

BAB III

TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Umum

Waduk menurut pengertian umum adalah tempat pada permukaan tanah yang digunakan untuk menampung air saat terjadi kelebihan air / musim penghujan sehingga air itu dapat dimanfaatkan pada musim kering. Sumber air waduk terutama berasal dari aliran permukaan ditambah dengan air hujan langsung. Waduk dapat dimanfaatkan antara lain sebagai berikut :

1. Irigasi

Pada saat musim penghujan, hujan yang turun di daerah tangkapan air sebagian besar akan mengalir ke sungai. Kelebihan air yang terjadi dapat di tampung waduk sebagai persediaan sehingga pada saat musim kemarau tiba air tersebut dapat digunakan untuk berbagai keperluan antara lain irigasi lahan pertanian.

2. PLTA

Dalam menjalankan fungsinya sebagai PLTA, waduk dikelola untuk mendapatkan kapasitas listrik yang dibutuhkan. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah suatu system pembangkit listrik yang biasanya terintegrasi dalam bendungan dengan memanfaatkan energi mekanis aliran air untuk memutar turbin yang kemudian akan diubah menjadi tenaga listrik oleh generator.

3. Penyediaan air baku

Air baku adalah air bersih yang dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air minum dan air rumah tangga. Waduk selain sebagai sumber pengairan persawahan juga dimanfaatkan sebagai sumber penyediaan air baku untuk bahan baku air minum dan air rumah tangga. Air yang dipakai harus memenuhi persyaratan sesuai kegunaannya.

4. Perikanan

Untuk mengganti mata pencaharian para penduduk desa yang desanya ditenggelamkan untuk pembuatan waduk yang dulu bermata pencaharian sebagai petani, sekarang beralih ke perikanan. Dengan memanfaatkan waduk ini para penduduk dapat membuat rumah apung yang digunakan untuk perikanan air tawar.

5. Pariwisata

Dengan pemandangan yang indah, waduk juga dapat dimanfaatkan sebagai tempat rekreasi.

3.1.1 Klasifikasi Penggunaan Waduk

Berdasarkan fungsinya, waduk diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu :

1) Waduk eka guna (*single purpose*)

Waduk eka guna adalah waduk yang dioperasikan untuk memenuhi satu kebutuhan saja, misalnya untuk kebutuhan air irigasi, air baku atau PLTA. Pengoperasian waduk eka guna lebih mudah dibandingkan dengan waduk multi guna dikarenakan tidak adanya konflik kepentingan di dalam. Pada waduk eka guna pengoperasian yang dilakukan hanya mempertimbangkan pemenuhan satu kebutuhan.

2) Waduk multi guna (*multi purpose*)

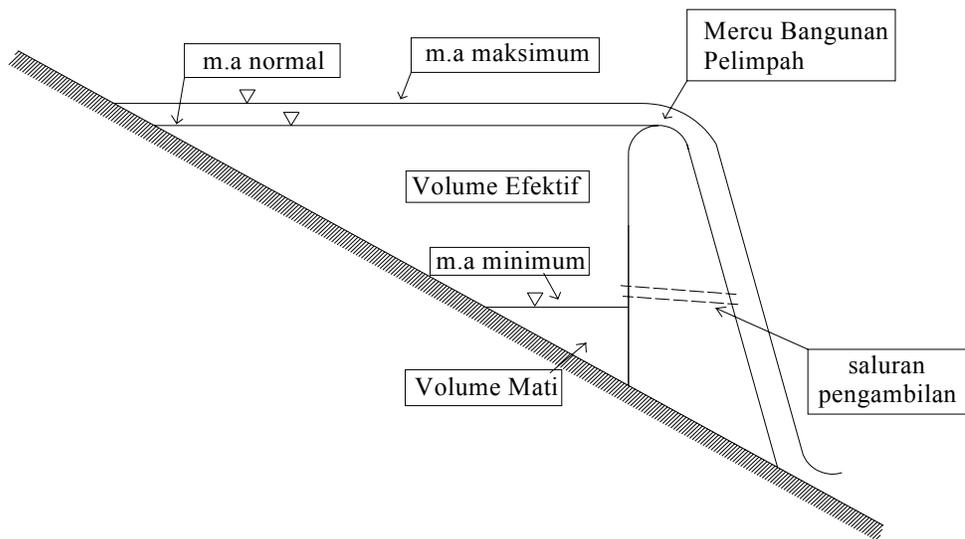
Waduk multi guna adalah waduk yang berfungsi untuk memenuhi berbagai kebutuhan, misalnya waduk untuk memenuhi kebutuhan air, irigasi, air baku dan PLTA. Kombinasi dari berbagai kebutuhan ini dimaksudkan untuk dapat mengoptimalkan fungsi waduk dan meningkatkan kelayakan pembangunan suatu waduk.

3.1.2 Karakteristik Waduk

Karakteristik suatu waduk merupakan bagian pokok dari waduk yaitu volume hidup (*effective storage*), volume mati (*dead storage*), tinggi muka air

(TMA) maksimum, TMA minimum, tinggi mercu bangunan pelimpah berdasarkan debit rencana.

Dari karakteristik fisik waduk tersebut didapatkan hubungan antara elevasi dan volume tampungan yang disebut juga liku kapasitas waduk. Liku kapasitas tampungan waduk merupakan data yang menggambarkan volume tampungan air di dalam waduk pada setiap ketinggian muka air.



Gambar 3.1 Karakteristik Waduk

3.2 Pola Operasi Waduk

Pola Operasi waduk adalah patokan operasional bulanan suatu waduk dimana debit air yang dikeluarkan oleh waduk harus sesuai dengan ketentuan agar elevasinya terjaga sesuai dengan rencana. Pola operasi waduk disepakati bersama oleh para pemanfaat air dan pengelola melalui Panitia Tata Pengaturan Air (PTPA).

Tujuan dari disusunnya pola operasi waduk adalah untuk memanfaatkan air secara optimal demi tercapainya kemampuan maksimal waduk dengan cara

mengalokasikan secara proporsional sehingga tidak terjadi konflik antar kepentingan.

Pengoperasian waduk secara efisien dan optimal merupakan permasalahan yang kompleks karena melibatkan beberapa faktor seperti :

- 1) Operasional *policy*, pola kebijakan pengoperasian waduk.
- 2) Debit *inflow* yang akan masuk ke waduk yang tergantung dari ketepatan perencanaan debit yang akan masuk ke waduk tersebut.
- 3) *Demand*, kebutuhan air untuk irigasi dan PLTA.
- 4) Ketepatan peralatan akan besarnya debit banjir yang akan terjadi.
- 5) Keandalan peralatan monitoring tinggi muka waduk, debit aliran dan curah hujan.
- 6) Koordinasi antara instansi yang terkait.
- 7) Kemampuan Operasional.
- 8) Koordinasi pengoperasian jangka pendek, jangka menengah, dan jangka panjang serta pengoperasian *real time*.

Kebijakan pola pengoperasian waduk dapat dibedakan menjadi 5, yaitu:

1. Standard Operating Policy (SOP)

Kebijakan pola pengoperasian waduk berdasarkan SOP adalah dengan menentukan *outflow* terlebih dahulu berdasarkan ketersediaan air di waduk dikurangi kehilangan air. Sejauh mungkin *outflow* yang dihasilkan dapat memenuhi seluruh kebutuhan / *demand* dengan syarat air berada dalam zona kapasitas / tampungan efektif. Besarnya pelepasan dapat ditentukan sebagai berikut :

$$RL_t = I_t + S_{t-1} - E_t - S_{maks}, \text{ apabila } I_t + S_{t-1} - E_t - D_t > S_{maks}$$

$$RL_t = I_t + S_{t-1} - E_t - S_{min}, \text{ apabila } I_t + S_{t-1} - E_t - D_t < S_{min}$$

$$RL_t = D_t, \text{ apabila } S_{min} < I_t + S_{t-1} - E_t - D_t < S_{maks}$$

Keterangan :

I_t : debit inflow waduk pada bulan ke-t (juta m³/bulan).

RL_t : release waduk pada bulan ke-t (juta m³/bulan).

S_{t-1} : tampungan waduk awal bulan ke-t (juta m³/bulan).

D_t : demand pada waktu ke-t.

E_t : Evaporasi pada bulan ke-t (juta m³/bulan).

S_{maks} : tampungan waduk maksimum (juta m³/bulan).

S_{min} : tampungan waduk minimum (juta m³/bulan).

t : bulan (1,2,3,.....,12).

2. Program Dinamik Deterministik Atau Implisit Stokastik

Asumsi bahwa semua parameter atau variabel yang terdapat dalam model program *linier* dapat diperkirakan dengan pasti (*non stochastic*), meskipun tidak dengan tepat (*Buras, 1975; Asri 1984*). Pada model *Deterministik*, debit *inflow* pada masing-masing interfal waktu telah ditentukan. Secara sederhana, model ini menggunakan nilai harapan (*expected value*) dari sebuah variabel abstrak yang diskrit. Analisis regresi digunakan untuk menghasilkan model optimasi dalam kurva optimasi laju tampungan

Implisit Stokastik

$$S_{t+1} = \bar{A}s_t^* + \bar{B}q_{t-1} + \hat{c}$$

Keterangan :

s_t^* = tampungan maksimum diperoleh dari solusi program linear

q_t = data *inflow*

\bar{A}, \bar{B} = matriks hubungan hasil dari regresi program linier

\hat{c} = vektor hasil dari regresi program linier

3. Program Dinamik Stokastik

Pada Program Dinamik Stokastik ini, ada beberapa peristilahan dan variabel yang menunjang untuk mencapai target yang diharapkan, antara lain sebagai berikut :

- 1) Fungsi Sasaran (*Objective Function*). Masukan utama dalam operasi waduk adalah inflow yang merupakan proses alam yang tidak pernah deterministik, dan sifat ketidakpastian selalu terkait dalam *inflow*. Sifat ketidakpastian atau stokastik ini diperhitungkan dalam optimasi dengan memasukkan sebaran probabilitas *inflow* pada setiap tahap optimasi. Dengan memperhitungkan sifat stokastik inflow tersebut, maka sasaran optimasi operasi waduk dapat ditentukan, misalnya memaksimalkan produksi listrik tahunan yang diharapkan. Kata “diharapkan” dipakai untuk mencerminkan adanya harapan terhadap sesuatu yang tidak pasti, hal inilah yang merupakan ciri teknik program dinamik stokastik. Secara sistematis, sasaran tersebut dapat dinyatakan dalam fungsi sasaran (*objective function*) sebagai berikut (Shrestha, 1987) :

OF = maksimumkan (TEEG)

$$= \text{maksimumkan } E = \sum_{t=1}^T TEG_t$$

OF = objective function (fungsi tujuan)

TEEG = Produksi Listrik tahunan yang diharapkan

TEG_t = Produksi listrik selama bulan t

E = menyatakan nilai harapan (*expectation*)

2) Probabilitas Transisi Inflow

Probabilitas transisi ini dirumuskan sebagai berikut :

$$P_{ij} = \Pr (Q_{y+1} = q_i \dots Q_y = q_j)$$

Probabilitas bahwa Q_{y+1} (debit di tahun sekarang) akan sama dengan q_j jika Q_y (debit di tahun sebelumnya) sama dengan q_i . Probabilitas transisi ini akan memenuhi kondisi $\sum_{j=1}^n P_{ij}^t = 1$ dimana P_{ij}^t adalah probabilitas kejadian bahwa

Q^{t-1} akan berada di kelas j jika Q^t tercatat di kelas i .

3) Persamaan Pelepasan di Waduk (*Reservoir release*)

Untuk menangani permasalahan program dinamik stokastik, membutuhkan pengenalan persamaan mengenai pelepasan waduk, yang didefinisikan sebagai $R_{k,i,l,t}$ yang bergantung pada tingkat tampungan pada periode yang sedang berlangsung $S_{k,t}$, Inflow pada periode yang sedang berlangsung $Q_{i,t}$ dan tingkat tampungan waduk pada periode akan datang $S_{l,t+1}$. Persamaan ini dapat dihitung melalui persamaan kekekalan sebagai berikut :

$$R_{k,i,l,t} = S_{k,t} + Q_{i,t} - S_{l,t+1} - E_{k,l,t}$$

Dimana :

$E_{k,l,t}$ = kehilangan air yang disebabkan oleh evaporasi dan rembesan (*seepage*) pada waduk.

4) Kinerja Sistem (*System Performance*)

Pengoptimalan dari pelepasan bergantung pada kinerja sistem untuk mendapatkan target pelepasan dan target tampungan. Persamaan tersebut seperti berikut :

$$B_{k,i,l,t} = (R_{k,i,l,t} - TR_t)^2 + (S_{k,t} - TS_t)^2$$

Dimana :

$B_{k,i,l,t}$ = Kinerja sistem

TR_t = Target pelepasan bulanan

TS_t = Target tampungan bulanan

Persamaan ini akan bernilai nol jika pelepasan sama dengan nilai targetnya. Jika terdapat deviasi dari masing-masing target, maka akan mendapatkan nilai sebagai fungsi dari penyimpangan (deviasi) yang terjadi. Persamaan ini tidak tetap dalam artian dapat berubah apakah menggunakan deviasi release atau deviasi tampungan saja, bergantung pada bagian mana penekanannya. (Loucks, 1981).

5) Persamaan Rekursif

Persamaan rekursif adalah persamaan yang menyatakan hubungan antara nilai variable status sebagai hasil optimasi pada setiap tahap dengan nilai masukan variabel status tersebut dan variabel keputusan yang diambil pada tahap yang ditinjau. Hal ini disebabkan karena setiap masukan pada setiap tahap merupakan sebaran probabilitas. Bentuk persamaan rekursif adalah sebagai berikut :

$$F_t(k,i) = \text{Minimum} \left[B_{kilt} + \sum P_{ij}^{t+1} F_{t+1}^*(i,j) \right]$$

Dimana :

$F_t(k,i)$ = nilai fungsi objektif jika volume waduk di kelas k , volume inflow di kelas i , pada waktu ke t

$B_{k,i,t}$ = nilai fungsi objektif jangka pendek (immediate return) jika volume waduk bulan t ada di kelas k , inflow ke waduk kelas i , dan volume waduk adalah l .

P_{ij}^{t+1} = matrik probabilitas transisi inflow dari periode/bulan i ke periode/ bulan j .

F_{t+1}^* = nilai fungsi objektif jangka panjang (*long term periode*) yang diperoleh pada periode waktu $t + 1$ jika volume waduk pada awal periode waktu $t + 1$ berada di kelas l dan inflow berada di kelas j .

6) Kriteria Konvergensi

Proses optimasi dilakukan pada setiap tahap selama satu siklus operasi. Pada awal optimasi nilai hasil pada tahap akhir (bulan ke-T), nilai $f_T(l,j)$ diberi nilai awal nol. Hitungan berjalan mundur sampai tahap pertama dan kemudian diulang kembali (iterasi) sampai hasil optimasi menunjukkan hasil yang stabil. Begitu persamaan rekursif ini terpecahkan untuk setiap periode pada tahun-tahun berikutnya, kebijakan $l(k,I,t)$ yang ditentukan dalam setiap periode tertentu akan dengan relative cepat, berulang kembali pada tiap tahun berikutnya. Pada saat keadaan ini tercapai dan saat performansi tahunan harapan (*expected*) adalah konstan untuk semua *state* k,I dan untuk seluruh periode satu tahunan t , maka kebijakan pengoperasian telah mencapai kondisi *steady-state*.

Kondisi *steady-state* ini tercapai jika dan hanya jika pola operasinya tidak berubah dari tahun ke tahun. Karena kebijakan pengoperasian yang *steady-state* ini tercapai, maka pola operasi yang dihasilkan merupakan kebijakan pengoperasian yang *steady* untuk jangka panjang. Kebijakan pengoperasian waduk akan merupakan volume waduk pada akhir bulan ke t (pada awal bulan ke $t+1$ yang optimum sebagai fungsi dari kombinasi debit masukan (*inflow*) bulak $t-1$ dan volume tampungan awal (*storage*) pada bulan ke t . sehingga dapat ditentukan besarnya pelepasan (*release*) air pada setiap periode.

4. Linear Program

Program Linier banyak dipakai dalam program optimasi pendayagunaan sumber daya air, baik untuk permasalahan operasi dan pengelolaan yang sederhana sampai permasalahan yang kompleks. Teknik program linier dapat dipakai apabila terdapat hubungan linier antara variabel-variabel yang dioptimasi, baik dalam fungsi tujuan (*objective function*) maupun kendala (*constraint function*).

Apabila permasalahan yang ditinjau bersifat non linier, seperti yang umum dijumpai dalam sumber daya air, maka hubungan antar variabel diubah menjadi bentuk linier atau persamaan-persamaan non linier pada fungsi sasaran dan kendala dipecah menjadi beberapa persamaan linier dan diselesaikan dengan metode iterasi dan aproksimasi (Yeh, 1985).

Persamaan yang digunakan untuk optimasi Program Linier adalah (Makrup, 1995).

$$\text{Max } Z = c \sum_{i=1}^2 \left(\sum_{j=1}^{12} E_{ij} \right) - M \sum_{i=1}^2 \left(\sum_{i=1}^{12} S_{ij} \right)$$

Besarnya energi (E dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$E = 9,8 \times \eta \times Q \times H_{\text{eff}}$$

$$Z = \text{Fungsi Tujuan}$$

$$c = \text{Nilai ekonomi air untuk PLTA (Rp/m}^3\text{)}$$

$$M = \text{Nilai ekonomi air untuk Limpasan (Rp/m}^3\text{)}$$

$$S = \text{Limpasan (spill) yang terjadi (m}^3\text{)}$$

$$E = \text{Jumlah energi yang dihasilkan (KWH)}$$

$$\eta = \text{Efisiensi dari PLTA}$$

$$Q = \text{debit yang dialirkan ke turbin (m}^3\text{/detik)}$$

$$H = \text{Tinggi tekanan efektif (m)}$$

Besarnya nilai tekanan (H) dipengaruhi oleh volume waduk (V), secara matematis hubungan antara H dan V dapat dinyatakan oleh persamaan :

$$H = \alpha V^\beta + \varepsilon$$

Dimana :

H = Tinggi tekanan (*head*) (m)

V = Volume waduk (m^3)

$\alpha, \beta, \varepsilon$ = konstanta, nilainya diperoleh dari analisis data tampungan waduk.

Agar persamaan *non linear* bisa diselesaikan dengan program linier maka harus dilaksanakan *linearisasi*. (Dagli & Miles, 1985; Yeh, 1985)

Keunggulan program linier adalah kemudahannya untuk penyelesaian permasalahan optimasi berdimensi besar, sedangkan kelemahannya adalah kemungkinan terjadinya kesalahan dan kekeliruan dari program ini sangat besar karena pendekatan yang dilakukan melinierisasi fenomena non linier pada beberapa variabel tidak tepat (Makrup 1995 ; Goulter 1981). Oleh karena itu kendala program linier tergantung pada tingkat pendekatan dalam linierisasi hubungan antara variabel.

5. Rule Curve

Rule curve adalah ilmu yang menunjukkan keadaan waduk pada akhir periode pengoperasian yang harus dicapai pada suatu nilai *outflow* tertentu (Mc. Mahon 1978). *Rule curve* pengoperasian waduk adalah kurva atau grafik yang menunjukkan hubungan antara elevasi muka air waduk, debit *outflow* dan waktu dalam satu tahun (Indrakarya, 1993). *Rule Curve* ini digunakan sebagai pedoman pengoperasian waduk dalam menentukan pelepasan yang diijinkan dan sebagai harapan memenuhi kebutuhan. Akan tetapi pada kenyataannya, kondisi muka air waduk pada awal operasi belum tentu akan sama *Rule Curve* rencana. Untuk mencapai elevasi awal operasi yang direncanakan, mungkin harus lebih banyak volume air yang dibuang. Sebaliknya apabila debit terjadi dari tahun-tahun kering, rencana pelepasan harus disesuaikan dengan kondisi yang ada.

Ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemenuhan kebutuhan suplesi untuk kebutuhan irigasi, air baku, dan PLTA dari operasi waduk, antara lain :

1. Dalam hal target untuk PLTA lebih besar dari target irigasi, maka kapasitas waduk akhir ditentukan berdasarkan *release* waduk untuk PLTA, jika sebaliknya maka kapasitas waduk akhir berdasarkan *release* target irigasi.
2. Seandainya dengan *release* target diatas, kapasitas akhir periode waduk yang dihasilkan lebih besar dari kapasitas minimum waduk maka energi listrik yang dibangkitkan bisa ditingkatkan dan jika lebih kecil dari kapasitas minimum maka target pemenuhan kebutuhan diturunkan (gagal).
3. Jika kapasitas akhir ternyata melebihi kapasitas minimum, maka kapasitas kelebihannya akan dilimpahkan.

