

BAB III

TINJAUAN PUSTAKA

3.1. Tinjauan Umum

Secara kasat mata kelongsoran yang terjadi di sepanjang alur Sungai Luk Ulo diakibatkan oleh ketidakstabilan alur akibat adanya gerusan oleh air. Namun demikian tetap perlu diadakan pengujian terhadap kondisi tanah pada titik-titik longsor untuk mengetahui apakah longsor yang terjadi juga disebabkan oleh faktor keamanan tebing yang kecil sehingga tebing menjadi tidak stabil. Untuk mencari penyebab kerusakan tebing ini diperlukan analisa dari berbagai disiplin ilmu. Disiplin ilmu tersebut adalah Hidrologi, Hidrolika, Transportasi Sedimen, dan Geoteknik.

Hidrologi digunakan untuk mengolah data curah hujan. Data curah hujan yang ada dianalisis sehingga didapatkan besarnya curah hujan daerah untuk setiap tahun. Data-data curah hujan daerah ini kembali dianalisis untuk mendapatkan besar curah hujan rencana. Berdasarkan curah hujan rencana ini kemudian dihitung besarnya intensitas hujan yang terjadi. Setelah besar curah hujan rencana dan intensitas hujan diketahui, maka debit banjir rencana dapat dihitung.

Hidrolika digunakan dalam perhitungan tinggi muka air dan kecepatan aliran. Hidrolika juga digunakan dalam menghitung *passing capacity* guna mendapatkan debit pembanding yang perhitungannya didasarkan pada tinggi muka air hasil pengamatan di lapangan. Analisis hidrolika pada penelitian ini menggunakan program *HEC-RAS*. Dalam menghitung *passing capacity* digunakan beberapa nilai debit coba-coba sebagai *input HEC-RAS*. Dari beberapa *input* ini akan diperoleh suatu nilai debit yang menghasilkan *output* berupa nilai tinggi muka air yang paling mendekati tinggi muka air pengamatan lapangan. Nilai debit inilah yang akan dijadikan sebagai pembanding debit hasil analisis hidrologi. Perhitungan tinggi muka air rencana didasarkan pada debit hasil analisis hidrologi yang paling mendekati debit pembanding hasil perhitungan *passing capacity*.

Transportasi sedimen digunakan untuk menganalisis pengaruh aliran air terhadap stabilitas alur sungai. Dengan diketahuinya tinggi muka air maksimum

yang akan terjadi dan sifat-sifat material butiran pada suatu alur sungai, maka bisa dianalisis apakah terjadi erosi pada alur sungai atau tidak terjadi.

Geoteknik dikhususkan untuk menguji stabilitas tebing sungai terhadap tekanan tanah. Tebing yang memiliki stabilitas kecil memiliki potensi longsor lebih besar. Tanpa ada aliran sungai dibawahnya pun, tebing yang memiliki stabilitas kecil dapat mengalami kelongsoran. Hal ini sering terjadi pada tebing-tebing di lokasi perumahan atau pada jalan raya. Untuk memudahkan analisis, pengujian stabilitas tebing pada penelitian ini menggunakan program *GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*.

Berdasarkan hasil analisis stabilitas alur dan stabilitas tebing ini kemudian ditentukan yang dianggap sebagai penyebab kelongsoran. Penyebab kelongsoran bisa salah satu dari kedua faktor tersebut. Namun tidak tertutup kemungkinan keduanya menjadi penyebab kelongsoran.

Konstruksi penanganan kerusakan tebing dipilih berdasarkan penyebab terjadinya kerusakan. Jika hasil analisis menyatakan bahwa kerusakan tebing yang terjadi diakibatkan oleh alur sungai yang tererosi, maka alternatif konstruksi yang dapat digunakan sebagai pelindung tebing sungai adalah *revetment* bronjong batu, krib bronjong batu atau *shootcrete*.

Jika hasil analisis menyatakan bahwa kerusakan yang terjadi diakibatkan oleh kecilnya stabilitas tebing, maka alternatif konstruksi yang dapat digunakan adalah konstruksi *grouting* dan *nailing*, konstruksi dinding penahan tanah, konstruksi *sheet pile*, atau konstruksi bronjong batu.

Terjadinya kerusakan pelindung tebing sungai pada umumnya diawali oleh kerusakan pondasi yang ditandai oleh tergerusnya dasar sungai. Karena itu perlu dibuat suatu konstruksi pengaman dasar sungai untuk mencegah penggerusan dasar sungai dan untuk mengurangi kecepatan arus air di depan perkuatan tebing sungai.

3.2. Dasar Teori Analisis Hidrologi

Hidrologi adalah suatu ilmu yang membahas mengenai sirkulasi air yang ada di bumi, yang meliputi kejadiannya, distribusinya, pergerakannya, sifat-sifat fisik dan kimianya, serta hubungannya dengan lingkungan kehidupan.

Pengamatan hidrologi merupakan hal yang sangat kompleks karena dipengaruhi hujan yang sifatnya acak dan merupakan proses yang tidak pasti. Maka harus diterapkan ilmu statistik untuk menyaring sejumlah data hidrologi hasil pengukuran yang kritis kemudian dilakukan pengujian. Karena itulah ilmu hidrologi bukanlah ilmu yang eksak tetapi merupakan ilmu yang bersifat menafsirkan. Perhitungan data hujan diperlukan untuk menentukan besarnya curah hujan rencana yang berpengaruh pada besarnya debit air yang mengalir melalui suatu sungai.

Ilmu hidrologi diperlukan untuk menentukan desain parameter yang menunjang masalah keteknikan yaitu perencanaan, perancangan, dan pengoperasian, terutama untuk bangunan hidraulik atau bangunan fisik yang lain. Untuk bidang teknik sumber daya air maka desain parameter cukup dinamik dan hanya merupakan perkiraan sehingga masih diperlukan wawasan yang cukup luas. Lain halnya dengan bidang struktur dimana parameternya sudah lebih pasti. Biasanya kalau untuk sesuatu yang sangat penting (misalnya menentukan tanggul banjir), desain parameter diestimasi dengan beberapa cara sehingga ada beberapa desain alternatif. Desain parameter ini dapat berubah jika lingkungannya berubah dan tergantung pada banyak faktor.

3.2.1. Metode Perhitungan Curah Hujan Daerah

Metode yang digunakan dalam penelitian ini untuk menghitung curah hujan daerah adalah dengan metode *Thiessen*. Cara ini memperhitungkan luas daerah yang diwakili oleh stasiun yang bersangkutan, untuk digunakan sebagai faktor dalam menghitung hujan rata-rata. Poligon didapat dengan cara menarik garis hubung antara masing-masing stasiun, kemudian menarik garis-garis sumbunya.

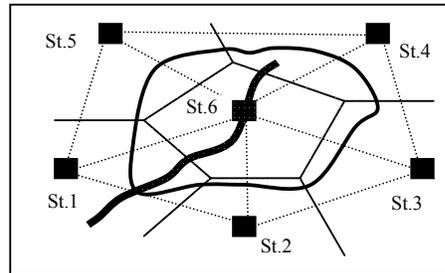
$$\text{Rumus: } R = \sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot R_i \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$C_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

dimana: R = Curah hujan maksimum rata-rata (mm)
 C_i = Koefisien *Thiessen* pada stasiun i

A_i = Luas DAS stasiun i (km^2)

R_i = Curah hujan pada stasiun i (mm)



Gambar 3.1. Metode Poligon *Thiessen*

Keterangan:

- : Batas Daerah Aliran Sungai (DAS)
- : Aliran air sungai
- : Garis Poligon
- : Garis hubung antar stasiun
- : Stasiun hujan

Curah hujan yang dipakai adalah curah hujan harian maksimum dalam satu tahun yang terjadi pada stasiun pengukur dengan luas daerah tangkapan dominan. Sedangkan untuk stasiun pengukur yang lain, curah hujan harian yang terpakai adalah curah hujan harian yang terjadi pada hari yang sama dengan hari terjadinya curah hujan maksimum pada stasiun tersebut.

3.2.2. Metode Perhitungan Curah Hujan Rencana

Untuk mendapatkan data curah hujan rencana yang akurat, maka diperlukan adanya pembandingan. Makin banyak pembandingan maka makin akurat data tersebut.

a. Pengujian Sebaran

Dalam pengujian sebaran dikenal beberapa metode distribusi sebaran, yaitu Distribusi Normal, Distribusi Log Normal, Distribusi Gumbel, Dan Distribusi Log *Pearson* Tipe III. Untuk menentukan distribusi sebaran yang akan

digunakan, diperlukan syarat-syarat statistik. Syarat-syarat tersebut dapat dilihat dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Pedoman Umum Penggunaan Metode Distribusi Sebaran

No.	Jenis Sebaran	Syarat
1	Normal	$C_s = 0$; $C_k = 3$
2	Log Normal	$C_s = 1,104$; $C_k = 5,24$
3	Gumbel	$C_s \approx 1,14$; $C_k \approx 5,4002$
4	Log <i>Pearson</i> Tipe III	$C_s \neq 0$; $C_{V1} = 0,3$

Sumber: Soewarno, 1995

Data statistik yang diperlukan:

a) Standar deviasi

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

b) Koefisien *Skewness*

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)S_x^3} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

c) Koefisien *Kurtosis*

$$C_k = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)S_x^4} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

d) Koefisien variasi

$$C_v = \frac{S_x}{\bar{x}} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

dimana: S_x = Standar deviasi

C_s = Koefisien *Skewness*

C_k = Koefisien *Kurtosis*

C_v = Koefisien variasi

x_i = Hujan harian maksimum daerah (mm)

\bar{x} = Hujan harian maksimum daerah rata-rata (mm)

n = Banyaknya data

b. Distribusi Sebaran

Setelah didapatkan standar deviasi (S_x), koefisien *Skewness* (C_s), koefisien *Kurtosis* (C_k), koefisien variasi (C_v) dari data curah hujan, maka sesuai dengan syarat-syarat statistik yang terdapat pada Tabel 3.1, akan didapatkan metode yang akan digunakan untuk pengujian sebaran dalam perhitungan curah hujan rencana. Keempat metode tersebut adalah *Log Pearson Tipe III*, *Normal*, *Log Normal*, dan *Gumbel*.

1. Metode Log Pearson Tipe III

Rumus: $LogX = Log\bar{x} + k.S_{Logx}$ (3.7)

$$S_{Logx} = \sqrt{\frac{\sum Log(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$
 (3.8)

$$C_s = \frac{n \sum Log(x_i - \bar{x})^3}{(n - 1)(n - 2)S_{Logx}^3}$$
 (3.9)

dimana: X = Curah hujan rencana dengan periode ulang T tahun (mm)

Log x_i = Hujan harian maksimum daerah dalam logaritmik

Log \bar{x} = Hujan harian maksimum daerah rata-rata dalam logaritmik

$S_{log x}$ = Standar deviasi dalam logaritmik

k = Karakteristik distribusi peluang *Log Pearson Tipe III* (dapat dilihat pada Lampiran Tabel LT 3.1)

C_s = Koefisien kemencengan

n = Banyaknya data

2. Metode Normal

Rumus: $X_t = \bar{x} + U \cdot S_x$ (3.10)

dimana: X_t = Curah hujan rencana dengan periode ulang T tahun (mm)

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

S_x = Standar deviasi

U = *Standard Variable*, tergantung pada nilai T tahun (dapat dilihat pada Tabel 3.2)

Tabel 3.2. Hubungan Periode Ulang (T) Dengan *Standard Variable* (U)

Periode Ulang (T)	<i>Standard Variable</i> (U)
5	1,64
10	1,26
15	1,63
20	1,89
25	2,10
50	2,75

Sumber: Imam Subarkah, 1978

3. Metode Gumbel

Rumus: $x_t = \bar{x} + k.S_x$ (3.11)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$
 (3.12)

$$k = \frac{Y_t + Y_n}{S_n}$$
 (3.13)

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$
 (3.14)

$$Y_t = -Ln \left\{ Ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right\}$$
 (3.15)

- dimana:
- x_t = Curah hujan dengan periode ulang t tahun (mm)
 - \bar{x} = Curah hujan rata-rata (mm)
 - S_x = Standar deviasi
 - Y_t = *Reduced Variate*, tergantung dari nilai T periode ulang (dapat dilihat pada Tabel 3.3)
 - T = Periode ulang (tahun)
 - Y_n = Nilai rata-rata *reduced variate mean*, tergantung dari banyaknya data (n) (dapat dilihat pada Tabel 3.4)
 - S_n = Standar deviasi dari *reduced variate mean*, tergantung

Dari banyaknya data (n) (dapat dilihat pada Tabel 3.4)

n = Banyaknya data

Tabel 3.3. Hubungan T Dengan Y_t

T	Y_t
2	0,3065
5	1,4999
10	2,2504
20	2,9702
50	3,9019
100	4,6001
200	5,2958
500	6,2136
1000	6,9072

Sumber: CD Soemarto, 1995.

Tabel 3.4. Hubungan *Reduced Variate Mean* (Y_n) Dan *Reduced Deviation* (S_n) Dengan Banyaknya Data (n)

n	Y_n	S_n	n	Y_n	S_n
10	0,4952	0,9497	65	0,5535	1,1803
15	0,5128	1,0206	70	0,5548	1,1854
20	0,5236	1,0628	75	0,5559	1,1898
25	0,5309	1,0915	80	0,5569	1,1938
30	0,5362	1,1124	85	0,5578	1,1973
35	0,5402	1,1285	90	0,5586	1,2007
40	0,5436	1,1413	95	0,5593	1,2038
45	0,5436	1,1519	100	0,5600	1,2065
50	0,5485	1,1607	200	0,5672	1,2360
55	0,5504	1,1681	500	0,5724	1,2590
60	0,5521	1,1745	1000	0,5745	1,2690

Sumber: CD Soemarto, 1995.

