E = 14,374.R^{1.075} \quad (2-26)$$

### 2.1.13.2 Faktor Panjang dan Kemiringan Lereng (LS)

Dalam pendugaan erosi yang ada pada suatu daerah digunakan persamaan sebagai berikut :

$$LS = \left( \sqrt{\frac{L}{100}} \right) \cdot (0,0139.S^2 + 0,0965.S + 0,0136) \quad (2-27)$$

dengan :

LS = Faktor panjang dan faktor kemiringan lereng (%)

L = Panjang lereng (m)

S = Kemiringan lereng (%)

### 2.1.13.3 Faktor Konservasi Tanah dan Pengelolaan Tanaman

Nilai faktor indeks konservasi tanah didapat dari membagi kehilangan tanah dari lahan yang memberikan perlakuan pengawetan, terhadap tanah tanpa pengawetan. Sedangkan faktor pengelolaan tanaman merupakan angka perbandingan erosi dari lahan yang ditanami suatu jenis tanaman dan pengelolaan tertentu terhadap lahan.

Faktor indeks konservasi tanah (faktor P) dan faktor indeks pengelolaan tanaman (faktor C) dihitung berdasarkan kondisi lahan dan jenis tanaman yang tumbuh pada daerah tersebut. Berikut hasil yang menentukan faktor C dan P dapat dilihat pada tabel 2.5

### 2.1.13.4 Pendugaan Erosi Potensial ( $E_{pot}$ ) dan Erosi Aktual ( $E_{akt}$ )

Erosi potensial adalah erosi maksimum yang terjadi pada suatu tempat dengan permukaan tanah dalam keadaan gundul sempurna dan proses kejadian erosi disebabkan oleh faktor alamiah yang berupa iklim, keadaan internal tanah dan keadaan topografi.

Erosi aktual terjadi karena adanya campur tangan manusia dalam kegiatan sehari-hari, misalnya pengotahan tanah untuk pertanian dan adanya keterlibatan unsur-unsur penutup tanah, baik yang tumbuh secara alamiah maupun yang dibudidayakan oleh manusia dalam usaha pertanian. Jadi erosi aktual adalah hasil ganda antara erosi potensial dan pola penggunaan lahan tertentu.

Tabel 2.5 Faktor C dan P

No	Jenis Tanah / Pengelolaan Tanah	C	P
1	Padi sawah tadah hujan	0,05	
2	Padi sawah beririgasi	0,01	
3	Kedelai	0,399	
4	Jagung	0,7	
5	Hutan produksi (tebang pilih)	0,2	
6	Tanah pekarangan	0,1	
7	Tanah lapang	0,95	0,4
8	Tanah pekuburan	0,1	
9	Teras tradisional		0,04

Sumber : Sarwono H. : 145



Dalam perhitungan erosi potensial dan aktual digunakan persamaan sebagai berikut (VA. Vanoni,1983:442) :

$$E_{pot} = R \times K \times LS \times A \quad (2-28)$$

$$E_{akt} = E_{pot} \times C.P \quad (2-29)$$

dengan :

- $E_{pot}$  = erosi potensial (ton/tahun)
- $E_{akt}$  = erosi aktual di DAS (ton/ha/tahun)
- R = indeks erosivitas hujan
- K = erodibilitas tanah
- LS = faktor panjang dan kemiringan lereng
- A = luas DAS (ha)
- CP = faktor tanaman dan pengawetan tanah

### 2.1.13.5 Pendugaan Laju Sedimentasi Potensial

Sedimentasi potensial merupakan proses pengangkutan sedimen yang berasal dari proses erosi yang secara potensial mempunyai kemampuan mengendap di jaringan irigasi dan lahan persawahan maupun path suatu waduk.