3.3 Simulasi

Simulasi dalam permasalahan pendayagunaan sumber daya air adalah suatu teknik permodelan yang dipakai untuk menirukan dan memindahkan perilaku suatu sistem ke dalam suatu model. Model simulasi menunjukkan apa yang terjadi di dalam sistem dengan diberikannya masukan-masukan tertentu.

Dengan demikian pola pengelolaan sistem dapat diterapkan dengan mempelajari reaksi terhadap berbagai skenario pengelolaan sistem tanpa perlu memiliki sistem itu sebenarnya (Yeh, 1985).

Metode simulasi ada beberapa tipe (Hall, 1975) :

1. Simulasi dalam bentuk fisik, misalnya model skala fisik hidraulik.
2. Simulasi dalam bentuk analog, misalnya model simulasi yang diwakilkan dalam bentuk rangkaian listrik.

3. Simulasi dalam bentuk digital, yaitu dengan menggunakan persamaan matematis misalnya hukum keseimbangan air untuk simulasi waduk.

Simulasi digunakan untuk mengevaluasi hasil pola pengoperasian waduk (data eksisting, SOP, *Rule curve*). Tinjauan kegagalan atau keberhasilan pengoperasian tersebut dievaluasi dengan simulasi melalui kajian tentang unjukkerja (*performance*) dari waduk. Unjuk kerja yang dianalisis adalah Keandalan (*reliability*), Kelentingan (*resiliency*), serta Kerawanan (*vulnerability*).

Simulasi operasi waduk bertujuan untuk meninjau sejauh mana tingkat keandalan atau kegagalan yang terjadi dari perilaku sistem pengoperasian waduk dalam memenuhi kebutuhan pelayanannya. Model simulasi akan menganalisis probabilitas keandalan atau kegagalan rencana operasi yang telah ditetapkan.

Secara umum beberapa pendekatan simulasi waduk dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Simulasi dilakukan sepanjang beberapa tahun menurut urutan tahun inflow.
2. Awal pengoperasian pada bulan Oktober sesuai dengan pola tanam di daerah irigasi.
3. Tampungan pada awal pengoperasian dilakukan dengan coba-coba (*trial dan error*) yaitu dengan menggunakan persamaan lengkung kapasitas yang ada.
4. Kehilangan air bulanan (evaporasi) merupakan fungsi dari luas genangan waduk dengan data ketinggian evaporasi yang ada (luas permukaan*tinggi evaporasi*koefisien bulan).
5. Tampungan waduk di akhir bulan tidak diperkenankan kurang dari kapasitas minimum dan melebihi kapasitas maksimum.

6. Limpasan terjadi jika volume tampungan alhir waduk melebihi kapasitas maksimum. Air yang melimpas melalui bangunan pelimpah tidak diperhitungkan sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan atau diasumsikan sebagai kelebihan (*Martsanto, 1990*).
7. Hukum kesetimbangan air waduk adalah (*Wurbs, 1996*) :

$$I_t = RL_t + Le_t + SP_t + S_t - S_{t-1}$$

$$S_{0 \text{ (awal)}} = S_{12}$$

Keterangan :

I_t : debit inflow waduk pada bulan ke-t (juta m³/bulan).

RL_t : release waduk pada bulan ke-t (juta m³/bulan).

S_t : tampungan waduk pada akhir bulan ke-t (juta m³/bulan).

S_{t-1} : tampungan waduk awal bulan ke-t (juta m³/bulan).

D_t : demand pada waktu ke-t.

E_t : Evaporasi pada bulan ke-t (juta m³/bulan).

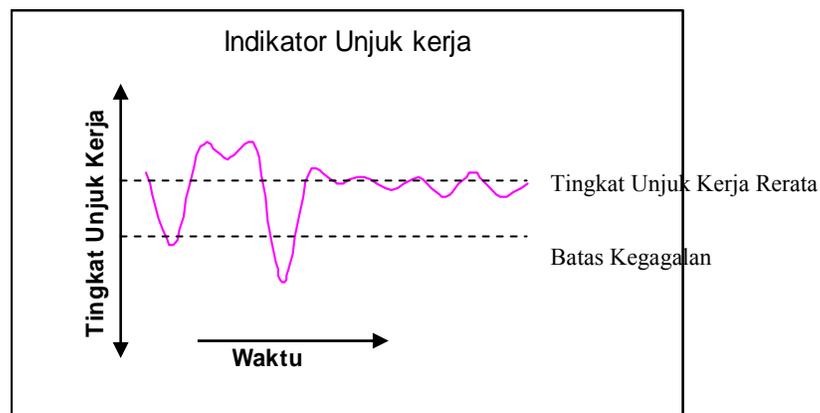
S_{maks} : tampungan waduk maksimum (juta m³/bulan).

t : bulan (1,2,3,.....,12).

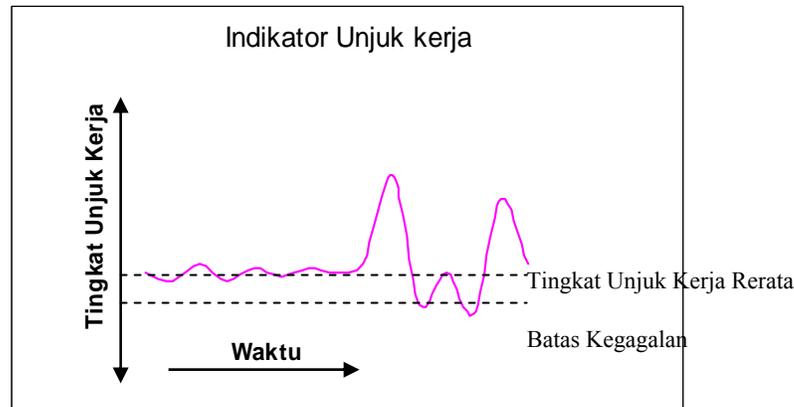
8. Luas genangan dan elevasi waduk dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan lengkung teoritis waduk.
9. Volume tampungan awal sama dengan volume tampungan akhir waduk bulan sebelumnya.
10. Unjuk kerja yang dihitung adalah andalan, kelentingan dan kerawanan.
11. Pada perhitungan unjuk kerja digunakan asumsi bahwa waduk dianggap gagal apabila tidak bisa memenuhi seluruh kebutuhan.

3.4 Evaluasi Unjuk Kerja Pengoperasian Waduk

Analisis parameter unjuk kerja (*performance*) pengoperasian waduk biasanya dievaluasi berdasarkan nilai rerata (*mean*) dan variasi (*variance*) dari parameter unjuk kerjanya. Suatu misal, waduk sering dikatakan mempunyai keandalan (*reliability*) untuk memenuhi suatu kebutuhan sebesar 95,0%. Pernyataan diatas lebih ditekankan pada persentasi rata-rata (jangka panjang) kemampuan waduk dalam memenuhi kebutuhan. Dalam kenyataannya, variasi debit, perubahan konfigurasi jaringan, dan kebijakan pengoperasian jaringan akan menyebabkan variasi pada parameter unjuk kerja pengoperasian. Parameter unjuk kerja pada dua sistem waduk, misalnya, dapat mempunyai nilai rerata dan variasi yang sama tapi menunjukkan perilaku yang berlainan.



(a)



(b)

Gambar 3.2 Indikator Unjuk kerja yang Mempunyai Nilai Rerata dan Variasi Sama, Tapi Menunjukkan Perilaku yang Berlainan.

Sebagai ilustrasi diambil contoh seperti yang disajikan pada Gambar 3.2 (Hashimoto, Stredinger, dan Loucks, 1982). Kedua gambar diatas menunjukkan perilaku salah satu indikator unjuk kerja (waduk) yang mempunyai rerata dan variasi yang sama (kedua gambar tersebut masing-masing merupakan putaran 180°). Gambar 3.2 menunjukkan bahwa waduk pernah mengalami kegagalan dua kali yang mempunyai intensitas dan konsekuensi yang berlainan. Kegagalan yang pertama merupakan kegagalan yang tidak serius, sedang kegagalan kedua berlangsung lebih lama dan intensitas/kerawannya lebih serius. Akan tetapi, Gambar 3.2 menunjukkan bahwa waduk tidak pernah mengalami kegagalan. Jika ada batas atas pada indikator kerja ini (misal tekanan yang terjadi pada waduk, sehingga ada batas bawah dan batas atas nilai tekanan), maka perilaku pada Gambar 3.2 menunjukkan bahwa waduk pernah mengalami tekanan yang melebihi tekanan maksimum yang diijinkan. Hal ini menunjukkan bahwa evaluasi unjuk kerja waduk yang berdasarkan pada nilai rerata dan variasinya kurang memberikan gambaran yang sebenarnya pada perilaku waduk tersebut.

Selain itu, konsekuensi yang terjadi pada saat-saat waduk tidak mampu memenuhi kebutuhannya yaitu pada saat-saat terjadi "kegagalan" tidak begitu diperhatikan, padahal konsekuensi terjadinya "kegagalan" dapat berdampak luas, berlangsung cukup lama, atau dapat pula menyebabkan beban psikologis yang berkepanjangan. Penggunaan unjuk kerja keandalan waduk saja tidak selalu dapat menggambarkan perilaku keadaan waduk yang sesungguhnya.

Unjuk kerja yang disajikan pada evaluasi ini adalah beberapa indikator unjuk kerja yang mampu memberikan indikasi seberapa jauh intensitas kegagalan dan berapa lama suatu kegagalan itu terjadi. Unjuk kerja-unjuk kerja tersebut adalah Keandalan (*reliability*), Kelentingan (*resiliency*), serta Kerawanan (*vulnerability*).

- **Keandalan (*reliability*)**

Keandalan merupakan indikator seberapa sering waduk untuk memenuhi kebutuhan yang ditargetkan selama masa pengoperasiannya. Untuk pengoperasiannya waduk paling tidak ada dua macam definisi keandalan yaitu : (*Mc Mahon and Russel, 1978 dalam Suharyanto, 1997*).

1. Presentase keadaan dimana waduk mampu memenuhi kebutuhannya. Seringkali pada definisi keandalan ini dapat dikaitkan dengan kegagalan. Dalam hal ini, waduk dianggap gagal apabila tidak dapat memenuhikebutuhannya secara total.
2. Rerata persentase waduk dibanding dengan kebutuhannya, dalam definisi ini, meskipun suplai waduk tidak dapat memenuhi kebutuhannya, waduk keseluruhannya, tidak dianggap gagal total. Tetapi dianggap waduk hanya mensuplai sebagian dari kebutuhannya.

Pada kondisi seperti misalnya pada waduk yang digunakan sebagai sarana pembangkitan listrik dimana ada batas minimum debit pembangkitan listrik, maka definisi Gambar 3.2 (a) akan lebih sesuai. Hal ini dapat diterangkan bahwa jika waduk hanya mampu melepaskan debit yang lebih kecil daripada batas debit pembangkitan listrik minimum, maka untuk tidak mengakibatkan kerusakan pada turbin diputuskan untuk sama sekali tidak membangkitkan listrik.

Secara sistematis, definisi diatas dapat dituliskan dengan variabel "Zt" yang nilainya ditentukan sesuai dengan dua definisi diatas dan disajikan dalam persamaan berikut :

$$Z_t^1 = 1 \text{ untuk } R_t \geq D_t, 0 \text{ untuk } R_t \leq D_t$$

$$Z_t^2 = 1 \text{ untuk } R_t \geq D_t, R_t/D_t \text{ untuk } R_t \leq D_t$$

Dalam jangka panjang, nilai kelandaian sistem untuk definisi keandalan yang pertama dapat ditulis sebagai berikut :

$$\alpha_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum^n Z_t^1$$

Dimana :

n = jangka waktu pengoperasian.

R_t = *release* pada waktu ke t.

D_t = *demand* pada waktu ke t.

α_1 =keandalan waduk, gagal total jika kebutuhan tidak terpenuhi.

$$\sum^n Z_t^1 = \text{jumlah total waduk mampu memenuhi kebutuhan } (R_t \geq D_t)$$

untuk definisi keandalan ke-2.

Dalam studi dipergunakan definisi keandalan waduk yang pertama. Waduk dianggap gagal jika tidak mampu mensuplai kebutuhan secara total. Kondisi tersebut digunakan untuk mengantisipasi kebutuhan air baku karena jika pemenuhan kebutuhan air baku kurang dari yang ditargetkan maka air baku yang dihasilkan oleh optimasi tidak dijamin untuk terpenuhi. Selain itu simulasi mempunyai nilai keandalan yang lebih kecil adri kondisi yang sebenarnya. Sehingga kondisi keandalan yang pertama diharapkan banyak memberi nilai keamanan terhadap ketersediaan air.

- **Kelentingan (*resiliency*)**

Indikator ini untuk mengukur kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal. Jika semakin cepat waduk kembali ke keadaan memuaskan maka dapat dikatakan waduk lebih lenting sehingga konsekuensi dari kegagalan lebih kecil. Dengan mempergunakan definisi kegagalan pertama, perhitungan masa transisi dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan dituliskan dengan variabel "W_t" sebagai berikut :

$$W_t = \begin{cases} 1 & \text{jika } R_{t-1} \leq D_{t-1} \text{ dan } R_t \geq D_t \\ \text{osebaliknya } a & \end{cases}$$

Dalam jangka panjang nilai rerata dari "W_t" akan menunjukkan jumlah rerata terjadi transisi waduk dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan. Jumlah rerata terjadinya transisi ini dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum^n W_t$$

Dimana ρ menunjukkan probabilitas (rerata frekuensi) terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal ke keadaan memuaskan.

Jangka waktu rerata waduk mengalami kegagalan dibagi dengan frekuensi rerata terjadinya transisi waduk dan secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T_{\text{gagal}} = \frac{\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^1)}{\sum_{t=1}^n W_t}$$

Dimana :

T_{gagal} = jangka waktu rerata waduk dalam keadaan gagal secara kontinu.

Dalam jangka panjang, jangka waktu rerata waduk berada dalam kegagalan secara kontinue dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T_{\text{gagal}} = \frac{1 - \alpha_1}{\rho}$$

Semakin lama jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal maka semakin kecil kelentingannya sebagai akibatnya maka konsekuensi dari keadaan gagal tersebut juga akan besar. Oleh karenanya indikator kelentingannya didefinisikan sebagai γ_1 berikut :

$$\gamma_1 = \frac{1}{T_{\text{gagal}}} = \frac{\rho}{1 - \alpha_1}$$

Dimana :

γ_1 = unjuk kerja kelentingan

- **Kerawanan (*vulnerability*)**

Jika terjadi kegagalan, unjuk kerja kerawanan menunjukkan / mengukur seberapa besar (seberapa rawan) suatu kegagalan yang terjadi. Untuk mengukur tingkat kerawanan ini digunakan variabel kekurangan (*defisit*), DEF yang didefinisikan sebagai berikut :

$$DEF = \begin{cases} D_t - R_t & \text{jika } R_t \leq D_t \\ 0 & \text{jika } R_t \geq D_t \end{cases}$$

Sedangkan unjuk kerja kerawanan tersebut dapat dirumuskan dengan berbagai penafsiran sebagai berikut (*Suharyanto, 1997*) :

1. Nilai rerata ”*deficit-ratio*”

$$v_1 = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{DEF_t}{D_t}}{\sum_{t=1}^n (1 - Z_t)}$$

2. Nilai maksimum ”*deficit-ratio*”

$$v_2 = \max \left(\frac{DEF_t}{D_t} \right)$$

3. Nilai maksimum ”*deficit*”

$$v_3 = \max \{ DEF_t \}$$

3.5 Erosi dan Sedimentasi

3.5.1 Erosi

Menurut Utomo (1987) erosi adalah proses perataan kulit bumi yang meliputi proses penghancuran, pengangkutan dan pengendapan butir-butir tanah. Dalam hal ini Ellison (1947) dan Morgan (1986), mengemukakan bahwa erosi

tanah merupakan proses pelepasan butir-butir tanah dan poses pemindahan atau pengangkutan tanah yang disebabkan oleh angin dan air. Untuk Indonesia yang beriklim tropis basah maka proses erosi tanah lebih banyak disebabkan oleh air, akibat air hujan yang turun di permukaan tanah.

Menurut Arsyad (1976), yang dimaksud dengan proses erosi yang disebabkan oleh air merupakan kombinasi dua sub proses, yaitu:

- a. Penghancuran struktur-struktur tanah menjadi butir-butir primer oleh energi tumbukan butir-butir hujan yang jatuh menimpa tanah dan peredaman oleh air yang tergenang (proses dispersi).
- b. Pengangkutan butir-butir primer tanah tersebut oleh air yang mengalir di atas permukaan tanah.

Di daerah-daerah tropis yang lembab seperti di Indonesia maka air merupakan penyebab utama terjadinya erosi, sedangkan untuk daerah-daerah panas yang kering maka angin merupakan faktor penyebab utamanya. Erosi tanah yang disebabkan oleh air meliputi 3 tahap (Suripin, 2004), yaitu:

- a. Tahap pelepasan partikel tunggal dari massa tanah.
- b. Tahap pengangkutan oleh media yang erosif seperti aliran air dan angin.
- c. Tahap pengendapan, pada kondisi dimana energi yang tersedia tidak cukup lagi untuk mengangkut partikel.

Sedangkan Foster (1976) dan Lane dan Shirley (1982), mengemukakan proses erosi tanah merupakan proses pelepasan butir-butir tanah akibat pukulan jatuhnya butiran air hujan dan pengangkutan butir-butir tanah oleh aliran permukaan atau limpasan permukaan atau pelepasan butir-butir tanah oleh aliran air dalam alur pengangkutan butir-butir tanah oleh air dalam alur.

Berdasarkan bentuknya erosi dibedakan menjadi 7 tipe, diantaranya yaitu:

- a. Erosi percikan (*splash erosion*) adalah terlepas dan terlemparnya partikel-partikel tanah dari massa tanah akibat pukulan butiran air hujan secara langsung

- b. Erosi aliran permukaan (*overland flow erosion*) akan terjadi hanya dan jika intensitas dan/atau lamanya hujan melebihi kapasitas infiltrasi atau kapasitas simpan air tanah
- c. Erosi alur (*rill erosion*) adalah pengelupasan yang diikuti dengan pengangkutan partikel-partikel tanah oleh aliran air larian yang terkonsentrasi di dalam saluran-saluran air
- d. Erosi parit/selokan (*gully erosion*) membentuk jajaran parit yang lebih dalam dan lebar dan merupakan tingkat lanjutan dari erosi alur
- e. Erosi tebing sungai (*streambank erosion*) adalah erosi yang terjadi akibat pengikisan tebing oleh air yang mengalir dari bagian atas tebing atau oleh terjangan arus sungai yang kuat terutama pada tikungan-tikungan
- f. Erosi internal (*internal or subsurface erosion*) adalah proses terangkutnya partikel-partikel tanah ke bawah masuk ke celah-celah atau pori-pori akibat adanya aliran bawah permukaan
- g. Tanah longsor (*land slide*) merupakan bentuk erosi dimana pengangkutan atau gerakan massa tanah yang terjadi pada suatu saat dalam volume yang relatif besar.

(Sumber : Suripin, 2004)

Faktor-faktor yang mempengaruhi erosi antara lain :

- Iklim
- Tanah
- Topografi
- Tanaman / Vegetasi
- Macam penggunaan lahan
- Kegiatan manusia
- Karakteristik hidrolika sungai
- Karakteristik penampung sedimen, *check dam*, dan waduk
- Kegiatan gunung berapi

Hudson (1976), memandang erosi dari dua segi yakni :

1. Faktor penyebab erosi, yang dinyatakan dalam *erosivitas* hujan, dan
2. Faktor ketahanan tanah terhadap *erosivitas* hujan, yang dinyatakan sebagai *erodibilitas* tanah.

