

## **BAB II**

### **STUDI PUSTAKA**

#### **2.1 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.

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.

##### **2.1.1 Proses Terjadinya Erosi**

Berdasarkan proses terjadinya erosi tanah dapat dibedakan menjadi dua bagian, yaitu :

- a. Proses erosi tanah akibat pelapukan atau akibat geologi. Batu-batuan padat atau bahan induk tanah lapuk oleh cuaca menjadi bagian-bagian besar dan kecil, selanjutnya melalui proses secara fisik (mekanik), biologi (aktivitas organik) dan kimia, batuan akan terurai dan lebih lanjut akan terjadi retakan-retakan, keadaan ini akan lebih hebat lagi dengan adanya ayunan perubahan suhu tinggi dan rendah. Melalui retakan-retakan ini air dapat masuk ke dalam batuan-batuan maka lebih lanjut batuan akan pecah menjadi bagian-bagian yang lebih kecil lagi, ini akan mempercepat proses penghancuran. Namun demikian proses erosi tanah akibat pelapukan atau secara geologi, perubahan bentuk masih merupakan keseimbangan alam, artinya kecepatan pengrusakan tanah masih sama atau lebih kecil dari proses pembentukan tanah.
- b. Proses pelapukan tanah dipercepat dengan adanya tindakan manusia mengelola tanah untuk meningkatkan produktivitas tanah, di lain pihak mengakibatkan pemecahan agregat tanah, meliputi pengangkutan dan pemindahan tanah pada saat pengolahan tanah. Hal ini akan mengakibatkan bertambahnya laju erosi tanah yang disebut "erosi dipercepat" (*Accelerated Erosion*), artinya kecepatan pengrusakan tanah atau erosi tanah sudah lebih besar atau melebihi kecepatan proses pembentukan tanah. Melalui usaha-usaha konservasi tanah dan air diharapkan kegiatan manusia dapat menekan atau mengurangi kerusakan tanah (*resisting force*) dan bukan sebaliknya terhadap kecepatan erosi tanah atau kerusakan tanah dapat diperlambat (*retard erosion*) semaksimal mungkin. Pengolahan tanah yang benar, disamping meningkatkan produktivitas tanah juga menjaga tanah dari kerusakan. Tujuan ini dimaksudkan agar tanah dapat berproduksi sepanjang waktu atau dalam jangka waktu selama-lamanya.

### **2.1.2 Perhitungan Erosi**

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.

$$E_a = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2.1)$$

di mana:

$E_a$  : banyaknya tanah tererosi

$R$  : faktor erosivitas hujan

$LS$  : faktor panjang - kemiringan lereng

$C$  : faktor tanaman penutup lahan dan manajemen tanaman

$P$  : faktor tindakan konservasi praktis

### 2.1.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Erosi Tanah

Menurut Hudson (1986), ada dua macam yang mempengaruhi erosi tanah yaitu faktor penyebab terjadinya erosi yang dinyatakan dalam erosivitas dan faktor tanah yang dinyatakan dalam erodibilitas.

#### a. Erosivitas Hujan

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

$$R = \sum_{i=1}^n EI_{30} \quad (2.2)$$

$$EI_{30} = 6,119 \times P_b^{1,211} \times N^{-0,747} \times P_{max}^{0,526} \quad (2.3)$$

di mana :

$R$  : faktor erosivitas hujan (Kj/Ha/tahun)

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

$P_b$  : curah hujan bulanan (cm)

$N$  : jumlah hari hujan per bulan

$P_{max}$  : hujan maximum harian (24 jam) dalam bulan yang bersangkutan

b. Erodibilitas Tanah

Erodibilitas merupakan ketidak sanggupan tanah untuk menahan pukulan butir-butir hujan. Tanah yang mudah tererosi pada saat dipukul oleh butir-butir hujan mempunyai erodibilitas yang tinggi. Erodibilitas dari berbagai macam tanah hanya dapat diukur dan dibandingkan pada saat terjadi hujan. Erodibilitas tanah merupakan ukuran kepekaan tanah terhadap erosi yang ditentukan oleh sifat fisik dan kandungan mineral tanah. Erodibilitas tanah dapat dinilai berdasarkan sifat-sifat fisik tanah sebagai berikut :

- Tekstur tanah yang meliputi :
  - ✓ fraksi debu (ukuran 2 - 50  $\mu$  m)
  - ✓ fraksi pasir sangat halus (50 – 100  $\mu$  m)
  - ✓ fraksi pasir (100 – 2000  $\mu$  m)
- Kadar bahan organik yang dinyatakan dalam %.
- Permeabilitas yang dinyatakan sebagai berikut :
  - ✓ sangat lambat (< 0,12 cm/jam)
  - ✓ lambat (0,125 – 0,5 cm/jam)
  - ✓ agak lambat (0,5 – 2,0 cm/jam)
  - ✓ sedang (2,0 – 6,25 cm/jam)
  - ✓ agak cepat (6,25 – 12,25 cm/jam)
  - ✓ cepat (> 12,5 cm/jam)
- Struktur dinyatakan sebagai berikut :
  - ✓ Granular sangat halus : tanah liat berdebu
  - ✓ Granular halus : tanah liat berpasir
  - ✓ Granular sedang : lempung berdebu
  - ✓ Granular kasar : lempung berpasir

$$K = \left\{ 2,713 \times 10^{-4} (12 - O) M^{1,14} + 3,25(S - 2) + 2,5 \frac{(p - 3)}{100} \right\} \quad (2.4)$$

di mana:

$K$  : faktor kepekaan erosi tanah/faktor erodibilitas tanah

$M$  : Persentase pasir sangat halus dan debu x (100 - % tanah liat)

$O$  : persentase bahan organik

$S$  : kode struktur tanah yang dipergunakan

$p$  : kelas permeabilitas tanah

c. Faktor panjang dan kemiringan 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 yang disampaikan oleh Wischmeier and Smith, 1978 (dalam Morgan, 1988 dan Torri, 1996), sebagai berikut:

$$LS = \left( \frac{L}{22} \right)^z (0,006541S^2 + 0,0456S + 0,065) \quad (2.5)$$

di mana :

$L$  : panjang lereng (m)

$S$  : kemiringan lereng (%)

**Tabel 2.1** Hubungan nilai  $z$  dan  $S$

Nilai $S$	Nilai $z$
< 1%	0,2
1% – 3 %	0,3
3,5% - 4,5%	0,4
>5%	0,5

(sumber: *Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu, Robert J. Kodoatie*)

d. Faktor konservasi tanah dan pengelolaan tanah

- Faktor indeks konservasi tanah (faktor  $P$ ). Nilai indeks konservasi tanah dapat diperoleh dengan membagi kehilangan tanah dari lahan yang diberi perlakuan pengawetan, terhadap tanah tanpa pengawetan.

**Tabel 2.2** Nilai faktor P untuk berbagai tindakan konservasi tanah

No.	Tindakan khusus konservasi tanah	Nilai P
1.	Tanpa tindakan pengendalian erosi	1,00
2.	Terras bangku	
	Konstruksi baik	0,04
	Konstruksi sedang	0,15
	Konstruksi kurang baik	0,35
	Terras tradisional	0,40
3.	Strip tanaman	
	Rumput bahia	0,40
	Clotaria	0,64
	Dengan kontur	0,20
4.	Pengolahan tanah dan penanaman menurut garis kontur	
	Kemiringan 0-8%	0,50
	Kemiringan 8-20%	0,75
	Kemiringan >20%	0,90

(sumber: Pelestarian Sumber Daya Tanah dan Air, Suripin)

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

**Tabel 2.3** Harga-harga koefisien limpasan pada rumus rasional

Tipe kawasan daerah aliran sungai	Koefisien limpasan
<b>Halaman rumput :</b>	
Tanah berpasir,datar (2%)	0,05-0,10
Tanah berpasir, rata-rata (2-7%)	0,10-0,15
Tanah berpasir, curam(7%)	0,15-0,20
Tanah berat, datar (2%)	0,13-0,17
Tanah berat, rata-rata(2-7%)	0,18-0,22
Tanah berat, curam (7%)	0,25-0,35
<b>Bisnis :</b>	
Kawasan kota	0,70-0,95
Kawasan pinggiran	0,50-0,70
<b>Kawasan pemukiman :</b>	
Kawasan keluarga-tunggal	0,30-0,50
Multi satuan, terpisah	0,40-0,60
Multi satuan, berdempetan	0,60-0,75
Pinggiran kota	0,25-0,40
Kawasan tempat tinggal berupa rumah susun	0,50-0,70
<b>Perindustrian :</b>	
Kawasan yang ringan	0,50-0,80
Kawasan yang berat	0,60-0,90
<b>Taman-taman dan kuburan</b>	0,10-0,25
<b>Lapangan bermain</b>	0,20-0,35
<b>Kawasan halaman rel kereta api</b>	0,20-0,40
<b>Kawasan yang belum diperbaiki</b>	0,10-0,30
<b>Jalan-jalan :</b>	
Beraspal	0,70-0,95
Beton	0,80-0,95
Batu bata	0,70-0,85
<b>Jalan raya dan trotoir :</b>	0,75-0,85
<b>Atap</b>	0,75-0,95

(sumber: *Dasar-Dasar Hidrologi, Ersin Seyhan*)