Tidak semua sedimen yang dihasilkan erosi aktual menjadi sedimen di waduk, namun tergantung dari nisbah antara volume sedimen hasil erosi aktual yang mampu mencapai aliran sungai dengan volume sedimen yang diendapkan dari lahan di atasnya. Faktor ini disebut nisbah pelepasan sedimen (SDR - *sediment delivery ratio*). Besarnya nilai SDR ditentukan oleh besarnya DAS, kemiringan lereng dan tingkat kekerasan permukaan DAS yang berkaitan dengan pola penggunaan lahan. Dalam perhitungan SDR digunakan rumus sebagai berikut :

$$SDR = S_x \frac{(1 - 0,8683 \cdot (A^{-0,2018}))}{2(S + 50n)} + 0,8683 \cdot (A^{-0,2018}) \quad (2-30)$$

dengan :

- SDR = nisbah pelepasan sedimen, nilainya  $0 < SDR < 1$
- A = luas DAS (ha)
- S = kemiringan lereng rata-rata permukaan DAS (%)
- n = koefisien kekasaran manning

Dari nilai SDR yang diperoleh maka akan diketahui besarnya pendugaan laju sedimentasi potensial, dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$S_{pot} = E_{akt} \times SDR \quad (2-31)$$





### 2.1.14 Analisis Tampungang Efektif

Untuk menentukan tampungan efektif yang dipakai sebagai dasar adalah debit masukan (inflow) dan rencana kebutuhan debit (outflow).

Besar kecilnya tampungan dipengaruhi beberapa faktor antara lain :

1. Elevasi permukaan air rendah (LWL) hasil analisis tampungan mati, serta permukaan air normal (NWL) yang diijinkan
2. Pengoperasian waduk.
3. Kehilangan air waduk.

### 2.1.15 Kebutuhan Air Irigasi

Kebutuhan air irigasi besarnya harus disesuaikan dengan besar inflow pada waduk. Adapun faktor-faktor yang menentukan besarnya kebutuhan air pada bangunan pengambilan untuk irigasi adalah :

1. Luas daerah irigasi
2. Pola tata tanam
3. Evaporasi potensial
4. Koefisien tanaman
5. Pengerjaan tanah
6. Perkolasi
7. Curah hujan rencana
8. Efisiensi irigasi

### 2.1.16 Simulasi Waduk

Penentuan kapasitas tampungan efektif dimaksudkan untuk menentukan elevasi mercu pelimpah serta mendapatkan kapasitas tampungan pada kondisi muka air normal. Analisis tampungan efektif di waduk pada kajian ini digunakan metoda simulasi. Rumus neraca air di waduk dapat dinyatakan sebagai berikut (Mcmahon, 1987: 1).

$$S_t = S_{t-1} + I_t + R_t - O_t - E_t \text{ dengan batasan } 0 \leq S_t \leq C \quad (2-32)$$

dengan :

$C$  = Kapasitas tampungan efektif

$S_t$  = Volume air di waduk pada waktu  $t$

$S_{t-1}$  = Volume air di waduk pada waktu  $t-1$

$R_t$  = Volume air hujan yang masuk ke waduk seluas daerah genangan pada waktu  $t$

$E_t$  = Volume air untuk kebutuhan pada waktu  $t$

$I_t$  = Volume masukan ke waduk pada waktu t

## 2.2 Analisis Hidrolika

Sesuai dengan bahasan di atas maka bagian analisis hidrolika ini akan menyajikan perhitungan mengenai kapasitas pengaliran bangunan pelimpah, analisa saluran transisi, analisa saluran pengatur, dan analisa kolam olakan.

### 2.2.1 Kapasitas Pengaliran Bangunan Pelimpah

Debit yang lewat ambang bebas dapat dihitung dengan rumus (Suyono Sasrodarsono, 1989:181) :

$$Q = C.L.H^{3/2} \quad (2-33)$$

dengan :

Q : Debit yang melalui ambang pelimpah ( $m^3/dt$ )

C : Koefisien limpahan

L : Lebar efektif mercu pelimpah (m)

H : Total tinggi tekanan air di atas mercu pelimpah (m)

Penampang memanjang dari pelimpah langsung dihitung dengan rumus yang digunakan dari I. Hinds :