3.5.2 Erosi yang Diijinkan

Erosi tidak bisa dihilangkan sama sekali atau tingkat erosinya nol, khususnya untuk lahan-lahan pertanian. Tindakan yang dilakukan adalah dengan mengusahakan supaya erosi yang terjadi masih di bawah ambang batas yang maksimum (*soil loss tolerance*), yaitu besarnya erosi yang tidak melebihi laju pembentukan tanah. Apabila besarnya erosi, untuk lahan pertanian khususnya, masih lebih kecil dari 10 ton/ha/tahun, maka erosi yang terjadi masih dapat dibiarkan selama pengolahan tanah dan penambahan bahan organik terus dilakukan (*Suripin, 2004*). Besarnya erosi tanah yang masih dapat dibiarkan (*soil loss tolerance*) berdasarkan keadaan tanah yang dikeluarkan oleh SCS-USDA diberikan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1

Batas Maksimum Laju Erosi yang Dapat Diterima untuk Berbagai
Macam Kondisi Tanah

KONDISI TANAH	Laju Erosi (kg/m ² /th)
Skala makro (misal DAS)	0,2
Skala meso (misal lahan pertanian):	
- Tanah berlempung tebal dan subur (Mid-West, USA)	0,6 – 1,1
- Tanah dangkal yang mudah tererosi	0,2 – 0,5
- Tanah berlempung tebal, yang berasal dari endapan vulkanik	1,3 – 1,5

Tanah yang mempunyai kedalaman:	
- 0 -25 cm	0,2
- 25 – 50 cm	0,2 – 0,5
- 50 – 100 cm	0,5 – 0,7
- 100 – 150 cm	0,7 – 0,9
- > 150 cm	1,1
Tanah tropika yang sangat mudah tererosi	2,5
Skala mikro (misal daerah terbangun)	2,5
Tanah dangkal di atas batuan	0,112
Tanah dalam di atas batuan	0,224
Tanah lapisan dalam padat di atas batuan lunak	0,448
Tanah dengan permeabilitas lambat di atas batuan lunak	1,121
Tanah yang permeabel di atas batuan lunak	1,341

(Sumber : Suripin, 2004)

Erosi merupakan fungsi dari *erosivitas* dan *erodibilitas*. Pada dasarnya proses erosi adalah akibat interaksi kerja antara faktor-faktor iklim, topografi, vegetasi dan manusia terhadap tanah. Secara umum, faktor-faktor tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan yang dikenal dengan Persamaan Umum Kehilangan Tanah (PUKT), yaitu kehilangan tanah (A) dipengaruhi oleh indeks Erosifitas (R), Faktor Erodibilitas (K), Faktor Panjang Kemiringan (L), Faktor Kemiringan (S), Faktor Pengelolaan Tanaman (C), Faktor Pengendali Erosi (P) (CD. Soemarto, 1995)

Salah satu persamaan yang dikembangkan untuk mempelajari erosi lahan adalah persamaan Musgrave, yang selanjutnya berkembang menjadi persamaan yang sering digunakan sampai sekarang, yaitu *Universal Soil Loss Equation* (USLE). USLE memungkinkan perencana memprediksi laju erosi rata-rata lahan tertentu pada satu kemiringan dengan pola hujan tertentu untuk setiap macam

jenis tanah dan penerapan pengelolaan lahan. USLE dirancang untuk memprediksi erosi jangka panjang dari erosi lembar (*sheet erosion*) dan erosi alur dibawah erosi tertentu.

$$E_a = R \times K \times LS \times C \times P$$

di mana:

E_a : banyaknya tanah tererosi per satuan luas per satuan waktu (ton/ha/tahun)

R : faktor erosivitas hujan

K : faktor erodibilitas tanah

S : faktor panjang - kemiringan lereng

C : faktor tanaman penutup lahan dan manajemen tanaman

P : faktor tindakan konservasi praktis

3.5.2.1 Erosivitas Hujan

Faktor erosivitas hujan didefinisikan sebagai jumlah satuan indeks erosi hujan dalam setahun. Nilai R yang merupakan daya rusak hujan, dapat ditentukan dengan persamaan yang dilaporkan oleh Wischmeier, 1959 (dalam Renard, *et.al*, 1996) sebagai berikut (Suripin, 2004):

$$R = \sum_{i=1}^n EI_{30}$$

dimana:

R = faktor erosivitas hujan (KJ/ha/tahun)

n = jumlah kejadian hujan dalam setahun

EI_{30} = interaksi energi dengan intensitas maksimum 30 menit

Dalam penelitian Bols pada tahun 1978 untuk menentukan besarnya erosivitas hujan berdasarkan penelitian di Pulau Jawa dan Madura (Suripin 2004), didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$EI_{30} = 6,119 \times P_b^{1,211} \times N^{-0,747} \times P_{max}^{0,526}$$

Dimana:

EI_{30} = indeks erosi hujan bulanan (Kj/ha)

P_b = curah hujan bulanan (cm)

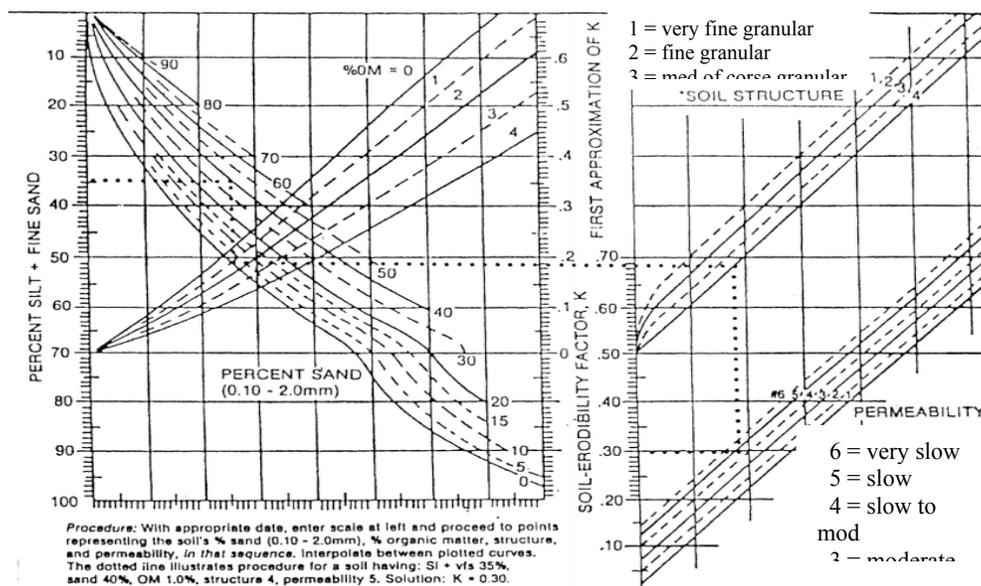
N = jumlah hari hujan per bulan

P_{max} = jumlah hujan maksimum harian (24 jam) dalam bulan yang bersangkutan

EI_{30} tahunan adalah jumlah EI_{30} bulanan

3.5.2.2 Erodibilitas Tanah

Faktor erodibilitas tanah (K) atau faktor kepekaan erosi tanah merupakan daya tahan tanah baik terhadap penglepasan maupun pengangkutan, terutama tergantung pada sifat-sifat tanah, seperti tekstur, stabilitas agregat, kekuatan geser, kapasitas infiltrasi, kandungan bahan organik dan kimiawi. Disamping itu juga tergantung pada posisi topografi, kemiringan lereng dan gangguan oleh manusia. Faktor erodibilitas tanah dapat diestimasi dengan nomograf K seperti pada Gambar 2.3 (Asdak, 1995).



Gambar 3.3

Nomograf K yang Dikembangkan Wischmeier (Asdak, 1995)

Sebagai keterangan untuk menghitung nilai K dengan nomograf, berikut disajikan tabel pelengkapya yaitu tipe Struktur Tanah pada Tabel 3.2, Klasifikasi Butir-butir Primer Tanah pada Tabel 3.3, dan Penilaian Permeabilitas Tanah pada Tabel 3.4.

Tabel 3.2 Penilaian Struktur Tanah

Tipe struktur tanah (diameter)	Kode penilaian
Granular sangat halus (< 1 mm)	1
Granular halus (1-2 mm)	2
Granular sedang dan besar (2-10 mm)	3
Berbentuk gumpal, lempeng, pejal	4

(Sumber: Suripin, 2004)

Tabel 3.3 Klasifikasi Butir-Butir Primer Tanah

Fraksi tanah	Diameter (mm)
Kerikil	> 2
Pasir kasar	2,0 – 0,2
Pasir halus	0,2 – 0,02
Debu	0,002 -0,02
Liat	<0,002

(Sumber: Roth, 1994)

Tabel 3.4 Penilaian Permeabilitas Tanah

Kelas permeabilitas tanah (kecepatan)	Kode penilaian
Sangat lambat (< 0,5 cm/jam)	1
Lambat (0,5-2,0)	2

Lambat sampai sedang (2,0-6,3)	3
Sedang (6,3-12,7)	4
Sedang sampai cepat (12,7-25,4)	5
Cepat (> 25,4)	6

(Sumber: Suripin, 2004)

Bahan organik tanah umumnya terdapat dipermukaan tanah. Jumlahnya berkisar antara 3%-5% dan mempengaruhi sifat-sifat tanah antara lain bertindak sebagai sumber hara N, P, S dan unsure mikro lainnya. Bahan organik tanah terdiri dari semua sisa makhluk hidup, baik yang berasal dari manusia, hewan maupun tumbuh-tumbuhan dan termasuk mikroorganisme didalam tanah baik yang sedang melapuk maupun yang telah melapuk.

Bahan organik sangat besar peranannya terhadap perbaikan struktur tanah, menambah kemampuan tanah untuk mengikat air, menambah kemampuan tanah untuk menahan unsur-unsur hara dalam arti kapasitas kation tanah menjadi tinggi dan sebagai unsur-unsur hara dalam arti kapasitas tukar kation tanah menjadi lebih tinggi dan sebagai sumber energi bagi kehidupan organisme.

3.5.2.3 Kemiringan dan Panjang Lereng

Faktor LS , kombinasi antara faktor panjang lereng (L) dan kemiringan lereng (S) merupakan nisbah besarnya erosi dari suatu lereng dengan panjang dan kemiringan tertentu terhadap besarnya erosi dari plot lahan dengan panjang 22,13 m dan kemiringan 9 %. Nilai LS untuk sembarang panjang dan kemiringan lereng dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$LS = \left(\frac{L}{22} \right)^z (0,006541S^2 + 0,0456S + 0,065)$$

Dimana :

L = panjang lereng (m) yang diukur dari tempat mulai terjadinya aliran air di atas permukaan tanah sampai tempat mulai terjadinya pengendapan disebabkan

oleh berkurangnya kecuraman lereng atau dari tempat aliran air di permukaan tanah masuk ke badan air/saluran

S = kemiringan lereng (%)

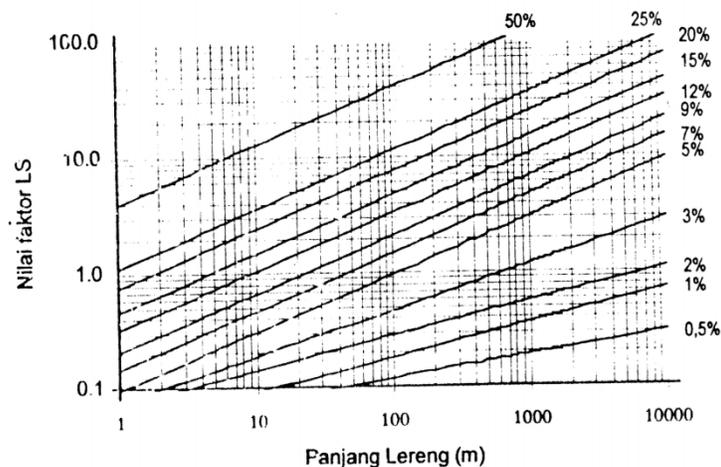
z = konstanta yang besarnya bervariasi tergantung besarnya S (lihat Tabel 3.5)

Tabel 3.5. Hubungan Nilai z dan S

Nilai S	Nilai z
$S < 1\%$	0,2
$1\% \leq S < 3\%$	0,3
$3\% \leq S < 4,5\%$	0,4
$S \geq 5\%$	0,5

(Sumber : Suripin, 2004)

Faktor LS dapat juga diperoleh dengan menggunakan nomograf seperti terlihat pada Gambar 3.4



Gambar 3.4

Nomograf untuk Menghitung Faktor LS (Suripin, 2004)

3.5.2.4 Penutupan Lahan

Merupakan rasio dari tanah pada tanaman tertentu dengan tanah gundul. Pada tanah gundul (petak baku) nilai $C = 1,0$. Untuk mendapatkan nilai C

tahunan perlu diperhatikan perubahan-perubahan penggunaan tanah dalam setiap tahun.

Penentuan nilai C sangat sulit, dikarenakan banyaknya ragam cara bercocok tanam untuk suatu jenis tanaman tertentu dalam lokasi tertentu. Berhubung berbagai lokasi tersebut memiliki iklim yang berbeda dengan berbagai ragam cara bercocok tanam sehingga penentuan nilai C diperlukan banyak data. Sehingga faktor C dapat dirumuskan :

$$C = \sum_i \sum_j C_{i,j} A_{i,j} P_{i,j} \quad (\text{Suripin, 1998})$$

Dimana :

C = koefisien penutupan lahan

$C_{i,j}$ = koefisien penutupan lahan dengan pengolahan i, dan umur j

$A_{i,j}$ = luas lahan dengan pengolahan i, dan umur j

$P_{i,j}$ = hujan pada luas daerah $A_{i,j}$ dengan pengolahan i, dan umur j

Nilai C dapat juga ditentukan dalam Tabel 3.6 dibawah ini.

Tabel 3.6 Nilai C dari beberapa Jenis Pertanian di Indonesia

No.	Jenis Pertanian	Nilai C
1.	Tanah yang diberakan tapi diolah secara periodik	1,0
2.	Sawah beririgasi	0,01
3.	Sawah tadah hujan	0,05
4.	Tanaman tegalan (tidak dispesifikasi)	0,7
5.	Tanaman rumput Brachiaria;	
	- Tahun permulaan	0,3 ⁺
	- Tahun berikutnya	0,02 ⁺
6.	Ubi kayu	0,8
7.	Jagung	0,7

No.	Jenis Pertanaman	Nilai C
8.	Kekacangan	0,6
9.	Kentang	0,4
10.	Kacang tanah	0,2
11.	Padi	0,5
12.	Tebu	0,2
13.	Pisang	0,6
14.	Sereh wangi	0,4 ⁺
15.	Kopi dengan tanaman penutup tanah	0,2
16.	Yam	0,85
17.	Cabe, jahe, dan lain – lain (rempah-rempah)	0,9
18.	Kebun campuran;	
	- Kerapatan tinggi	0,1
	- Ubi kayu – kedele	0,2
	- Kerapatan sedang	0,3
	- Kerapatan rendah (kacang tanah)	0,5
19.	Perladangan berpindah – pindah (shifting cultivation)	0,4
20.	Perkebunan (penutup tanah buruk);	
	- Karet	0,8
	- Teh	0,5
	- Kelapa Sawit	0,5
	- Kelapa	0,8
21.	Hutan alam;	
	- Penuh dengan serasah	0,001
	- Serasah sedikit	0,005
22.	Hutan produksi;	
	- Tebang habis (clear cutting)	0,5
	- Tebang pilih (selective cutting)	0,2

No.	Jenis Pertanaman	Nilai C
23.	Belukar/rumput	0,3
24.	Ubi kayu + kedele	0,3
25.	Ubi Kayu + kacang tanah	0,26
26.	Ubi Kayu + jagung – kacang tanah	0,45
27.	Padi gogo + jagung	0,5
28.	Padi gogo + sorgum	0,5
29.	Padi gogo + kedelai	0,3
30.	Padi gogo + Kacang gede	0,55
31.	Padi gogo + kacang tunggak	0,45
32.	Kacang tanah + kacang hijau	0,50
33.	Kacang tanah + kacang hijau	0,45
34.	Jagung + kacang tanah	0,40
35.	Jagung + ubi jalar	0,40
36.	Alang – alang dibakar sekali setiap tahun	0,1
37.	Tanah kosong, tidak diolah	0,95
38.	Tanah kosong diolah	1,0
39.	Ladang berpindah	0,4
40.	Pohon reboisasi, tahun 1	0,32
41.	Pohon reboisasi, tahun 2	0,1
42.	Tanaman perkebunan, tanah ditutup dengan bagus	0,1
43.	Tanaman perkebunan, tanah berpenutupan jelek	0,5
44.	Semak tak terganggu	0,01
45.	Hutan tak terganggu, sedikit seresah	0,005
46.	Hutan tak terganggu, banyak seresah	0,001

(Sumber : Hamer, 1980)

3.5.2.5 Konservasi Praktis

Merupakan rasio tanah yang hilang bila usaha konservasi tanah dilakukan (teras, tanaman dalam kontur dan sebagainya) dengan tanpa usaha konservasi tanah. Tanpa konservasi tanah nilai $P = 1$ (petak baku). Bila diteraskan, nilai P dianggap sama dengan P untuk *strip cropping*, sedang nilai LS didapat dengan menganggap panjang lereng sebagai jarak horizontal dari masing – masing teras. Nilai P pada beberapa teknik konservasi tanah dapat dilihat pada tabel berikut ini

Tabel 3.7 Nilai P pada Beberapa Teknik Konservasi Tanah

No.	Jenis Teknik Konservasi	Nilai P
1.	Teras bangku :	
	- Standard disain dan bangunan baik	0,04
	- Standard disain dan bangunan sedang	0,15
	- Standard disain dan bangunan rendah	0,35
2.	Teras tradisional	0,04
3.	Penanaman/pengolahan menurut kontur pada lereng :	
	- 0 – 8%	0,5
	- 9 – 20%	0,75
	> 20%	0,90
4.	Penanaman rumput (Bahlia) dalam strip :	
	- Standard disain dan keadaan pertumbuhan baik	0,04
	- Standard disain dan keadaan pertumbuhan tidak baik	0,40
5.	Penanaman Crotalaria dalam rotasi	0,60
6.	Penggunaan mulsa (jerami 6 ton/ha/tahun)	0,30
	(jerami 3 ton/ha/tahun)	0,50
	(jerami 1 ton/ha/tahun)	0,80
7.	Penanaman tanaman penutup tanah rendah pada tanaman perkebunan :	

No.	Jenis Teknik Konservasi	Nilai P
	- kerapatan tinggi	0,1
	- kerapatan sedang	0,5

(Sumber : Hamer, 1980)

3.5.3 Sedimentasi

Proses sedimentasi yaitu proses terkumpulnya butir-butir tanah. Keadaan ini terjadi karena kecepatan aliran air yang mengangkut bahan sedimen mencapai kecepatan pengendapan.

Proses sedimentasi dapat terjadi baik pada lahan-lahan pertanian maupun di sepanjang dasar sungai, dasar waduk, muara, dan sebagainya. Sedimentasi pada sungai dan waduk menyebabkan daya tampung sungai dan waduk akan menurun. Khusus untuk waduk dapat berakibat memperpendek umur waduk. Pada muara sungai, proses pengendapan sedimen dapat membentuk suatu delta. Dengan tersumbatnya muara sungai dengan sedimentasi dapat menghambat kemampuan sungai membuang air banjir ke laut sehingga secara bersama-sama dapat mendatangkan bahaya banjir dan kerusakan-kerusakan lain yang diakibatkan. Dari proses terjadinya erosi tanah dan proses sedimentasi maka proses sedimentasi dapat dibedakan menjadi 2 (dua) bagian :

1. Proses sedimentasi secara geologi. Proses sedimentasi secara geologi yaitu proses erosi tanah dan sedimentasi yang berjalan secara normal atau berlangsung secara geologi, artinya proses pengendapan yang berlangsung masih dalam batas-batas diperkenankan atau dalam keseimbangan alam dari proses degradasi dan agradasi pada permukaan kulit bumi akibat pelapukan.
2. Proses Sedimentasi dipercepat. Proses Sedimentasi dipercepat yaitu proses terjadinya sedimentasi yang menyimpang dari proses secara geologi dan berlangsung dalam waktu yang cepat biasanya bersifat merusak atau merugikan dan dapat mengganggu keseimbangan alam atau kelestarian lingkungan hidup. Kejadian ini biasanya disebabkan karena kegiatan

manusia dalam mengolah tanah. Cara mengolah tanah yang salah dapat mengakibatkan erosi tanah yang sangat tinggi, sehingga sedimentasi juga meningkat.

Disamping kegiatan manusia bencana alam seperti gunung meletus juga merupakan penyimpangan besar-besaran yang dapat mendatangkan kesulitan-kesulitan akibat timbulnya bahan sedimen yang tinggi baik yang menutup lahan-lahan pertanian, daerah pemukiman, jalan-jalan maupun pendangkalan sungai-sungai, waduk-waduk dan lain sebagainya.