- Faktor indeks pengelolaan tanaman dan konservasi tanah (faktor  $CP$ ). Jika faktor  $C$  dan  $P$  tidak dapat dicari tersendiri, maka faktor indeks  $C$  dan  $P$  digabung menjadi faktor  $CP$

**Tabel 2.4** Faktor *CP* untuk berbagai jenis penggunaan lahan di Pulau Jawa

Konservasi dan pengelolaan tanaman	Nilai <i>CP</i>
<b>Hutan :</b>	
a. tak terganggu	0,01
b. tanpa tumbuhan bawah, disertai seresah	0,05
c. tanpa tumbuhan bawah, tanpa seresah	0,50
<b>Semak :</b>	
a. tak terganggu	0,01
b. sebagian berumput	0,10
<b>Kebun :</b>	
a. kebun-talun	0,02
b. kebun-pekarangan	0,20
<b>Perkebunan :</b>	
a. penutupan tanah sempurna	0,01
b. penutupan tanah sebagian	0,07
<b>Perumputan :</b>	
a. penutupan tanah sempurna	0,01
b. penutupan tanah sebagian; ditumbuhi alang-alang	0,02
c. alang-alang : pembakaran sekali setahun	0,06
d. serai wangi	0,65
<b>Tanaman pertanian :</b>	
a. umbi-umbian	0,51
b. biji-bijian	0,51
c. kacang-kacangan	0,36
d. campuran	0,43
e. padi irigasi	0,02
<b>Perladangan :</b>	
a. 1 tahun tanam - 1 tahun bero	0,28
b. 1 tahun tanam - 2 tahun bero	0,19
<b>Pertanian dengan konservasi :</b>	
a. mulsa	0,14
b. teras bangku	0,04
c. <i>contour cropping</i>	0,14

(sumber: Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Chay Asdak)



#### **2.1.4 Proses Erosi sebagai Penghasil Sedimen**

Sebagaimana diketahui bahwa akibat erosi tanah yang meliputi proses pelepasan butir-butir tanah dan proses pemindahan tanah akan menyebabkan timbulnya bahan endapan atau sedimentasi di tempat lain. Bersama-sama air mengalir, butir-butir tanah yang lepas akibat proses erosi tanah akan diangkat yang kemudian akan diendapkan pada tempat-tempat tertentu berupa pengendapan atau sedimentasi, baik sementara ataupun tetap. Banyaknya endapan tergantung dari besarnya erosi tanah yang terjadi. Makin banyak jumlah sedimen terangkut menunjukkan semakin besar tingkat erosi tanah yang terjadi dalam daerah aliran sungai bersangkutan.

Foster dan Mayer (1977) dan Lane dan Shirley (1982) mengemukakan bahwa erosi dan sedimentasi diakibatkan oleh air, terutama melalui proses pelepasan butir-butir tanah, penghanyutan dan pengangkutan sedimentasi yang diakibatkan oleh jatuhnya pukulan air hujan, dari aliran air. Curah hujan yang tinggi dapat mengakibatkan laju erosi tanah, maka angkutan bahan sedimen akan meningkat. Pukulan air hujan tersebut merupakan penghasil utama butir-butir tanah yang terlepas dalam proses erosi tanah.

Pada suatu siklus hidrologi, secara karakteristik curah hujan yang jatuh di atas permukaan tanah dan limpasan permukaan yang timbul adalah variabel yang ekstrim yang menyebabkan erosi tanah dan bahaya banjir dan bahaya kerusakan yang terjadi, diantaranya seperti timbulnya sedimentasi baik dilahan-lahan pertanian, dasar sungai, waduk, muara dan lain-lain.

#### **2.1.5 Pengaruh Erosi Tanah Terhadap Kesuburan Tanah**

Pengaruh erosi tanah ini disamping sebagai penghasil bahan sedimennya sendiri, juga dapat mengakibatkan merosotnya kesuburan tanah baik fisik ataupun kimia, sehingga dapat menurunkan produktivitas tanah, daya dukung tanah untuk pondasi. Hal ini diakibatkan oleh hilangnya lapisan yang subur akibat erosi yang mengikis permukaan tanah. Lebih lanjut erosi tanah dapat mengakibatkan menurunnya kualitas lingkungan hidup.

## 2.2 SEDIMENTASI

### 2.2.1 Proses Sedimentasi

Proses sedimentasi adalah proses terkumpulnya butiran-butiran tanah karena aliran air yang mengangkut sedimen tersebut mencapai kecepatan pengendapan (*settling velocity*). Proses sedimentasi sering terjadi pada daerah pertanian, di sepanjang dasar sungai, dasar waduk, muara dan sebagainya. Sedimentasi sepanjang dasar sungai dan waduk akan mengakibatkan daya tampung sungai dan waduk tersebut menurun. Khusus untuk waduk dapat memperpendek umur layanan waduk. Pada muara sungai pengendapan sedimen dapat membentuk suatu delta. Dengan tersumbatnya aliran sungai oleh sedimentasi akan menghambat kemampuan sungai membuang air banjir dan kerusakan-kerusakan lain yang akan ditimbulkannya.

Dari proses terjadinya erosi tanah dan sedimentasi maka terjadinya sedimentasi dapat dibedakan menjadi dua bagian, yaitu :

a. Proses sedimentasi secara geologis.

Proses sedimentasi secara geologis yaitu proses erosi tanah dan sedimentasi yang berjalan normal dan berlangsung secara geologi, artinya pengendapan yang terjadi masih dalam batas-batas yang diperkenankan atau dalam keseimbangan alam dari proses degradasi dan aggradasi pada permukaan kulit bumi akibat pelapukan.

b. Proses sedimentasi dipercepat.

Proses sedimentasi dipercepat yaitu proses sedimentasi yang menyimpang dari proses sedimentasi secara geologi yang berlangsung secara cepat dan bersifat merugikan. Hal ini terjadi karena kegiatan manusia dalam pengolahan tanah. Cara pengolahan tanah yang salah, akan mengakibatkan laju erosi yang tinggi sehingga sedimentasi meningkat. Selain kegiatan manusia, peristiwa gunung meletus juga akan mengakibatkan terjadinya penyimpangan besar-besaran yang akan menimbulkan kesulitan akibat timbulnya bahan sedimen yang tinggi, baik yang menutupi lahan pertanian, daerah pemukiman, jalan-jalan maupun pendangkalan sungai dan waduk, dan sebagainya.

## **2.2.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Sedimentasi**

Proses sedimentasi merupakan bagian dari proses erosi tanah. Timbulnya bahan sedimen merupakan akibat dari adanya erosi tanah. Kegiatan ini berlangsung diakibatkan oleh air ataupun angin. Proses erosi di Indonesia pada umumnya diakibatkan oleh air, sedangkan faktor angin sangat kecil. Faktor-faktor yang mempengaruhi erosi tanah juga merupakan penyebab terjadinya sedimentasi. Beberapa faktor yang menimbulkan sedimentasi antara lain iklim, tanah, topografi, tanaman, macam penggunaan lahan, kegiatan manusia, karakteristik hidrolika sungai, karakteristik penampung sedimen (*check dam* dan waduk), kegiatan gunung berapi.

## **2.3 UPAYA PENGENDALIAN SEDIMENTASI**

Masalah sedimentasi tidak lepas dari masalah erosi. Keduanya saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan karena erosi adalah penyebab utama terjadinya sedimentasi. Begitu pula dalam pengendaliannya. Pengendalian sedimen yang terbaik yaitu dimulai dari sumbernya yaitu pengendalian erosi.

### **2.3.1 Upaya Pengendalian Erosi**

Erosi tidak dapat dihilangkan namun hanya dapat dicegah karena erosi merupakan gejala alam yang akan terus menerus terjadi. Tindakan-tindakan yang dapat dilakukan untuk mengurangi terjadinya erosi antara lain sebagai berikut:

a. Pengaturan penggunaan lahan

Pengaturan penggunaan lahan memerlukan peraturan daerah atau undang-undang yang bertujuan untuk mengawetkan keadaan sekarang atau memperbaiki keadaan penggunaan lahan yang cocok untuk tujuan pengendali erosi, misal usaha penggarapan lahan (*cultivation*), penghutanan kembali (*reforestation*) atau penanaman kembali pada padang-padang rumput (*reseeding grassland*)

b. Usaha-usaha pertanian, antara lain:

1. Pengolahan tanah menurut kontur

Tindakan ini cenderung untuk mengurangi limpasan air permukaan sehingga air akan mempunyai waktu untuk infiltrasi di lahan (tidak mengalir ke bawah dengan kecepatan tinggi) dan mengurangi pengangkutan tanah.

2. Guludan dan guludan bersaluran

Guludan adalah tumpukan tanah yang dibuat memanjang menurut garis kontur atau memotong lereng dan diperkuat dengan penanaman rumput. Guludan bersaluran dilengkapi dengan saluran memanjang di bagian atas lereng guludan memanjang mengikuti arah guludan. Pembuatan guludan dan guludan bersaluran ini bermanfaat mengurangi erosi dengan cara menahan limpasan permukaan dan menyalurkan air yang tidak masuk ke dalam tanah dengan kecepatan yang rendah ke luar lapangan.