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

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

$$C = 1,6 \frac{1 + 2a \left( \frac{h}{H_d} \right)}{1 + a \left( \frac{h}{H_d} \right)}$$

dimana :

Q = Debit pada banjir rencana ( $m^3/dt$ )

C = Koeffisien Limpasan

L = Lebar efektif mercu bendung (m)

H = Total tinggi tekanan air di atas mercu bendung (m)

Cd = Koeffisien limpasan pada saat  $h = H_d$

a = Konstanta

L' = Panjang bendung sesungguhnya

N = Jumlah pilar di atas mercu bendung

Ka= Koeffisien kontraksi pada dinding samping

Kp= Koeffisien kontraksi pada pilar

### 2.2.2 Analisis Saluran Transisi

Saluran transisi direncanakan agar debit banjir rencana yang akan disalurkan tidak menimbulkan air terhenti (backwater) di bagian hilir ambang pelimpah dan memberikan posisi yang paling menguntungkan, baik pada aliran di dalam saluran transisi tersebut maupun pada aliran permukaan yang akan menuju saluran peluncur.

Saluran transisi yang direncanakan berikut ini terbagi menjadi tiga bagian, yaitu :

- a. Bagian yang menikung dan berpenampang empat persegi panjang.
- b. Bagian yang lurus dengan penampang empat persegi panjang, dimana lebar saluran makin menyempit ke hilir. Sudut inklisasi terhadap sumbu saluran direncanakan minimal sebesar  $12^{\circ}30'$  (Sosrodarsono, 2002:203)
- c. Bagian peralihan kemiringan dasar saluran pada saat bertemu dengan saluran peluncur.

Perencanaan saluran transisi meliputi perhitungan-perhitungan hidrolika sebagai berikut :

1. Perencanaan saluran pada tikungan.
2. Perhitungan tinggi muka air pada saluran transisi.
3. Perhitungan hidrolika pada peralihan kemiringan.

### 2.2.3 Saluran Pengatur

Saluran pengatur aliran berfungsi sebagai pengatur kapasitas aliran (debit) air yang melintasi bangunan pelimpah. Tipe saluran pengatur yang dipakai dalam perencanaan ini adalah saluran tipe langsung.

Perencanaan saluran pengatur tipe saluran samping meliputi perhitungan sebagai berikut :

1. Perencanaan dimensi saluran langsung.
2. Pemilihan kombinasi a dan c.
3. Perhitungan bentuk dasar saluran langsung.
4. Penyesuaian bentuk dasar saluran langsung.
5. Perhitungan tinggi muka air di hilir saluran langsung.



### 2.2.3 Analisa Kolam Olakan

Suatu bangunan peredam energi yang berbentuk kolam dimana prinsip peredam energinya yang sebagian besar terjadi akibat proses pergesekan diantara molekul-molekul air, sehingga menimbulkan olakan-olakan di dalam kolam tersebut.

Untuk menentukan tipe kolam olakan yang sesuai digunakan klasifikasi tipe kolam olakan yang menjadi standar perencanaan di Indonesia. Adapun klasifikasi tipe kolam olakan ini didasarkan pada harga bilangan Froude dan kecepatan yang terjadi, rinciannya sebagai berikut :

- a. USBR Type I  $1,7 < Fr < 2,5$
- b. USBR Type II  $Fr > 4,5 ; V > 15 \text{ m/dt}$
- c. USBR Type III  $Fr > 4,5 ; V < 15 \text{ m/dt}$
- d. USBR Type IV  $2,5 < Fr < 4,5$

## 2.3 Perencanaan Teknis Bendungan

### 2.3.1 Jenis Bangunan Utama

Penetapan suatu tipe bendungan yang paling sesuai untuk suatu tempat kedudukan didasarkan pada berbagai faktor, dimana faktor-faktor utamanya adalah (Suyono, 1987:120) :

- Kualitas serta kuantitas dari bahan-bahan tubuh bendungan yang terdapat di daerah sekitar tempat kedudukan calon bendungan.
- Kondisi penggarapan/pengerjaan bahan tersebut (penggalian, pengolahan tanah, pengangkutan, penimbunan).
- Kondisi lapis tanah pondasi tempat kedudukan calon bendungan.
- Kondisi alur sungai serta lereng kedua tebingnya dan hubungan dengan calon bendungan beserta bangunan pelengkap.