3.5.3.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Sedimentasi

Proses terjadinya sedimentasi merupakan bagian dari proses erosi tanah. Timbulnya bahan sedimen adalah sebagai akibat terjadinya erosi tanah. Kegiatan ini berlangsung baik oleh air maupun angin. Proses erosi dan sedimentasi di Indonesia yang lebih berperan adalah faktor air, sedangkan faktor angin relatif kecil. Faktor-faktor yang mempengaruhi erosi tanah juga merupakan sebagian besar dari faktor-faktor yang mempengaruhi sedimentasi. Beberapa faktor yang mempengaruhi sedimentasi yaitu :

1. Iklim
2. Tanah
3. Topografi
4. Tanaman
5. Macam Penggunaan Lahan
6. Kegiatan Manusia
7. Karakteristik Hidrolika Sungai
8. Karakteristik Penampungan Sedimen, Cekdam-cekdam dan waduk-waduk
9. Kegiatan Gunung Berapi

3.5.3.2 Mekanisme Pengangkutan Sedimen

Mekanisme pengangkutan butir-butir tanah yang dibawa dalam air yang mengalir, dapat digolongkan menjadi beberapa bagian sebagai berikut :

a. *Wash load movement*

Butir-butir yang sangat halus berupa lumpur yang bergerak bersama-sama dalam aliran air, konsentrasi sedimen merata di semua bagian pengaliran. Bahan *wash load* berasal dari pelapukan lapisan permukaan tanah yang menjadi lepas-lepas berupa butir halus selama musim kering. Debu halus ini dibawa masuk ke saluran atau sungai baik oleh angin maupun air hujan yang pertama turun pada musim hujan, sehingga jumlah pada awal musim hujan lebih banyak dibandingkan dari keadaan yang lain.

b. *Suspended load movement*

Butir-butir tanah yang bergerak melayang dalam aliran air. Gerakan butir-butir tanah ini terus menerus dikompensir oleh gerak turbulensi aliran sehingga butir-butir tanah bergerak di atas saluran. Bahan *suspended load* terjadi dari pasir halus (*fine sand*) yang bergerak di samping dipengaruhi turbulensi aliran juga debit dan kecepatan aliran, semakin besar debit, angkutan *suspended load* juga meningkat.

c. *Saltation load movement*

Pergerakan butir-butir tanah yang bergerak dalam aliran air antara pergerakan *suspended load* dan *bed load*. Butir-butir tanah bergerak secara terus menerus meloncat-loncat (*skip*) dan melambung (*baunce*) sepanjang saluran tanpa menyentuh dasar saluran. Bahan *saltation load* terdiri dari pasir halus sampai pasir kasar. Dalam perhitungan kriteria *saltation load* masih diragukan yaitu antara *suspended load* dan *bed load*, sehingga dalam perhitungan pengangkutan sedimen sering tidak diperhitungkan.

d. *Bed load movement*

Merupakan angkutan butir-butir tanah berupa pasir kasar (*coarse sand*) yang bergerak secara menggelinding (*rolling*) mendorong dan menggeser (*pushing*)

and sliding) terus menerus pada dasar aliran yang pergerakannya dipengaruhi oleh adanya gaya seret (*drag force*) aliran yang bekerja diatas butir-butir tanah yang bergerak.

3.5.3.3 Hasil Sedimen

Hasil sedimen (*sedimen yield*) adalah besarnya sedimen yang berasal dari erosi yang terjadi di daerah tangkapan air yang diukur pada periode waktu dan tempat tertentu. Hasil sedimen tergantung pada besarnya erosi total di DAS dan tergantung pada transport partikel-partikel tanah yang tererosi tersebut keluar dari daerah tangkapan air DAS. Produksi sedimen umumnya mengacu pada besarnya laju sedimen yang mengalir melewati satu titik pengamatan tertentu dalam suatu DAS. Besarnya hasil sedimen biasanya bervariasi mengikuti karakteristik fisik DAS. Satuan yang biasa digunakan adalah ton per km² per tahun. Hasil sedimen biasanya diperoleh dari pengukuran sedimen terlarut dalam sungai (*suspended sediment*) atau dengan pengukuran langsung di dalam waduk. Cara lain yang dapat dilakukan untuk memprakirakan besarnya hasil sedimen dari suatu daerah tangkapan air adalah melalui perhitungan Nisbah Pelepasan Sedimen (*Sediment Delivery Ratio*) atau cukup dikenal dengan singkatan SDR.

Perhitungan besarnya SDR dianggap penting dalam menentukan prakiraan besarnya hasil sedimen total yang realistis berdasarkan perhitungan erosi total yang berlangsung di daerah tangkapan air. Tergantung dari faktor-faktor yang mempengaruhi, hubungan antara besarnya hasil sedimen dan besarnya erosi total yang berlangsung di daerah tangkapan air umumnya bervariasi. Variabilitas angka SDR dari suatu DAS akan ditentukan oleh pengaruh salah satu atau kombinasi dari faktor-faktor seperti sumber sedimen, jumlah sedimen yang tersedia untuk proses transport sedimen dan jarak antara sumber sedimen dan sungai/anak sungai, sistem transpor, tekstur partikel tanah yang tererosi, lokasi deposisi sedimen, karakteristik DAS.

Cara memprakirakan besarnya hasil sedimen dengan menghitung besarnya SDR suatu daerah tangkapan air kurang begitu akurat mengingat bahwa erosi total yang ditentukan berdasarkan rumus USLE tidak memperhitungkan besarnya erosi parit dan

deposisi hasil erosi (sedimen) di cekungan-cekungan permukaan tanah antara daerah sumber erosi dan saluran air (sungai) yang dikaji besarnya hasil sedimen. Namun demikian, cara ini lazim dilakukan di daerah yang kurang memungkinkan dilakukannya pengukuran hasil sedimen secara langsung, di lapangan. Menurut *SCS National Engineering Handbook (DPMA,1984)* besarnya prakiraan hasil sedimen dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut :

$$SY = Ea \times SDR$$

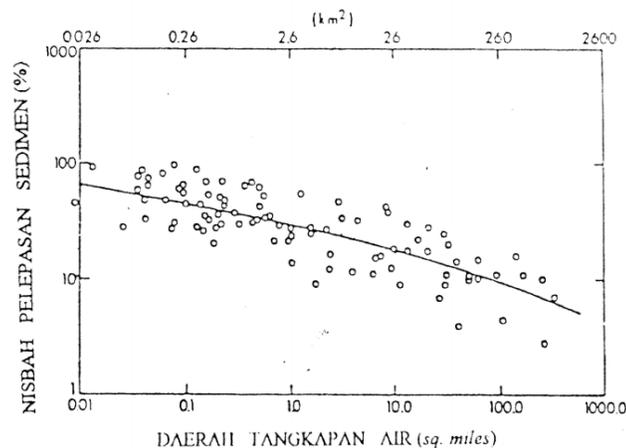
Dimana:

SY = Jumlah sedimen (ton/tahun)

SDR = *sediment delivery ratio*

Ea = erosi total (ton/ha/tahun)

Nilai SDR dapat dihitung dari nomograf SDR, seperti terlihat pada Gambar 3.5



Gambar 3.5

Nomograf untuk Menghitung Nilai SDR (*Asdak, 1995*)

3.5.3.4 Upaya Pengendalian Sedimentasi

Pengendalian sedimentasi pada waduk yang terbaik adalah dimulai dari sumbernya yaitu pengendalian erosi. Tindakan-tindakan yang diambil untuk memperkecil akibat-akibatnya antara lain :

3.5.3.4.1 Secara teknis

Upaya pengendalian sedimentasi secara teknis antara lain :

1. Pembuatan *Check Dam* di hulu waduk.

Check Dam berfungsi mengumpulkan sedimen sebelum masuk ke dalam waduk. Apabila *check dam* tidak dibangun, maka sedimen akan masuk ke dalam waduk sehingga dapat memperpendek umur waduk.

2. *Flushing*

Prinsip dan metode penggelontoran sedimen dengan energi potensial air waduk (*flushing*) adalah mengeluarkan sedimen dengan mengambil manfaat energi hidrolis akibat beda tinggi antara muka air di depan dan belakang bendungani, untuk mensuplai energi pada sediment flushing system.

3. Perencanaan bangunan (*structure*) yang baik.

Perencanaan bangunan harus sebaik mungkin agar dapat dihindarkan terjadinya endapan sedimen di depan bukaan atau di ruang ambang-ambang pintu, katup berada dan bergerak.

4. Pengerukan Waduk

Pengerukan waduk yang dilakukan secara kontinyu dapat mengurangi endapan sedimen di waduk

5. Membuat alur pintas atau sudetan (*by pass channel*)

Alur pintas atau sudetan berfungsi mengelakkan aliran yang mengandung sedimen agar tidak masuk ke dalam waduk. Kesulitan yang dihadapi oleh pemecahan dengan cara ini ialah karena jumlah terbesar pengangkutan sedimen terjadi pada musim banjir, sedangkan waduk harus menampung air banjir atau konservasi air permukaan.

3.5.3.4.2 Secara Non Teknis

Upaya pengendalian sedimentasi secara non teknis dapat dilakukan dengan cara konservasi di daerah pengaliran sungai. Konservasi yang dimaksud adalah konservasi waduk sebagai upaya memelihara keberadaan, keberlanjutan

keadaan, sifat, dan fungsi waduk agar senantiasa mendukung tersedianya air dalam kuantitas dan kualitas yang memadai. Konservasi tersebut dapat mengurangi terjadinya erosi pada DPS sehingga dapat mengurangi laju pembentukan sedimentasi.

Konservasi sumber daya air dilakukan melalui kegiatan-kegiatan (ayat 2 pasal 20 UU Sumber Daya Air) :

- ❖ Perlindungan dan pelestarian sumber air
- ❖ Pengawetan air
- ❖ Pengelolaan kualitas air
- ❖ Pengendalian pencemaran air

Konservasi waduk didesain untuk mempertahankan dan meningkatkan fungsi waduk yaitu menampung air pada periode kelebihan air (musim hujan) dan dipakai pada waktu kekurangan air (musim kemarau) untuk berbagai kepentingan. Hal penting dalam konservasi waduk adalah menjaga DAS dari kerusakan dan alih fungsi yang berdampak sedimentasi bagi waduk. Konservasi di daerah pengaliran sungai dapat mengurangi terjadinya erosi pada DPS sehingga dapat mengurangi laju pembentukan sedimentasi.

Dalam kaitannya dengan konservasi waduk kawasan di sekitar waduk harus dijaga agar tidak terjadi penebangan pohon, sedangkan kawasan yang gundul dilakukan penanaman pohon. Di kawasan mata air, yakni pada radius 200 meter tidak diperkenankan untuk kegiatan budidaya.

Konservasi waduk erat hubungannya dengan konservasi tanah dan air. Penganan konservasi waduk dengan memperhatikan konservasi tanah dan air akan mendukung optimalisasi fungsi waduk.

Secara garis besar metode konservasi tanah secara non struktural (non fisik) dapat dikelompokkan menjadi tiga (*Morgan, 1986; Suripin 2002*) yaitu:

a. Secara Agronomis

Metode agronomis atau biologi adalah memanfaatkan vegetasi untuk membantu menurunkan erosi lahan, mengurangi aliran permukaan (*run off*), memperbesar jumlah air dalam tampungan-tampungan dari alam maupun artifisial dan meningkatkan fungsi air tanah. Konservasi tanah dan air secara agronomis ini menjalankan fungsinya melalui :

1. Pengurangan daya perusak butiran hujan yang jatuh akibat intersepsi butiran hujan oleh dedaunan tanaman atau tajuk tanaman.
2. Pengurangan volume aliran permukaan akibat meningkatnya kapasitas infiltrasi oleh aktifitas perakaran tanaman dan penambahan bahan organik.
3. Pengurangan peningkatan kehilangan air tanah akibat meningkatnya evapotranspirasi, sehingga tanah cepat kekurangan air.
4. Perlambatan atau pengurangan aliran permukaan akibat meningkatnya panjang lintasan permukaan oleh keberadaan tanaman.
5. Perlambatan atau pengurangan aliran permukaan karena meningkatnya turbulensi akibat lebatnya penutup lahan ketinggian kekasaran meningkat sehingga kecepatan air berkurang. Semakin besar perlawanan aliran, kecepatan aliran semakin kecil (*Simons dan Senturk, 1992; Julien, 1995; Kodoatie, 2002*).
6. Pengurangan daya rusak aliran permukaan sebagai akibat pengurangan volume permukaan aliran dan kecepatan aliran permukaan akibat meningkatnya panjang lintasan dan kekasaran permukaan.

Konservasi tanah dan air secara agronomis dapat dilakukan dengan berbagai macam cara yaitu:

1. Penanaman tanaman atau tumbuhan penutup tanah secara terus menerus (*permanent plan cover*).
2. Penanaman dalam strip (*strip cropping*).
3. Penanaman bergabda (*multiple cropping*)
4. Penanaman bergilir (*rotation cropping*)

5. Pemanfaatan mulsa (*residue management*)
6. Sistem pertanian hutan (*agroforestry*)

b. Penghutanan kembali (Reboisasi)

Reboisasi merupakan cara yang cocok untuk menurunkan erosi dan aliran permukaan, terutama jika dilakukan pada bagian hulu daerah tangkapan air untuk mengatur banjir. Secara lebih luas, reboisasi dapat diartikan sebagai usaha untuk memulihkan dan menghutankan kembali tanah yang mengalami kerusakan fisik, kimia, maupun biologi; baik secara alami maupun oleh ulah manusia. Tanah yang rusak tersebut dapat berupa hutan gundul/rusak, belukar, padang ilalang, atau tanah terlantar lainnya. Tanaman yang digunakan biasanya tanaman yang bisa mencegah erosi, baik dari segi habitus maupun umur, juga diutamakan tanaman keras yang bernilai ekonomis, baik kayunya maupun hasil samping lainnya, misalnya getah, akar dan minyak.

Dalam kaitannya dengan usaha konservasi, tanaman yang dipilih hendaknya mempunyai persyaratan sebagai berikut :

- a Mempunyai sistem perakaran yang kuat, dalam dan luas, sehingga membentuk jaringan akar yang rapat.
- b Pertumbuhannya cepat sehingga mampu menutup tanah dalam waktu singkat.
- c Mempunyai nilai ekonomis baik kayunya maupun hasil sampingnya.
- d Dapat memperbaiki kualitas/kesuburan tanah.

c. Konservasi Mekanis

Metode mekanis atau fisik adalah konservasi yang berkonsentrasi pada penyiapan tanah supaya dapat ditumbuhi vegetasi yang lebat dan cara memanipulasi topografi mikro untuk mengendalikan aliran air dan angin. Pematuan air berlangsung lebih lama sehingga kesempatan air untuk meresap ke dalam tanah lebih panjang. Prinsip dasar konservasi tanah adalah mengurangi

banyaknya tanah yang hilang akibat erosi, sedangkan prinsip konservasi air adalah memanfaatkan air hujan yang jatuh ke tanah seefisien mungkin, mengendalikan kelebihan air di musim hujan, dan menyediakan air yang cukup di musim kemarau.

Dalam hal ini, konservasi secara mekanis mempunyai fungsi :

- a. Memperlambat aliran permukaan.
- b. Menampung dan mengalirkan aliran permukaan sehingga tidak merusak.
- c. Memperbesar kapasitas infiltrasi air ke dalam tanah dan memperbaiki aerasi tanah.
- d. Menyediakan air bagi tanaman.

Adapun usaha konservasi tanah dan air yang termasuk dalam metode mekanis antara lain:

- a. Pengolahan tanah.
- b. Pengolahan tanah menurut garis kontur.
- c. Pembuatan terasering.
- d. Pembuatan saluran air (*waterways*)
- e. Pembuatan dam pengendali (*check dam*).

d. Secara Kimiawi

Konservasi secara kimiawi adalah usaha konservasi yang ditujukan untuk memperbaiki struktur tanah sehingga lebih tahan terhadap erosi. Metode ini perannya sangat kecil dalam hal konservasi air terutama dari sisi kuantitas airnya. Struktur tanah merupakan salah satu sifat tanah yang sangat menentukan kepekaan tanah terhadap ancaman erosi. Oleh karena itu sejak tahun 1950-an telah dimulai adanya usaha-usaha untuk memperbaiki kemantapan struktur tanah melalui pemberian preparat-preparat kimia yang secara umum yang disebut pemantap tanah (*soil conditioner*). Bahan pemantap tanah yang baik harus mempunyai sifat-sifat sebagai berikut (*Seta, 1991*) :

- a. mempunyai sifat adhesif serta dapat bercampur dengan tanah secara merata.
- b. Dapat merubah sifat hidrophobik atau hidrophilik tanah, yang dengan demikian dapat merubah kurva penahanan air tanah.
- c. Dapat meningkatkan kapasitas tukar kation tanah, yang berarti mempengaruhi kemampuan tanah dalam menahan air.
- d. Daya tahan sebagai pemantap tanah cukup memadai, tidak terlalu singkat dan tidak terlalu lama.
- e. Tidak bersifat racun (*phytotoxix*) dan harganya terjangkau (*murah*)

Beberapa macam bahan pemantap tanah yang banyak digunakan dalam rangka konservasi tanah dan air dapat dilihat pada tabel 3.1 penggunaan bahan pemantap tanah pada dasarnya dapat dilakukan melalui tiga cara, yaitu :

- a. pemakaian di permukaan tanah (*surface treatment*). Pada cara ini larutan atau emulsi bahan pemantap tanah yang telah diencerkan dengan air (dengan perbandingan tertentu) disemprotkan langsung ke atas permukaan tanah dengan *sprayer*. Cara ini dapat dilakukan baik untuk penelitian di lapangan maupun di laboratorium.
- b. Pemakaian secara dicampur (*incorporation treatment*). Pada cara ini larutan atau emulsi bahan pemantap tanah yang telah diencerkan dengan air (dengan perbandingan tertentu) disemprotkan langsung di atas permukaan tanah dengan *sprayer*, kemudian tanah diaduk-aduk sampai campuran merata sampai kedalaman antara 0-22 cm. Cara ini banyak dilakukan dalam penelitian di laboratorium, namun dapat juga untuk pemakaian di lapangan. Untuk areal yang luas, penyemprotan dan pengadukan tanah dapat dilakukan dengan mesin atau traktor.
- c. Pemakaian setempat/lubang (*local/pit treatment*). Pada cara ini pemakaian bahan pemantap tanah hanya terbatas pada lubang-lubang (dengan ukuran misalnya 60x60, 60x60, 60x60 cm²) yang dipersiapkan untuk ditanami tanaman (biasanya tanaman tahunan saja).

Tabel 3.8 Macam-macam bahan pemantap tanah yang banyak digunakan untuk memperbaiki struktur tanah (*Gabriel et al., 1977*)

Nama kimia	Wujud
Polyninyl (Pva)	Emulsi
Polyacrilamide (PAM)	Larutan
Polyvinyl Pyrrolidone	Larutan
Asphalt	Emulsi
Polyvinyl alkohol (PVA)	Larutan
Polyurethane	Larutan
Polyethyneglycol	Larutan
Latex	Emulsi

(Sumber : Robert, Rustam, 2005)

3.6 Analisis Hidrologi

Data hidrologi adalah kumpulan keterangan atau fakta mengenai fenomena hidrologi (*hydrologic phenomenon*), seperti besarnya : curah hujan, temperatur, penguapan, lamanya penyinaran matahari, kecepatan angin, debit sungai, tinggi muka air sungai, kecepatan aliran, konsentrasi sedimen sungai akan selalu berubah terhadap waktu (*Soewarno, 1995*).

Data hidrologi dianalisis untuk membuat keputusan dan menarik kesimpulan mengenai fenomena hidrologi berdasarkan sebagian data hidrologi yang dikumpulkan. (*Soewarno, 1995*).

Adapun langkah-langkah dalam analisis hidrologi adalah sebagai berikut :

- 1) Perencanaan Daerah Aliran Sungai (DAS) beserta luasnya.
- 2) Analisis mengenai distribusi curah hujan dengan periode ulang T tahun.
- 3) Analisis mengenai frekuensi curah hujan.
- 4) Pengukuran dispersi.

- 5) Pemilihan jenis sebaran.
- 6) Uji kecocokan sebaran.
- 7) Perhitungan debit banjir rencana berdasarkan besarnya curah hujan rencana di atas pada periode ulang T tahun untuk menentukan bangunan pengendali banjir.

3.6.1 Daerah Aliran Sungai

Daerah Aliran Sungai (DAS) (*catchment, basin, watershed*) merupakan daerah dimana semua airnya mengalir ke dalam suatu sungai yang dimaksudkan. Daerah ini umumnya dibatasi oleh batas topografi, yang berarti ditetapkan berdasar aliran air permukaan. Batas ini tidak ditetapkan berdasar air bawah tanah karena permukaan air tanah selalu berubah sesuai dengan musim dan tingkat kegiatan pemakaian.

Nama sebuah DAS ditandai dengan nama sungai yang bersangkutan dan dibatasi oleh titik kontrol, yang umumnya merupakan stasiun hidrometri. Memperhatikan hal tersebut berarti sebuah DAS dapat merupakan bagian dari DAS lain (*Sri Harto Br., 1993*). Dalam sebuah DAS kemudian dibagi dalam area yang lebih kecil menjadi sub DAS. Penentuan batas-batas sub DAS berdasarkan kontur, jalan dan rel KA yang ada di lapangan untuk menentukan arah aliran air.

Dari peta topografi, ditetapkan titik-titik tertinggi disekeliling sungai utama (*main stream*) yang dimaksudkan, dan masing-masing titik tersebut dihubungkan satu dengan lainnya sehingga membentuk garis utuh yang bertemu ujung pangkalnya. Garis tersebut merupakan batas DAS dititik kontrol tertentu (*Sri Harto Br., 1993*).