3. *Terras*

*Terras* berfungsi mengurangi panjang lereng dan menahan air sehingga mengurangi kecepatan dan jumlah aliran permukaan, dan memungkinkan penyerapan air oleh tanah. Dengan demikian erosi berkurang. Ada dua jenis *terras*, yaitu *terras tangga (bench terrace)* dan *terras berdasar lebar (broadbase terrace)*.

4. Cocok tanam pias (*strip cropping*)

Bercocok tanam pada pias yang sempit melintang terhadap lereng lahan. Pias yang ditanami tanaman yang tidak tahan erosi selalu dipisahkan dari pias yang ditanami tanaman yang tahan erosi yang ditanam secara rapat. Pias tanaman tahan erosi tersebut melindungi tanah terhadap erosi dan bertindak sebagai penyaring (*filter*) limpasan pias yang lain.

5. Memperkuat ujung alur sungai erosi atau polongan (*gully*)

Untuk mencegah erosi yang merayap ke atas yang menyebabkan terjadinya alur erosi atau polongan (*gully*) ke arah hulu maka ujung alur erosi harus dilindungi dengan batu-batu yang didapat dari tempat itu dan disusun di sekitar ujung alur erosi tersebut.

6. Penutupan alur erosi

Penutupan alur erosi diterapkan di tempat terjadinya erosi yang berlebihan di lembah-lembah yang dalam yang disebabkan oleh penebangan hutan tanpa

perencanaan yang baik. Penutupan alur erosi dilakukan dengan cara membuat bendungan dari pasangan batu atau beton (*chek dam*) untuk menahan sedimen. Jika sudah terisi penuh maka dibuat lagi serentetan bangunan semacam itu sampai stabil sehingga erosi lembah ke hulu dan ke arah samping dapat dihentikan.

7. Sumuran penampung air

Air yang dialirkan ke sumur-sumur tersebut dapat dibiarkan menguap atau mengalami perkolasi ke dalam tanah sehingga menjadi air tanah.

### 2.3.2 Upaya Pengendalian Sedimentasi

Upaya penanggulangan sedimentasi dilakukan dengan cara mengendalikan erosi sebagai penyebab utama. Selain itu, pengendalian sedimentasi dapat dilakukan pula dengan hal-hal sebagai berikut:

a. Pengendalian sungai (*river training*)

Pengendalian sungai terdiri dari pembuatan tanggul-tanggul, krib, bendungan pembimbing (Inggris : *guiding dam* ; Belanda : *strekdam*)

b. Perencanaan bangunan *inlet* untuk penyadapan air ke saluran

Bangunan *inlet* harus diletakkan sedemikian rupa sehingga laju sedimen yang masuk ke saluran seminimal mungkin. Untuk memperkecil masuknya sedimen, ke dalam saluran dengan membuat pembilas (*excluder*) atau saluran pengendap (*settling basin*) sebelum air dimasukkan ke dalam saluran.

c. Pemilihan lokasi bendungan yang tepat

Anak-anak sungai yang kecil yang banyak mengangkut sedimen harus dicegah masuk ke dalam waduk, sejauh masih dapat dipilih lokasi lain untuk letak bendungan.

d. Pembangunan *chek dam* di hulu waduk

*Chek dam* berfungsi untuk menahan sedimen, apabila *chek dam* tidak dibangun, sedimen akan masuk ke dalam waduk, sehingga mengurangi kapasitas tampung waduk dan mengurangi umur layanan waduk

- e. Perencanaan *outlet* waduk yang baik  
Pembangunan bangunan *outlet* yang dekat dengan dasar sungai akan memberikan kemungkinan membilas endapan yang terdiri dari material halus.

## 2.4 ANALISIS HIDROLOGI

Sebelum merencanakan konstruksi Bangunan Pengendali Sedimen, langkah pertama yaitu merencanakan debit banjir rencana yang akan digunakan dalam perhitungan. Data-data hidrologi yang diperoleh dianalisis untuk memperoleh besarnya debit banjir rencana dengan periode ulang tertentu yang dapat dialirkan tanpa membahayakan lingkungan dan stabilitas bangunan sungai. Di bawah ini akan diuraikan secara singkat metode-metode analisis hidrologi.

### 2.4.1 Metode Perhitungan Curah hujan

Analisis data hujan dimaksudkan untuk mendapatkan besaran curah hujan. Perlunya menghitung curah hujan wilayah adalah untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir. 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 :

$$\bar{R} = \frac{1}{n}(R_1 + R_2 + \dots + R_n) \quad (2.6)$$

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*

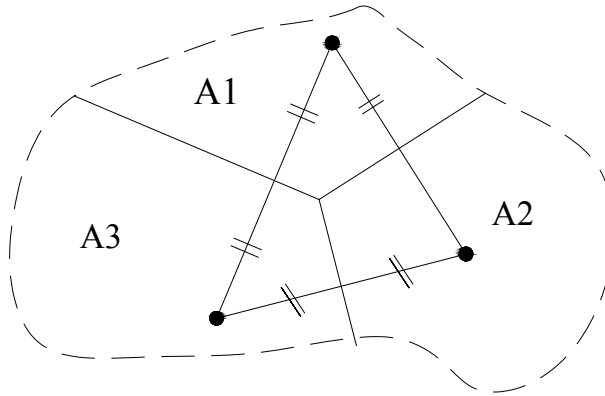
Metode ini sering digunakan pada analisis hidrologi karena metode ini lebih baik dan obyektif dibanding metode lainnya. Metode ini dapat digunakan pada daerah yang memiliki titik pengamatan yang tidak merata. Cara ini adalah dengan memasukkan faktor pengaruh daerah yang mewakili stasiun hujan yang disebut 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 :

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{A_1.R_1 + A_2.R_2 + \dots + A_n.R_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \\ &= \frac{A_1.R_1 + A_2.R_2 + \dots + A_n.R_n}{A} \\ &= W_1R_1 + W_2R_2 + \dots + W_nR_n \end{aligned} \tag{2.7}$$

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 (m<sup>2</sup>)
- $A$  : luas total wilayah (m<sup>2</sup>)
- $W_1, W_2, \dots, W_n$  : bobot luas bagian yang mewakili titik pengamatan (%)

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



**Gambar 2.1** Poligon Thiessen

c. Metode *Isohyet*

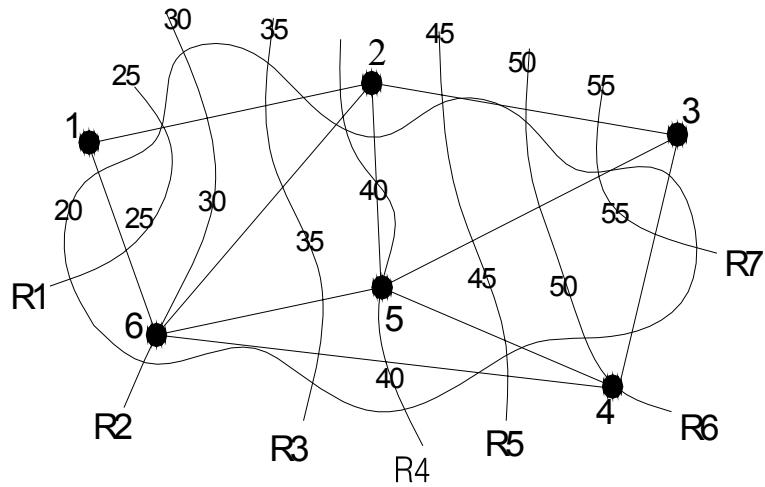
Dengan cara ini, digambar terlebih dahulu kontur tinggi hujan yang sama (*isohyet*), seperti terlihat pada Gambar 2.2 kemudian luas bagian di antara dua garis *isohyet* yang berdekatan diukur dengan planimeter, dan nilai rata-rata dihitung sebagai nilai rata-rata timbang nilai kontur. Curah hujan daerah itu dapat dihitung menurut persamaan sebagai berikut :

$$\bar{R} = \frac{A_1.R_1 + A_2.R_2 + \dots + A_n.R_n}{A_1 + \dots + A_n} \quad (2.8)$$

di mana :

- $\bar{R}$  : curah hujan daerah (mm)
- $A_1, A_2, \dots, A_n$  : luas bagian-bagian antara garis-garis *isohyet* (m<sup>2</sup>)
- $R_1, R_2, \dots, R_n$  : curah hujan rata-rata pada bagian-bagian (mm)





**Gambar 2.2** 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*).

## 2.4.2 Metode Analisis Frekuensi

Suatu kenyataan bahwa tidak semua variat dari suatu variabel hidrologi terletak atau sama dengan nilai rata – ratanya, akan tetapi kemungkinan ada nilai variat yang lebih besar atau lebih kecil dari nilai rata – ratanya. Besarnya derajat dari suatu sebaran variat disekitar nilai rata – ratanya disebut dengan variasi atau dispersi. Cara mengukur besarnya dispersi disebut pengukuran dispersi. Macam cara pengukuran dispersi antara lain :

Harga rata – rata ( $\bar{X}$ )

Rumus :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2.9)$$

di mana :

- $\bar{X}$  : curah hujan rata – rata (mm)  
 $X_i$  : curah hujan di stasiun hujan ke i (mm)  
 $n$  : jumlah data

a. *Standar deviasi* (SD)

Rumus :

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.10)$$

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

b. Koefisien *Skewness* (Cs)