Bendungan merupakan bangunan yang digunakan untuk membendung aliran air sungai yang dimanfaatkan untuk keperluan hidup manusia atau menanggulangi bencana, seperti banjir.

Menurut Sosrodarsono (2002), bendungan urugan merupakan bendungan yang dibangun dengan cara menimbunkan bahan-bahan, seperti: batu, krakal, krikil, pasir, dan tanah, pada posisi tertentu dengan fungsi sebagai pengempang atau pengangkat permukaan air yang terdapat di dalam waduk di udiknya.

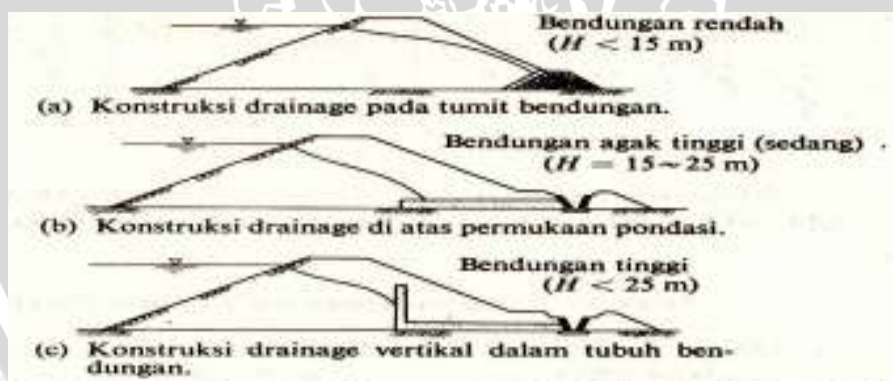
Bendungan urugan digolongkan tipe homogen, apabila bahan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari tanah yang hampir sejenis dan gradasinya (susunan ukuran butirannya)

hampir seragam. Tubuh bendungan secara keseluruhannya berfungsi ganda, yaitu sebagai bangunan penyangga dan sekaligus sebagai penahan rembesan air.

Ditinjau dari sudut pelaksanaan pembangunannya, bendungan homogen merupakan bendungan yang paling sederhana dibandingkan dengan tipe-tipe lainnya, akan tetapi senantiasa dihadapkan pada problema stabilitas tubuh bendungan tersebut. Hal tersebut disebabkan karena di seluruh tubuh bendungan yang terletak di bawah garis depresi (*seepage line*), senantiasa dalam kondisi jenuh, sehingga daya dukung kekuatan geser serta sudut luncur alamiahnya menurun pada tingkat-tingkat yang paling rendah.

Berhubung dengan hal-hal tersebut di atas, maka bendungan homogen akan menguntungkan hanya untuk bendungan yang relatif rendah. Tetapi untuk bendungan yang lebih tinggi dari 6 s/d 7 meter, maka suatu sistem drainage telah diperlukan pada bagian hilir tubuh bendungan tersebut, guna menurunkan garis depresinya. Semakin rendah elevasi garis depresi di bagian hilir dari tubuh bendungan homogen, maka ketahanannya terhadap gejala longsor akan semakin meningkat dan stabilitas bendungan akan meningkat pula.