4. Metode Log Normal

Distribusi Log Normal yang digunakan yaitu Distribusi Log Normal 2 Parameter.

$$\text{Rumus: } \text{Log}X = \text{Log}\bar{x} + Y.S_{\text{Log}x} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

$$\text{Log}\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Log}x_i}{n} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$S_{\text{Log}x} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{Log}x_i - \text{Log}\bar{x})^2 \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

$$Cv = \frac{S_{\text{Log}x}}{\text{Log}\bar{x}} \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

dimana: X = Curah hujan rencana dengan periode ulang T tahun (mm)

Y = Faktor frekuensi dari log normal 2 parameter sebagai fungsi dari koefisien variasi dan periode ulang T tahun (dapat dilihat pada Lampiran Tabel LT 3.2)

Cv = Koefisien variasi

n = Banyaknya data

Log x_i = Curah hujan dalam logaritmik

Log \bar{x} = Curah hujan rata-rata dalam logaritmik

S_{log x} = Standar deviasi dalam logaritmik

Setelah didapatkan distribusi sebaran yang memenuhi syarat sesuai dengan data statistik, selanjutnya dilakukan uji sebaran dengan metode *Chi* Kuadrat. Pengujian kecocokan sebaran adalah untuk menguji apakah sebaran yang dipilih dalam pembuatan kurva cocok dengan sebaran empirisnya.

Uji *Chi* Kuadrat dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi peluang yang telah dipilih dapat mewakili distribusi statistik data yang dianalisa.

$$\text{Rumus: } X^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Of - Ef}{Of} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

dimana: X^2 = Harga *Chi* Kuadrat

Ef = Banyaknya frekuensi yang terbaca pada tiap kelas

Of = Banyaknya frekuensi yang diharapkan

n = Jumlah data

Prosedur yang digunakan dalam metode *Chi* Kuadrat adalah:

1. Urutkan data pengamatan (x) dari besar ke kecil

2. Hitung jumlah kelas yang ada, yaitu:

$$K = 1 + (3,322 \cdot \text{Log } n) \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

3. Hitung nilai frekuensi yang diharapkan, yaitu:

$$Of = \frac{\sum n}{\sum K} \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

4. Menentukan panjang kelas (Δx), yaitu

$$\Delta x = \frac{x_{\text{terbesar}} - x_{\text{terkecil}}}{K - 1} \quad \dots\dots\dots (3.23)$$

5. Menentukan nilai awal kelas terendah, yaitu:

$$x_{\text{awal}} = x_{\text{terkecil}} - \frac{1}{2} \Delta x \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

6. Hitung nilai *Chi* Kuadrat (X^2) untuk setiap kelas, kemudian hitung nilai total X^2

Nilai *Chi* Kuadrat (X^2) dari perhitungan harus lebih kecil dari nilai *Chi* Kuadrat kritis (X^2_{Cr}) pada Tabel 3.5 untuk derajat kebebasan tertentu.

$$\text{Rumus: } DK = K - (P + 1) \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

dimana: DK = Derajat kebebasan

K = Jumlah kelas

P = Banyaknya keterikatan;

- nilai P = 2, untuk distribusi normal dan log normal
- nilai P = 1, untuk distribusi *Pearson* dan Gumbel

Tabel 3.5. Nilai *Chi* Kuadrat Kritis (X^2_{Cr})

Dk	Derajat Kepercayaan (α)							
	0,995	0,99	0,975	0,95	0,05	0,025	0,01	0,005
1	0,0000393	0,000157	0,000982	0,00393	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,0100	0,020	0,0506	0,103	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,0717	0,115	0,216	0,352	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	9,488	11,142	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	11,070	12,832	15,086	16,750

Sumber: Soewarno, 1995

Interpretasi hasil uji:

- 1). Apabila derajat kepercayaan (α) lebih dari 5%, maka persamaan distribusi yang digunakan dapat diterima,
- 2). Apabila derajat kepercayaan (α) kurang dari 1%, maka persamaan distribusi yang digunakan tidak dapat diterima,
- 3). Apabila derajat kepercayaan (α) berada di antara 1 - 5%, maka tidak mungkin mengambil keputusan, misal perlu data tambahan.

3.2.3. Perhitungan Intensitas Curah Hujan

Intensitas curah hujan adalah ketinggian curah hujan yang terjadi pada suatu kurun waktu dimana air tersebut berkonsentrasi. Analisis intensitas curah hujan ini dapat diproses dari data curah hujan yang telah terjadi pada masa lampau. Untuk menghitung intensitas curah hujan digunakan metode menurut DR. Mononobe, yaitu :

$$I = \frac{R_{24}}{24} x \left[\frac{24}{t} \right]^{2/3} \quad \dots\dots\dots (3.26)$$

- dimana: I = Intensitas curah hujan (mm/jam)
R₂₄ = Curah hujan maksimum dalam 24 jam (mm)
t = Lamanya curah hujan (jam)

3.2.4. Perhitungan Debit Banjir Rencana

Metode yang digunakan untuk menghitung debit banjir rencana adalah metode Rasional dan metode *Haspers*.

a. Metode Rasional

Metode rasional dapat dinyatakan secara aljabar dengan persamaan berikut:

$$Q = 0,278 x C x I x A \quad \dots\dots\dots (3.27)$$

- dimana: Q = Debit banjir rencana (m³/dt)
C = Koefisien pengaliran
I = Intensitas hujan maksimum selama waktu konsentrasi (mm/jam)
A = Luas daerah aliran (km²)

Koefisien pengaliran (C) tergantung pada beberapa faktor antara lain jenis tanah, kemiringan, luas dan bentuk pengaliran sungai. Besarnya nilai koefisien pengaliran dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6. Nilai Koefisien Pengaliran

Kondisi daerah pengaliran	Koefisien pengaliran (C)
Daerah pegunungan bertebing terjal	0,75 – 0,90
Daerah perbukitan	0,70 – 0,80
Tanah bergelombang dan bersemak-semak	0,50 – 0,75
Tanah dataran yang digarap	0,45 – 0,65
Persawahan irigasi	0,70 – 0,80
Sungai di daerah pegunungan	0,75 – 0,85
Sungai kecil di dataran	0,45 – 0,75
Sungai yang besar dengan wilayah pengaliran lebih dari seperduanya terdiri dari dataran	0,50 – 0,75

Sumber : CD Soemarto, 1995.

b. Metode *Haspers*

Rumus: $Q = \alpha \cdot \beta \cdot qn \cdot A$ (3.28)

$$qn = \frac{r}{3,6 \cdot t} \quad \text{..... (3.29)}$$

$$r = \frac{t \cdot R_{24}}{t + 1 - 0,0008(360 - R_{24})(2 - t)^2}; \text{ untuk } t < 2 \text{ jam} \quad \text{..... (3.30-a)}$$

$$r = \frac{t \cdot R_{24}}{t + 1}; \text{ untuk } 2 \text{ jam} \leq t \leq 19 \text{ jam} \quad \text{..... (3.30-b)}$$

$$r = 0,707 \cdot R_{24} \cdot \sqrt{t + 1}; \text{ untuk } 19 \text{ jam} < t \leq 30 \text{ hari} \quad \text{..... (3.30-c)}$$

$$t = 0,1 \cdot L^{0,8} \cdot I^{-0,3} \quad \text{..... (3.31)}$$

$$I = \frac{H}{L} \quad \text{..... (3.32)}$$

$$\alpha = \frac{1 + 0,012 \cdot A^{0,7}}{1 + 0,075 \cdot A^{0,7}} \quad \text{..... (3.33)}$$

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{1 + 3,7 \cdot 10^{-0,4 \cdot t}}{t^2 + 15} \cdot \frac{A^{0,75}}{12} \quad \dots\dots\dots (3.34)$$

- dimana: Q = Debit rencana (m³/dt)
 α = Koefisien *Run Off*
 β = Koefisien reduksi
A = Luas DAS (km²)
qn = Hujan maksimum (m³/dt/km²)
R₂₄ = Intensitas curah hujan (mm/jam)
r = Curah hujan (mm)
t = Waktu konsentrasi (hari)
I = Kemiringan sungai
L = Panjang aliran sungai (m)
H = Beda tinggi titik terjauh dengan lokasi pengamatan (m)

3.3. Dasar Teori Analisis Hidrolika

Pada kasus sungai alam, tipe aliran yang ada adalah aliran tidak seragam (*non uniform flow*). Aliran sungai alam bisa dianggap sebagai aliran mantap (*steady flow*) maupun aliran tak mantap (*unsteady flow*). Pada teori analisa hidrolika ini, aliran dianggap sebagai aliran mantap (*steady flow*).

Profil muka air dihitung dengan cara membagi saluran menjadi bagian-bagian saluran yang pendek, lalu menghitung secara bertahap dari satu ujung ke ujung saluran lainnya. Cara atau metode ini biasa disebut sebagai Metode Tahapan Langsung atau *Direct Step Methods*.

Gambar 3.2 melukiskan bagian saluran sepanjang Δx , tinggi energi total di kedua ujung penampang 1 dan penampang 2 dapat disamakan sebagai berikut:

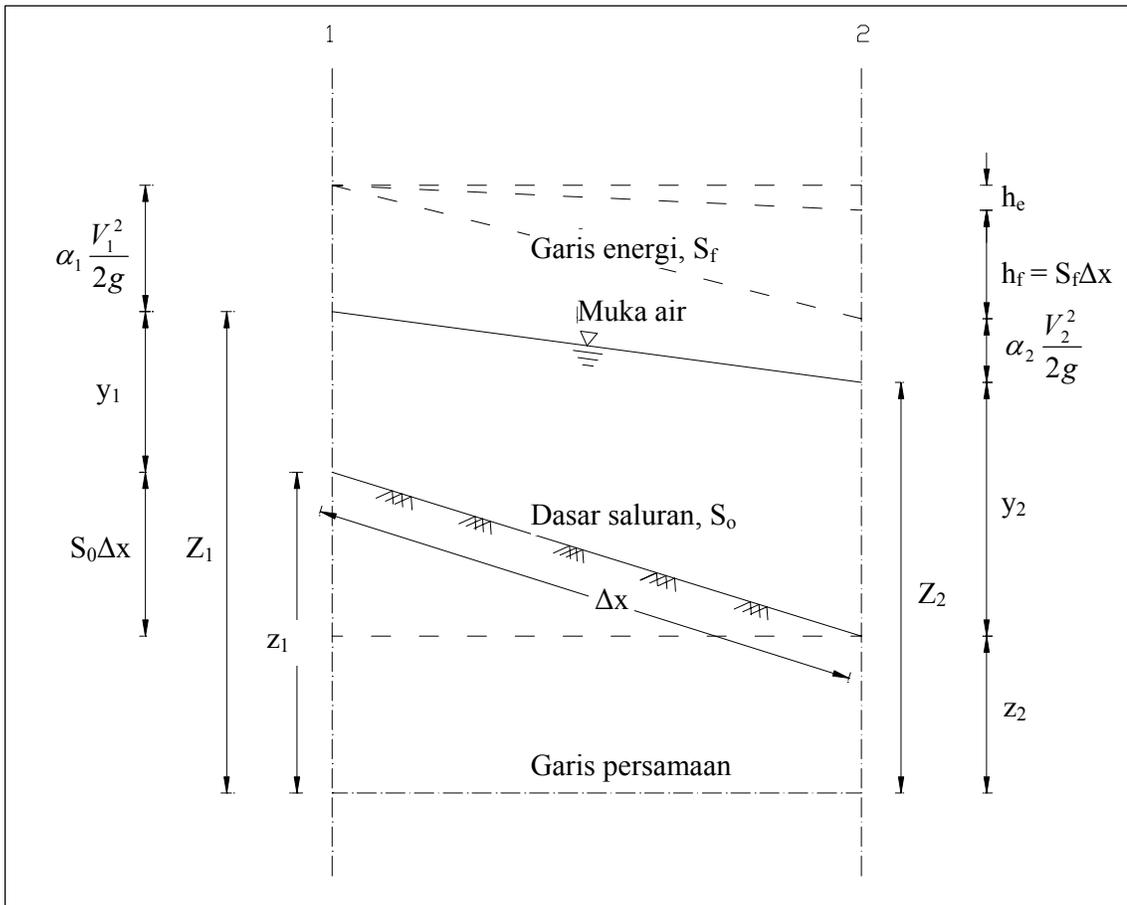
$$S_o \Delta x + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + S_f \Delta x \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_o - S_f} = \frac{\Delta E}{S_o - S_f} \quad \dots\dots\dots (3.36)$$

dengan E energi spesifik, dan dianggap $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$,

$$E = y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (3.37)$$

- dimana: y = Kedalaman aliran (m)
 V = Kecepatan rata-rata (m/dt)
 α = Koefisien energi
 S_0 = Kemiringan dasar
 S_f = Kemiringan geser



Sumber: Ven Te Chow, 1985

Gambar 3.2. Bagian Saluran Sepanjang Δx

Bila dipakai rumus *Manning*, kemiringan geser dinyatakan sebagai berikut:

$$S_f = \frac{n^2 \cdot V^2}{2,22 \cdot R^{4/3}} \quad \dots\dots\dots (3.38)$$

dimana R adalah jari-jari hidrolis.

Besarnya nilai V pada kedua penampang dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} ; V_2 = \frac{Q}{A_2} \quad \dots\dots\dots (3.39)$$

dimana: V_1 = Kecepatan aliran pada penampang 1 (m/dt)

V_2 = Kecepatan aliran pada penampang 2 (m/dt)

Q = Debit aliran (m^3/dt)

A_1 = Luas basah penampang 1 (m^2)

A_2 = Luas basah penampang 2 (m^2)

3.4. HEC-RAS

HEC-RAS adalah sistem *software* terintegrasi, yang didesain untuk digunakan secara interaktif pada kondisi tugas yang beraneka macam. Sistem ini terdiri dari *interface* grafik pengguna, komponen analisa hidrolika terpisah, kemampuan manajemen dan tampungan data, fasilitas pelaporan dan grafik.

Sistem *HEC-RAS* pada akhirnya akan memuat tiga komponen analisa hidrolika satu dimensi untuk:

- (1) Perhitungan profil muka air aliran seragam (*steady flow*),
- (2) Simulasi aliran tidak seragam,
- (3) Perhitungan transport sedimen dengan batas yang bisa dipindahkan.

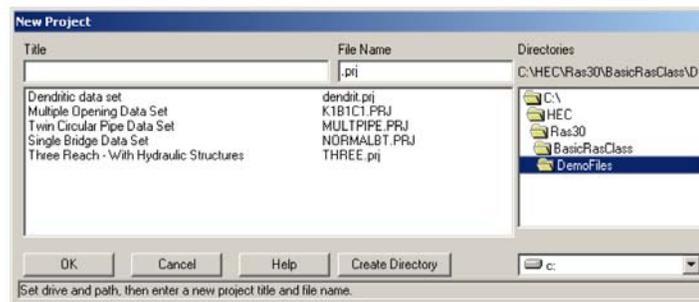
Ketiga komponen tersebut akan menggunakan representasi data geometri serta perhitungan hidrolika dan geometri seperti pada umumnya. Versi terakhir dari *HEC-RAS* yaitu *HEC-RAS 3.1.3* mendukung perhitungan profil muka air aliran tunak dan tidak tunak.