Rumus :

$$Cs = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n-1) \times (n-2) \times S^3} \quad (2.11)$$

di mana :

- $Cs$  : 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

c. Koefisien *Kurtosis* (Ck)

Rumus :

$$Ck = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{(n-1) \times (n-2) \times (n-3) \times S^3} \quad (2.12)$$

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

d. Koefisien variasi (Cv)

Rumus :

$$Cv = \frac{SD}{\bar{X}} \quad (2.13)$$

di mana :

$Cv$  : koefisien Variasi

$SD$  : standar deviasi

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

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

### 2.4.3 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.

Untuk prediksi curah hujan rencana dilakukan dengan analisis frekuensi data hujan. Ada beberapa metode analisis frekuensi yang dapat digunakan yaitu :

a. Metode Distribusi Normal

Distribusi *normal* banyak digunakan dalam analisis hidrologi, misalnya dalam analisis frekuensi curah hujan, analisis statistik dari distribusi rata-rata tahunan dan sebagainya. Distribusi *normal* atau disebut pula distribusi *Gauss*. Fungsi densitas peluang normal (*normal Probability density function*) dari variabel acak kontinyu dapat ditulis sebagai berikut :

$$P(X) = \frac{1}{SD\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.14)$$

di mana :

$P(X)$  : fungsi densitas peluang normal (ordinat kurva normal)

$\pi$  : 3,14156

$e$  : 2,71828

$X$  : variabel acak kontinyu

$\mu$  : rata-rata dari nilai  $X$

SD : standar deviasi dari nilai  $X$

b. Metode Gumbel

Rumus-rumus yang digunakan untuk menentukan curah hujan rencana menurut

Metode Gumbel (Soemarto,1999) adalah sebagai berikut :

$$X = \bar{X} + S \times k \quad (2.15)$$

di mana :

$X$  : hujan rencana dengan periode ulang T tahun

$\bar{X}$  : nilai tengah sample

$S$  : standar deviasi sample

$k$  : faktor frekuensi

Faktor frekuensi K didapat dengan menggunakan rumus :

$$k = \frac{Y_t - Y_n}{S_n} \quad (2.16)$$

di mana :

$Y_n$  : harga rata-rata *reduced mean* ( Tabel 2.5 )

$S_n$  : *reduced Standard Deviation* ( Tabel 2.6 )

$Y_t$  : *reduced variate* ( Tabel 2.7)

**Tabel 2.5 Reduced mean ( $Y_n$ )**

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

(sumber: Hidrologi Teknik, Soemarto)

**Tabel 2.6 Reduced standard deviation ( $S_n$ )**

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,9496	0,9676	0,9833	0,9971	1,0095	1,0206	1,0316	1,0411	1,0493	1,0565
20	1,0628	1,0696	1,0754	1,0811	1,0864	1,0315	1,0961	1,1004	1,1047	1,1080
30	1,1124	1,1159	1,1193	1,1226	1,1255	1,1285	1,1313	1,1339	1,1363	1,1388
40	1,1413	1,1436	1,1458	1,1480	1,1499	1,1519	1,1538	1,1557	1,1574	1,1590
50	1,1607	1,1923	1,1638	1,1658	1,1667	1,1681	1,1696	1,1708	1,1721	1,1734
60	1,1747	1,1759	1,1770	1,1782	1,1793	1,1803	1,1814	1,1824	1,1834	1,1844
70	1,1854	1,1863	1,1873	1,1881	1,1890	1,1898	1,1906	1,1915	1,1923	1,1930
80	1,1938	1,1945	1,1953	1,1959	1,1967	1,1973	1,1980	1,1987	1,1994	1,2001
90	1,2007	1,2013	1,2026	1,2032	1,2038	1,2044	1,2046	1,2049	1,2055	1,2060
100	1,2065									

(sumber: Hidrologi Teknik, Soemarto)

**Tabel 2.7** *Reduced variate (Yt)*

Periode Ulang	<i>Reduced Variate</i>
2	0,3665
5	1,4999
10	2,2502
20	2,9606
25	3,1985
50	3,9019
100	4,6001
200	5,2960
500	6,2140
1000	6,9190
5000	8,5390
10000	9,9210

(sumber: *Hidrologi Teknik, Soemarto*)

c. *Metode Log Pearson III*

*Metode Log Pearson III* apabila digambarkan pada kertas peluang logaritmik akan merupakan persamaan garis lurus, sehingga dapat dinyatakan sebagai model matematik dengan persamaan sebagai berikut (*Sumber : Hidrologi Teknik, Soemarto*).

$$X = \bar{X} + k.SD \quad (2.17)$$

di mana :

$X$  : nilai logaritmik dari  $X$  atau  $\log(X)$

$\bar{X}$  : rata-rata hitung (lebih baik rata-rata geometrik) dari nilai  $Y \{Y=\log(X)\}$

$SD$  : standar deviasi nilai  $Y \{Y=\log(X)\}$

$k$  : faktor frekuensi yang ditentukan oleh suatu distribusi peluang *Log-Pearson tipe III* dapat dilihat pada Tabel (2.8)

**Tabel 2.8** Harga  $k$  untuk distribusi *Log Pearson III*

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

#### 2.4.4 Uji Sebaran *Chi Square Test*

Rumus :

$$X^2Cr = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{Ef_i - Of_i}{Ef_i} \right]^2 \quad (2.18)$$

di mana :

$X^2Cr$  : harga *Chi Square*

$Ef_i$  : banyaknya frekuensi yang diharapkan pada data ke-i

$Of_i$  : frekuensi yang terbaca pada kelas yang sama pada data ke-i

$n$  : jumlah data

Prosedur perhitungan uji *Chi Kuadrat* adalah :

1. Urutkan data pengamatan dari besar ke kecil
2. Hitunglah jumlah kelas yang ada ( $K$ ) =  $1 + 3,322 \log n$ . Dalam pembagian kelas disarankan agar setiap kelas terdapat minimal tiga buah pengamatan.

3. Hitung nilai  $Ef = \left[ \frac{\sum n}{\sum K} \right]$  (2.19)

4. Hitunglah banyaknya  $Of$  untuk masing – masing kelas.
5. hitung nilai  $X^2Cr$  untuk setiap kelas kemudian hitung nilai total  $X^2Cr$  dari tabel untuk derajat nyata tertentu yang sering diambil sebesar 5% dengan parameter derajat kebebasan.

Rumus derajat kebebasan adalah :

$$DK = K - (R + 1) \quad (2.20)$$

di mana :

$DK$  : derajat kebebasan

$K$  : banyaknya kelas

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

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



### 2.4.5 Metode Perhitungan Intensitas Curah Hujan

Curah hujan jangka pendek dinyatakan dalam intensitas perjam yang disebut dengan intensitas curah hujan. Hujan dalam intensitas yang besar umumnya terjadi dalam waktu yang pendek. Hubungan intensitas hujan dengan waktu hujan banyak dirumuskan, pada umumnya tergantung pada parameter setempat.

Intensitas hujan rata-rata pada umumnya digunakan untuk perhitungan debit banjir rencana dengan cara rasional atau *storage function*. Beberapa rumus intensitas curah hujan yang sering digunakan antara lain :

- a. Rumus Mononobe

$$I = \frac{R_{24}}{24} \times \left( \frac{24}{t} \right)^{2/3} \quad (2.21)$$

di mana :

$I$  : intensitas hujan (mm/jam)

$t$  : waktu hujan (jam)

$R_{24}$  : curah hujan maksimum selama 24 jam (mm)

- b. Rumus Talbot

$$I = \frac{a}{t + b} \quad (2.22)$$

di mana :

$I$  : intensitas hujan (mm/jam)

$t$  : waktu hujan (jam)

$a, b$  : konstanta yang tergantung pada kondisi setempat

(sumber: Hidrologi Untuk Pengairan, Suyono Sosrodarsono)

- c. Rumus Sherman

$$I = \frac{c}{t^n} \quad (2.23)$$

di mana :

$I$  : intensitas hujan (mm/jam)

$t$  : waktu hujan (jam)

$c, n$  : konstanta yang tergantung dari keadaan setempat

(sumber: Hidrologi Untuk Pengairan, Suyono Sosrodarsono)

d. Rumus Ishiguro

$$I = \frac{a}{\sqrt{t+b}} \quad (2.24)$$

di mana :

$I$  : intensitas hujan (mm/jam)

$t$  : waktu hujan (jam)

$a, b$  : konstanta

## 2.4.6 Metode Perhitungan Debit Banjir Rencana

a. Rumus Haspers

Haspers (Iman Subarkah, 1980) menggunakan rumus :

$$Q_n = \alpha \times \beta \times q_n \times A \quad (2.25)$$

$$\alpha = \frac{1 + 0,012 \times A^{0,70}}{1 + 0,075 \times A^{0,70}} \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{t + 3,70 \times 10^{-0,40t}}{t^2 + 15} \times \frac{A^{0,75}}{12} \quad (2.27)$$

$$q_n = \frac{t \times R_n}{3,6 \times t} \quad (2.28)$$

$$t = 0,10 \times L^{0,80} \times I^{-0,30} \quad (2.29)$$

Untuk  $t < 2$  jam digunakan rumus :

$$r = \frac{t \times r}{t + 1 - 0,0008(260 - R)(2 - t)^2} \quad (2.30)$$

Untuk  $t > 2$  jam digunakan rumus :

$$R_n = \frac{t \times R_t}{t + 1} \quad (2.31)$$

di mana :