Adapun metode yang digunakan dalam perhitungan curah hujan rata-rata wilayah daerah aliran sungai (DAS) ada tiga macam cara:

a. Cara rata-rata aljabar

Tinggi rata-rata curah hujan yang didapatkan dengan mengambil nilai rata-rata hitung (*arithmetic mean*) pengukuran hujan di pos penakar-penakar hujan di dalam areal tersebut. Jadi cara ini akan memberikan hasil yang dapat dipercaya jika pos-pos penakarnya ditempatkan secara merata di areal tersebut, dan hasil penakaran masing-masing pos penakar tidak menyimpang jauh dari nilai rata-rata seluruh pos diseluruh areal. Nilai curah hujan wilayah ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

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

di mana :

\bar{R} : curah hujan wilayah (mm)

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

(R_1, R_2, \dots, R_n) : curah hujan di tiap titik pengamatan (mm)

b. Cara Poligon *Thiessen*

Metode ini sering digunakan pada analisis hidrologi karena metode ini lebih baik dan obyektif dibanding metode lainnya. Metode ini dapat digunakan pada daerah yang memiliki titik pengamatan yang tidak merata. Cara ini adalah dengan memasukkan faktor pengaruh daerah yang mewakili stasiun hujan yang disebut faktor pembobotan atau koefisien *Thiessen*. Untuk pemilihan stasiun hujan yang akan dipilih harus meliputi daerah aliran sungai yang akan dibangun. Besarnya koefisien *Thiessen* tergantung dari luas daerah pengaruh stasiun hujan yang dibatasi oleh poligon-poligon yang memotong tegak lurus pada tengah-tengah garis penghubung stasiun. Setelah luas pengaruh tiap-tiap stasiun didapat, maka koefisien *Thiessen* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \frac{A_1.R_1 + A_2.R_2 + \dots + A_n.R_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \\ &= \frac{A_1.R_1 + A_2.R_2 + \dots + A_n.R_n}{A} \\ &= W_1R_1 + W_2R_2 + \dots + W_nR_n\end{aligned}$$

di mana :

\bar{R} : curah hujan wilayah (mm)

R_1, R_2, \dots, R_n : curah hujan di tiap titik pengamatan dan n adalah jumlah titik-titik pengamatan (mm)

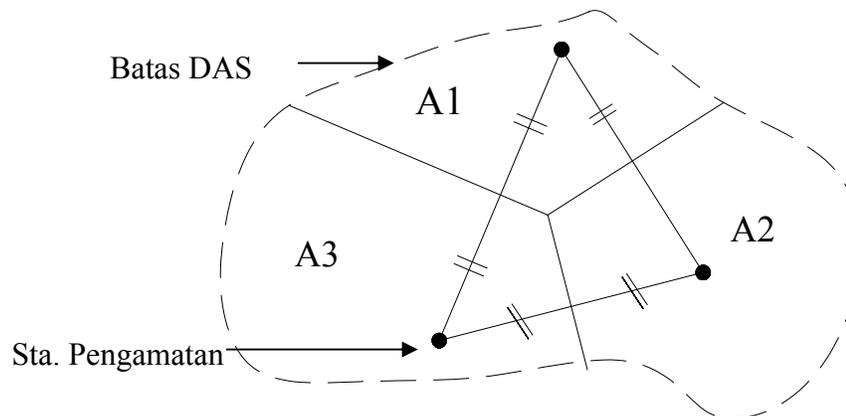
n : jumlah titik-titik pengamatan curah hujan

A_1, A_2, \dots, A_n : luas bagian yang mewakili tiap titik pengamatan (m²)

A : luas total wilayah (m²)

W_1, W_2, \dots, W_n : bobot luas bagian yang mewakili titik pengamatan (%)

Pada berbagai kondisi cara ini lebih baik daripada cara rata-rata aljabar.



Gambar 3.6 Pembagian Daerah dengan Cara Poligon Thiessen

Cara untuk mendapatkan curah hujan maksimum rata-rata dapat dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Tentukan disalah satu pos hujan saat terjadi curah hujan harian maksimum
2. Dicari besarnya curah hujan pada tanggal yang sama untuk stasiun yang lain
3. Dicari koefisien *Thiessen* untuk masing-masing stasiun hujan
4. Dengan metode *Thiessen* hitung rata-rata curah hujan tersebut
5. Tentukan curah hujan maksimum harian pada tahun yang sama untuk pos yang lain
6. Ulangi langkah no. 2 sampai no. 3 untuk setiap tahun
7. Dari hasil rata-rata *Thiessen* pilih salah satu yang tertinggi pada setiap tahun
8. Data curah hujan yang terpilih setiap tahun merupakan curah hujan maksimum rata-rata.

(Sumber : Loebis, 1987)

c. Metode *Isohyet*

Dengan cara ini, digambar terlebih dahulu kontur tinggi hujan yang sama (*isohyet*), seperti terlihat pada Gambar 3.4 kemudian luas bagian di antara dua garis *isohyet* yang berdekatan diukur dengan planimeter, dan nilai rata-rata dihitung sebagai nilai rata-rata timbang nilai kontur. Curah hujan daerah itu dapat dihitung menurut persamaan sebagai berikut :

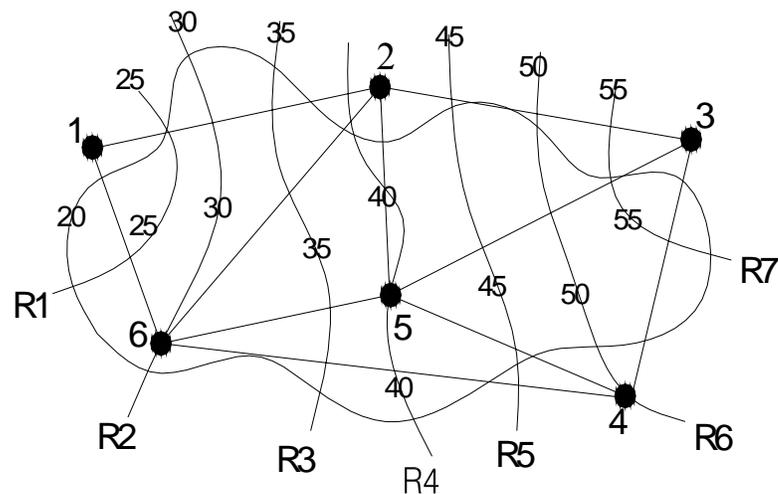
$$\bar{R} = \frac{A_1 \cdot R_1 + A_2 \cdot R_2 + \dots + A_n \cdot R_n}{A_1 + \dots + A_n}$$

di mana :

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

A_1, A_2, \dots, A_n : luas bagian-bagian antara garis-garis *isohyet* (m²)

R_1, R_2, \dots, R_n : curah hujan rata-rata pada bagian-bagian (mm)



Gambar 3.7 Metode *Isohyet*

Cara ini adalah cara rasional yang terbaik jika garis-garis *isohyet* dapat digambar dengan teliti. Akan tetapi jika titik-titik pengamatan itu banyak dan variasi curah hujan di daerah bersangkutan besar, maka pada pembuatan peta *isohyet* ini akan terdapat kesalahan Pearsonal (*individual error*). Pada waktu menggambar garis-garis *isohyet* sebaiknya juga memperhatikan pengaruh bukit atau gunung terhadap distribusi hujan (hujan *orografik*).

3.6.2 Analisa Distribusi Curah Hujan

Hal yang penting dalam pembuatan rancangan dan rencana adalah distribusi curah hujan. Distribusi curah hujan adalah berbeda-beda sesuai dengan jangka waktu yang ditinjau yakni curah hujan tahunan (jumlah curah hujan dalam setahun), curah hujan bulanan (jumlah curah hujan sebulan), curah hujan harian (jumlah curah hujan 24 jam), curah hujan per jam. Dalam laporan ini penulis menggunakan data curah hujan per jam.

Analisis frekuensi diperlukan seri data hujan yang diperoleh dari pos penakar hujan, baik yang manual maupun yang otomatis. Analisis frekuensi ini didasarkan pada sifat statistik data kejadian yang telah lalu untuk memperoleh

probabilitas besaran hujan yang akan datang. Dengan anggapan bahwa sifat statistik kejadian hujan yang akan datang masih sama dengan sifat statistik kejadian hujan masa lalu. (Suripin, 2004)

Dalam analisis frekuensi curah hujan, data hidrologi dikumpulkan, dihitung, disajikan dan ditafsirkan dengan menggunakan prosedur tertentu, yaitu metode statistik. Pada kenyataannya bahwa tidak semua varian dari suatu variabel hidrologi terletak atau sama dengan nilai rata-ratanya. Variasi atau dispersi adalah besarnya derajat atau besaran varian di sekitar nilai rata-ratanya. Cara mengukur besarnya dispersi disebut pengukuran dispersi (Soewarno, 1995).

Adapun cara pengukuran dispersi antara lain :

Harga rata – rata (\bar{X})

Rumus :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

di mana :

\bar{X} : curah hujan rata – rata (mm)

X_i : curah hujan di stasiun hujan ke i (mm)

n : jumlah data

1) *Standar deviasi* (SD)

Rumus :

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

di mana :

SD : standar deviasi

\bar{X} : curah hujan rata – rata (mm)

X_i : curah hujan di stasiun hujan ke i (mm)

n : jumlah data

2) Koefisien *Skewness* (C_s)

Rumus :

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n-1) \times (n-2) \times S^3}$$

di mana :

C_s : koefisien *Skewness*

S : standar deviasi

\bar{X} : curah hujan rata – rata (mm)

X_i : curah hujan di stasiun hujan ke i (mm)

n : jumlah data

3) Koefisien *Kurtosis* (C_k)

Rumus :

$$C_k = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{(n-1) \times (n-2) \times (n-3) \times S^3}$$

di mana :

C_k : koefisien *Kurtosis*

S : standar deviasi

\bar{X} : curah hujan rata – rata (mm)

X_i : curah hujan di stasiun hujan ke i (mm)

n : jumlah data

4) Koefisien variasi (Cv)

Rumus :

$$Cv = \frac{SD}{\bar{X}}$$

di mana :

Cv : koefisien Variasi

SD : standar deviasi

 \bar{X} : curah hujan rata – rata (mm)

(Sumber: Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data, Soewarno)

3.6.3 Metode Perhitungan Curah Hujan Rencana

Perhitungan curah hujan rencana digunakan untuk memprediksi besarnya hujan dengan periode ulang tertentu. Berdasarkan curah hujan rencana tersebut kemudian dicari intensitas hujan yang digunakan untuk mencari debit banjir rencana. Dalam statistik dikenal beberapa jenis distribusi, diantaranya yang banyak digunakan dalam hidrologi adalah :

- Distribusi normal
- Distribusi log normal
- Distribusi *Gumbel*
- Distribusi log Pearson III

Dari parameter statistik di atas, kemudian dilakukan pemilihan jenis analisa frekuensi yang akan digunakan untuk menentukan hujan rencana yaitu dengan membandingkan persyaratan-persyaratan seperti terlihat pada Tabel 3.9

Tabel 3.9 Tabel Syarat Pemilihan Distribusi

Jenis	Syarat
<i>Normal</i>	Cs ~ 0 Ck ~ 3
<i>Gumbel</i>	Cs ~ 1,1396 Ck ~ 5,4002

Jenis	Syarat
<i>Log Pearson III</i>	$C_s (\log X) \sim 0$ $C_v \sim 0.3$
<i>Log Normal</i>	$C_v (\log X) \sim 0.06$ $C_s (\log X) \sim 3C_v + C_v^2 = 0.209$

(Sumber : Soewarno, 1995)

3.6.3.1 Metode Distribusi Normal

Dalam analisis hidrologi distribusi Normal banyak digunakan untuk menganalisis frekuensi curah hujan, analisis statistik dari distribusi curah hujan tahunan, debit rata-rata tahunan dan sebagainya. Data variabel hidrologi yang telah dihitung besarnya periode ulangnya, selanjutnya digambarkan pada kertas grafik peluang (*probability paper*), umumnya akan membentuk persamaan garis lurus. Persamaan umum yang digunakan adalah:

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

Dimana:

X = hujan rencana dengan periode ulang T tahun

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

S = standar deviasi nilai variat

k = faktor frekuensi, nilai variabel reduksi *Gauss* (lihat Tabel 3.10)

Tabel 3.10 Nilai Variabel Reduksi *Gauss*

Periode Ulang T (tahun)	Peluang	K
2	0,5	0
5	0,2	0,84
10	0,1	1,28
20	0,05	1,64
50	0,02	2,05
100	0,01	2,33

(Sumber : Soewarno, 1995)

3.6.3.2 Metode Distribusi Log Normal

Distribusi Log Normal, merupakan hasil transformasi dari distribusi Normal, yaitu dengan mengubah variat X menjadi nilai logaritmik variat X . Distribusi Log Pearson Tipe III akan menjadi distribusi Log Normal apabila nilai koefisien kemencengan $C_s = 0,00$. Data variabel hidrologi yang telah dihitung besarnya periode ulangnya, selanjutnya digambarkan pada kertas grafik peluang logaritmik (*logarithmic probability paper*), umumnya akan membentuk persamaan garis lurus, dinyatakan sebagai model matematik dengan persamaan:

$$\text{Log}X = \text{Log} \bar{X} + k \cdot S\text{Log} \bar{X}$$

Dimana:

$\text{Log} X$ = nilai variat X yang diharapkan terjadi pada periode ulang tertentu

$\text{Log} \bar{X}$ = rata-rata hitung nilai X hasil pengamatan

$S\text{Log} \bar{X}$ = standar deviasi logaritmik nilai X hasil pengamatan

k = karakteristik distribusi peluang log normal, nilai variabel reduksi Gauss (lihat Tabel 3.10)

3.6.3.3 Metode Gumbel Tipe I

Distribusi Tipe I Gumbel atau Distribusi Extrim Tipe I (*extreme type I distribution*) umumnya digunakan untuk analisis data maksimum, misalnya untuk analisis frekuensi banjir. Persamaan garis lurus untuk distribusi frekuensi Tipe I Gumbel dapat menggunakan persamaan empiris sebagai berikut:

$$X = \bar{X} + \frac{S}{S_n}(Y - Y_n)$$

Dimana:

X = nilai variat yang diharapkan terjadi

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

S = standar deviasi

Y = nilai reduksi variat dari variabel yang diharapkan terjadi pada periode ulang tertentu (Tabel 3.11)

Y_n = nilai rata-rata dari reduksi variat/*mean of reduced variate* (Tabel 3.12)

S_n = deviasi standar dari reduksi variat/*standard deviation of the reduced variate*
(Tabel 3.13)

Tabel 3.11 Nilai Variabel Reduksi Gumbel

T (tahun)	Peluang	Y
2	0,50	0,3065
5	0,80	1,4999
10	0,90	2,2504
20	0,95	2,9702
50	0,98	3,9019
100	0,99	4,6001

(Sumber : Soewarno, 1995)

Tabel 3.12 Hubungan Reduksi Variat Rata-rata (Y_n) dengan Jumlah Data (n)

n	Y_n	n	Y_n	n	Y_n	n	Y_n
10	0,4952	33	0,5388	56	0,5508	79	0,5567
11	0,4996	34	0,5396	57	0,5511	80	0,5569
12	0,5035	35	0,5402	58	0,5515	81	0,5570
13	0,5070	36	0,5410	59	0,5518	82	0,5572
14	0,5100	37	0,5418	60	0,5521	83	0,5574
15	0,5128	38	0,5424	61	0,5524	84	0,5576
16	0,5157	39	0,5430	62	0,5527	85	0,5578
17	0,5181	40	0,5439	63	0,5530	86	0,5580
18	0,5202	41	0,5442	64	0,5533	87	0,5581
19	0,5220	42	0,5448	65	0,5535	88	0,5583
20	0,5236	43	0,5453	66	0,5538	89	0,5585
21	0,5252	44	0,5458	67	0,5540	90	0,5586
22	0,5268	45	0,5463	68	0,5543	91	0,5587
23	0,5283	46	0,5468	69	0,5545	92	0,5589
24	0,5296	47	0,5473	70	0,5548	93	0,5591
25	0,5309	48	0,5477	71	0,5550	94	0,5592
26	0,5320	49	0,5481	72	0,5552	95	0,5593
27	0,5332	50	0,5485	73	0,5555	96	0,5595
28	0,5343	51	0,5489	74	0,5557	97	0,5596
29	0,5353	52	0,5493	75	0,5559	98	0,5598
30	0,5362	53	0,5497	76	0,5561	99	0,5599
31	0,5371	54	0,5501	77	0,5563	100	0,5600
32	0,5380	55	0,5504	78	0,5565		

(Sumber : Soewarno, 1995)

Tabel 3.13 *Reduced standard deviation (Sn)*

<i>n</i>	<i>Sn</i>	<i>n</i>	<i>Sn</i>	<i>n</i>	<i>Sn</i>	<i>n</i>	<i>Sn</i>
10	0,9496	33	11,226	56	11,696	79	11,930
11	0,9676	34	11,255	57	11,708	80	11,938
12	0,9833	35	11,285	58	11,721	81	11,945
13	0,9971	36	11,313	59	11,734	82	11,953
14	10,095	37	11,339	60	11,747	83	11,959
15	10,206	38	11,363	61	11,759	84	11,967
16	10,316	39	11,388	62	11,770	85	11,973
17	10,411	40	11,413	63	11,782	86	11,980
18	10,493	41	11,436	64	11,793	87	11,987
19	10,565	42	11,458	65	11,803	88	11,994
20	10,628	43	11,480	66	11,814	89	12,001
21	10,696	44	11,499	67	11,824	90	12,007
22	10,754	45	11,519	68	11,834	91	12,013
23	10,811	46	11,538	69	11,844	92	12,020
24	10,864	47	11,557	70	11,854	93	12,026
25	10,915	48	11,574	71	11,863	94	12,032
26	10,961	49	11,590	72	11,873	95	12,038
27	11,004	50	11,607	73	11,881	96	12,044
28	11,047	51	11,623	74	11,890	97	12,049
29	11,086	52	11,638	75	11,898	98	12,055
30	11,124	53	11,658	76	11,906	99	12,060
31	11,159	54	11,667	77	11,915	100	12,065
32	11,193	55	11,681	78	11,923		

(Sumber : Soewarno, 1995)

3.6.3.4 Metode Log Pearson III

Distribusi Log Pearson tipe III banyak digunakan dalam analisis hidrologi, terutama dalam analisis data maksimum (banjir) dan minimum (debit minimum) dengan nilai ekstrem. Bentuk distribusi Log Pearson tipe III merupakan hasil transformasi dari distribusi Pearson tipe III dengan menggantikan varian menjadi nilai logaritmik. Bentuk kumulatif dari distribusi Log Pearson Tipe III dengan nilai variatnya X apabila digambarkan pada kertas

peluang logaritmik (*logarithmic probability paper*) akan merupakan model matematik persamaan garis lurus. Persamaannya adalah:

$$\text{Log}X = \text{Log}\bar{X} + k(\text{SLog}\bar{X})$$

Dimana :

$\text{Log} X$ = nilai variat X yang diharapkan terjadi pada periode ulang tertentu

$\text{Log}\bar{X}$ = rata-rata hitung nilai X hasil pengamatan

$\text{SLog}\bar{X}$ = standar deviasi logaritmik nilai X hasil pengamatan

k = karakteristik dari distribusi Log Pearson tipe III (lihat Tabel 3.14)

Prosedur untuk menentukan kurva distribusi Log Pearson tipe III, adalah:

- a. tentukan logaritma dari semua nilai variat X
- b. hitung nilai rata-ratanya:

$$\text{Log}\bar{X} = \frac{\sum \text{Log}X}{n}$$

n = jumlah data

- c. hitung nilai deviasi standarnya dari log X :

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

- d. hitung nilai koefisien kemencengan/*skewness*

$$CS = \frac{n \sum (\text{Log}X - \text{Log}\bar{X})^3}{(n-1)(n-2)(\text{SLog}\bar{X})^3}$$

- e. tentukan anti log dari log X , untuk mendapat nilai X yang diharapkan terjadi pada periode tertentu sesuai dengan nilai Cs -nya.