Terdapat lima langkah penting dalam membuat model hidrolika dengan menggunakan *HEC-RAS*:

- Memulai proyek baru
- Memasukkan data geometri
- Memasukkan data aliran dan kondisi batas
- Melakukan perhitungan hidrolika
- Menampilkan dan mencetak hasil

3.4.1. Memulai Pekerjaan Baru

Langkah pertama dalam mengembangkan model hidrolika dengan *HEC-RAS* adalah menetapkan direktori yang diinginkan untuk memasukkan judul dan menyimpan pekerjaan atau proyek baru. Untuk mengawali proyek baru, buka *file* menu pada jendela utama *HEC-RAS* dan pilih *New Project*, Akan muncul tampilan *New Project* seperti berikut:



Sumber: *User's Manual HEC-RAS*

Gambar 3.3. Jendela *New Project*

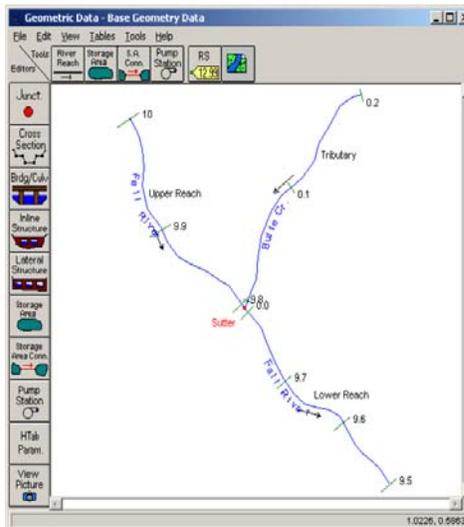
Seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3 langkah pertama dipilih *drive* dan *path* tempat pekerjaan akan disimpan (untuk memilih, *double click directory* yang diinginkan pada kotak *directories*), kemudian masukan judul proyek dan nama *file*. Nama *file* harus dengan ekstensi “**.prj**”. Kemudian tekan “**OK**” . Setelah tombol “**OK**” ditekan, muncul *message box* yang menampilkan judul dan *directory* tempat pekerjaan disimpan. Jika informasi dalam *message box* benar, tekan “**OK**”. Jika sebaliknya tekan “**cancel**” untuk kembali ke tampilan *New Project*.

3.4.2. Memasukkan Data Geometri

Sebelum data geometri dan data aliran dimasukkan, harus ditentukan terlebih dahulu Sistem Satuan (*English* atau *Metric*) yang akan dipakai. Langkah ini dilakukan dengan memilih *Unit System* dari menu *Option* pada jendela utama *HEC-RAS*.

Langkah selanjutnya adalah memasukkan data geometri yang diperlukan, yang terdiri dari skema sistem sungai, data *cross section*, dan data bangunan hidrolika (jembatan, gorong-gorong, dsb.) Data geometri dimasukan dengan

memilih **Geometric Data** pada menu **Edit** pada jendela utama. Setelah opsi ini terpilih, jendela geometri data akan muncul seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4. (ketika anda membuka pekerjaan baru, layar akan kosong).



Sumber: *User's Manual HEC-RAS*

Gambar 3.4. Jendela Geometri Data

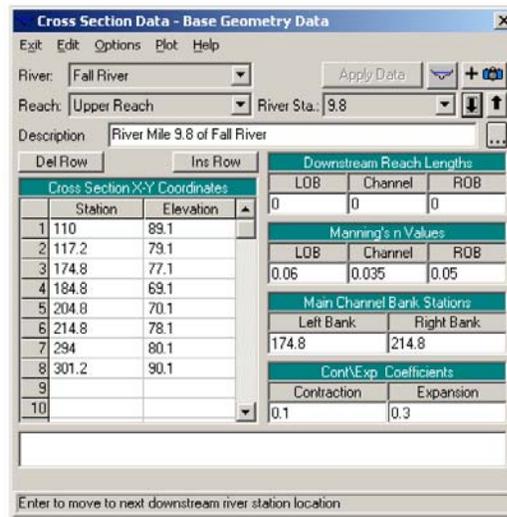
a. Menggambar Skema Alur Sungai

Langkah pertama dalam memasukkan data geometri adalah menggambar skema sistem sungai. Ini dilakukan garis demi garis, dengan menekan tombol **River Reach** dan kemudian menggambar alur dari hulu ke hilir (dalam arah positif). Setelah alur digambar, masukkan nama sungai dan ruas (*reach*). Jika terdapat pertemuan antara ruas sungai, masukan pula nama titik pertemuan (*junction*) tersebut.

b. Memasukkan Data *Cross Section*

Setelah skema sistem sungai tergambar, selanjutnya memasukkan data *cross-section* dan data bangunan hidrolika. Tekan tombol **Cross Section** akan memunculkan *editor cross section*. *Editor* ini seperti ditampilkan pada Gambar 3.5. Seperti pada tampilan, setiap *cross-section* memiliki nama sungai (*River*), ruas (*Reach*), *River Station*, dan *Description*, yang berfungsi untuk menggambarkan letak *cross section* tersebut pada sistem sungai. “*River Station*” tidak secara aktual menunjukkan letak *cross-section* pada sistem sungai (*miles* atau

kilometer keberapa), tetapi hanya berupa angka (1,2,3,..dst.). *Cross section* diurutkan dari nomor *river station* terbesar ke nomor *River Station* terkecil. Pada sistem sungai, *cross section* dengan nomor *river station* terbesar akan terletak di hulu sungai.



Sumber: *User's Manual HEC-RAS*

Gambar 3.5. Jendela *Editor Data Cross Section*

Data masukan yang dibutuhkan untuk setiap *cross-section* ditunjukkan pada *editor data cross-section* seperti pada Gambar 3.5. Langkah-langkah dalam memasukkan data *Cross Section* adalah sebagai berikut:

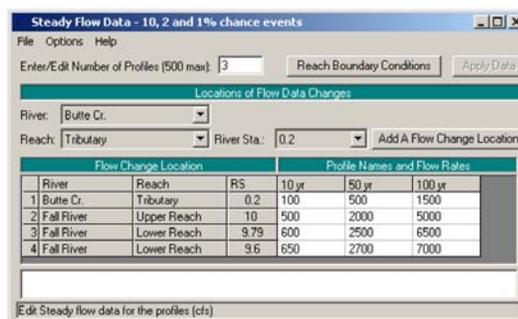
1. Pilih sungai dan ruas sungai yang akan di-*entry* data *cross section*-nya, dengan cara menekan panah pada kotak *River* dan *Reach*.
2. Pada menu ***Options*** pilih ***Add a New Cross Section***. Kotak *input* muncul, masukan nomor *river station* untuk *cross section* yang baru kemudian tekan ***OK***.
3. Masukkan semua data yang diperlukan. Data-data yang diperlukan data yang terdapat pada layar *editor cross section*.
4. Masukan informasi tambahan yang diperlukan (misal: bendungan, penghalang aliran, dsb), melalui menu ***Options***.
5. Tekan tombol ***Apply Data***. Setelah semua data geometri dimasukkan, simpanlah melalui ***Save Geometric Data As*** pada menu ***File*** yang terletak pada tampilan utama *editor Geometric Data*.

Data-data yang diperlukan adalah:

1. Nama sungai (*River*) dan ruas sungai (*Reach*), dengan tanah panah yang terletak pada kotak, pilih sungai (*River*) dan ruas sungai (*Reach*) yang hendak dimasukkan data *cross section*-nya.
2. Gambaran (*Description*), diisi dengan informasi tambahan tentang lokasi *cross section* pada sistem sungai.
3. *Cross Section X-Y Coordinates*. Tabel ini digunakan untuk memasukkan informasi stasiun dan elevasi dari *cross section*. Stasiun *cross section* (koordinat x) dimasukan dari kiri ke kanan, dengan pandang ke arah hilir.
4. Jarak *cross section* dengan *cross section* di bawahnya (*Downstreams Reach Lengths*). Jarak ini terbagi atas jarak tepi bantaran kiri (*LOB*), saluran utama (*Channel*), dan tepi bantaran kanan (*ROB*).
5. Koefisien kekasaran *Manning* (*Manning's n Values*), terdiri dari koefisien untuk bantaran sebelah kiri, saluran utama, dan bantaran sebelah kanan.
6. Stasiun tepi saluran utama (*Main Channel Bank Station*), merupakan titik terluar dari saluran utama.
7. Koefisien kontraksi dan ekspansi (*Contraction and Expansion Coefficients*).

3.4.3. Memasukkan Data Aliran *Steady Flow*.

Setelah semua data geometri dimasukkan, langkah selanjutnya adalah memasukkan data aliran *steady flow* yang dibutuhkan. Pilih ***Steady Flow Data*** dari menu ***Edit*** pada tampilan utama *HEC-RAS*. *Editor* data *steady flow* akan muncul seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Sumber: *User's Manual HEC-RAS*

Gambar 3.6. Jendela *Editor* Data Aliran *Steady Flow*

a. Data Aliran

Informasi yang diperlukan adalah:

- Jumlah profil yang akan dihitung;
- Data aliran maksimum; dan
- Data yang diperlukan untuk kondisi batas.

Langkah pertama adalah memasukkan jumlah profil yang akan dihitung, dan kemudian data alirannya. Data aliran dimasukkan langsung ke dalam tabel.

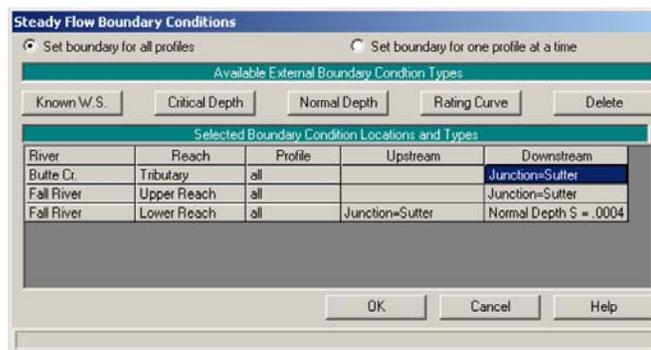
Data aliran dimasukkan dari hulu ke hilir. Setelah data aliran dimasukkan, besarnya aliran dianggap tetap sampai menemui lokasi yang memiliki nilai aliran berbeda.

Untuk menambahkan lokasi perubahan aliran pada tabel, pilih sungai dan ruas sungai dimana pada tempat tersebut diinginkan ada perubahan besar aliran. Setelah itu pilihlah stasiun yang diinginkan dan tekan **Add Flow Change Location**, lokasi perubahan aliran akan ditambahkan pada tabel.

Setiap profil secara otomatis akan diberi nama berdasarkan nomor profil (PF1,PF2, dst). Nama profil ini bisa diubah melalui menu **Options, Edit Profiles Names**. Nama profil ini umumnya diganti dengan lamanya periode ulang banjir/aliran yang ada dibawahnya, misal: 10 tahun, 50 tahun, dsb.

b. Kondisi Batas

Setelah semua data aliran dimasukan kedalam tabel, langkah selanjutnya adalah kondisi batas yang mungkin dibutuhkan. Untuk memasukkan data kondisi batas, tekan tombol **Boundary Conditions**. *Editor* kondisi batas akan muncul seperti pada Gambar 3.7.



Sumber: *User's Manual HEC-RAS*

Gambar 3.7. Jendela *Editor* Kondisi Batas

Kondisi batas diperlukan untuk menentukan permukaan air mula-mula di ujung-ujung sistem sungai (hulu dan hilir). Muka air awal dibutuhkan oleh program untuk memulai perhitungan. Pada resim aliran subkritik, kondisi batas hanya diperlukan di ujung sistem sungai bagian hilir. Jika resim aliran superkritik yang hendak dihitung, kondisi batas hanya diperlukan pada ujung hulu dari sistem sungai. Jika perhitungan resim aliran campuran yang akan dibuat, kondisi batas harus dimasukkan pada kedua ujung sistem sungai.

Editor kondisi batas berisi daftar tabel untuk setiap ruas. Tiap ruas memiliki kondisi batas hulu dan hilir. Kondisi batas internal secara otomatis terdaftar pada tabel, didasarkan pada bagaimana sistem sungai ditetapkan pada *editor* data geometri. Pengguna hanya diminta untuk memasukkan kondisi batas eksternal yang diperlukan.

Untuk memasukkan kondisi batas, gunakan *pointer mouse* untuk memilih lokasi pada tabel yang diinginkan. Kemudian pilih kondisi batas dari empat tipe yang tersedia.

- ***Known Water Surface Elevations***. Untuk kondisi ini pengguna harus memasukkan muka air yang diketahui pada setiap profil.
- ***Critical Depth***. Ketika kondisi batas ini yang dipilih, pengguna tidak diminta untuk memasukkan informasi lebih lanjut. Program akan menghitung kedalaman kritis untuk setiap profil dan menggunakannya sebagai kondisi batas.
- ***Normal Depth***. Pada tipe ini, pengguna diminta untuk memasukkan kemiringan energi yang ingin dipergunakan dalam perhitungan kedalaman normal (persamaan *Manning*) pada lokasi tersebut. Kedalaman normal akan dihitung untuk tiap profil didasarkan pada kemiringan yang telah dimasukkan. Jika kemiringan energi tidak diketahui, pengguna harus memperkirakannya dengan memasukkan salah satu dari kemiringan muka air dan kemiringan dasar saluran.
- ***Rating Curve***. Ketika tipe ini dipilih, pengguna diminta untuk memasukkan kurva elevasi-debit. Untuk setiap profil, elevasi ditambahkan dari kurva.

Fitur tambahan *editor* kondisi batas memungkinkan pengguna dapat menentukan tipe kondisi batas yang berbeda untuk tiap profil pada satu lokasi.

Hal ini dilakukan dengan memilih *option* “*Set boundary for one profile at a time*” di sebelah atas tampilan. Ketika *option* ini dipilih, tabel akan menyediakan baris bagi tiap profil pada setiap lokasi. Pengguna selanjutnya dapat memilih lokasi dan profil yang diinginkan untuk diubah tipe kondisi batasnya.