$Q_n$  : debit banjir rencana periode ulang T tahun ( $m^3/det$ )

$R_n$  : curah hujan harian maksimum rencana periode ulang T tahun (mm/hari)

$\alpha$  : koefisien limpasan air hujan (run off)

$\beta$  : koefisien pengurangan daerah untuk curah hujan DAS

$q_n$  : curah hujan ( $m^3/det.km^2$ )

$A$  : luas daerah aliran sungai DAS ( $km^2$ )

$t$  : lamanya curah hujan (jam) yaitu pada saat-saat kritis curah hujan yang mengacu pada terjadinya debit puncak

$L$  : panjang sungai (km)

$i$  : kemiringan dasar sungai

b. Metode Rasional

Rumus:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3,60} \quad (2.32)$$

di mana:

$C$  : koefisien limpasan air hujan

$I$  : intensitas curah hujan pada saat konsentrasi (mm/jam)

$A$  : Luas DAS ( $km^2$ )

$Q$  : debit maksimum ( $mm^3/dtk$ )

c. Rumus Weduwen

$$Q_n = \alpha \times \beta \times q_n \times A \quad (2.33)$$

$$\alpha = 1 - \frac{4,1}{\beta \times q + 7} \quad (2.34)$$

$$\beta = \frac{120 + \frac{t+1}{t+9} A}{120 + A} \quad (2.35)$$

$$q_n = \frac{R_n}{240} \times \frac{67,65}{t+1,45} \quad (2.36)$$

$$t = 0,25 \times L \times Q_n^{-0,125} \times i^{-0,25} \quad (2.37)$$

di mana :

$Q_n$  : debit banjir ( $m^3/det$ )

$R_n$  : curah hujan harian maksimum (mm/hari)

$\alpha$  : koefisien limpasan air hujan (*run off*)

$\beta$  : koefisien pengurangan daerah untuk curah hujan DAS

$q_n$  : curah hujan ( $m^3/det.km^2$ )

$A$  : luas daerah aliran ( $km^2$ )

$t$  : lamanya curah hujan (jam) yaitu pada saat-saat kritis curah hujan yang mengacu pada terjadinya debit puncak

$L$  : panjang sungai (km)

$i$  : gradien sungai atau medan

## 2.5 PERENCANAAN KONSTRUKSI BANGUNAN PENGENDALI SEDIMEN

### 2.5.1 Prosedur Perencanaan Bangunan Pengendali Sedimen

BPS direncanakan terdiri dari beberapa bagian, antara lain:

1. Perencanaan Peluap
2. Perencanaan *Main Dam*
3. Perencanaan Pondasi
4. Perencanaan Sayap
5. Perencanaan *Sub dam* dan Lantai

### 2.5.2 Perencanaan Peluap

Rumus :

$$Q = 2m_2 \frac{2}{15} \times c \sqrt{2g} (3B_1 + 2B_2) \times h_3^{3/2} \quad (2.38)$$

di mana :

$Q$  : debit rencana

$C$  : koefisien peluap (0,6-0,66)

$g$  : percepatan gravitasi (9,81 m/dtk)

$B_1$  : lebar bagian bawah penampang pelimpah (lebar peluap)(m)

$B_2$  : lebar bagian atas penampang pelimpah (M.A di atas peluap) (m)

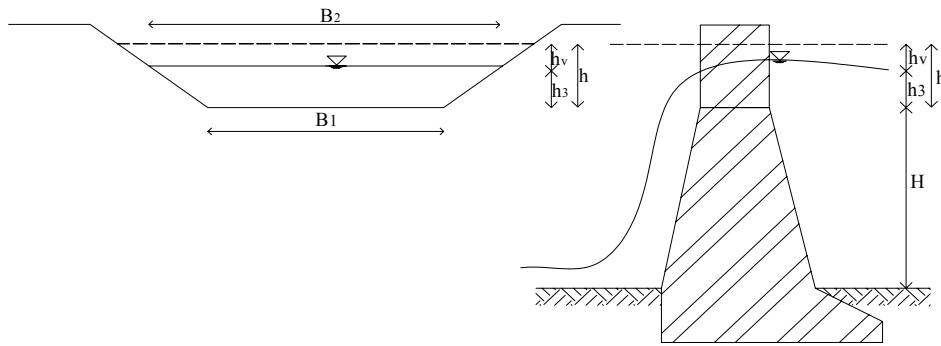
$h_3$  : tinggi air di atas peluap (m)

$m_2$  : kemiringan tepi peluap (0,5)

jika  $m_2 = 0,5$  dan  $c = 0,6$

maka

$$Q = (0,71h + 1,77B_1)h_3^{2/3} \quad (2.39)$$



(a) Penampang melintang peluap

(b) Potongan memanjang peluap

**Gambar 2.3** Penampang peluap

Kecepatan aliran di atas mercu

Rumus :

$$A_1 = \frac{1}{2}(B_1 + B_2) \times h_3 \quad (2.40)$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (2.41)$$

$$h_v = \frac{V_1^2}{2g} \quad (2.42)$$

$$h = h_3 + h_v \quad (2.43)$$

$$d = \frac{2}{3}h \quad (2.44)$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(B_1 + m \times d) \times d \quad (2.45)$$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} \quad (2.46)$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.47)$$

di mana :

H : tinggi *main dam* (m)

$h_3$  : tinggi air di atas peluap (m)

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

$h_v$  : tinggi kecepatan (m)

$d$  : kedalaman air di atas mercu (m)

$A_1$  : luas penampang basah pada ketinggian air setinggi *check dam* (m)

$A_2$  : luas penampang basah pada air diatas *check dam* (m)

$v$  : kecepatan aliran di atas mercu (m/det)

### 2.5.3 Perencanaan *Main Dam*

#### a. Gaya-gaya

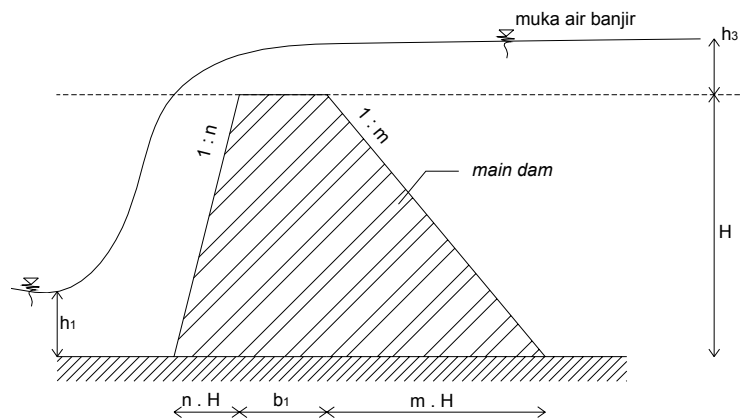
1. berat sendiri (W)
2. gaya tekan air statik (P)
3. gaya tekan endapan sedimen (Ps)
4. gaya angkat (U)
5. gaya inersia dan gempa (I)
6. gaya tekan air dinamik (Pd)

Gaya-gaya untuk keadaan normal dan banjir untuk dua tipe BPS (tinggi dan rendah) adalah :

**Tabel 2.9** Gaya-gaya yang ditinjau untuk keadaan normal dan banjir

Type	normal	Banjir
Dam rendah ( $H < 15,0$ m)	-	W;P
Dam tinggi ( $H > 15,0$ m)	W;Ps;Pd;I	W;P;Ps;U

(sumber : JICA (Japan International Cooperation Agency), 1985)



**Gambar 2.4** Perencanaan Main Dam

1. Berat sendiri (W)

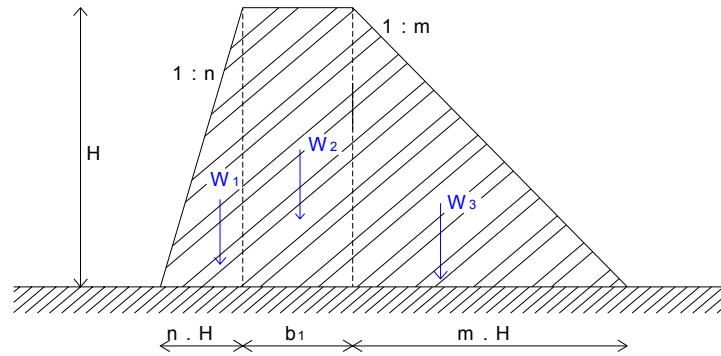
$$W = \gamma_{\text{bahan}} \times A \quad (2.48)$$

di mana :

$W$  : berat sendiri (ton)

$\gamma_{\text{bahan}}$  : berat volume bahan yang digunakan (untuk beton mutu tinggi 2,5 ton/m<sup>3</sup> dan pasangan batu 2,2 ton/m<sup>3</sup>)

$A$  : volume per meter (m<sup>2</sup>)