Selain itu apabila garis depresi memotong lereng hilir suatu bendungan homogen, berarti akan terjadi aliran-aliran filtrasi keluar ke permukaan lereng tersebut dan terlihat adanya gejala-gejala sufosi serta sembulan yang mengakibatkan timbulnya keruntuhan-keruntuhan atau longsor-longsor kecil pada permukaan lereng. Beberapa contoh sistem drainage pada bendungan homogen secara skematis, tertera pada gambar di bawah. (Suyono, 1987:120-121)



Gambar 2.2 Tubuh bangunan utama

### 2.3.2 Tinggi dan Lebar Bangunan Utama

Untuk menentukan tinggi dan lebar bangunan utama kita harus mengetahui terlebih dahulu jenis tinggi air tumpangan maksimum pada bangunan utama. Hubungan tinggi dan lebar bangunan utama dapat dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6 Tinggi bangunan utama

Tipe	Tinggi	Lebar puncak
------	--------	--------------



	(m)	(m)
1. Urugan	(1) < 5,00	3,00
	(2) 5,00 – 15,00	6,00

Sumber : Sarwono H. : 145

### 2.3.3 Elevasi Mercu Pelimpah

Elevasi mercu pelimpah merupakan elevasi tampungan efektif yang didapat dari perhitungan tampungan efektif waduk.

### 2.4 Stabilitas Konstruksi

Tubuh Embung tips urugan harus stabil terhadap rembesan dan akibat-akibat yang ditimbulkannya serta terhadap longornya tubuh embung. Secara umum suatu struktur tubuh embung harus memenuhi beberapa kriteria sebagai berikut:

- konstruksi tubuh embung harus stabil pada berbagai kondisi pembebanan
- Besarnya kapasitas filtrasi dan kecepatan aliran air dalam tubuh embung masih dalam Batas yang diijinkan.

#### 2.4.1 Stabilitas Embung Terhadap Aliran Filtrasi

Tubuh embung dan pondasinya harus mampu mempertahankan diri terhadap gaya-gaya yang ditimbulkan oleh adanya air filtrasi yang mengalir melalui celah-celah antara butiran-butiran tanah pembentuk tubuh embung. Untuk mengetahui kemampuan daya tahan tubuh embung terhadap gaya-gaya tersebut, maka perlu diadakan analisa mengenai hal-hal sebagai berikut

- a. Formasi garis depresi (*seepage line formation*) dalam tubuh embung
- b. Kapasitas aliran filtrasi yang mengalir melalui tubuh embung
- c. Kemungkinan terjadinya gejala sufosi yang disebabkan oleh gaya hidrodinamis dalam aliran air filtrasi

##### 2.4.1.1 Bentuk Garis Depresi (*seepage line formation*)

Bentuk garis aliran pads zone kedap air suatu embung dapat diperoleh dengan metode Casagrande. Jika angka permeabilitas vertikalnya berbeda dengan angka permeabilitas horizontalnya, maka akan terjadi perubahan bentuk garis aliran dengan mengurangi koordinat horizontalnya sebesar  $\sqrt{kv/kh}$  kali.



Pada gambar 2.1, ujung tumit embung dianggap sebagai titik permulaan koordinat dengan sumbu-sumbu x dan y, maka garis depresinya dapat diperoleh dengan persamaan parabola bentuk dasar sebagai berikut (Suyono S,1987:85):

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2 \cdot y_0} \tag{2.29}$$

$$y = \sqrt{2 \cdot y_0 \cdot x + y_0^2} \tag{2.30}$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \tag{2.31}$$

Dimana :

- H = jarak vertikal antara titik A dan B
- d = jarak horizontal antara A dan B<sub>2</sub>
- I<sub>1</sub> = jarak horizontal antara titik B dan E
- l<sub>2</sub> = jarak horizontal antara titik A dan B
- A = Ujung tumit hilir embung
- B = Titik perpotongan antara permukaan air dengan lereng hulu embung
- B<sub>1</sub> = titik perpotongan antara parabola dasar dengan lereng hulu embung
- B<sub>2</sub> = titik yang terletak sejauh 0,3 L<sub>1</sub> ke arah hulu dari titik B
- α = kemiringan sudut hilir

#### 2.4.1.2 Kapasitas Aliran Filtrasi

Kapasitas aliran filtrasi adalah kapasitas rembesan air yang mengalir ke hilir melalui tubuh embung. Apabila kapasitas filtrasi terlalu besar, maka kehilangan air yang terjadi cukup besar dan dapat menimbulkan gejala sufosi serta sembulan yang sangat membahayakan kestabilan tubuh embung.