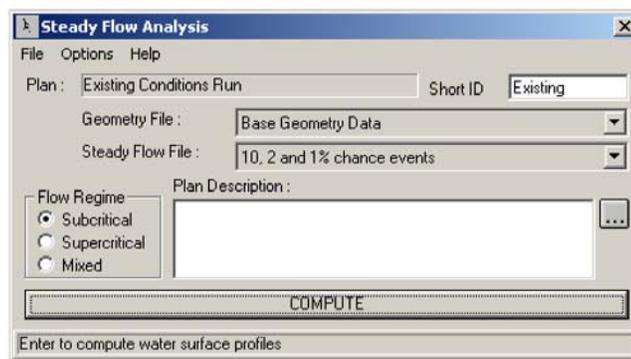
Setelah semua data kondisi batas dimasukkan, tekan **OK** untuk kembali ke *editor data steady flow*. Tekan tombol **Apply Data** agar data diterima.

c. Menyimpan Data *Steady Flow*

Langkah terakhir dalam mengembangkan data *steady flow* adalah menyimpan informasi yang sudah dibuat. Untuk menyimpan data, pilih **Save Flow Data As** dari menu **File** pada *editor data steady flow*.

3.4.4. Melakukan Perhitungan

Setelah semua data geometri dan data aliran dimasukkan, pengguna dapat memulai perhitungan profil muka air. Untuk melakukan simulasi, pilih **Steady Flow Analysis** dari menu **Run** pada tampilan utama *HEC-RAS*. Tampilan **Steady Flow Analysis** akan muncul seperti pada Gambar 3.8.



Sumber: *User's Manual HEC-RAS*

Gambar 3.8. Tampilan *Steady Flow Analysis*

Sebelum perhitungan dilakukan, pertama kali tentukan terlebih dahulu data geometri dan aliran (*plan*) mana yang akan dihitung. Kemudian pilih resim aliran yang diinginkan. Perhitungan dilakukan dengan menekan tombol **compute** pada jendela **Steady Flow Analysis**. Ketika tombol ini ditekan, *HEC-RAS* mengemas semua data untuk *plan* yang dipilih dan menuliskannya pada *run file*.

3.4.5. Menampilkan Hasil

Setelah perhitungan model diselesaikan, anda dapat memulai menampilkan hasil. Beberapa fitur untuk menampilkan hasil tersedia pada menu *View* dari jendela utama. Menu ini terdiri dari:

- *Plot Cross Section*;
- *Plot profil*;
- *Plot rating curve*;
- *Plot perspektif X-Y-Z*;
- *Plot hidrograf* (jika dilakukan perhitungan *unsteady flow*);
- Keluaran dalam bentuk tabel untuk lokasi tertentu (tabel keluaran detail);
- Keluaran dalam bentuk tabel untuk banyak lokasi (tabel rekapitulasi profil); dan
- Rekapitulasi kesalahan, peringatan dan catatan.

3.5. Dasar Teori Analisis Stabilitas Alur

Bila air mengalir dalam sebuah saluran, maka pada dasar saluran akan timbul suatu gaya bekerja searah dengan arah aliran. Gaya ini yang merupakan gaya tarik pada penampang basah disebut gaya seret (*tractive force*).

Butiran pembentuk alur sungai harus stabil terhadap aliran yang terjadi. Karena pengaruh kecepatan, aliran dapat mengakibatkan gerusan pada talud dan dasar sungai. Aliran air sungai akan memberikan gaya seret (τ_0) pada penampang sungai yang besarnya adalah: $\tau_0 = \rho_w \times g \times h \times I$ (3.40)

dimana: ρ_w = Rapat massa air (kg/m^3)

g = Gaya gravitasi (m/dt^2)

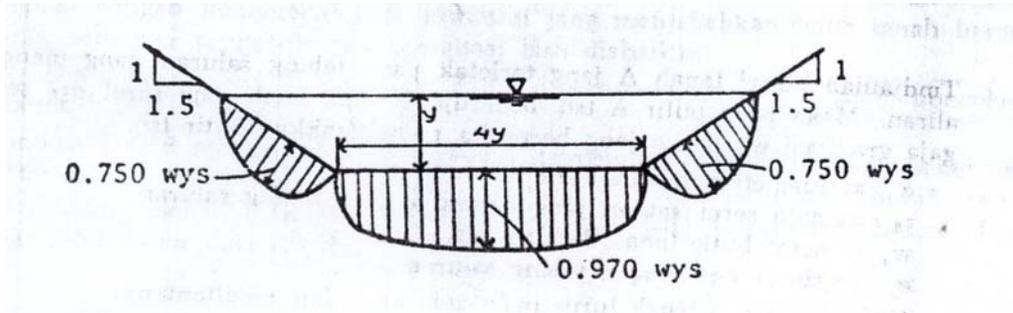
h = Tinggi air (m)

I = Kemiringan alur dasar sungai

Erosi dasar sungai terjadi jika τ_0 lebih besar dari gaya seret kritis (τ_{cr}) pada dasar dan tebing sungai. Gaya seret kritis adalah gaya seret yang terjadi tepat pada saat butiran akan bergerak. Besarnya gaya seret kritis didapatkan dengan menggunakan Grafik *Shield* (dapat dilihat pada Gambar 3.10) dengan menggunakan data ukuran butiran tanah dasar sungai.

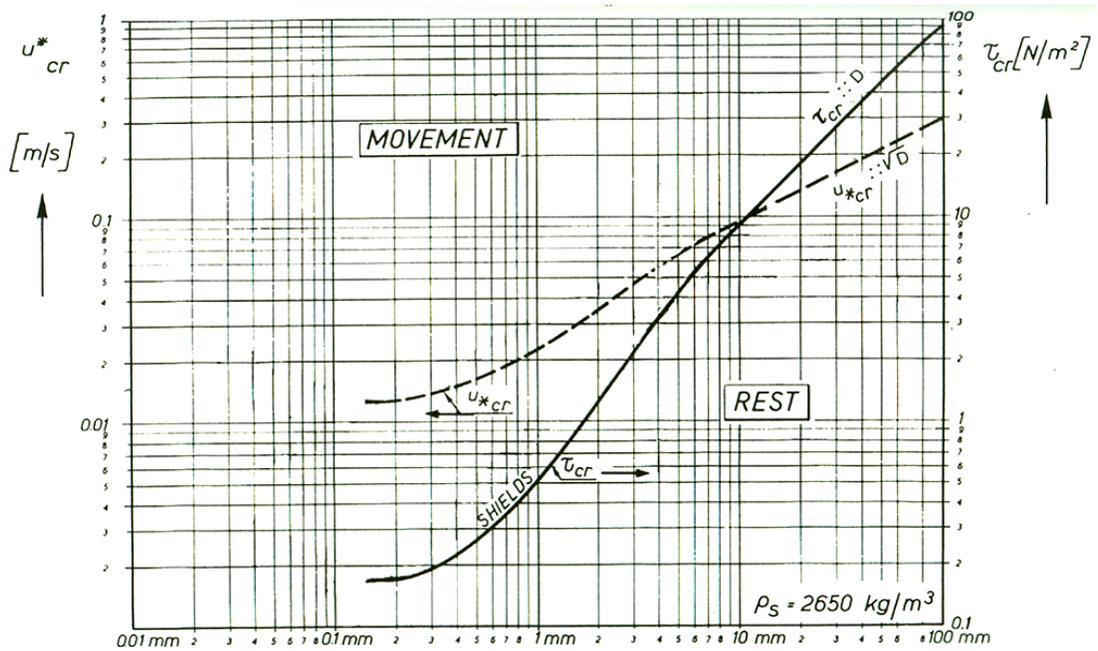
Kecepatan aliran sungai juga mempengaruhi terjadinya erosi sungai. Kecepatan aliran yang menimbulkan terjadinya tegangan seret kritis disebut kecepatan kritis (V_{Cr}).

U.S.B.R. memberikan distribusi gaya seret pada saluran empat persegi panjang berdasarkan analogi *membrane* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Sumber: Tim Penyusun Dosen Perguruan Tinggi Swasta, 1997

Gambar 3.9. Gaya Seret Satuan Maksimum



Sumber: Ven Te Chow, 1985

Gambar 3.10. Grafik Shield

3.5.1. Gaya Seret Pada Dasar Sungai

Besarnya gaya seret yang terjadi pada dasar sungai adalah:

$$\tau_b = 0,97 \times \rho_w \times g \times h \times I_b \quad \dots\dots\dots (3.41)$$

dimana: τ_b = Gaya seret pada dasar sungai (kg/m²)

ρ_w = Rapat massa air (kg/m³)

g = Gaya gravitasi (m/dt²)

h = Tinggi air (m)

I_b = Kemiringan alur dasar sungai

Kecepatan aliran kritis di dasar sungai terjadi pada saat $\tau_b = \tau_{cr.b}$. Maka:

$$0,97 \times \rho_w \times g \times h \times I_b = \tau_{cr.b} \quad \dots\dots\dots (3.42)$$

$$I_b = \frac{\tau_{cr.b}}{0,97 \times \rho_w \times g \times h} \quad \dots\dots\dots (3.43)$$

$$V_{cr.b} = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times I_b^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (3.44)$$

dimana: $\tau_{cr.b}$ = Gaya seret kritis pada dasar sungai (kg/m²)

ρ_w = Rapat massa air (kg/m³)

g = Gaya gravitasi (m/dt²)

h = Tinggi air (m)

I_b = Kemiringan alur dasar sungai

$V_{cr.b}$ = Kecepatan kritis dasar sungai (m/dt)

R = Jari-jari Hidrolik (m)

n = Angka kekasaran *Manning* (dapat dilihat pada Tabel 3.7)

Tabel 3.7. Angka Kekasaran *Manning*

Jenis Sungai	n
1. Trase dan profil teratur, air dalam	0,025 – 0,030
2. Trase dan profil teratur, bertanggul kerikil dan berumput	0,030 – 0,040
3. Berkelok-kelok dengan tempat-tempat dangkal	0,033 – 0,045
4. Berbelok-belok, air tidak dalam	0,040 – 0,055
5. Berumput banyak di bawah air	0,050 – 0,080

Sumber: CD Soemarto, 1995

3.5.2. Gaya Seret Pada Tebing Sungai

Besarnya gaya seret yang terjadi pada tebing sungai adalah:

$$\tau_s = 0,75 \times \rho_w \times g \times h \times I_s \quad \dots\dots\dots (3.45)$$

dimana: τ_s = Gaya seret pada tebing sungai (kg/m^2)

ρ_w = Rapat massa air (kg/m^3)

g = Gaya gravitasi (m/dt^2)

h = Tinggi air (m)

I_s = Kemiringan tebing sungai

Erosi dasar sungai juga dapat terjadi jika τ_s lebih besar dari gaya seret kritis pada lereng sungai ($\tau_{cr,s}$). Tegangan geser kritis pada lereng sungai tergantung pada besarnya sudut lereng.

$$\tau_{cr,s} = K_\beta \cdot \tau_{cr} \quad \dots\dots\dots (3.46)$$

$$K_\beta = \cos \beta \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{tg \beta}{tg \phi}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (3.47)$$

dimana: τ_{cr} = Tegangan geser kritis

β = Sudut lereng sungai ($^\circ$)

ϕ = 30-40 (tergantung diameter butiran dari grafik pada Gambar 3.11)

Kecepatan aliran kritis di dasar sungai terjadi pada saat $\tau_s = \tau_{cr,s}$. Maka:

$$0,75 \times \rho_w \times g \times h \times I_s = \tau_{cr,s} \quad \dots\dots\dots (3.48)$$

$$I_s = \frac{\tau_{cr,s}}{0,75 \times \rho_w \times g \times h} \quad \dots\dots\dots (3.49)$$

$$V_{cr,s} = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times I_s^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (3.50)$$

dimana: $\tau_{cr,s}$ = Gaya seret kritis tebing sungai (kg/m^2)

ρ_w = Rapat massa air (kg/m^3)

g = Gaya gravitasi (m/dt^2)

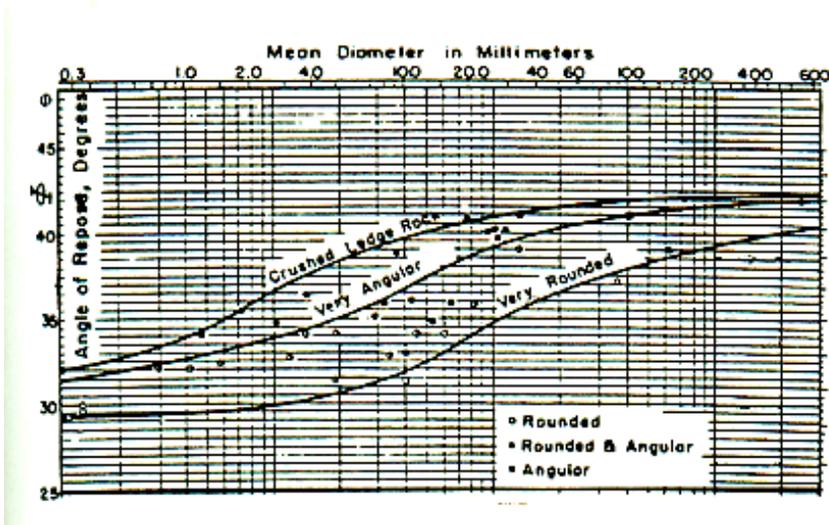
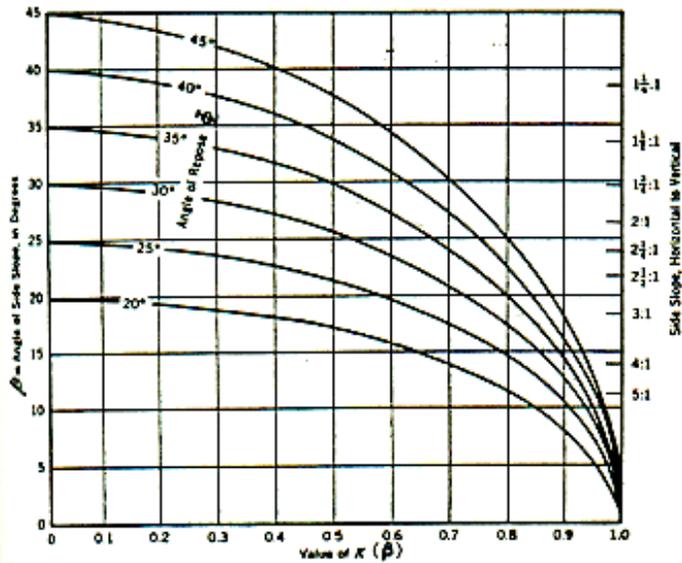
h = Tinggi air (m)

I_s = Kemiringan alur dasar sungai

$V_{cr,s}$ = Kecepatan kritis (m/dt)

R = Jari-jari hidrolik (m)

n = Angka kekasaran *Manning* (dapat dilihat pada Tabel 3.7)



Sumber: Ven Te Chow, 1985

Gambar 3.11. Grafik Hubungan Antara Diameter Butiran Dan θ

3.6. Dasar Teori Analisis Geoteknik

Dasar teori analisis geoteknik digunakan dalam menghitung besarnya faktor keamanan tebing terhadap tekanan tanah. Metode yang digunakan dalam perhitungan ini adalah metode irisan *Fellenius*. Faktor keamanan dihitung terhadap beberapa bidang longsor yang berbentuk busur lingkaran.