**Gambar 2.5** Gaya berat sendiri *main dam*

2. Tekanan air statik (P)

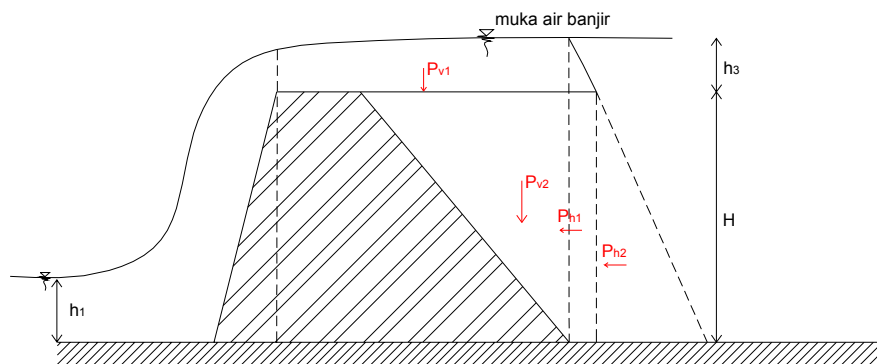
$$P = \gamma_s \times h_w \quad (2.49)$$

di mana :

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

$\gamma_w$  : berat volume air dan sedimen ( $1,5 t/m^3$ )

$h_w$  : kedalaman air (m)



**Gambar 2.6** Gaya tekan air statik

3. Gaya tekan sedimen (Ps)

$$P_{sv} = \gamma_s \times h_e \quad (2.50)$$

$$P_{sh} = C_c \times \gamma_s \times h_e \quad (2.51)$$

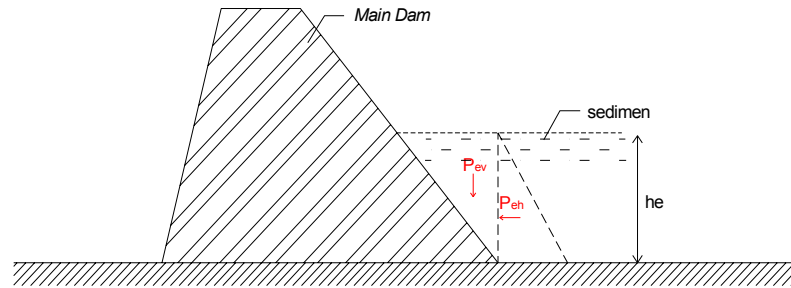
di mana :

$P_{sv}$  : gaya tekan sedimen vertikal ( $t/m^2$ )

$P_{sh}$  : gaya tekan sedimen horizontal ( $t/m^2$ )



- $\gamma_s$  : berat volume sedimen dalam air (1,5 – 1,8 t/m<sup>2</sup>)
- $C_c$  : koefisien gaya tekan tanah aktif (0,3) (*Design Of Sabo Facilities, JICA*)
- $h_e$  : tinggi sedimen (m)



**Gambar 2.7** Gaya tekan sedimen

4. Gaya angkat (U)

$$U_x = H_x - \frac{L_x}{\Sigma L} \times \Delta H \quad (2.52)$$

di mana :

$U_x$  : gaya angkat pada titik  $x$  (t/m<sup>2</sup>)

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

$L_x$  : jarak ke titik  $x$  (m)

$\Delta H$  : beda tinggi antara muka air hulu dengan muka air hilir (m)

$\Sigma L$  : panjang rembesan (m)

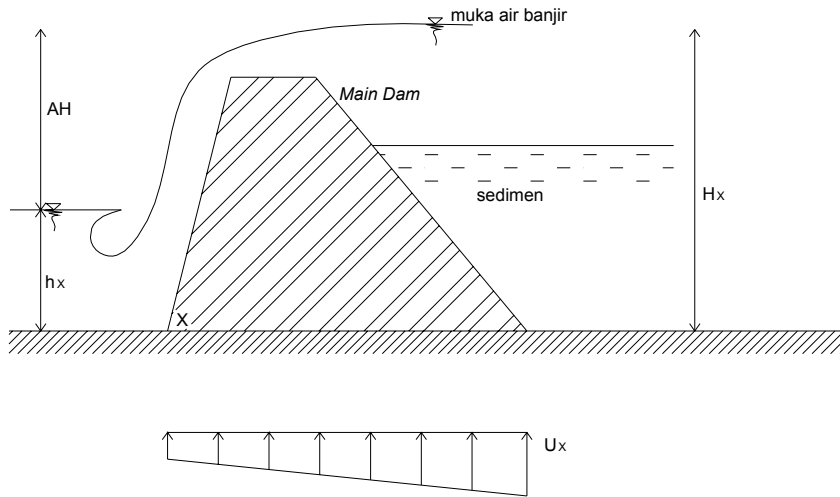
untuk *Lane* :

$$\Sigma L = \frac{1}{3} \Sigma H + \Sigma V \quad (2.53)$$

untuk *Bligh* :

$$\Sigma L = \Sigma H + \Sigma V \quad (2.54)$$

(*Design Of Sabo Facilities, JICA*)



Gambar 2.8 Gaya angkat pada main dam

5. Gaya inersia saat gempa

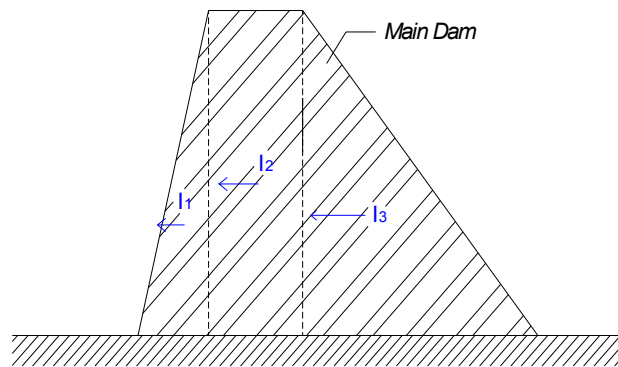
$$I = k \times w \quad (2.55)$$

di mana :

$I$  : gaya inersia oleh gempa

$k$  : koefisien gempa

$w$  : berat sendiri dam/m (t)



Gambar 2.9 Gaya inersia saat gempa

6. Gaya tekan air dinamik

$$P_x = C \times \gamma_w \times K \times h_0 \quad (2.56)$$

$$C = \frac{C_m}{2} \left[ \frac{h_x}{h_0} \left( 2 - \frac{h_x}{h_0} \right) + \sqrt{\frac{h_x}{h_0}} \left( 2 - \frac{h_x}{h_0} \right) \right] \quad (2.57)$$

$$P_d = \eta \times \frac{C_m}{2} \times \gamma_w \times K \times h_0^2 \times \sec \theta \quad (2.58)$$

$$h_d = \lambda \times h_x \quad (2.59)$$

di mana :

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

$P_d$  : gaya tekan air dinamik total dari M.A sampai titik x ( $t/m^2$ )

$\gamma_w$  : berat volume air ( $t/m^3$ )

$k$  : koefisien seismik (0,12)

$h_0$  : kedalaman air dari M.A sampai dasar pondasi (m)

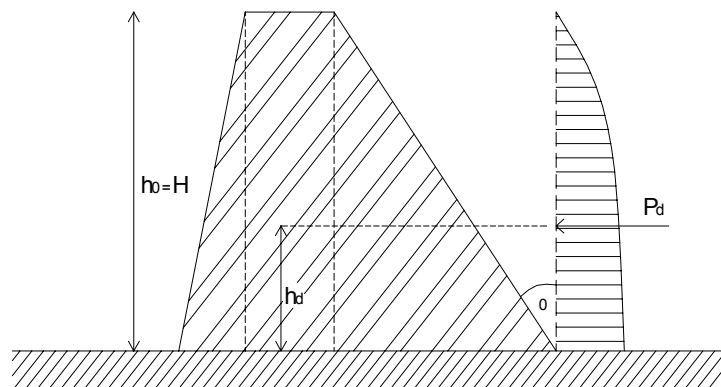
$h_x$  : kedalaman air dari M.A sampai titik x (m)

$h_d$  : jarak vertikal dari x sampai  $P_d$  (m)

$C_m$  : didapat dari grafik, fungsi dari sudut  $\theta$

$\mu, \lambda$  : koefisien yang diperoleh dari grafik

$C$  : koefisien gaya tekan air dinamik



**Gambar 2.10** Gaya tekan air dinamik

b. Lebar mercu peluap

Pada mercu peluap dan pengendali sedimen direncanakan agar aman terhadap pukulan sedimen, jadi harus kuat menahan benturan dan abrasi.