Untuk memperkirakan besarnya kapasitas filtrasi yang mengalir melalui tubuh embung, dapat dihitung berdasarkan gambar trayektori aliran filtrasi dengan persamaan sebagai berikut (Suyono S,1981:70):

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} \cdot k \cdot H \cdot L \tag{2.32}$$



dengan :

$Q_f$  = kapasitas aliran filtrasi ( $m^3/dt$ )

$N_f$  = Angka pembagi dari garis trayektori aliran filtrasi

$N_p$  = Angka pembagi dari garis equipotensial

$K$  = koefisien filtrasi ( $m/dt$ )

$H$  = tinggi tekanan air total (m)

$L$  = panjang profil memanjang tubuh embung (m)

### 2.4.1.3 Stabilitas terhadap Bahaya Piping

Agar gaya-gaya hidrodinamis yang timbul pada aliran filtrasi tidak akan menyebabkan bahaya piping yang sangat membahayakan baik tubuh embung maupun pondasinya, maka kecepatan aliran filtrasi dalam tubuh embung dan pondasi mempunyai batas-batas tertentu, maka perlu dikontrol keamanan tubuh embung terhadap bahaya piping. Untuk mengontrol keamanan terhadap bahaya piping dipakai ketentuan sebagai berikut (Suyono,1981:72) :

$$i < I$$

$$i = \frac{h}{L}$$

$$I = \frac{Gs-1}{1+e}$$



(2.33)

(2.34)

Dimana :

$i$  = gradien hidrolis

$I$  = gradien hidrolis kritis

$H$  = perbandingan tinggi tekan air pada titik peresapan air di lereng hulu dengan titik keluarnya pada lereng hilir

$L$  = panjang aliran filtrasi (m)

$G_s$  = Spesifik gravity material

$e$  = void ratio material

Untuk keamanan tubuh embung, maka harus dihitung juga kecepatan filtrasinya, dimana kecepatan ini harus lebih kecil dari kecepatan kritis yang diijinkan. Kecepatan aliran filtrasi dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut (RF. Craig, Soil Mechanic: 27)

$$V = \frac{k \cdot i}{n} \quad (2.35)$$

Dimana :

V = kecepatan aliran filtrasi (cm/dt)

k = koefisien permeabilitas

i = gradien hidrolis

n = angka porositas

Untuk kecepatan kritis digunakan rumus yang dikembangkan oleh Yustin sebagai berikut (Suyono,1985:169)

$$V_c = \sqrt{\frac{W_1 \cdot g}{F \cdot \gamma_w}} \quad (2.36)$$

dimana :

V<sub>c</sub> = koefisien kritis aliran rembesan (cm/dt)

W<sub>1</sub> = berat butiran dalam air (gr)

g = gaya gravitasi (cm/dt<sup>2</sup>)

F = Luas permukaan butiran (cm<sup>2</sup>)

γ<sub>w</sub> = berat isi air (gr/cm<sup>3</sup>)

Syarat : V < V<sub>c</sub>

#### 2.4.2 Stabilitas Lereng Tubuh Embung

Bangunan embung akan hancur dimulai dengan terjadinya gejala longoran baik pada lereng hulu maupun lereng hilir embung tersebut, yang disebabkan kurangnya stabilitas kedua lereng tersebut. Karena itu stabilitas lereng merupakan hal yang sangat penting bagi tubuh embung secara keseluruhan.

Pada suatu lereng yang dibuat dari tanah yang dipadatkan biasanya mempunyai bidang gelincir yang bentuknya mendekati busur lingkaran. Suatu bidang longoran yang diperkirakan mempunyai angka keamanan terkecil disebut bidang longsor kritis. Untuk memperoleh angka keamanan ini dipakai Metode Irisan Bidang Luncur Bundar (*slice methode on circular slip surface*).