3.6.1. Penentuan Titik Pusat Bidang Longsor

Untuk memudahkan usaha *trial and errors* terhadap stabilitas tebing maka titik-titik pusat bidang longsor harus ditentukan dahulu melalui pendekatan. *Fellenius* memberikan petunjuk-petunjuk untuk menentukan lokasi titik pusat busur longsor kritis yang melalui tumit suatu tebing pada tanah kohesif seperti pada Tabel 3.8.

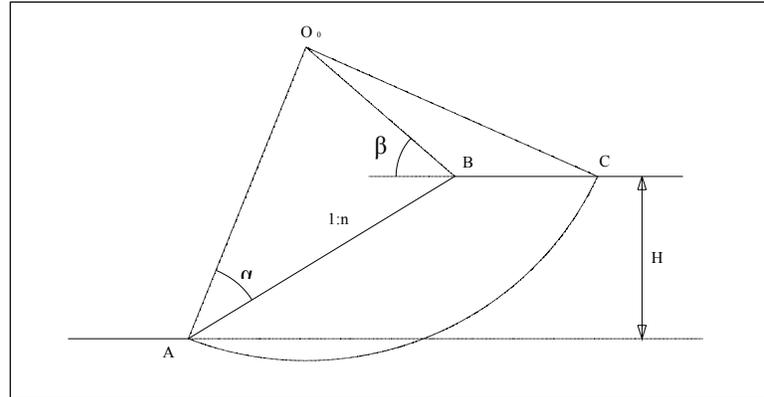
Tabel 3.8. Sudut-Sudut Petunjuk Menurut *Fellenius*

Kemiringan Tebing	Sudut Sudut Petunjuk	
	α	β
1 : n		
1 : 1	28°	37°
1 : 1,5	26°	35°
1 : 2	25°	35°
1 : 3	25°	35°
1 : 5	25°	35°

Sumber: K.R. Arora, 2002

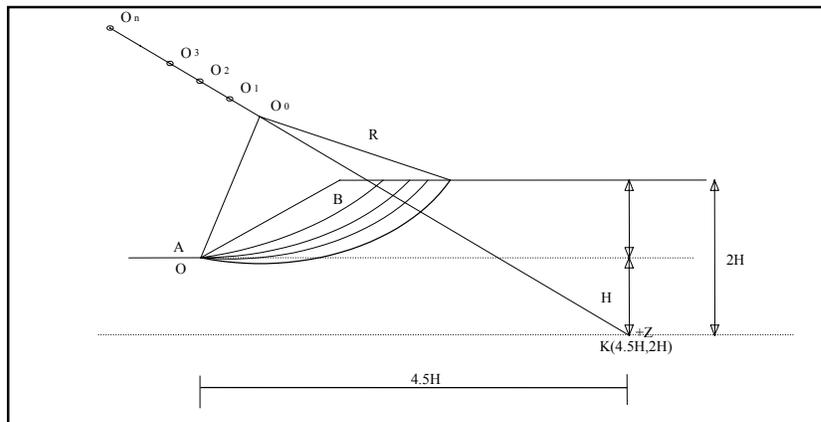
Untuk menentukan letak titik pusat busur lingkaran sebagai bidang longsor dilakukan dengan cara coba-coba dimulai dengan bantuan sudut-sudut petunjuk dari *Fellenius* untuk tanah kohesif ($\phi = 0$).

Grafik *Fellenius* menunjukkan bahwa dengan meningkatnya nilai sudut geser (ϕ) maka titik pusat busur lingkaran akan bergerak naik dari O_0 yang merupakan titik pusat bidang longsor tanah kohesif ($\phi=0$) sepanjang garis O_0 -K yaitu $O_1, O_2, O_3, \dots, O_n$. Titik K merupakan koordinat pendekatan dimana $x = 4.5 H$ dan $z = 2H$. Disepanjang garis O_0 -K inilah diperkirakan terletak titik-titik pusat busur bidang longsor. Dari masing-masing titik dianalisa angka keamanannya untuk memperoleh nilai F_k yang minimum sebagai indikasi bidang longsor kritis. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.12 dan 3.13.



Sumber: K.R. Arora, 2002

Gambar 3.12. Lokasi Pusat Busur Longsor Kritis Pada Tanah Kohesif



Sumber: K.R. Arora, 2002

Gambar 3.13. Posisi Titik Pusat Longsor Sepanjang Garis O_0-K

3.6.2. Perhitungan Stabilitas Tebing dengan Metode *Fellenius*

Cara ini dapat dipakai pada lereng-lereng dengan kondisi isotropis, non isotropis dan berlapis-lapis. Massa tanah yang bergerak diandaikan terdiri atas beberapa elemen vertikal. Lebar elemen dapat diambil tidak sama dan sedemikian sehingga lengkung busur di dasar elemen dapat dianggap sebagai garis lurus. Dasar busur setiap elemen harus berada hanya pada satu jenis tanah.

Berat total tanah pada suatu elemen (W_t) termasuk beban luar yang bekerja pada permukaan lereng (lihat Gambar 3.14). W_t diuraikan dalam komponen tegak

lurus dan tangensial pada dasar elemen. Dengan cara ini pengaruh gaya T dan E yang bekerja disamping elemen diabaikan. Faktor keamanan adalah perbandingan momen penahan longsor dengan momen penyebab longsor. Momen tahanan geser pada bidang longsor adalah:

$$M_{\text{penahan}} = R \times r \quad \dots\dots\dots (3.51)$$

Tahanan geser pada dasar tiap elemen adalah:

$$R = S \times l = l \times (c' + \sigma \tan \phi') \quad \dots\dots\dots (3.52-a_1)$$

$$\sigma = \frac{W_t \cos \alpha}{l} \quad ; \text{ atau,} \quad \dots\dots\dots (3.52-a_2)$$

$$R = c'l + W_t \cos \alpha \tan \phi' \quad \dots\dots\dots (3.52-b)$$

Sehingga besarnya momen penahan yang ada sebesar:

$$M_{\text{penahan}} = r (c'l + W_t \cos \alpha \tan \phi') \quad \dots\dots\dots (3.53)$$

dimana: R = Gaya geser tanah (t)

r = Jari-jari bidang longsor (m)

S = Kuat geser tanah (t/m)

l = Panjang dasar elemen (m) = $\frac{b}{\cos \alpha}$

α = Kemiringan dasar

c' = Kohesi efektif (t/m²)

ϕ' = Sudut geser dalam efektif

σ = Tegangan total pada bidang geser (t/m)

W_t = Berat total elemen (t)

b = Lebar elemen (m)

Komponen tangensial W_t bekerja sebagai penyebab longsor menimbulkan momen penyebab longsor:

$$M_{\text{penyebab}} = (W_t \sin \alpha).r \quad \dots\dots\dots (3.54)$$

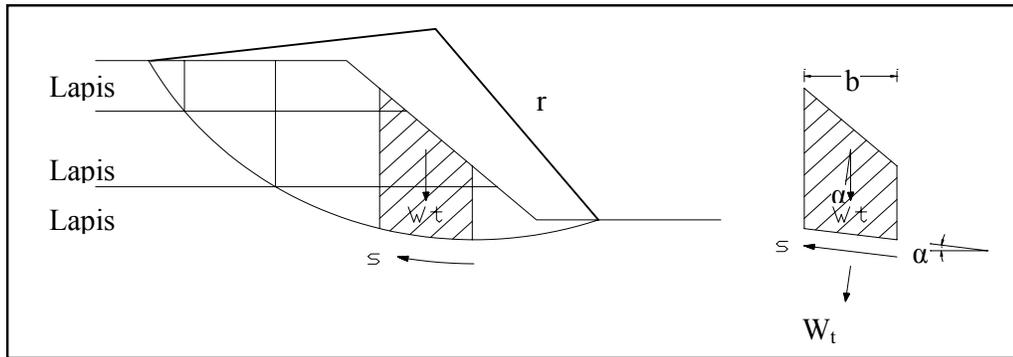
Faktor keamanan dari tebing menjadi:

$$FK = \frac{\sum (c'l + W_t \cos \alpha \tan \phi')}{\sum W_t \sin \alpha} \quad \dots\dots\dots (3.55)$$

Jika tebing terendam air atau muka air tanah diatas kaki tebing, maka tekanan air pori akan bekerja pada dasar elemen yang ada dibawah air tersebut.

Dalam hal ini tahanan geser harus diperhitungkan yang efektif sedangkan penyebabnya tetap diperhitungkan secara total sehingga rumusnya menjadi:

$$FK = \frac{\sum [c'l + (W_i \cos \alpha - \mu l) \tan \phi']}{\sum W_i \sin \alpha} \dots\dots\dots (3.56)$$



Sumber: PRPL-DPU, 1987

Gambar 3.14. Sistem Gaya Pada Metode *Fellenius*

3.7. GeoStudio SLOPE/W

SLOPE/W adalah salah satu komponen dalam paket lengkap produk geoteknik yang disebut *GeoStudio*. *Slope/W* didesain dan dibuat untuk menganalisis stabilitas struktur tanah pada suatu lereng dengan menggunakan berbagai metode berdasarkan pada konsep kesetimbangan batas (*limit equilibrium*).

Langkah-langkah perhitungan stabilitas tebing dengan menggunakan program *GeoStudio 2004 Slope/W Analysis* adalah sebagai berikut:

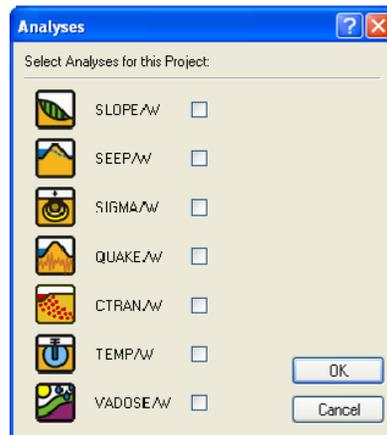
3.7.1. Mendefinisikan Permasalahan

Dalam *GeoStudio 2004 Slope/W Analysis* secara umum terdapat tiga komponen pemecahan masalah, yaitu *Define*, *Solve* dan *Contour*. Pendefinisian masalah dibuat dengan *Define*.

a. Membuka Modul *Define Geostudio Slope/W*

1. Pilih *GeoStudio 2004* dari menu *Start* pada folder *GEOSLOPE*
2. Setelah *GeoStudio* dibuka, pilih *New* dari menu *File*. Pilih *GeoStudio original settings* kemudian tekan *OK*. Selanjutnya kotak dialog pilihan analisis akan muncul.

3. Setelah kotak dialog muncul, tekan pada *check box* disamping **SLOPE/W** kemudian tekan **OK**. Sekarang kita bekerja dengan **GeoStudio (SLOPE/W DEFINE)**.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.15. Kotak Dialog Pilihan Analisis

b. Menentukan Area Kerja

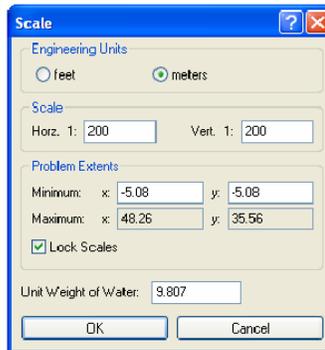
Area kerja adalah ukuran dari tempat yang tersedia untuk mendefinisikan permasalahan. Area kerja bisa lebih kecil, sama atau lebih besar dari ukuran halaman cetak (*print page*). Jika area kerja lebih lebih besar dari ukuran halaman cetak, masalah akan dicetak pada banyak halaman ketika faktor pembesaran adalah 1,0 atau lebih. Area kerja harus ditentukan sehingga kita dapat bekerja dengan skala yang dikehendaki.

c. Menentukan Skala

Geometri dari permasalahan didefinisikan dalam skala tertentu. Skala diatur sedemikian rupa agar area kerja nantinya dapat menampung sketsa masalah. Luas yang diperlukan akan lebih besar dari ukuran permasalahan untuk memberikan batas disekitar area gambar.

Langkah-langkah dalam menentukan skala adalah sebagai berikut:

1. Pilih **Scale** dari menu **Set**. Kotak dialog untuk menentukan skala akan muncul.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.16. Kotak Dialog Pengaturan Skala

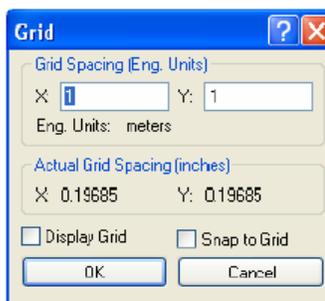
2. Pilih satuan yang ingin digunakan terpilih pada kotak **Engineering Units**.
3. Tentukan besarnya **Problem Extents** untuk memberi besarnya margin atau batas di sekeliling are gambar.
4. Tentukan besarnya skala dengan mengisi kotak edit **Scale**.
5. Tekan **OK**.

d. Mengatur Grid Spacing

Grid, sebagai latar belakang, diperlukan untuk membantu dalam menggambar permasalahan. Titik ini dapat di kunci ketika membuat geometri dengan titik dan garis dengan koordinat pasti.

Langkah untuk mengatur dan menampilkan *grid* adalah sebagai berikut:

1. Pilih **Grid** dari menu **Set**. Kotak dialog pengaturan **Grid** akan muncul seperti ditunjukkan pada Gambar 3.17.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.17. Kotak Dialog Pengaturan *Grid*

2. Isi kotak *edit Grid Spacing X* dan kotak *edit Grid Spacing Y*.
3. Beri tanda *cek* pada kotak *cek Display Grid* untuk memunculkan grid pada jendela *Define*
4. Beri tanda *cek* pada kotak *cek Snap to Grid* untuk mengunci titik-titik grid.
5. Pilih *OK*.