Lebar mercu yang disarankan :

**Tabel 2.10** Lebar mercu peluap

Lebar mercu	B = 1,5-2,5 m	B = 3,0-4,0
Material	Pasir dan kerikil atau pasir dan batu	Batu-batu besar
Hidrologis	Kandungan sedimen sedikit sampai sedimen yang banyak	Debris flow kecil sampai debris flow yang besar

(Sumber: JICA)

c. Penampang

Kemiringan badan *dam* dan pengendali sedimen di hulu 1 : m digunakan rumus :

$H < 15$

$$(1 + \alpha)m^2 + [2(n + \beta) + n(4\alpha + \gamma) + 2\alpha]m - (1 + 3\alpha) + \alpha\beta(4\alpha + \beta) + (3n\beta + \beta^2 + n^2) = 0 \quad (2.60a)$$

$$\alpha = \frac{h_3}{H} \quad (2.60b)$$

$$\beta = \frac{b_1}{H} \quad (2.60c)$$

$$\gamma = \frac{\gamma_{\text{bahan}}}{\gamma_s} \quad (2.60d)$$

di mana :

$\gamma_{\text{bahan}}$  : berat volume bahan bangunan ( $t/m^3$ )

$\gamma_s$  : berat volume air dengan kandungan sedimen ( $1,5 t/m^3$ )

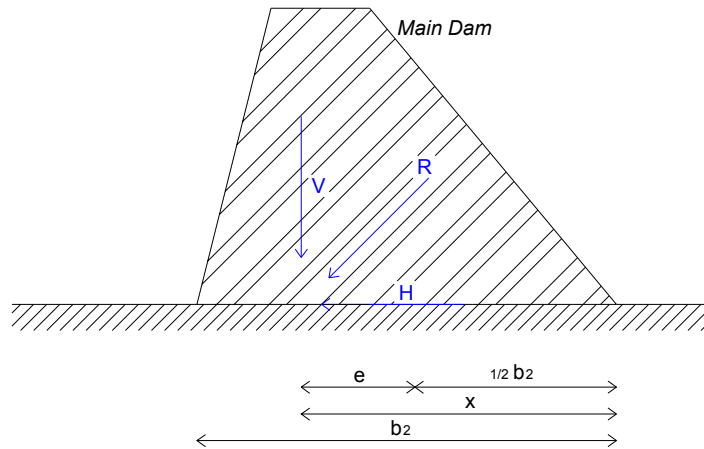
H : tinggi konstruksi (m)

d. Perhitungan stabilitas

1. Resultan (R) gaya harus berada dalam inti

$$x = \frac{M}{V} \quad (2.61)$$

Syarat:  $b_2 < x < 2/3b$



**Gambar 2.11** Resultante gaya-gaya pada main dam

2. Stabilitas terhadap geser

$$SF = \frac{V \times \tan \phi + C \times b_2}{H} \quad (2.62)$$

di mana :

$SF$  : faktor keamanan  $> 1,2$

$V$  : gaya vertikal (ton)

$H$  : gaya horizontal (ton)

$\phi$  : sudut geser tanah ( $^\circ$ )

$C$  : kohesi tanah ( $t/m^2$ )

$b_2$  : panjang bidang geser (m)

3. Stabilitas terhadap guling

$$SF = \frac{M_V}{M_H} \quad (2.63)$$

di mana :

$SF$  : faktor keamanan  $> 1,2$

$M_V$  : jumlah momen gaya vertikal terhadap O (tm)

$M_H$  : jumlah momen horizontal terhadap O (tm)

4. Tegangan pada dasar pondasi

$$\sigma_{12} = \frac{V}{b_2} \left( 1 \pm \frac{6e}{b_2} \right) \quad (2.64)$$

di mana :

$\sigma_{12}$  : tegangan minimum/maksimum pada dasar pondasi ( $t/m^2$ )

$V$  : total gaya vertikal (ton)

$b_2$  : Lebar dasar *chek dam* (m)

$e$  : jarak dari titik sampai tengah R  $\left(x - \frac{b_2}{2}\right)$  dalam meter

#### 2.5.4 Perencanaan Pondasi

a. Dasar pondasi

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

b. Daya dukung pondasi

Tegangan yang terjadi pada dasar pondasi harus lebih kecil dari tegangan yang diperkenankan. Daya dukung yang diperkenankan dapat dilihat di tabel 2.11

Menurut *Terzaghi*, daya dukung keseimbangan tanah dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$q_{ult} = C \times N_c + \gamma \times D \times N_\gamma + 0,5 \times \gamma \times N_q \quad (2.65)$$

dimana :

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

$C$  : kohesi tanah ( $t/m^2$ )

$\gamma$  : berat isi tanah ( $t/m^3$ )

$D$  : kedalaman pondasi (m)

$B$  : lebar pondasi (m)

$N_c, N_\gamma, N_q$  adalah faktor daya dukung tanah yang tergantung dari besarnya sudut geser ( $\phi$ ), didapat dari grafik *Terzaghi*.

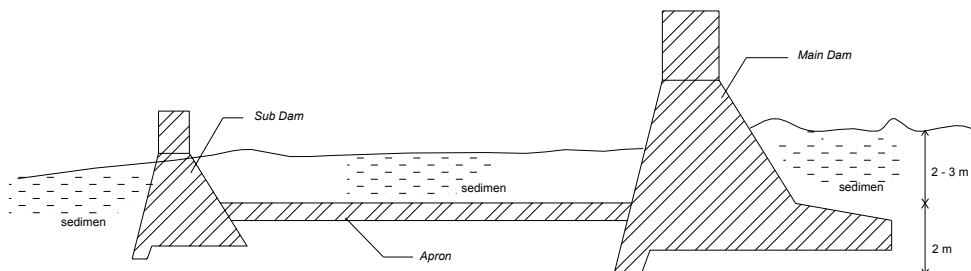
**Tabel 2.11** Daya dukung yang diijinkan

Klasifikasi pondasi		Daya dukung tanah (t/m <sup>3</sup> )	Koefisien geser	Catatan	
				Pengujian desak ( <i>unconfined</i> )	Nilai N
Batuan dasar	Batuan keras dengan sedikit retak	100	0,7	> 1000 t/m <sup>2</sup>	-
	Batuan keras dengan banyak retak	60	0,7	> 1000 t/m <sup>2</sup>	-
	Batuan lunak atau <i>mudstone</i>	30	0,7	> 1000 t/m <sup>2</sup>	-
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 <sup>2</sup>	8-15
	Kurang keras	5	-	5 – 10 t/m <sup>2</sup>	4-8
	Sangat keras	20	0,5	20 - 40 t/m <sup>2</sup>	15-30

(Sumber : Perencanaan Bangunan Pengendali Sedimen, JICA)

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 2.12** Penetrasi pondasi pada *main dam*

d. Kedalaman Pondasi

Rumus :

$$d_1 = \frac{1}{3}(H + h_3) \quad (2.66)$$

di mana :

$d_1$  : kedalaman pondasi (m)

$H$  : tinggi efektif *main dam* (m)

$h_3$  : tinggi muka air di atas peluap (m)

e. Pemeriksaan pipping

Pada dasar pondasi bangunan berupa sedimen sungai harus diperiksa terhadap kemungkinan terjadinya pipping. Pemeriksaan dengan metode *lane*.

$$C_c < \frac{\frac{1}{3}L_H + L_V}{\Delta h} \quad (2.67)$$

di mana :

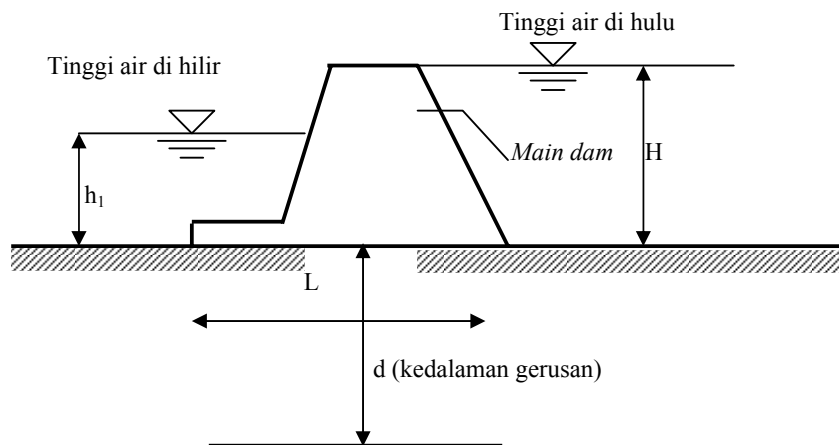
$C_c$  : Angka *creep* untuk *lane* (lihat tabel 2.12)

$L_H$  : panjang lintasan horizontal (m)

$L_V$  : panjang lintasan vertikal (m)

$\Delta h$  : tinggi head (m) =  $H - h_1$

(sumber : Suyono Sosrodarsono, *Perbaikan dan Pengaturan Sungai*)



**Gambar 2.13** Pemeriksaan bahaya pipping



**Tabel 2.12** Angka *Creep* untuk *Lane*

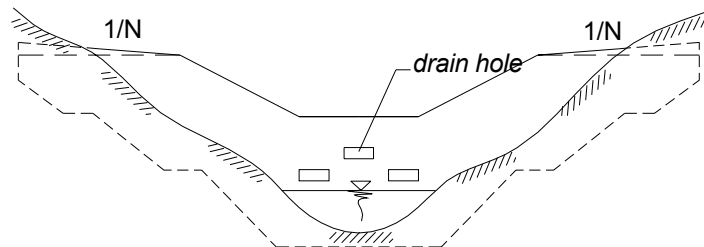
Bahan pondasi	Cv	Cw
Pasir dan lanau sangat halus	18	8,5
Pasir halus	15	7,0
Pasir	-	6,0
Pasir kasar	12	5,0
Kerikil Halus	-	4,0
Kerikil	-	3,5
Campuran pasir dan kerikil	9	-
Kerikil kasar bercampur dengan batu besar	4 – 6	3,0
Batu dan kerikil	-	2,5

(sumber: JICA)

### 2.5.5 Perencanaan Sayap

a. Kemiringan sayap 1 : N

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

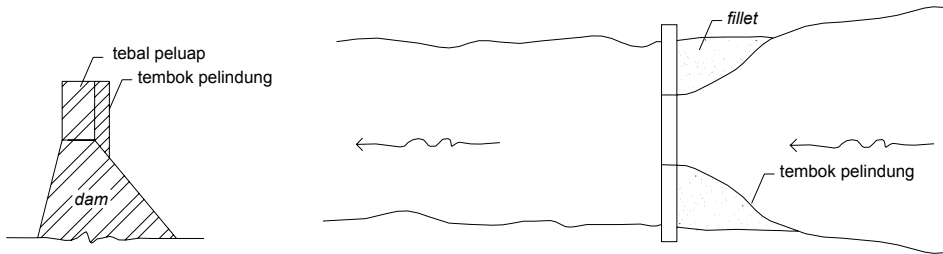


**Gambar 2.14** Kemiringan sayap 1 : N

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 sayap terhadap tegangan yang disebabkan oleh gaya tumbukan dan perlu

dipertimbangkan untuk menambah lebar sayap atau memasang tembok pelindung dibagian hulunya.