Angka keamanan dari stabilitas lereng dinyatakan dengan rumus sebagai berikut (Suyono,1985:141) :



$$F_s = \frac{\Sigma(c.L + (n - U N_e)tg\phi}{\Sigma(T - Te)} \quad (2.37)$$

Syarat:  $F_s > 1,5$  Untuk kondisi Normal

$F_s > 1,1$  Untuk kondisi Gempa

dimana :

$F_s$  = Faktor keamanan

$N$  = beban komponen vertikal yang timbul dari setiap irisan bidang luncur

$$N = \gamma \cdot A \cdot \cos \alpha \quad (2.38)$$

$T$  = beban komponen tangensial yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur

$$T = \gamma \cdot A \cdot \sin \alpha \quad (2.39)$$

$U$  = tekanan air pori yang bekerja dari setiap irisan bidang luncur

$C$  = angka kohesi yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur

$L$  = panjang busur lingkaran bidang luncur (m)

$N_e$  = komponen vertikal beban seismik yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur

$$N_e = e \cdot \gamma \cdot A \cdot \sin \alpha \quad (2.40)$$

$T_e$  = komponen tangensial beban seismik yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur

$$T_e = e \cdot \gamma \cdot A \cdot \cos \alpha \quad (2.41)$$

Analisa stabilitas lereng tubuh embung ditinjau dalam beberapa kondisi, yaitu sesaat setelah waduk dibangun, waduk terisi penuh dan saat penurunan mendadak permukaan air waduk (*rapid draw dawn*), pada keadaan normal dan gempa.

a. Keadaan sesaat setelah waduk dibangun

$$N = w \cdot \cos \alpha = b \cdot ht \cdot \gamma \cdot \cos \alpha \quad (2.42)$$

$$U = \frac{u \cdot b}{\cos \alpha} \quad (2.43)$$

$$N_e = e \cdot W \cdot \sin \alpha = e \cdot b \cdot ht \cdot \gamma \cdot \sin \alpha \quad (2.44)$$

$$T = W \cdot \sin \alpha = b \cdot ht \cdot \gamma \cdot \sin \alpha$$

$$T_e = e \cdot W \cdot \cos \alpha = e \cdot b \cdot h_t \cdot \gamma \cdot \cos \alpha \quad (2.45)$$

$$\quad (2.46)$$

b. Keadaan Waduk Penuh

$$N = (W_w + W_{sat}) \cdot \cos \alpha = (h_w \gamma_w + h_{sat}) \cdot b \cdot \cos \alpha \quad (2.47)$$

$$\text{atau} = (W_t + W_{sat}) \cdot \cos \alpha = (h_w \gamma_w + h_{sat}) \cdot b \cdot \cos \alpha \quad (2.48)$$

$$N_e = e \cdot W_{sat} \cdot \sin \alpha = e \cdot b \cdot h_t \cdot \gamma_{sat} \cdot \sin \alpha \quad (2.49)$$

$$U = u \cdot b = (h_w + h_t) \cdot \gamma_w \cdot b / \cos \alpha \quad (2.50)$$

$$T = (W_w + W_{sat}) \cdot \sin \alpha = (h_w \gamma_w + h_t \gamma_{sat}) \cdot b \cdot \sin \alpha \quad (2.51)$$

$$T_e = e \cdot W_{sat} \cdot \sin \alpha = e \cdot b \cdot h_t \cdot \gamma_{sat} \cdot \sin \alpha \quad (2.52)$$

$$\text{atau} = e \cdot (W_t + W_{sat}) \cdot \sin \alpha = e \cdot (h_t \gamma_{sat} + h_w \gamma_w) \cdot b \cdot \sin \alpha \quad (2.53)$$

Dengan:

W = berat = A · γ

γ<sub>w</sub> = berat volume air (t/m<sup>3</sup>)

γ<sub>t</sub> = berat volume tanah (t/m<sup>3</sup>)

γ<sub>sat</sub> = berat volume tanah basah (t/m<sup>3</sup>)

e = koefisien gempa

b = lebar irisan

h<sub>t</sub> = tinggi tanah dalam irisan

h<sub>w</sub> = tinggi air dalam irisan.