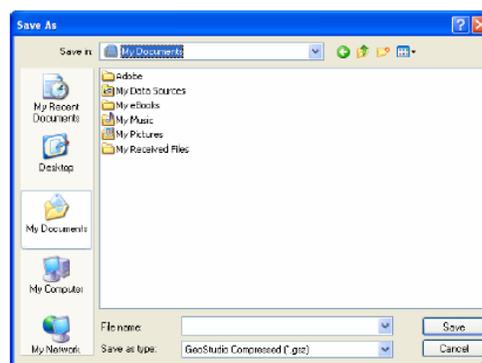
Grid dimunculkan pada jendela *Define*. Ketika *cursor* pada layar digeser, koordinat titik *grid* terdekat ditampilkan pada *Status Bar*.

e. Menyimpan Masalah

Data hasil pendefinisian masalah harus disimpan dalam bentuk *file*. Ini memungkinkan fungsi *SOLVE* dan *CONTOUR* memperoleh definisi masalah untuk dipecahkan dan ditampilkan hasilnya.

Langkah-langkah dalam menyimpan data adalah sebagai berikut:

1. Pilih *Save* dari menu *File*. Kotak dialog seperti ditunjukkan pada Gambar 3.18 ini akan muncul.
2. Pilih *direktori* yang akan digunakan untuk menyimpan *file*, kemudian tulis nama *file* pada kotak *edit File Name*.
3. Pilih *Save*.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.18. Kotak Dialog Penyimpanan Masalah

f. Membuat Sketsa Sumbu

Langkah-langkah untuk mensketsa sumbu adalah sebagai berikut:

1. Pilih **Axis** dari menu **Sketch**. Kotak dialog seperti ditunjukkan pada Gambar 3.19.
2. Pada kotak *edit Display*, Beri tanda cek pada kotak cek yang dikehendaki (*Left Axis*, *Right Axis*, *Top Axis* atau *Bottom Axis*).
3. Pada **Axis Titles**, tuliskan nama untuk untuk sumbu x dan sumbu y.
4. Pilih **OK** dan kotak dialog “*Axis Size*” akan muncul.
5. Pada *X-Axis* dan *Y-Axis*, ketik interval yang diinginkan pada kotak *edit Increment Size*, dan ketik jumlah interval pada kotak edit **# of Increments**.
6. Tekan **OK**, sumbu akan muncul pada jendela *Define*.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.19. Kotak Dialog Pengaturan Sumbu

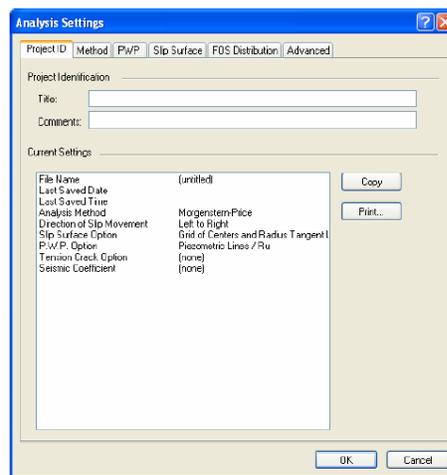
g. Membuat Sketsa Masalah

Menggambar sketsa masalah dapat dilakukan menggunakan fungsi **Line** dari menu **Sketch**. Namun untuk jika letak titik dan garis sketsa tidak berada pada koordinat dengan angka bulat, penggambaran akan lebih mudah dengan cara meng-*import* gambar dari *folder* lain.

3.7.2. Penentuan Metode Analisis

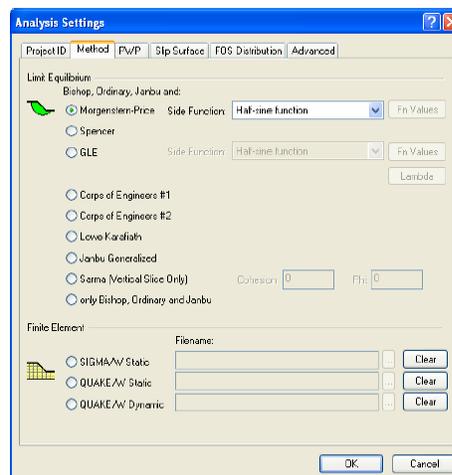
a. Langkah Untuk Menentukan Metode Analisis

1. Pilih *Analysis Settings* dari menu *Key In*. Maka akan muncul kotak dialog seperti pada Gambar 3.20.
2. Ketik judul pada kotak isian *Title* dan biarkan kotak isian *Comments*.
3. Tekan pada label *Method* dan pilih metode perhitungan yang akan digunakan, seperti yang terlihat pada Gambar 3.21.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.20. Kotak Dialog Penentuan Analisis



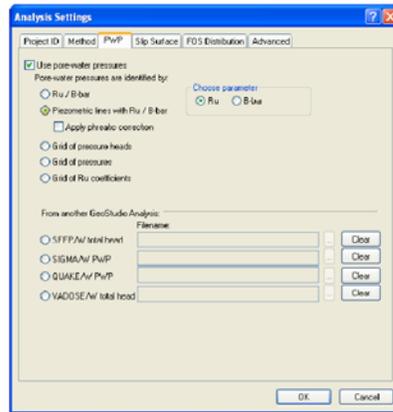
Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.21. Label *Method* Pada Kotak Dialog Penentuan Analisis

SLOPE/W akan menyertakan analisis *Morgenstern-Price Limit Equilibrium* pada perhitungan analisis *Bishop*, *Ordinary*, dan *Janbu*.

b. Langkah Menentukan Pilihan Yang Digunakan Dalam Analisis

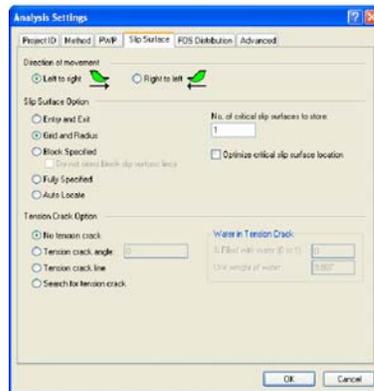
1. Pilih label **PWP** dari **Analysis Settings** pada menu **Key In**. Akan muncul kotak dialog seperti pada Gambar 3.22. Pilih opsi tekanan air pori yang dikehendaki.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.22. Label PWP Pada Kotak Dialog Penentuan Analisis

2. Pilih **Slip Surface** dari **Analysis Settings** pada menu **Key In**. Akan muncul kotak dialog seperti pada Gambar 3.23. Pilih arah pergerakan longsor yang dikehendaki.

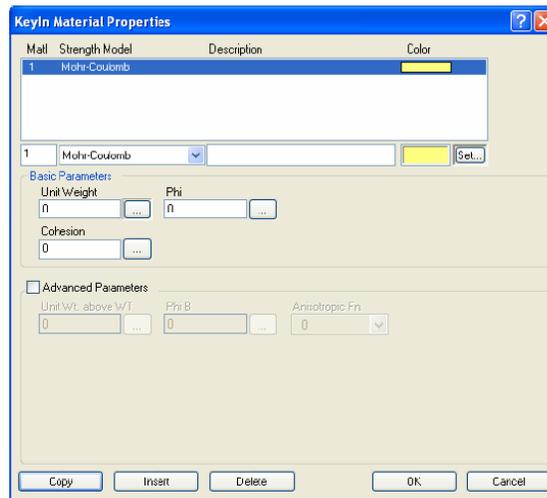


Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.23. Label *Slip Surface* Pada Kotak Dialog Penentuan Analisis

c. Langkah Untuk Mendefinisikan Sifat Tanah

1. Pada menu **Key In** pilih **Material Properties**, maka akan tampak kotak dialog seperti pada Gambar 3.24.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.24. Kotak Dialog *Input* Data Sifat Tanah

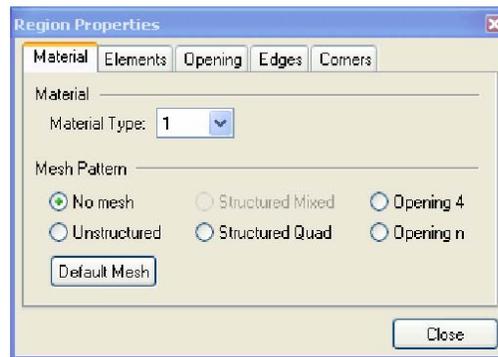
2. Ketik 1 pada kotak **Soil** (dibawah kotak daftar isi) untuk menandakan sedang mendefinisikan sifat tanah pertama.
3. Tekan tombol **Tab** dua kali untuk memindahkan kotak isian **Description** (model kekuatan tidak perlu dirubah, jika model **Mohr-Coulomb** telah menjadi acuan).
4. Pada kotak **Description** isikan gambaran kondisi tanah lapis pertama, contoh "Lapis 1".
5. Masukkan parameter dasar tanah berupa berat jenis, sudut geser, dan kohesi tanah pada kotak yang tersedia.
6. Tekan **Copy**. Nilai-nilai tersebut akan masuk pada kotak daftar isi.
7. Ulangi langkah 2 sampai 6 untuk mendefinisikan sifat lapisan tanah berikutnya.
8. Tekan **OK**.

d. Menggambar Bagian Tanah (*Region*)

Pengukuran dan pembuatan lapisan dilakukan dengan menggambar tiap satu lapisan tanah.

Langkah menggambar lapisan pertama:

1. Pilih **Region** dari menu **Draw**. *Kursor* akan berubah menjadi tanda palang. Geser *kursor* pada tempat yang diinginkan sebagai awal garis region dan tekan tombol kiri *mouse*. *SLOPE/W* membuat titik no 1 pada posisi ini. Buatlah daerah tertutup dengan menggeser dan menekan tombol kiri *mouse* di sepanjang garis yang membentuk lapisan pertama pada gambar sketsa yang telah dibuat. Selama menggeser *mouse*, sebuah garis merah akan tergambar dari titik awal menuju posisi *kursor* tersebut.
2. Lapisan pertama akan terlihat dengan warna lapisan tanah menunjukkan **Material #1** dan kemudian akan muncul kotak dialog **Region Properties** seperti ditunjukkan pada Gambar 3.25.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.25. Kotak Dialog *Region Properties*

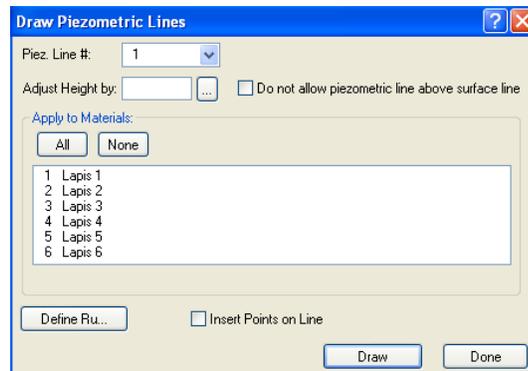
3. Pilih tipe material sesuai dengan pendefinisian sifat tanah yang telah dibuat sebelumnya. Tekan **Close** untuk kembali pada model menggambar lapisan. Kotak dialog **Region Properties** akan hilang dan *kursor* akan kembali berbentuk palang, dan siap untuk menggambar lapisan selanjutnya.
4. Lakukan langkah 2, 3 dan 4 untuk lapisan tanah berikutnya.
5. Tekan **Close**

6. Tekan tombol kanan *mouse* untuk keluar dari mode **Draw Regions**

e. Menggambar Garis *Piezometry*

Langkah menggambar garis *piezometry*:

1. Pilih **Pore Water Pressure** pada menu **Draw**, maka akan muncul kotak dialog seperti pada Gambar 3.26.
2. Tentukan jumlah garis *piezometri* dengan memasukkan angka pada kotak Piez. Line #.
3. Tentukan garis *piezometry* akan diaplikasikan pada lapisan tanah mana saja dengan memilih lapisan yang tersedia pada daftar *Apply to Materials*.
4. Pilih tombol **Draw**. *Cursor* akan berubah dari panah menjadi tanda palang, dan *status bar* akan menunjukkan bahwa model operasi yang sedang digunakan adalah “**Draw PWP**”.
5. Gambar garis *piezometri* dengan menekan tombol kiri *mouse* pada lokasi-lokasi yang dikehendaki.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.26. Kotak Dialog Menggambar Garis *Piezometry*

6. Selanjutnya geser *cursor* dan tekan tombol kiri *mouse* di sepanjang permukaan tebing.
7. Untuk mengakhiri proses menggambar garis *piezometry* tekan tombol kanan *mouse*.

Kotak dialog **Draw Piez Lines** akan muncul kembali.

- Pilih **Done** pada kotak dialog **Draw Piez Lines** untuk selesai menggambar garis *piezometry*.

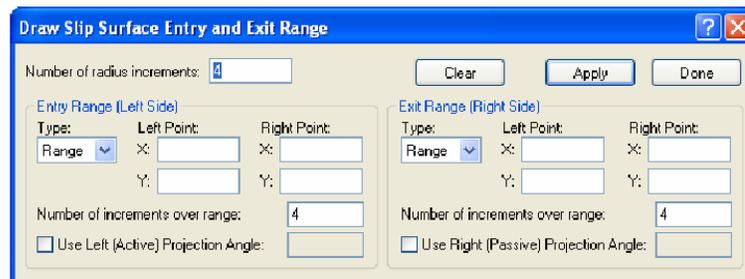
f. Menggambar Lokasi *Exit And Entry*

Untuk mengatur lokasi percobaan bidang gelincir, terdapat beberapa pilihan bidang gelincir yang dapat digunakan. Sebuah pilihan dapat digunakan untuk mendefinisikan lokasi *Entry And Exit*. Sebuah lingkaran bidang gelincir akan dimasukkan data sifat tanah melalui zona “**Entry**” dan selesai memasukkan data tanah melalui zona “**Exit**”.

Langkah memasukkan lokasi “*Exit*” dan “*Entry*”:

Pastikan kembali seluruh sifat tanah dapat terlihat pada layar. Jika perlu gunakan tombol **Zoom** pada *toolbar*.