Tabel 3.14

Nilai k Distribusi Log Pearson Tipe III untuk Setiap Nilai CS (Koefisien *kewness*)

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	4,054	4,976	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	4,454	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	3,386	3,990	5,390
1,4	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271	3,721	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	2,019	2,498	2,957	3,401	4,395
0,8	-0,132	0,780	1,336	1,993	2,453	2,891	3,312	4,250
0,7	-0,116	0,790	1,333	1,967	2,407	2,874	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

Tugas Akhir

Perencanaan Operasi dan Konservasi Waduk Mrica (PB. Soedirman) Banjarnegara

Kemencengan (CS)	Periode Ulang (Tahun)							
	2	5	10	25	50	100	200	1000
	Peluang (%)							
	50	20	10	4	2	1	0,5	0,1
-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	0,035	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 : Soewarno, 1995)

3.6.4 Uji Keselarasan

Untuk menentukan kecocokan (*the goodness of fit test*) distribusi frekuensi dari sampel data terhadap fungsi distribusi peluang yang diperkirakan dapat menggambarkan/mewakili distribusi frekuensi tersebut diperlukan pengujian parameter.

Pengujian parameter dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu:

- Chi - Kuadrat (*chi - square*)
- Smirnov - Kolmogorov.

Pada penggunaan uji Smirnov – Kolmogorov, meskipun perhitungan matematis namun kesimpulan hanya berdasarkan bagian tertentu (sebuah variant) yang mempunyai penyimpangan terbesar, sedangkan uji Chi – kuadrat menguji penyimpangan distribusi data pengamatan dengan mengukur secara matematis kedekatan antara data pengamatan dan seluruh bagian garis persamaan distribusi teoritisnya. Dengan demikian uji Chi – kuadrat lebih teliti dibanding dengan uji Smirnov – Kolmogorov (Soewarno, 1995). Dapat pula dilakukan uji keselarasan dengan Plotting Data menggunakan kertas kemungkinan.

Uji Keselarasan dapat pula dilakukan dengan metode Plotting Data. Dalam hal ini Uji Smirnov-Kolmogorof dilakukan untuk membuktikan bahwa hasil

plotting distribusi (yang memenuhi syarat) memiliki Δ max kurang dari harga kritis Smirnov-Kolmogorof.

3.6.4.1 Uji Chi - kuadrat

Uji Chi – kuadrat dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi peluang yang telah dipilih dapat mewakili dari distribusi statistik sampel data yang dianalisis. Penentuan parameter ini menggunakan X^2 yang dihitung dengan rumus:

$$X_h^2 = \sum_{i=1}^G \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Di mana :

- X_h^2 = parameter Chi Kuadrat terhitung
- O_i = jumlah nilai pengamatan pada sub kelompok ke i
- E_i = jumlah nilai teoritis pada sub kelompok ke i
- G = jumlah sub kelompok

Prosedur perhitungan uji *Chi Kuadrat* adalah :

1. Urutkan data pengamatan (dari besar ke kecil atau sebaliknya)
2. Kelompokkan data menjadi G sub grup, dimana jumlah kelas yang ada $(G) = 1 + 3,322 \times \log n$.
 n = jumlah data
3. Jumlahkan data pengamatan sebesar O_i tiap-tiap sub grup
4. Jumlahkan data dari persamaan distribusi yang digunakan sebesar E_i .

$$E_i = \left[\frac{n}{G} \right]$$

5. Tiap-tiap sub grup hitung nilai

$$(O_i - E_i)^2 \text{ dan } \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

6. Jumlah seluruh G sub grup nilai $\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$ untuk menentukan nilai Chi Kuadrat

hitung

7. Tentukan derajat kebebasan

$$DK = G - R - 1$$

Dimana :

DK = derajat kebebasan

G = sub grup

R = banyaknya keterikatan (biasanya diambil $R = 2$ untuk distribusi normal dan binomial dan $R = 1$ untuk distribusi *Poisson* dan *Gumbel*)

8. Persamaan distribusi teoritis yang digunakan dapat diterima apabila derajat kepercayaan lebih dari 5 % dengan parameter derajat kebebasan

Tabel 3.15

Nilai Kritis untuk Uji Kecocokan Chi Kuadrat

DK	α (Derajat Kepercayaan)							
	0,995	0,99	0,975	0,95	0,05	0,025	0,01	0,005
1	0,0000393	0,000157	0,000928	0,00393	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,1000	0,021	0,05806	0,103	5,991	7,378	9,210	10,579
3	0,0717	0,115	0,216	0,352	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,4848	0,711	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	11,070	12,832	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	0,1,239	1,690	2,167	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,646	2,180	2,733	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	0,558	3,247	3,940	18,307	20,483	23,209	25,188

(Sumber : Soewarno, 1995)

3.6.4.2 Uji Sebaran Plotting Data

Perkiraan kasar periode ulang atau curah hujan yang mungkin, lebih mudah dilakukan dengan menggunakan kertas kemungkinan. Kertas kemungkinan normal (*normal probability paper*) digunakan untuk curah hujan tahunan yang mempunyai distribusi yang hampir sama dengan distribusi normal, dan kertas kemungkinan logaritmis normal (*logarithmic-normal probability paper*) digunakan untuk curah hujan harian maksimum dalam setahun yang mempunyai distribusi normal logaritmis (*Sosrodarsono dan Takeda, 1977*).

Plotting data distribusi frekuensi dalam kertas probabilitas bertujuan untuk mencocokkan rangkaian data dengan jenis sebaran yang dipilih, dimana kecocokan dapat dilihat dengan persamaan garis yang membentuk garis lurus. Hasil *plotting* juga dapat digunakan untuk menaksir nilai tertentu dari data baru yang kita peroleh. (Soewarno, 1995)

Dalam hal ini harus dipilih kertas kemungkinan yang sesuai dengan distribusi data secara teoritis maupun empiris dan bentuk distribusi ditentukan dengan menggambarannya. (Sosrodarsono dan Tominaga, 1985).

Ada dua cara untuk mengetahui ketepatan distribusi probabilitas data hidrologi, yaitu data yang ada diplot pada kertas probabilitas yang sudah didesain khusus atau menggunakan skala plot yang melinierkan fungsi distribusi. Posisi pengeplotan data merupakan nilai probabilitas yang dimiliki oleh masing-masing data yang diplot. Banyak metode yang telah dikembangkan untuk menentukan posisi pengeplotan yang sebagian besar dibuat secara empiris. Untuk keperluan penentuan posisi ini, data hidrologi (hujan atau banjir) yang telah ditabelkan diurutkan dari besar ke kecil (berdasarkan peringkat m), dimulai dengan $m = 1$ untuk data dengan nilai tertinggi dan $m = n$ (n adalah jumlah data) untuk data dengan nilai terkecil. Periode ulang T_r dapat dihitung dengan beberapa persamaan yang telah terkenal, yaitu Weibull, California, Hazen, Gringorten, Cunnane, Blom dan Turkey. Data yang telah diurutkan dan periode ulangnya telah dihitung dengan salah satu persamaan diatas diplot di atas kertas probabilitas sehingga diperoleh garis T_r vs P (hujan) atau Q (debit banjir) yang berupa garis lurus. (Suripin, 2003)

Penggambaran posisi (*plotting positions*) yang dipakai adalah cara yang dikembangkan oleh Weibull dan Gumbel, yaitu :

$$P(X_m) = \frac{m}{n+1} \times 100\%$$

Dimana :

$P(X_m)$ = data yang telah direnking dari besar ke kecil

m = nomor urut

n = jumlah data

3.6.4.3 Uji Keselarasan *Smirnov-Kolmogorof*

Dengan membandingkan probabilitas untuk tiap variable dari distribusi empiris dan teoritis didapat perbedaan (Δ) tertentu (*Ir C.D Soemarto, 1999*).

$$\alpha = \frac{P_{\max} - P_{(x_i)}}{P_{(x)} - \Delta_{cr}}$$

Tabel 3.16 Nilai Delta Kritis untuk Uji Keselarasan *Smirnov-Kolmogorof*

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	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	$\frac{1.07}{N^{0,5}}$	$\frac{1.22}{N^{0,5}}$	$\frac{1.36}{N^{0,5}}$	$\frac{1.63}{N^{0,5}}$

(Sumber : Soewarno, 1995)

3.6.5 Metode Perhitungan Debit Banjir Rencana

3.6.5.1 Metode Haspers

Metode ini pada dasarnya merupakan metode empiris dengan persamaan umum:

$$Q_n = \alpha \times \beta \times q \times A$$

1. Koefisien aliran α di hitung dengan rumus:

$$\alpha = \frac{1 + 0,0012A^{0.7}}{1 + 0,0075A^{0.7}}$$

Dimana:

$$A = \text{Luas DAS (km}^2\text{)}$$

2. Koefisien reduksi (β) dihitung dengan rumus:

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{t + (3.7 \cdot 10^{0.41})A^{0.75}}{(t^2 + 0,15)12}$$

Dimana:

β = koefisien reduksi

t = waktu konsentrasi (jam)

A = Luas DAS (km²)

3. Waktu konsentrasi dihitung dengan rumus:

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

Dimana:

t = waktu konsentrasi / lama hujan terpusat (jam)

L = panjang sungai (km)

i = gradien sungai atau kemiringan rata-rata sungai (10% bagian hulu dari panjang sungai tidak dihitung. Beda tinggi dan panjang diambil dari suatu titik 0,1 L dari batas hulu DAS).

4. Model banjir maksimum menurut Haspers dirumuskan:

$$q = \frac{R_t}{3,6 \cdot t}$$

$$R_t = R + S_x U$$

Dimana:

q = hujan maksimum ($m^3/km^2/det$).

t = waktu konsentrasi / lama hujan terpusat (jam)

R = curah hujan maksimum rata-rata (mm)

S_x = simpangan baku (standar deviasi)

U = variabel simpangan untuk kala ulang T tahun

R_t = curah hujan dengan kala ulang T tahun (mm)

5. Intensitas Hujan

a. Lama hujan $t < 2$ jam:

$$R_t = \frac{t \cdot R_{24}}{t + 1 - 0,0008(260 - R_{24})(2 - t)^2} \quad (\text{mm/jam})$$

b. Lama hujan $2 \text{ jam} < t < 19 \text{ jam}$:

$$R_t = \frac{t \cdot R_{24}}{t + 1} \quad (\text{mm/jam})$$

c. Lama hujan $19 \text{ jam} < t < 30 \text{ hari}$:

$$R_t = 0,707 t R_{24} + 1 \quad (\text{mm/jam})$$

Dimana:

A = luas daerah aliran sungai (km^2)

R_t = curah hujan maksimum rata-rata selama t (mm)

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

S_x = standar deviasi

U = variabel standar deviasi untuk kala ulang T tahun

3.6.5.2 Metode Rasional

1 Rumus Umum:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3,60}$$

Di mana:

Q = debit banjir rencana (m^3/dtk)

C = koefisien *run off* (koefisien limpasan)

- I = intensitas maksimum selama waktu konsentrasi (mm/jam)
 A = luas daerah aliran (km²)

Tabel 3.17

Nilai Koefisien Larian (α) Untuk Persamaan Rasional (*U.S. Forest Service, 1980*)

Tata guna lahan	α	Tata guna lahan	α
Perkantoran		Tanah lapang	
- Daerah pusat kota	0,70-0,95	- Berpasir, datar 2%	0,05-0,10
- Daerah sekitar kota	0,50-0,70	- Berpasir, agak rata, 2-7%	0,10-0,15
Perumahan		- Berpasir, miring 7%	0,15-0,20
- Rumah tunggal	0,30-0,50	- Tanah berat, datar 2%	0,13-0,17
- Rumah susun, terpisah	0,40-0,60	- Tanah berat, agak rata, 2-7%	0,18-0,22
- Rumah susun, bersambung	0,60-0,75	- Tanah berat, miring 7%	0,25-0,35
- Pinggiran kota	0,25-0,40	Tanah pertanian, 0-30%	
Daerah industri		Tanah kosong	
- Kurang padat industri	0,50-0,80	- Rata	0,30-0,60
- Padat industri	0,60-0,90	- Kasar	0,20-0,50
		Ladang garapan	
Taman, Kuburan	0,10-0,25	- Tanah berat, tanpa vegetasi	0,30-0,60
Tempat bermain	0,20-0,35	- Tanah berat, dengan vegetasi	0,20-0,50
Daerah stasiun KA	0,20-0,40	- Berpasir, tanpa vegetasi	0,20-0,25
Daerah tak berkembang	0,10-0,30	- Berpasir, dengan vegetasi	0,10-0,25
Jalan raya		Padang rumput	
- Beraspal	0,70-0,95	- Tanah berat	0,15-0,45
- Berbeton	0,80-0,95	- Berpasir	0,05-0,25
- Berbatu bata	0,70-0,85	Hutan/bervegetasi	0,05-0,25
- Trotoar	0,75-0,85	Tanah tidak produktif, >30%	
Daerah beratap	0,75-0,95	- Rata, kedap air	0,70-0,90
		- Kasar	0,50-0,70

(Sumber: Asdak, 1995)

2 Waktu Konsentrasi (*Time of Concentration*)

a. Rumus Kraven:

$$T_p = \frac{L}{V_p} \text{ (jam)}$$

Dimana:

L = panjang sungai (m)

V_p = kecepatan rambat aliran (m/dt)

b. Rumus Doken:

$$T_p = 1,67 \times 10^{-3} (L / \sqrt{S})^{0.7} \text{ (jam)}$$

Dimana:

L = panjang palung air dari titik terjauh sampai titik tangkap (m)

S = rata-rata kemiringan palung air

c. Rumus Fukushima:

$$T_p = C \cdot A^{0.22} \cdot r_e^{-0.35} \text{ (menit)}$$

Dimana:

r_e = curah hujan efektif (mm/jam)

$C = 120$ (konstanta)

A = luas DAS (km²)

d. Rumus Kirpich:

$$t_c = 0,0133L \times i^{-0,6}$$

Dimana:

t_c = Waktu konsentrasi

L = Panjang sungai utama (km)

i = kemiringan sungai

3 Intensitas Hujan

a. Talbot:

$$R_1 = f \frac{a}{t + b} \quad (\text{mm/jam})$$

$$R_1 = \frac{f \cdot a}{(C \cdot A^{0.22} \cdot r_e^{-0.35}) / 60 + b} \quad (\text{mm/jam})$$

Dimana:

t = lama hujan (dapat diganti dengan T_p) (jam)

a, b = konstanta

b. Mononobe:

$$R_1 = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t_c} \right)^{2/3} \quad (\text{mm/jam})$$

Dimana:

t_c = waktu konsentrasi aliran permukaan (jam)

R_{24} = hujan harian maksimum (mm/hari)

3.6.5.3 Metode Melchior

1. Rumus umum

$$Q = \alpha x \beta x q x A$$

2. Koefisien reduksi (β) dihitung dengan rumus:

$$A = \frac{1970}{\beta - 0,12} - 3960 + 1720$$

3. Koefisien aliran (α) :

$$\alpha = 0,52 \quad (\text{ketentuan Melchior})$$

4. Waktu konsentrasi (t) dihitung dengan rumus:

$$t = 0,186 \times L \times Q^{-0,2} \times i^{-0,4}$$

5. Modul banjir maksimum dirumuskan:

$$q = \frac{R_{24}}{3,6xt}$$

Dimana:

A = luas DAS (km²)

i = kemiringan sungai rata-rata

L = panjang sungai (km)

R_{24} = hujan maksimum harian

Metode ini harus dihitung dengan *trial and error* sehingga ketepatan antara waktu konsentrasi dengan debit sama atau mendekati sama (Loebis, 1987).

3.7 Perencanaan Konstruksi Bangunan Pengendali Sedimen

Pada sungai yang banyak membawa sedimen, sedapat mungkin dapat dibangun bendung-bendung pengendali sedimen (*check dam*) yang lebih tinggi agar kemiringan sungai lebih landai dan daya tampung sedimen ruang di hulu *check dam* lebih besar. Untuk menahan sedimen yang masih mengalir dari hulu kadang dilakukan dengan penggalian pada kantong-kantong yang telah penuh. Akan tetapi penggalian yang terlalu besar dapat menyebabkan penurunan suplai sedimen dibagian hilir *check dam* yang berakibat lapisan tanah dibagian kaki hilir *check dam* terkikis dan membahayakan kesetabilan tubuh *check dam* (Suyono Sosrodarsono, 1994).

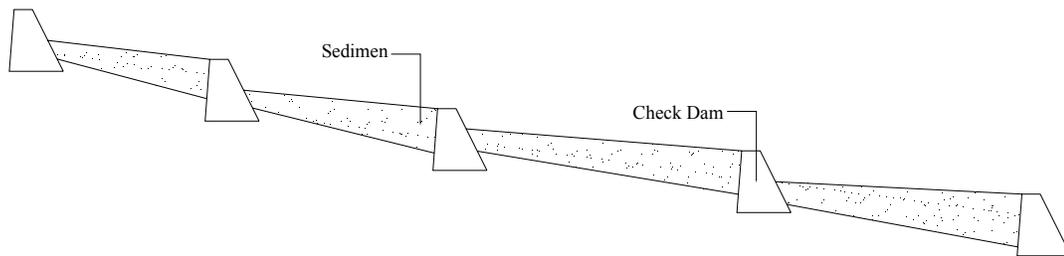
Jika tanah pondasi terdiri dari tanah batuan yang lunak, maka gerusan tersebut dapat dicegah dengan pembuatan bendung anakan (*Sub Dam*). Beberapa *check dam* memerlukan beberapa sub dam, sehingga didapat kelandaian yang stabil pada dasar alur sungai dihilirnya, stabilitas dasar alur dapat diketahui dari ukuran

butir sedimen, debit sungai dan daya angkut sedimen, kemudian barulah jumlah sub dam dapat ditentukan. Keruntuhan *check dam* biasanya akibat dari bahaya *piping* pada lapisan pondasi dan pencegahannya adalah dengan pembuatan lantai lindung antara *Main Dam* dengan *Sub Dam*-nya. Apabila besarnya pengaruh *piping* pada dasar pondasi bagian hilir tidak diketahui secara pasti, maka dianjurkan untuk membangun bendung secara bertahap dan peninggiannya dilakukan setelah 2-3 tahun kemudian. Dengan demikian dapat diketahui secara pasti penurunan dasar sungai disebelah hilir bendung dan ketahanan tanah asli terhadap *piping* (Suyono Sosrodarsono, 1994).

3.7.1 Prosedur Perencanaan Teknis

Penentuan tempat kedudukan bendung, biasanya didasarkan pada tujuan pembangunannya. Seperti yang dijelaskan dibawah ini :

- 1) Untuk pencegahan terjadinya sedimentasi yang mendadak dan dengan jumlah yang sangat besar yang timbul akibat dari tanah longsor, sedimen luruh, banjir lahar dan lain-lain, maka tempat kedudukan *check dam* harus diusahakan pada lokasi disebelah hilir dari sumber sedimen yang labil tersebut, yaitu pada alur sungai yang dalam, agar dasar sungai naik dengan adanya *check dam* tersebut.
- 2) Pencegahan penurunan dasar sungai, tempat kedudukan *check dam* harus disebelah hilir dari ruas sungai tersebut. Apabila ruas sungai tersebut cukup panjang, maka diperlukan beberapa buah *check dam* yang dibangun secara berurutan membentuk terap-terap sedemikian sehingga pondasi yang lebih hulu dapat tertimbun oleh tumpukan sedimen yang tertahan oleh *check dam* dibagian hilirnya.



Gambar 3.8 Rangkaian Check Dam

Untuk memperoleh kapasitas tampungan yang besar, maka tempat kedudukan *check dam* diusahakan sebelah hilir ruas sungai yang lebar, sehingga dapat terbentuk semacam kantong. Kadang *check dam* diletakkan pada sungai utama disebelah hilir muara anak sungai sehingga dapat menahan sedimen baik dari sungai utama maupun dari anak sungainya (Suyono Sosrodarsono, 1994).

Perencanaan dam pengendali sedimen secara teknis meliputi perencanaan sebagai berikut:

- a. Perencanaan peluap
- b. Perencanaan *Main Dam*
- c. Perencanaan pondasi
- d. Perencanaan sayap
- e. Bangunan pelengkap

3.7.1.1 Perencanaan Peluap

Dalam perencanaan peluap memperhitungkan :

- Kecepatan aliran diatas mercu
- Tinggi Jagaan (*Free Board*)

Untuk mencegah terjadinya limpasan diatas sayap pada saat terjadi debit rencana, maka diperlukan adanya ruang bebas yang besarnya tergantung dari debit rencana (Q). Besarnya tinggi jagaan ditetapkan berdasarkan debit rencana (Sabo Design, 1983).