**Gambar 2.15** Lebar sayap

c. Tinggi sayap

Tinggi sayap ditetapkan dari besarnya tinggi jagaan. Besarnya tinggi jagaan ditetapkan berdasarkan debit rencana sebagai berikut:

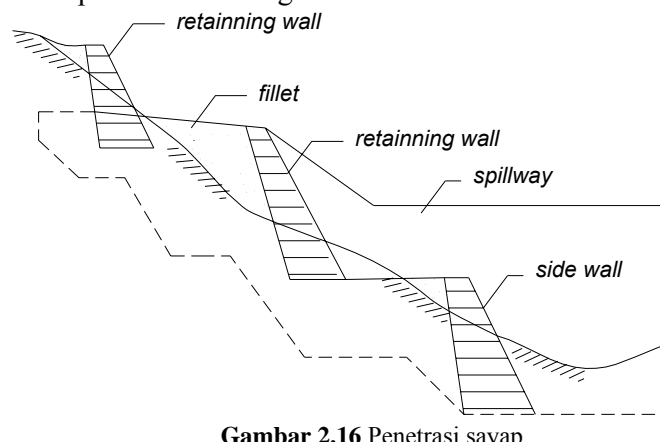
**Tabel 2.13** Tinggi jagaan

Debit rencana(m <sup>3</sup> /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 )

d. Penetrasi sayap

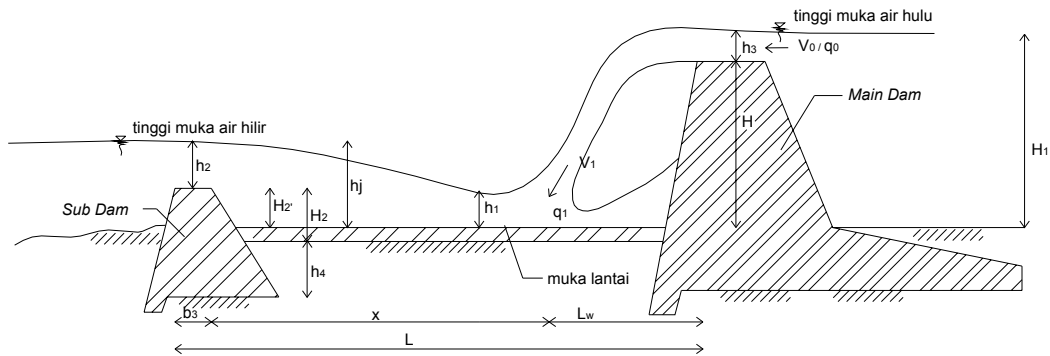
Sayap harus cukup dalam ke tebing.



**Gambar 2.16** Penetrasi sayap

## 2.5.6 Perencanaan Sub Dam dan Lantai

*Sub dam* berfungsi untuk mencegah pondasi dam dan dasar sungai di hilir dari gerusan dan penurunan yang disebabkan oleh terjunan air dan sedimen.



Gambar 2.17. Letak sub dam

### a. Jarak Sub Dam

- Jika *main dam* tidak begitu tinggi

$$L = 1,5 - 2,0 (H + h_3) \quad (2.68)$$

di mana :

$L$  : 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)

- Jika *main dam* cukup tinggi

$$L = L_w + x + b_3 \quad (2.69)$$

di mana :

$L_w$  : panjang terjunan (m)

$x$  : panjang loncatan air (m)

$\beta$  : konstanta (4,5 – 5)

$b_3$  : lebar puncak *sub dam* (m)

$$L_w = V_0 \times \left( \frac{2(H + \frac{1}{2}h_3)}{g} \right)^{1/2} \quad (2.70)$$

di mana :

$V_0$  :  $q_0 / h_3$  (m/detik)

$q_0$  : debit per meter lebar peluap ( $Q/B_1$ ) ( $m^3/detik$ )

$h_3$  : tinggi muka air di atas peluap (m)

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

$g$  : percepatan gravitasi ( $9,8 \text{ m/detik}^2$ )

$$x = \beta \times hj \quad (2.71)$$

di mana :

$\beta$  : koefisien (4,5 s/d 5)

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

$$h_j = \frac{h_1}{2} \left[ \left( \sqrt{1 + 8 \times Fr^2} \right) - 1 \right] \quad (2.72)$$

di mana :

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

$L_w$  : panjang terjunan (m)

$$h_1 = \frac{q_1}{v_1} \quad (2.73)$$

di mana :

$q_1$  : debit per meter lebar pada titik jatuhnya terjunan ( $m^3/detik$ )

$v_1$  : kecepatan terjunan pada titik jatuhnya terjunan (m/detik)

$$q_1 = \frac{Q}{0,5(B_1 + B_2)} \quad (2.74)$$

$$v_1 = \sqrt{2g(H + h_3)} \quad (2.75)$$

$$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}} \quad (2.76)$$

di mana :

$Fr$  : angka *Froude* dari aliran jet pada titik jatuh

(sumber : Perencanaan Bangunan Pengendali Sedimen, JICA)

b. Penampang *Sub Dam*

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

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

c. Tinggi *Sub Dam*

- Jika *main dam* tidak begitu tinggi

Rumus :

$$H' = H_2 + h_4 \quad (2.77)$$

$$H_2 = \left( \frac{1}{3} - \frac{1}{4} \right) H \quad (2.78)$$

di mana :

$H'$  : tinggi *sub dam* (m)

$H_2$  : tinggi *overlapping* (m)

$h_4$  : kedalaman penetrasi (m)

$H$  : tinggi *main dam* (m)

- Jika *main dam* cukup tinggi

Rumus :

$$H' = H_2' + t + h_4 \quad (2.79)$$

$$H_2' = h_j - h_2 \quad (2.80)$$

di mana :

$H'$  : tinggi *sub dam* (m)

$H_2'$  : tinggi *sub dam* dari permukaan apron (m)

$t$  : tebal *apron* (m)

$h_4$  : kedalaman penetrasi (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*

( Sumber : *Sabo Design, DPU* )

d. Tebal Lantai / *Apron*

- Tanpa bantalan air

Rumus :

$$t = 0,2 \times (0,6H + 3h_3 - 1) \quad (2.81)$$

- Dengan bantalan air

Rumus :

$$t = 0,1 \times (0,6H + 3h_3 - 1) \quad (2.82)$$

di mana :

$t$  : tebal lantai (m)

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

$h_3$  : tinggi muka air di atas peluap (m)

(Sumber : *Sabo Design, Dept. Pekerjaan Umum*)

## 2.5.7 Perencanaan Bangunan Pelengkap

a. Konstruksi Tembok Tepi

Dinding tepi berfungsi untuk menahan erosi dan longsor antara *main dam* dan *sub dam* yang disebabkan oleh aliran air atau terjunan. Perencanaan tembok tepi meliputi :

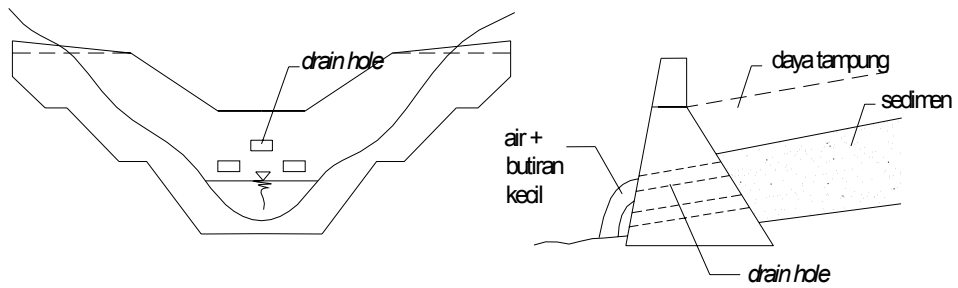
- Elevasi pondasi tembok tepi direncanakan sama dengan elevasi lantai terjun, tetapi harus terletak di luar titik jauh dari *main dam*.
- Kemiringan standar  $V : H = 1 : 0,5$
- Ketinggian tembok tepi direncanakan sama dengan atau sedikit lebih tinggi dari ketinggian sayap *sub dam*.

b. Lubang Drainase (*Drain Hole*)

Maksud dari pembuatan lubang drainase adalah sebagai berikut :

- Berfungsi 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 datang.
- Umumnya lebar lubang drainase diambil 0,5 s/d 1 meter.



**Gambar 2.18.** *Drain hole*