- Pada menu **Draw** pilih **Slip Surface**. Akan muncul pilihan menu pada **Slip Surface**. Pilih **Entry And Exit** dari menu-menu yang ada. *Kursor* akan berubah bentuk menjadi palang, *status bar* akan tertulis “**Draw Slip Surface Entry And Exit**” sebagai model operasi yang akan digunakan dan akan muncul kotak dialog seperti pada Gambar 3.27.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.27. Kotak Dialog Penggambaran Lokasi *Entry* dan *Exit*

- Isikan jumlah penambahan radius pada kotak yang tersedia.
- Pilih tipe lokasi dan ketik koordinat lokasi Masuk dan keluarnya bidang gelincir sesuai rencana yang dikehendaki.

Koordinat titik-titik ujung garis “**Entry**” dan koordinat titik “**Exit**” dapat diubah dengan cara mengarahkan *kursor* ke titik tersebut dan tahan tombol

kiri *mouse* kemudian geser menuju tempat yang diinginkan sepanjang garis lapisan permukaan.

4. Pilih **Done** pada kotak dialog **Draw Slip Surface Entry And Exit**.

g. Pemeriksaan Masalah

Pemeriksaan definisi masalah harus diperiksa oleh program *SLOPE/W* untuk memastikan data-data yang masuk sudah benar. Perintah **Tools Verify** memperlihatkan angka-angka sebanyak pengecekan untuk membantu menemukan kesalahan yang terjadi.

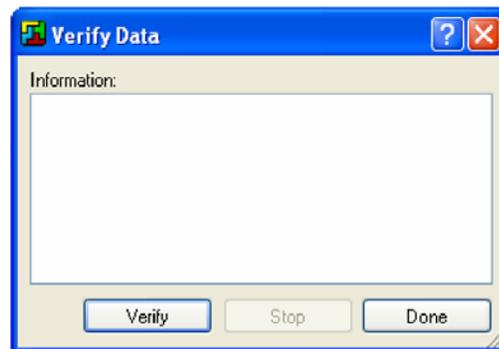
Langkah pemeriksaan masalah:

1. Pada menu **Tools** pilih **Verify**, maka akan muncul kotak dialog seperti pada Gambar 3.28.

2. Tekan tombol **Verify**

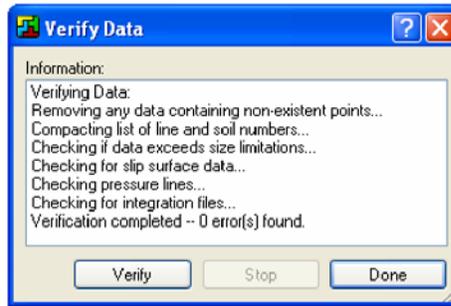
Program *SLOPE/W* akan memeriksa data. Jika ditemukan kesalahan dalam data, pesan *error* akan ditampilkan pada kotak dialog. Total jumlah kesalahan akan ditampilkan pada baris terakhir kotak dialog, seperti terlihat pada Gambar 3.29.

3. Jika selesai melihat hasil pemeriksaan data, tekan **Done**.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.28. Kotak Dialog *Verify Data*



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.29. Kotak Dialog Hasil Pemeriksaan

h. Menyimpan Masalah

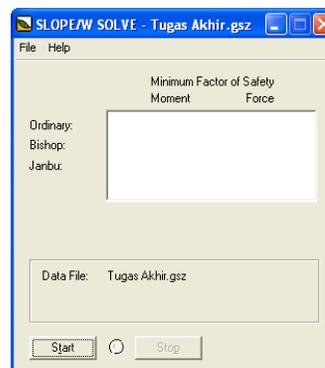
Masalah telah terdefinisi secara lengkap. Pilih **File Save** untuk menyimpan masalah. **Solve** akan membaca data masalah pada *file* yang tersimpan ini untuk memperhitungkan angka keamanan.

3.7.3. Penyelesaian Masalah

Bagian kedua dari analisis adalah menggunakan **SLOPE/W SOLVE** untuk menghitung faktor keamanan.

Untuk memulai **SOLVE** dan secara otomatis akan memuat data *file* sebelumnya yang sudah disimpan, pilih **Solve** dibawah menu **Tools** atau tekan *icon Solve* yang dapat ditemukan pada **Geostudio Analysis Toolbar**.

Jendela **Solve** akan muncul. **Solve** akan secara otomatis membuka data pada *file* Tugas Akhir.GSZ dan akan tertulis nama *file* tersebut pada jendela **Solve**, seperti terlihat pada Gambar 3.30.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

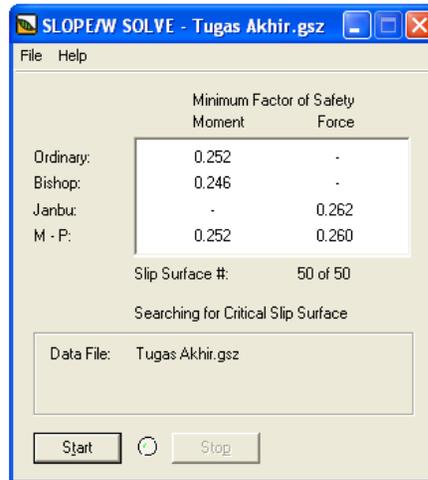
Gambar 3.30. Jendela *Solve*

a. Memulai Penyelesaian Masalah

Untuk memulai penyelesaian masalah pada perhitungan angka keamanan, tekan tombol **Start** pada jendela **Solve**.

Sebuah titik hijau akan muncul antara tombol **Start** dan tombol **Stop**. Titik hijau ini akan berkedip selama dilakukannya perhitungan.

Selama melakukan perhitungan, **Solve** memperlihatkan angka keamanan minimum dan banyaknya bidang gelincir yang sedang dinalisis.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.31. Contoh Hasil “Solve”

b. Keluar dari Solve

Setelah selesai menghitung angka keamanan, pilih **Exit** pada menu **File** untuk keluar dari jendela **SLOPE/W SOLVE**, atau tekan tombol **Close** pada ujung atas kanan pada jendela **Solve**.

3.7.4. Melihat Hasil Perhitungan

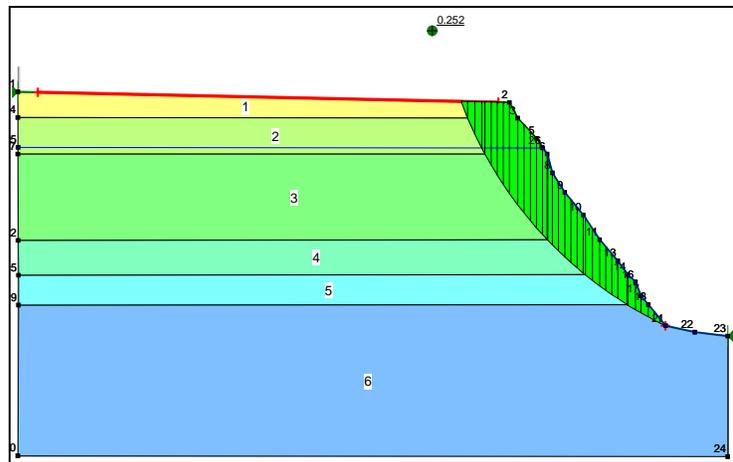
SLOPE/W CONTOUR dapat memperlihatkan gambar hasil analisis seperti:

- Menampilkan bidang gelincir permukaan, dengan juga memperlihatkan angka keamanannya.
- Memperlihatkan kontur dengan angka keamanan tertentu.

- Menampilkan *free body diagram* dan poligon kekuatan dari sebuah irisan pada bidang gelincir minimum.
- Grafik hasil perhitungan.

Untuk memulai *Contour*, pilih *Contour* dari menu *Tools* atau tekan tombol *Contour* pada *toolbar Geostudio Analysis*.

Gambar pada *Geostudio* akan berubah menjadi *Contour*, dimana secara otomatis membuka data *file* pekerjaan sebelumnya, dan menampilkan bidang gelincir kritis dan angka faktor keamanannya, sebagai contoh dapat dilihat pada Gambar 3.32.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.32. Bidang Gelincir Kritis

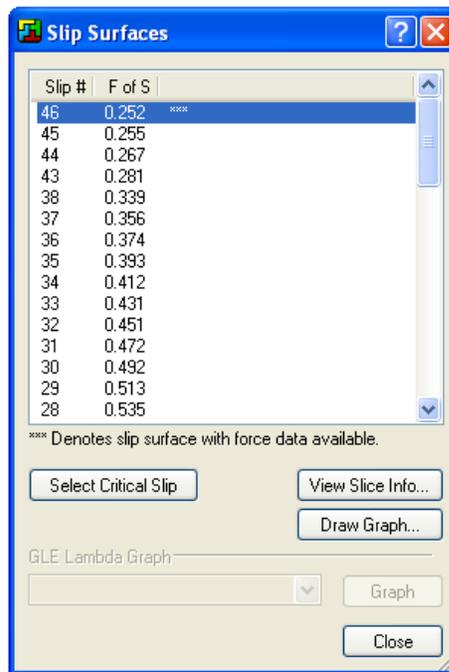
Gambar yang diperlihatkan pada jendela *Contour* akan tergambar sesuai pada saat terlihat di *View Preferences* pada saat penyimpanan masalah di *Define*. Beberapa bagian yang berbeda dapat dilihat dengan memilih *Preferences* dari menu *Contour View*, atau dengan memilih pada *toolbar View Preferences*.

a. Menampilkan Bidang Gelincir

Untuk menampilkan berbagai bidang gelincir selain bidang gelincir optimum dapat dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah berikut:

1. Pilih *Slip Surfaces* dari menu *Draw* pada *Contour*. Kotak dialog seperti ditunjukkan pada Gambar 3.33 akan muncul.

2. *Cursor* akan berubah dari bentuk anak panah menjadi bentuk tangan ketika berada diatas kotak dialog, dan *status bar* akan menunjukkan bahwa “*Draw Slip Surfaces: Select A Slip Surface*” adalah model operasi yang sedang berjalan. Bidang gelincir kritis pada contoh ini adalah bidang gelincir # 47. Bidang gelincir yang diberi tanda *** menunjukkan bidang gelincir tersebut adalah bidang gelincir yang informasinya sedang dibaca.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.33. Kotak Dialog Bidang Gelincir

3. Pilih bidang gelincir yang diinginkan. Bidang gelincir yang dipilih dan faktor keamanannya akan ditampilkan pada jendela *Contour*.
4. *Contour* akan selalu menyajikan bidang gelincir minimum ketika tombol faktor keamanan minimum dipilih. Jangan tutup kotak dialog *Draw Slip Surface*.

b. Memilih Metode Perhitungan

Pada *DEFINE*, hasil perhitungan yang ditampilkan adalah hasil perhitungan metode *Morgenstern Price*. Hasil perhitungan metode lainnya dapat ditampilkan dengan langkah berikut:

1. Pilih **Method** dari menu **View**. Kotak dialog seperti terlihat pada Gambar 3.34. akan muncul.



Sumber: *User's Manual GeoStudio 2004 Slope/W Analysis*

Gambar 3.34. Kotak Dialog *View Method*

2. Pilih metode yang diinginkan melalui kotak *edit Method*.
Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah metode *Ordinary* atau juga dikenal dengan metode *Fellenius*.
3. Tekan **OK**.

3.8. Alternatif Konstruksi Perkuatan Tebing

Akibat Tekanan Tanah

a. Dinding Penahan Tanah

Dinding penahan tanah merupakan bagian penambat dari pasangan batu, beton atau beton bertulang. Tipe dinding penahan terdiri dari dinding gaya berat, semi gaya berat dan dinding pertebalan. Dinding penahan harus diberi fasilitas drainase seperti lubang penetas dan pipa air yang diberi bahan filter supaya tidak tersumbat, sehingga tidak menimbulkan tekanan hidrostatik yang besar.

Jenis apapun dinding penahan yang digunakan, harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- Stabilitas dinding penahan tanah yang digunakan secara keseluruhan harus memenuhi faktor keamanan terhadap gelincir (*sliding*), guling (*overturning*), ataupun penurunan.
- Dinding penahan tanah itu sendiri harus memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan gaya-gaya yang bekerja padanya.

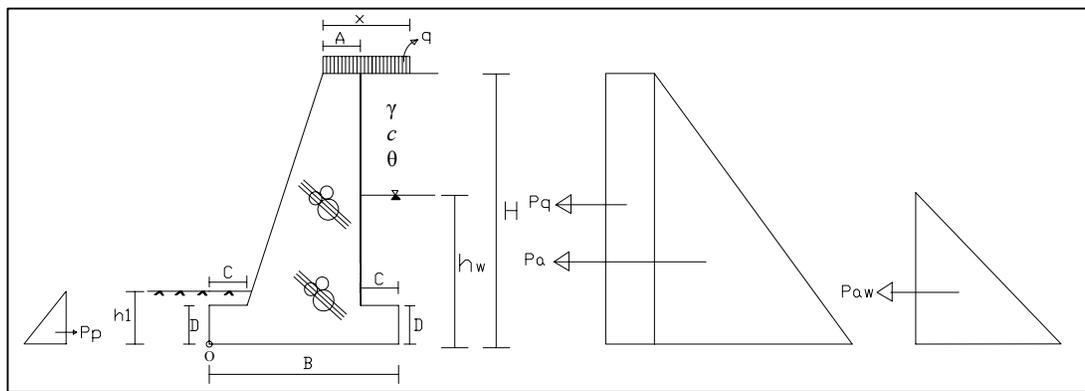
Dimensi dinding penahan tanah:

$$A: \frac{H}{12} - \frac{H}{6} \dots\dots\dots (3.57)$$

$$B: \frac{H}{12} - 0,9.H \dots\dots\dots (3.58)$$

$$C: \frac{H}{8} - \frac{H}{6} \dots\dots\dots (3.59)$$

$$D: \frac{H}{8} - \frac{H}{5} \dots\dots\dots (3.60)$$



Gambar 3.35. Dinding Penahan Tanah

a. Perhitungan tekanan akibat tanah

- Menghitung koefisien tekanan tanah aktif dan pasif:

$$K_a = \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \dots\dots\dots (3.61)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \dots\dots\dots (3.62)$$

dimana: K_a = Koefisien tekanan tanah aktif
 K_p = Koefisien tekanan tanah pasif
 θ = Sudut geser tanah