Rumus :

$$Q = \frac{2}{15} * C * h_3 * \sqrt{2gh_3} * (3B_1 + 2B_2)$$

(Sumber : Perencanaan Bangunan Pengendali Sedimen, JICA 1985)

Di mana :

- Q = debit rencana (m³/detik)
 C = koefisien debit (0,6 - 0,66)
 g = percepatan gravitasi (9,81 m/det²)
 B₁ = lebar peluap bagian bawah (m)
 B₂ = lebar muka air di atas peluap (m)
 h₃ = tinggi muka air di atas peluap (m)
 m₂ = kemiringan tepi peluap

Jika m₂ = 0,5 maka $3B_1 + 2B_2 = 3B_1 + 2(B_1 + h_3)$
 $= 5B_1 + 2h_3$

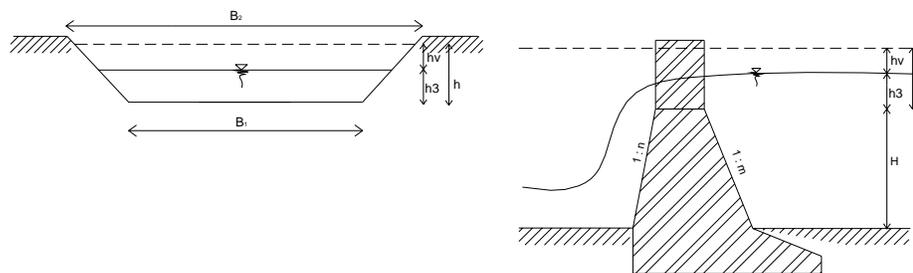
dan jika C = 0,6, maka rumus di atas menjadi :

$$Q = \frac{2}{15} * 0,6 * h_3 * \sqrt{2gh_3} * (5B_1 + 2h)$$

$$= (0,4B_1 * h_3 * \sqrt{2gh_3}) + (0,6h_3^2 * \sqrt{2gh_3})$$

$$= (0,71 * h_3 + 1,77 * B_1) * h_3^{3/2}$$

(Sumber : Perencanaan Bangunan Pengendali Sedimen, JICA 1985)



a. Potongan Melintang Peluap

b. Potongan Memanjang Peluap

Gambar 3.9 Penampang Peluap

1. Kecepatan aliran di atas mercu

Rumus :

$$A_1 = \frac{1}{2}(B_1 + B_2) * h_3$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_1}$$

$$h_v = \frac{V_1^2}{2g}$$

$$h = h_3 + h_v$$

$$d = \frac{2}{3}h$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(B_1 + m * d) * d$$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2}$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Di mana :

h = tinggi muka air di atas peluap + tinggi kecepatan (m)

h_v = tinggi kecepatan (m)

d = kedalaman air di atas mercu (m)

A₁ = luas penampang basah pada ketinggian air setinggi *check dam* (m)A₂ = luas penampang basah pada air diatas *check dam* (m)

v = kecepatan aliran di atas mercu (m/det)

*(Sumber : Diktat Kuliah Bangunan Air, Ir. Salamun, MT)*2. Tinggi Jagaan (*Free Board*)

Untuk mencegah terjadinya limpasan di atas sayap pada saat terjadi debit rencana, maka diperlukan adanya ruang bebas yang besarnya tergantung dari

debit rencana (Q). Besarnya tinggi jagaan ditetapkan berdasarkan debit rencana adalah sebagai berikut :

Tabel 3.18 Tinggi Jagaan

Debit Rencana (m ³ /detik)	Tinggi Jagaan (m)
Q < 200	0,6
200 < Q < 500	0,8
500 < Q < 2000	1,0
2000 < Q < 5000	1,2

(Sumber : DPU, Sabo Design, 1983)

3.7.1.2 Perencanaan Main Dam

a. Penampang main dam

Kemiringan badan main dam di hulu 1 : m digunakan rumus :

Untuk $H < 15$ m :

$$(1 + \alpha)m^2 + [2(n + \beta) + n(4\alpha + \gamma)]m - (1 + 3\alpha) + \alpha\beta(4n + \beta) + \gamma(3n\beta + \beta^2 + n^2) = 0$$

$$\alpha = \frac{h_3}{H}$$

$$\beta = \frac{b_1}{H}$$

$$\gamma = \frac{\gamma_c}{\gamma_w}$$

Untuk $H \geq 15$ m :

$$\begin{aligned} & [(1 + \alpha - \omega)(1 - \mu) + \partial(2\zeta^2 - \omega^2)]m^2 + \\ & [2(n + \beta)\{1 + \partial\zeta^2 - \mu(1 + \alpha - \omega) - \omega\} - n(\alpha + \gamma) + 2\alpha\beta]m - \\ & (1 - 3\alpha) - \mu(1 + \alpha - \omega)(n + \beta)^2 - \partial 2\zeta^2 + \alpha\beta(4n + \beta) + \\ & \gamma(3n\beta + \beta^2 + n^2) - \omega(n + \beta)^2 = 0 \end{aligned}$$

$$\delta = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

$$\zeta = \frac{h_c}{H}$$

$$\omega = \frac{h_2}{H}$$

Dimana :

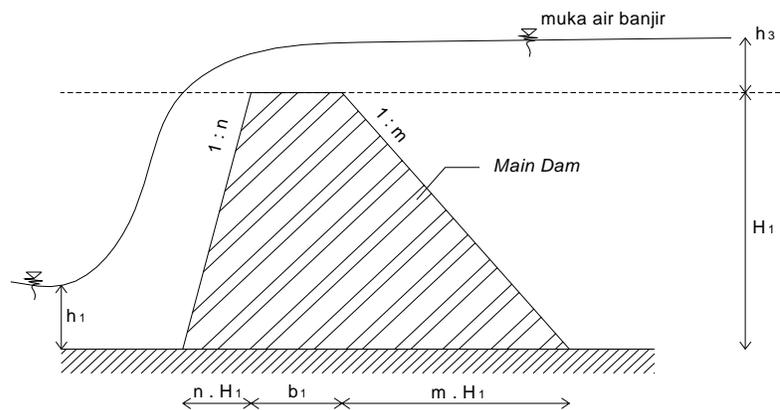
γ_c = berat volume bahan (t/m^3)

γ_w = berat volume air ($1 t/m^3$)

γ_s = berat volume sedimen dalam air ($1,5 - 1,8 t/m^2$)

H = tinggi konstruksi (m)

Kemiringan badan *dam* bagian hilir 1 : 0,2 atau $n = 0,2$ (JICA, 1985)



Gambar 3.10 Perencanaan *Main Dam*

b. Lebar mercu pelimpah

Mercu pelimpah *check dam* harus kuat menahan aliran debris/aliran sedimen, jadi harus kuat menahan benturan dan abrasi dari batu-batu yang melintasinya. Lebar mercu dapat cari dengan rumus sebagai berikut:

$$Bm = \frac{1}{2,4n} \left[0,06 \times v^2 + h_3 \times \frac{1}{2} d \right]$$

Dimana:

B_m = lebar mercu pelimpah

n = faktor keamanan (2)

v = kecepatan air di atas pelimpah

h_3 = tinggi air di atas pelimpah

d = tinggi air + tinggi energi di atas mercu

Hubungan antara lebar mercu dengan material dapat dilihat pada Tabel 3.19.

Tabel 3.19 Lebar Mercu Peluap

Lebar Mercu	$b = 1,5 - 2,5 \text{ m}$	$b = 3,0 - 4,0 \text{ m}$
Material	Pasir dan kerikil atau Kerikil dan batu	Batu-batu besar
Hidrologis	Kandungan sedimen sedikit sampai dengan sedimen banyak	Debris flow kecil sampai debris flow besar

(Sumber : Sosrodarsono, 1985)

c. Gaya-gaya yang bekerja pada *main dam*:

1. Berat sendiri (W)

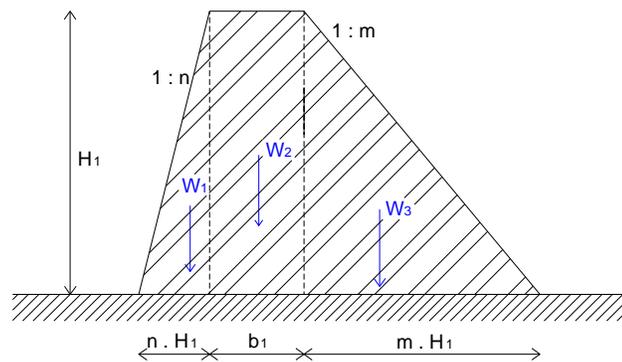
$$W = \gamma_c \times A$$

Dimana :

W = berat sendiri per meter

γ_c = berat volume bahan yang digunakan (beton $2,4 \text{ t/m}^3$, pasangan batu $2,2 \text{ t/m}^3$)

A = volume per meter



Gambar 3.11 Gaya Berat Sendiri *Main Dam*

2. Gaya tekan air statik (P)

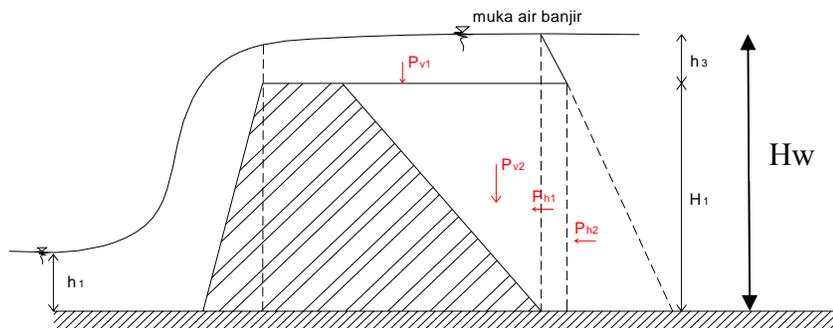
$$P = \gamma_w \times h_w$$

Dimana :

P = tekanan air statik horizontal pada titik sedalam h_w (t/m^3)

γ_w = berat volume air ($1 t/m^3$)

h_w = kedalaman air (m)



Gambar3.12 Gaya Tekan Air Statik

3. Tekanan sedimen (P_e)

$$P_{ev} = \gamma_s \times h_e$$

$$P_{eh} = C_e \times \gamma_s \times h_e$$

Dimana :

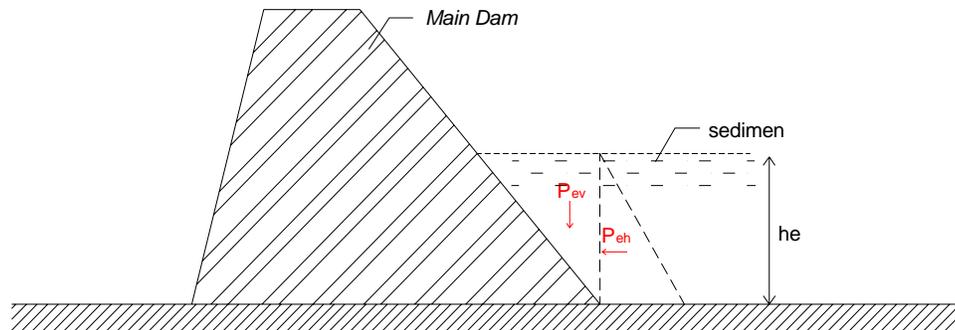
P_{ev} = gaya tekan vertikal sedimen (t/m^2)

P_{eh} = gaya tekan horizontal sedimen (t/m^2)

γ_s = berat volume sedimen dalam air ($1,5 - 1,8 t/m^3$)

C_e = koefisien gaya tekan tanah aktif (diambil 0,3) (JICA, 1985)

h_e = tinggi sedimen (m)



Gambar 3.13 Gaya Tekan Akibat Sedimen

4. Gaya angkat (U)

$$U_x = H_x - \frac{L_x}{\Sigma L} \times \Delta H$$

Dimana :

U_x = gaya angkat pada titik x (t/m^2)

H_x = tinggi muka air hulu sampai dengan titik x (m)

L_x = jarak ke titik x (m)

ΔH = beda tinggi antara muka air hulu dengan muka air hilir (m)

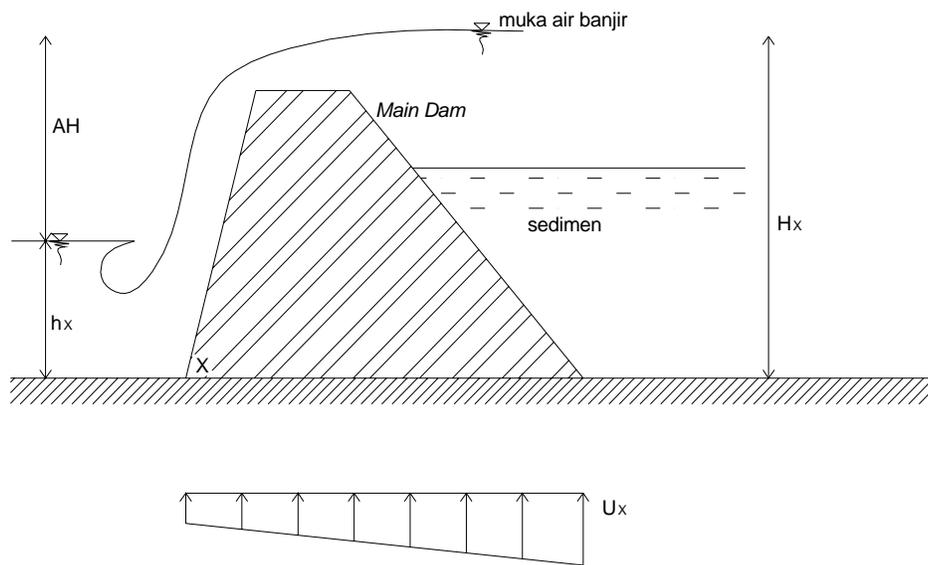
ΣL = panjang rembesan (m)

untuk Lane :

$$\Sigma L = \frac{1}{3} \Sigma H + \Sigma V$$

untuk Bligh :

$$\Sigma L = \Sigma H + \Sigma V$$



Gambar 3.14 Gaya Angkat pada Main Dam

5. Gaya inersia saat gempa (I)

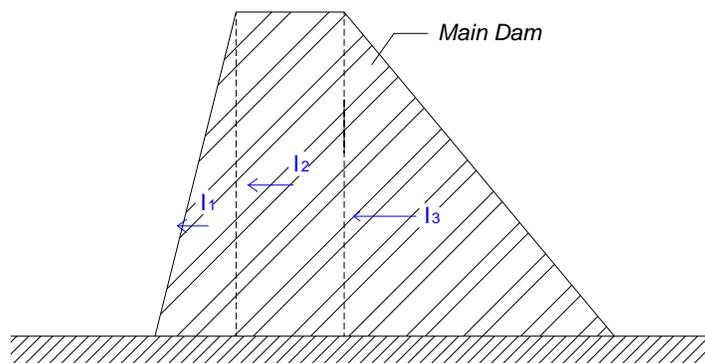
$$I = k \times W$$

Dimana :

I = gaya inersia oleh gempa (t/m^2)

k = koefisien gempa (0,10 – 0,12)

W = berat sendiri dam per meter (t)



Gambar 3.15 Gaya Inersia Saat Gempa

6. Gaya tekan air dinamik (P_d)

$$P_x = C \times \gamma_w \times K \times h_0$$

$$C = \frac{C_m}{2} \left[\frac{h_x}{h_0} \left(2 - \frac{h_x}{h_0} \right) + \sqrt{\frac{h_x}{h_0} \left(2 - \frac{h_x}{h_0} \right)} \right]$$

$$P_d = \eta \times \frac{C_m}{2} \times \gamma_w \times K \times h_0^2 \times \sec \theta$$

$$h_d = \lambda \times h_x$$

Dimana:

P_x = gaya tekan air dinamik pada titik x (t/m^2)

P_d = gaya tekan air dinamik total dari muka air sampai titik x (t/m^2)

γ_w = berat volume air ($1 t/m^3$)

K = koefisien seismik (0,12)

h_0 = kedalaman air dari muka air sampai dasar pondasi (m)

h_x = kedalaman air dari muka air sampai titik x (m)

h_d = jarak vertikal x sampai P_d (m)

C_m = diperoleh dari Tabel 2.19, fungsi dari sudut θ

θ = sudut antara kemiringan *check dam* dan sisi tegak

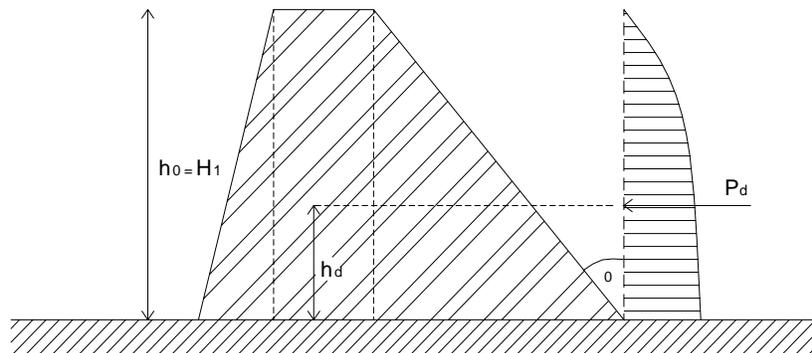
η, λ = koefisien yang diperoleh dari grafik

C = koefisien tekanan air dinamik

Tabel 3.20 Nilai C_m

θ	30°	35°	40°	50°	60°	70°
C_m	0,54	0,50	0,45	0,38	0,30	0,20

(Sumber : JICA, 1983, *Design of Sabo Facilities*)



Gambar 3.16 Gaya Tekan Air Dinamik

d. Analisa stabilitas *main dam*

Stabilitas *main dam* dihitung dengan berbagai beban-beban rencana seperti dan harus memenuhi beberapa faktor keamanan berikut ini :

1. Resultan gaya-gaya (R) harus berada pada inti

$$e = \frac{b_2}{2} - x$$

$$x = \frac{M}{V}$$

$$M = M_v - M_h$$

Syarat:

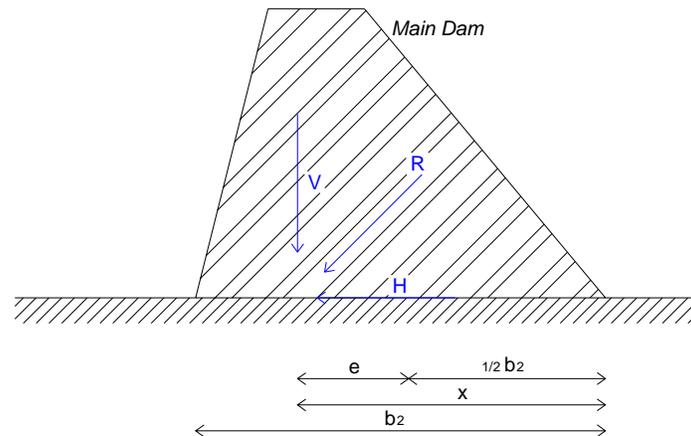
$$1/3b_2 < x < 2/3b_2$$

$$e < 1/6 b_2$$

Dimana:

M_{tahan} = jumlah momen gaya vertikal (tm)

M_{guling} = jumlah momen gaya horizontal (tm)



Gambar 3.17 Resultan Gaya pada *Main Dam*

2. Stabilitas terhadap geser

$$SF = \frac{V \times \operatorname{tg} \phi - C \times b_2}{H}$$

Syarat:

$$SF > 1,2$$

Dimana:

SF = faktor keamanan

V = total gaya vertikal (ton)

H = total gaya horisontal (ton)

ϕ = sudut geser dalam tanah dasar

C = kohesi tanah

b_2 = panjang bidang geser (m)

3. Stabilitas terhadap guling

$$SF = \frac{Mtahan}{Mguling}$$

Syarat:

$$SF > 1,2$$

Dimana :

SF = faktor keamanan

M_{tahan} = jumlah momen gaya vertikal (tm)

M_{guling} = jumlah momen gaya horizontal (tm)

4. Tegangan pada dasar pondasi

$$\sigma_{1,2} = \frac{V}{b_2} \left(1 \pm \frac{6e}{b_2} \right)$$

Syarat:

$$\sigma_1 < \sigma_{ijin} (60 \text{ ton/m}^2)$$

Di mana :

V = total gaya vertikal (ton)

b_2 = panjang bidang geser (m)

σ_1 = tegangan maksimum pada dasar pondasi (t/m^2)

σ_2 = tegangan minimum pada dasar pondasi (t/m^2)

e = jarak dari titik tengah sampai R ($b_2/2-x$) (m)

3.7.1.3 Perencanaan Pondasi

Yang utama dalam perencanaan pondasi adalah daya dukung tanah terhadap gaya yang bekerja pada dam dan gaya geser.

a. Dasar pondasi

Sebaiknya pondasi ditempatkan pada batuan dasar. Jika keadaan tidak memungkinkan, dibuat pondasi terapan pada sedimen sungai.

b. Daya dukung dasar pondasi

Daya dukung keseimbangan tanah dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$q_{ult} = C \times N_c + \gamma \times D \times N_\gamma + 0,4 \times \gamma \times N_q$$

Dimana :

q_{ult} = daya dukung tanah (t/m^2)

C = kohesi tanah (t/m^2)

γ = berat isi tanah (t/m^3)

D = kedalaman pondasi (m)

B = lebar pondasi (m)

N_c, N_γ, N_q adalah faktor daya dukung tanah yang tergantung dari besarnya sudut geser (ϕ), didapat dari faktor *Terzaghi* (Tabel 3.21).

Tabel 3.21

Nilai-Nilai Faktor Daya Dukung Tanah Terzaghi

ϕ	Keruntuhan geser umum			Keruntuhan geser lokal		
	N_c	N_q	N_γ	N_c	N_q	N_γ
0	5	1	0	1,57	1	0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,4	5	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19	8,3	5,7
34	52,6	38,5	35	23,7	11,7	9
35	57,8	41,4	42,4	25,2	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8
45	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7
48	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4
50	347,6	415,1	1153,2	81,3	65,6	87,1

(Sumber: Braja. M. Das)

Tegangan yang terjadi pada dasar pondasi harus lebih kecil dari tegangan yang diperkenankan. Daya dukung yang diperkenankan dapat dilihat di Tabel 3.22.

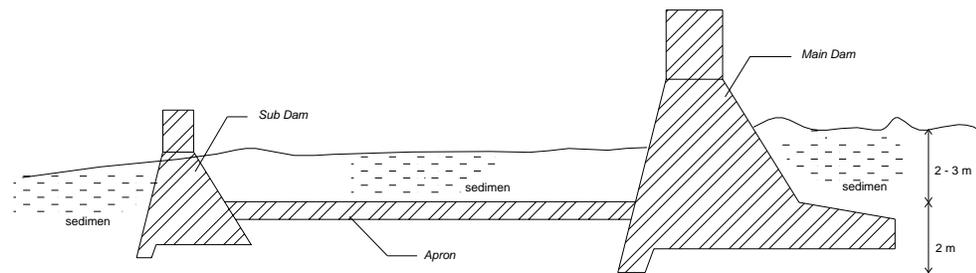
Tabel 3.22 Daya Dukung yang Diijinkan

Klasifikasi pondasi		Daya dukung tanah (t/m^3)	Koefisien geser	Catatan	
				Pengujian desak (<i>unconfined</i>)	Nilai N
Batuan dasar	Batuan keras sedikit	100	0,7	$> 1.000 t/m^2$	-
	Batuan keras banyak retak	60	0,7	$> 1.000 t/m^2$	-
	Batuan lunak <i>mudstone</i>	30	0,7	$> 1.000 t/m^2$	-
Lapisan kerikil	Kompak	60	0,6	-	-
	Tidak kompak	30	0,6	-	-
Lapis pasir	Kompak	30	0,6	-	30-50
	Kurang kompak	20	0,5	-	15-30
Lapis tanah liat	Keras	10	0,45	$10 - 20 t/m^2$	8-15
	Kurang keras	5	-	$5 - 10 t/m^2$	4-8
	Sangat keras	20	0,5	$20 - 40 t/m^2$	15-30

(Sumber : JICA, 1985)

c. Penetrasi pondasi

Pada dasar pondasi berupa batuan, dasar *dam* harus ditempatkan minimal 1,0 meter dari permukaan batuan. Pada dasar pondasi berupa sedimen sungai, dasar harus ditempatkan minimal 2,0 meter dari dasar sungai.



Gambar 3.18 Penetrasi Pondasi pada *Main Dam*

d. Kedalaman pondasi

Rumus yang digunakan

$$d_1 = \frac{1}{3}(H_{eff} + h_3)$$

Dimana :

d_1 = kedalaman pondasi (m)

H_{eff} = tinggi efektif *main dam* (m)

h_3 = tinggi muka air di atas peluap (m)

e. Pemeriksaan pipung

Pada dasar pondasi bangunan berupa sedimen sungai harus diperiksa terhadap kemungkinan terjadinya pipung. Pemeriksaan dengan Formula *Lane*.

$$C_c < \frac{1/3 L_H + L_V}{\Delta h}$$

Dimana :

C_c = angka *creep* untuk *lane* (lihat Tabel 2.24)

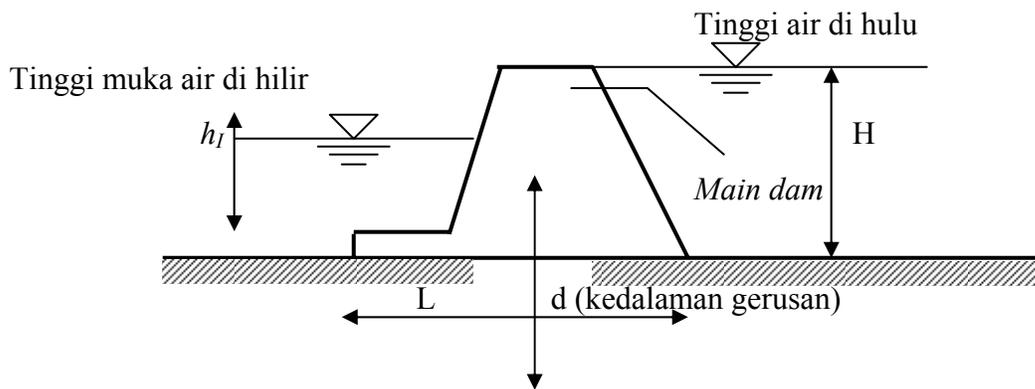
L_H = panjang lintasan horizontal (m)

L_V = panjang lintasan vertikal (m)

Δh = tinggi *head* (m) = $H - h_1$

h_1 = tinggi muka air di hilir

H = Tinggi air di hulu



Gambar 3.19 Pemeriksaan Bahaya Piping

Tabel 3.23 Angka *Creep* untuk *Lane*

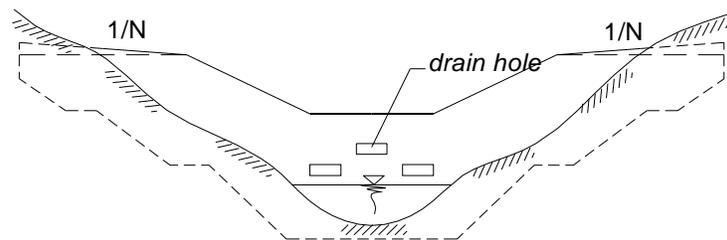
Bahan pondasi	Cv	Cw
Pasir dan lanau sangat halus	18	8,5
Pasir halus	15	7,0
Pasir	-	6,0
Pasir kasar	12	5,0
Kerikil Halus	-	4,0
Kerikil	-	3,5
Campuran pasir dan kerikil	9	-
Kerikil kasar bercampur dengan	4 –	3,0
Batu dan kerikil	-	2,5

(Sumber: JICA, 1985)

3.7.1.4 Perencanaan Sayap

a. Kemiringan sayap

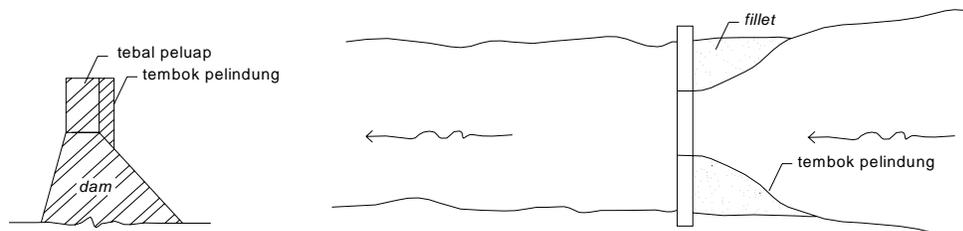
Agar tidak ada limpasan pada sayap, maka ke arah tebing sayap dibuat lebih tinggi dengan kemiringan $1/N >$ kemiringan dasar sungai.



Gambar 3.20 Kemiringan sayap 1 : N

b. Lebar sayap

Lebar sayap diambil sama dengan lebar mercu peluap atau sedikit lebih sempit. Lebar sayap harus aman terhadap gaya luar. Bangunan pengendali sedimen yang dibangun di daerah di mana aliran sedimen yang terjadi perlu diteliti keamanan sayapnya terhadap tegangan yang disebabkan oleh gaya tumbukan, maka perlu dipertimbangkan untuk menambah lebar sayap atau memasang tembok pelindung dibagian hulunya.



Gambar 3.21 Lebar Sayap

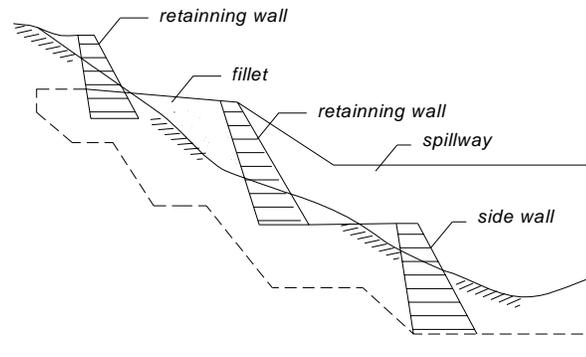
c. Tinggi sayap

Tinggi sayap ditetapkan dari besarnya tinggi muka air di atas pelimpah dan tinggi jagaan (lihat Tabel 3.15)

d. Penetrasi sayap

Pusaran atau aliran yang berputar biasanya mudah terjadi pada lokasi di sekitar sudut-sudut *checkdam*. Sudut *checkdam* ini merupakan pertemuan antara sayap-sayap *checkdam* dengan tebing sungai. Pada sungai arus deras,

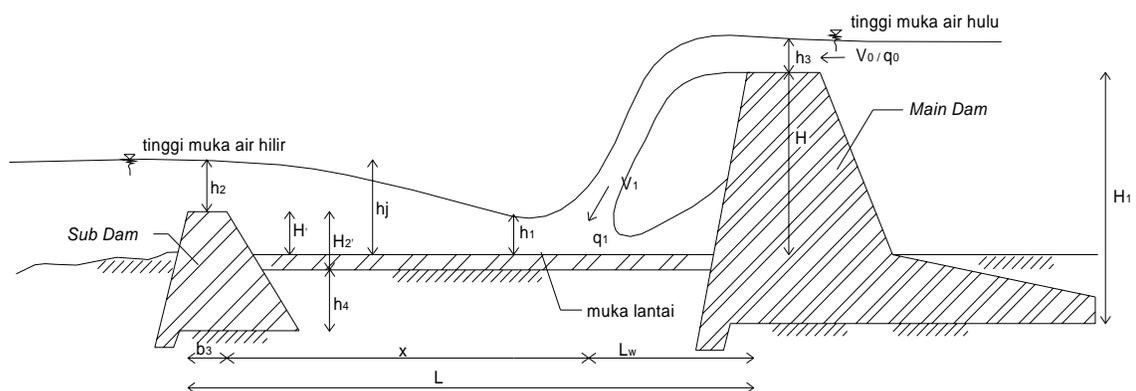
biasanya lereng gunung juga merupakan tebing sungai. Karena itu sayap *checkdam* harus diperkuat dengan konstruksi perkuatan lereng.



Gambar 3.22 Penetrasi Sayap

3.7.1.5 Perencanaan *Sub Dam* dan Lantai Lindung

Jika tanah pondasi terdiri dari batuan yang lunak, maka gerusan tersebut dapat dicegah dengan pembuatan *sub dam*. Keruntuhan bendung-bendung yang dibangun di atas lapisan pondasi pasir kerikil biasanya disebabkan terjadinya piping pada lapisan pondasi tersebut dan pencegahannya adalah dengan pembuatan lantai lindung antara bendung dengan *sub dam*nya. *Sub dam* dan lantai lindung berfungsi untuk mencegah pondasi *dam* dan dasar sungai di hilir dari gerusan dan penurunan yang disebabkan oleh terjunan air dan sedimen.



Gambar 3.23 Letak *Sub Dam*

a. Penampang *sub dam*

Standar perencanaan *sub dam* mengikuti standar perencanaan *main dam*, antara lain sebagai berikut:

1. Lebar mercu *sub dam* sama dengan lebar mercu *main dam*.
2. Kemiringan badan *sub dam* di bagian hilir ditetapkan sama dengan *main dam*.
3. Perhitungan stabilitas *sub dam* dibuat dengan prosedur yang sama dengan perhitungan stabilitas *main dam*.

b. Jarak *sub dam* dari *main dam*

1. Jika *main dam* tidak begitu tinggi, rumus yang digunakan:

$$L = 1,5 \text{ s/d } 2,0 (H + h_3)$$

2. Jika *main dam* cukup tinggi, rumus yang digunakan:

$$L = L_w + x + b_3$$

$$L_w = V_0 \times \left(\frac{2(H + \frac{1}{2}h_3)}{g} \right)^{1/2}$$

$$V_0 = \frac{q_0}{h_3}$$

$$q_0 = \frac{Q}{B_1}$$

$$x = \beta \times h_j$$

$$h_j = \frac{h_1}{2} \left[\left(\sqrt{1 + 8 \times Fr^2} \right) - 1 \right]$$

$$h_1 = \frac{q_1}{v_1}$$

$$q_1 = \frac{Q}{0,5(B_1 + B_2)}$$

$$v_1 = \sqrt{2g(H + h_3)}$$

$$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}$$

Dimana:

L = jarak *main dam* – *sub dam* (m)

H = tinggi dari muka lantai permukaan batuan dasar sampai mercu *main dam* (m)

h_3 = tinggi muka air di atas peluap (m)

L_w = panjang terjunan (m)

x = panjang loncatan air (m)

b_3 = lebar puncak *sub dam* (m)

q_0 = debit per meter lebar peluap (m³/detik)

Q = debit rencana (m³/detik)

B_1 = lebar peluap bagian bawah (m)

B_2 = lebar muka air di atas peluap (m)

g = percepatan gravitasi (9,8 m/detik²)

β = koefisien (4,5 s/d 5)

h_j = tinggi dari permukaan lantai sampai muka air di atas mercu *sub dam*

h_1 = tinggi air (*jet*) pada titik jatuhnya terjunan (m)

q_1 = debit per meter lebar pada titik jatuhnya terjunan (m³/detik)

v_1 = kecepatan terjunan pada titik jatuhnya terjunan (m/detik)

Fr = angka *Froude* dari aliran jet pada titik jatuh

c. Tinggi *sub dam*

1. Jika *main dam* tidak begitu tinggi, rumus yang digunakan:

$$H_2 = Hsb + h_4$$

$$Hsb = \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4} \right) H$$

2. Jika *main dam* cukup tinggi, rumus yang digunakan:

$$H_2 = H' + t + h_4$$

$$H_2' = h_j - h_2$$

Dimana :

H_2 = tinggi *sub dam* (m)

H_2' = tinggi *overlapping* (m)

H = tinggi *main dam* (m)

H' = tinggi *sub dam* dari permukaan apron (m)

t = tebal *apron* (m)

h_4 = kedalaman pondasi *sub dam* (m)

h_2 = tinggi muka air di atas *sub dam* (m)

h_j = tinggi dari permukaan lantai sampai muka air di atas mercu *sub dam*

d. Tebal lantai lindung/*Apron*

1. Bila tidak ada kolam olak, rumus yang digunakan:

$$t = 0,2 \times (0,6H + 3h_3 - 1)$$

2. Bila ada kolam olak, rumus yang digunakan:

$$t = 0,1 \times (0,6H + 3h_3 - 1)$$

Dimana :

t = tebal lantai lindung (m)

H = tinggi dari muka lantai permukaan batuan dasar sampai mercu *main dam* (m)

h_3 = tinggi muka air di atas peluap (m)

3.7.1.6 Perencanaan Bangunan Pelengkap

Bangunan pelengkap pada *check dam* terdiri dari:

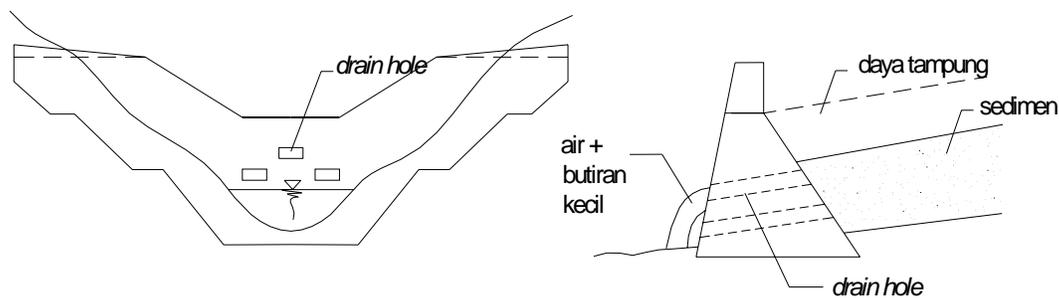
a. Dinding lantai lindung

Dinding lantai lindung berfungsi untuk menahan gerusan dan longsoran di tebing sungai pada kedua sisi lantai lindung yang berada antara *main dam* dan *sub dam* yang disebabkan oleh hempasan air yang terjun melalui mercu peluap.

Perencanaan tembok tepi meliputi:

- Elevasi pondasi tembok tepi direncanakan sama dengan elevasi lantai terjun, tetapi harus terletak di luar titik jauh dari *main dam*

- Ketinggian tembok tepi direncanakan sama dengan atau sedikit lebih tinggi dari ketinggian sayap *sub dam*
- b. Lubang drainase (*Drain Hole*)
Lubang drainase memiliki fungsi sebagai berikut:
 - Sebagai saluran pengelak pada waktu pelaksanaan pekerjaan
 - Mengurangi tekanan air pada *main dam* setelah tempat endapan sedimen di hulu penuh
 - Mengalirkan material endapan berbutir kecil agar dam tetap mempunyai daya tampung dalam menghadapi aliran debris yang akan datangUmumnya lebar lubang drainase diambil 0,5 s/d 1 meter.

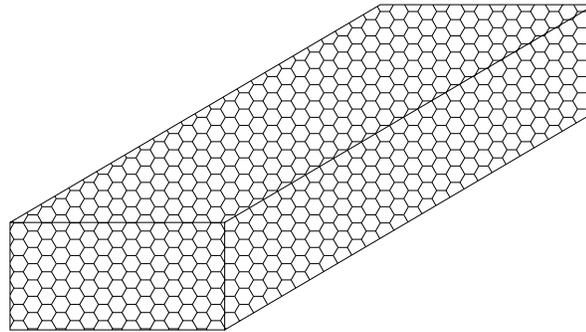


Gambar 3.24 Lubang Drainase/*Drain Hole*

c. Bronjong

Bronjong adalah sebuah anyaman dari belahan-belahan bambu, kawat atau bahan-bahan lain yang diisi dengan batu-batu untuk maksud-maksud tertentu. Bronjong dapat dipergunakan antara lain untuk :

- Melindungi dan memperkuat tebing tanah, baik lereng sungai maupun lereng tanggul
- Menjaga tepi sungai terhadap arus aliran air dan usaha menjauhkan arus aliran air dari tepi sungai yang merusak tebing-tebingnya
- Membuat bendung untuk meninggikan muka air
- Memperkecil gerusan pada lantai bendung/ *chek dam* bagian hilir



Gambar 3.25 Bronjong Kawat

3.7.2 Daya Tampung *Check Dam*

Dalam menentukan daya tampung bangunan pengendali sedimen digunakan rumus berikut:

$$V_s = \frac{B_1 * H_1^2}{2(I_o - I_s)}$$

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

$$V = \frac{1}{c} R^{2/3} I_o^{1/2}$$

c adalah koefisien kekasaran *manning*, dalam menentukan besarnya koefisien *manning* ini banyak faktor yang berpengaruh seperti kekasaran permukaan, tetumbuhan, ketidakteraturan saluran, bentuk saluran, debit, dan lainnya.

Namun oleh Cowan dikembangkan suatu cara memperkirakan nilai c , nilai c dapat dihitung dengan rumus (*Ven Te Chow, 1959*)

$$c = (c_0 + c_1 + c_2 + c_3 + c_4) m_5$$

Dengan c_0 nilai untuk saluran lurus dan seragam, c_1 yaitu nilai koreksi untuk efek ketidakteraturan permukaan, c_2 nilai untuk variasi bentuk dan ukuran penampang saluran, c_3 nilai untuk hambatan, c_4 nilai untuk kondisi tetumbuhan dan m_5 nilai faktor koreksi untuk belokan saluran. Nilai-nilai

$c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, m_5$ dicocokkan pada lampiran tabel nilai koefisien kekasaran *manning*.

$$Q = V * A$$

$$U^{*2} = R * g * I_s$$

$$U^{*2}_{cr} = 0,05 \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} * g * D_{50} \right)$$

Kondisi dasar sungai yang stabil :

$$U^{*2} = U^{*2}_{cr}$$

Di mana :

V_s = volume sedimen yang ditampung (m^3)

B_1 = lebar rata-rata sungai = 40 m

H_1 = tinggi efektif dam pengendali sedimen

I_s = kemiringan dasar sungai stabil

Q = debit banjir rencana

B = lebar sungai rata-rata

I_o = kemiringan dasar sungai asli

ρ_s = berat volume sedimen

ρ_w = berat volume air

D_{50} = diameter butiran rata-rata