- Menghitung tekanan tanah aktif dan pasif:

$$\sigma_a = (\gamma \times H \times K_a) - (2 \times c \times \sqrt{K_a}) \dots\dots\dots (3.63)$$

$$P_a = \sigma_a \times 0,5 H \dots\dots\dots (3.64)$$

$$\sigma_p = (\gamma \times h_1 \times K_p) + (2 \times c \times \sqrt{K_p}) \quad \dots\dots\dots (3.65)$$

$$P_p = \sigma_p \times 0,5 h_1 \quad \dots\dots\dots (3.66)$$

- dimana: σ_a = Tegangan tanah aktif (t/m²)
 σ_p = Tegangan tanah pasif (t/m²)
 P_a = Tekanan tanah aktif (t/m)
 P_p = Tekanan tanah pasif (t/m)
 γ = Berat jenis tanah (t/m³)
 H = Tinggi lapisan tanah aktif (m)
 h_1 = Tinggi lapisan tanah pasif (m)
 c = Kohesi tanah (t/m²)
 K_a = Koefisien tekanan tanah aktif
 K_p = Koefisien tekanan tanah pasif

b. Perhitungan tekanan akibat air:

$$\sigma_w = \gamma_w \times h_w \times K_w \quad \dots\dots\dots (3.67)$$

$$P_{aw} = \sigma_w \times 0,5 h_w \quad \dots\dots\dots (3.68)$$

- dimana: σ_w = Tegangan air (t/m²)
 P_{aw} = Tekanan akibat air (t/m)
 γ_w = Berat jenis air (t/m³)
 h_w = Tinggi air (m)
 K_w = Koefisien tekanan air

$$P_H = \Sigma P_a + \Sigma P_w - \Sigma P_p \quad \dots\dots\dots (3.69)$$

- dimana: P_H = Tekanan horizontal (t/m)
 P_a = Tekanan tanah aktif (t/m)
 P_w = Tekanan akibat air (t/m)
 P_p = Tekanan tanah pasif (t/m)

c. Perhitungan tekanan akibat beban merata q:

$$\sigma_q = K_a \times q \quad \dots\dots\dots (3.70)$$

$$P_q = \sigma_q \times H \quad \dots\dots\dots (3.71)$$

dimana: σ_q = Tegangan tanah akibat beban merata (t/m^2)
 P_q = Tekanan tanah akibat beban merata (t/m)
 H = Tinggi lapisan tanah aktif (m)
 K_a = Koefisien tekanan tanah aktif
 q = Beban merata (t/m^2)

d. Perhitungan tekanan akibat berat dinding penahan tanah:

$$P_V = \gamma_s \times A \times c \quad \dots\dots\dots (3.72)$$

dimana: P_V = Tekanan vertikal (t/m)
 γ_s = Berat jenis bahan pembuat dinding penahan tanah (t/m^3)
 A = Luas dinding penahan tanah (m^2)
 c = Kohesi tanah (t/m^2)

f. Perhitungan momen horizontal:

$$M_H = \Sigma P.l \quad \dots\dots\dots (3.73)$$

dimana: M_H = Momen horizontal (t.m)
 P = Tekanan akibat tanah dan air per 1 m (t)
 l = Jarak lengan momen terhadap titik tinjau O (m)

g. Perhitungan momen vertikal:

$$M_V = \Sigma P_V.l \quad \dots\dots\dots (3.74)$$

dimana: M_V = Momen vertikal (t.m)
 P_V = Tekanan akibat berat dinding penahan tanah per 1 m (t)
 l = Jarak lengan momen terhadap titik tinjau O (m)

h. Kontrol terhadap stabilitas dinding penahan tanah:

- Tinjauan terhadap guling

$$FK = \frac{M_V}{M_H} \geq 2 \quad \dots\dots\dots (3.75)$$

dimana: FK = Faktor keamanan
 M_H = Momen horizontal (t.m)
 M_V = Momen vertikal (t.m)

- Tinjauan terhadap geser

$$FK = \frac{\sum P_V \times \tan \theta + B \times c + \sum P_p}{\sum P_H} \geq 1,5 \quad \dots\dots\dots (3.76)$$

dimana: FK = Faktor keamanan

$\sum P_V$ = Jumlah tekanan akibat berat dinding penahan tanah (t/m)

$\sum P_H$ = Tekanan horizontal (t/m)

$\sum P_p$ = Tekanan tanah pasif (t/m)

B = Lebar pondasi (m)

c = Kohesi tanah (t/m²)

θ = Sudut geser tanah

- Tinjauan terhadap eksentrisitas (|e|)

$$|e| = \frac{B}{2} - \left(\frac{M_V - M_H}{\sum P_V} \right) \leq \frac{B}{6} \quad \dots\dots\dots (3.77)$$

dimana: |e| = Nilai eksentrisitas

M_H = Momen horizontal (t.m)

M_V = Momen vertikal (t.m)

$\sum P_V$ = Jumlah tekanan akibat berat dinding penahan tanah per 1 m (t)

B = Lebar pondasi (m)

- Tinjauan terhadap daya dukung tanah

$$q_{\max} = \frac{\sum P_V}{B} \times \left(1 + \frac{6 \times |e|}{B} \right) \quad \dots\dots\dots (3.78)$$

$$q_{\min} = \frac{\sum P_V}{B} \times \left(1 - \frac{6 \times |e|}{B} \right) \quad \dots\dots\dots (3.79)$$

dimana: q_{\max} = Beban maksimum (t/m)

q_{\min} = Beban minimum (t/m)

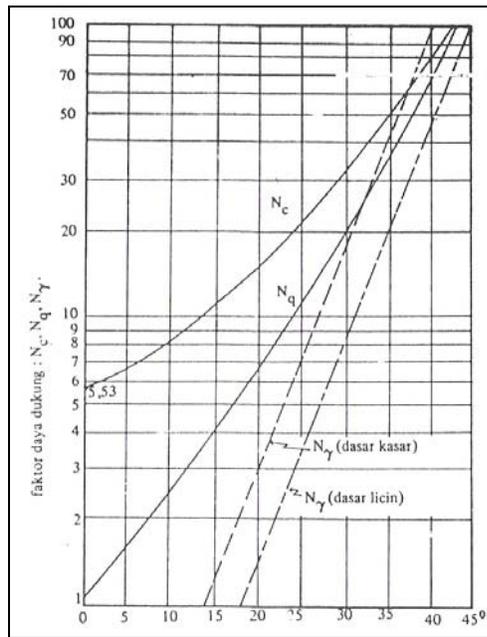
$\sum P_V$ = Jumlah tekanan akibat berat dinding penahan tanah per 1 m (t)

|e| = Nilai eksentrisitas

B = Lebar pondasi (m)

$$q_{ult} = c \times N_c + \gamma \times D \times N_q + 0,5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \quad \dots\dots\dots (3.80)$$

dimana: q_{ult} = Beban *ultimate* (t/m)
 c = Kohesi tanah
 D = Tinggi tapak pondasi (m)
 γ = Berat jenis tanah (t/m³)
 B = Lebar pondasi (m)
 N_c, N_q, N_γ = Faktor daya dukung tanah (dapat dilihat pada Gambar 3.36.)



Sumber: Sunggono Kh, 1995

Gambar 3.36. Faktor Daya Dukung Tanah

Ketentuan: $q_{max} < \frac{q_{ult}}{1,5}$ (3.81)

$q_{min} > 0$ (3.82)

b. Grouting

Grouting dilakukan dengan cara menginjeksikan larutan semen, dengan atau tanpa campuran bahan lain, ke dalam tanah dengan tujuan untuk meningkatkan angka kohesi (c) dan sudut geser tanah (θ) asli sehingga diperoleh angka keamanan yang lebih besar.

Sebelum dilakukan *grouting* secara keseluruhan terlebih dahulu dilakukan uji *grouting* dengan suatu lubang yang disebut *pilot hole*. Pada *pilot hole* ini dilakukan percobaan penyuntikan semen sehingga diperoleh campuran air-semen yang baik. Penyuntikan dimulai dengan campuran yang sangat encer kemudian berubah semakin kental. Perubahan campuran adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 3.9.

Setelah *grouting* selesai, dilakukan pemboran *check holes* diantara dua lubang *grouting* untuk mengecek nilai c dan ϕ pada lokasi tersebut. Jika nilai c dan ϕ belum seperti yang diharapkan maka dilakukan *grouting* pada lokasi tersebut.

Tabel 3.9. Perubahan Perbandingan Campuran Semen-Air Pada Uji *Grouting*

Perbandingan Campuran Semen : Air	Jumlah Pemasukan	Perubahan Perbandingan Campuran Semen : Air
1 : 10	< 1200 liter / 30 menit	Tetap 1 : 10
	> 1200 liter / 30 menit	Diubah 1 : 8
1 : 8	< 1200 liter / 30 menit	Tetap 1 : 8
	> 1200 liter / 30 menit	Diubah 1 : 5
1 : 5	< 1200 liter / 30 menit	Tetap 1 : 5
	> 1200 liter / 30 menit	Diubah 1 : 3
1 : 3	< 1200 liter / 30 menit	Tetap 1 : 3
	> 1200 liter / 30 menit	Diubah 1 : 2
1 : 2	Sampai 1000 liter / meter bila menurun dihentikan dan diulang setelah kering	
1 : 1	Dipakai bila terjadi kebocoran	

Sumber: Dwijanto, 2005

c. *Nailing*

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menjadikan suatu tebing lebih stabil terhadap tekanan tanah adalah dengan pemasangan *soil nailing*. *Soil nailing* termasuk kategori perkuatan kaku (*rigid*) yang dapat memikul gaya normal, gaya lintang dan gaya momen.

Nailing dilaksanakan dengan cara menanamkan batang *nail* ke dalam tanah. *Nailing* terbuat dari bahan baja berukuran panjang antara 4,00 meter sampai dengan 12,00 meter dengan diameter bervariasi antara 16 mm sampai 30

mm. Untuk melindungi batang *nail* dari korosi di antara batang *nail* dan tanah diisi dengan bahan *grouting*.

Faktor keamanan sebelum dilakukan *nailing* adalah:

$$FK_{awal} = \frac{M_{penahan}}{M_{penyebab}} \dots\dots\dots (3.83)$$

Untuk meningkatkan faktor keamanan kepada suatu nilai faktor keamanan baru maka diperlukan suatu momen penahan tambahan sehingga besarnya faktor keamanan akan menjadi:

$$FK_{baru} = \frac{M_{penahan} + M_{tambahan}}{M_{penyebab}} \text{ atau,} \dots\dots\dots (3.84-a)$$

$$FK_{baru} = FK_{awal} + \frac{M_{tambahan}}{M_{penyebab}} \dots\dots\dots (3.84-b)$$

Besarnya momen tambahan menjadi:

$$M_{tambahan} = (FK_{akhir} - FK_{awal}) \cdot M_{penyebab} \dots\dots\dots (3.85)$$

Momen tambahan didapatkan dengan cara memberikan gaya T dengan arah yang searah dengan garis singgung bidang gelincir pada titik tangkap ujung bagian bawah bidang gelincir atau sejauh r dari titik pusat bidang gelincir. Besarnya gaya T dihitung dengan rumus :

$$T = \frac{(FK_{akhir} - FK_{awal}) \times M_{penyebab}}{r} \dots\dots\dots (3.86)$$

Gaya diatas adalah yang harus diberikan per meter panjang tebing. Sehingga besarnya gaya yang harus diberikan oleh satu baris horisontal *nail* (T') menjadi:

$$T' = T \times b \dots\dots\dots (3.87)$$

dimana b adalah jarak antar baris horisontal *nail* dalam satuan meter.

Untuk menghasilkan momen tambahan diatas, gaya yang harus diberikan oleh satu batang *nail* dalam arah mendatar (P) adalah:

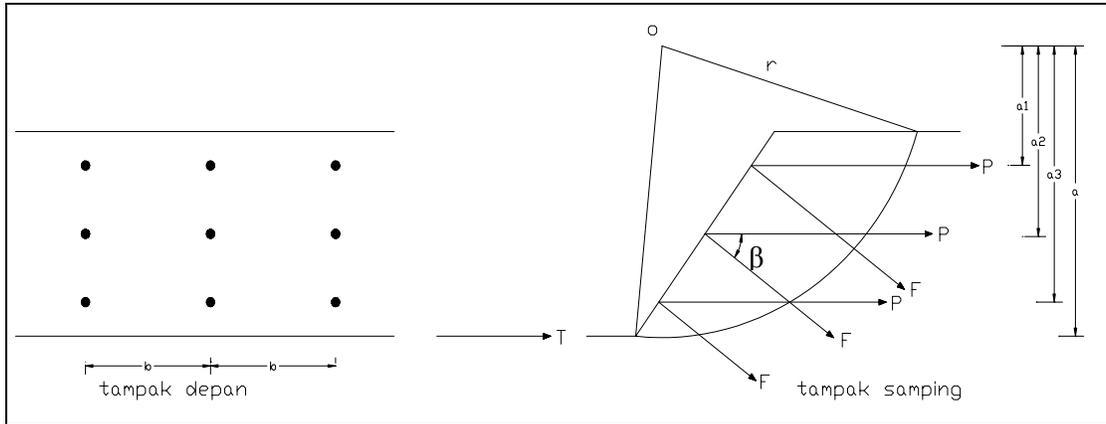
$$P = \frac{T' \times a}{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n} \dots\dots\dots (3.88)$$

dimana a adalah jarak dari gaya T ke titik pusat bidang gelincir. Posisi a_1, a_2, \dots, a_n dapat dilihat pada Gambar 3.37. Sedangkan n adalah jumlah *nail* dalam satu baris vertikal.

Sedangkan gaya yang harus diberikan oleh satu batang *nail* searah batang *nail* (F) adalah:

$$F = \frac{P}{\cos \beta} \quad \dots\dots\dots (3.89)$$

dimana β adalah besar sudut antara batang *nail* dengan bidang mendatar, untuk lebih jelasnya dapat dilihat ilustrasi pada Gambar 3.37.



Gambar 3.37. Denah Dan Gaya *Nailing*

Diameter *nail* dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} = \bar{\sigma}_{ijin} \quad \dots\dots\dots (3.90)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \bar{\sigma}_{ijin}}} \quad \dots\dots\dots (3.01)$$

dimana: F = Gaya yang harus diberikan satu batang *nail* (kg)

D = Diameter penampang *nail* (mm)

$\bar{\sigma}_{ijin}$ = Tegangan tarik ijin bahan *nail* (kg/cm²)

Panjang *nail* dihitung dengan rumus:

$$L = L_e + L_r \quad \dots\dots\dots (3.92)$$

$$L_e = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot c} \quad \dots\dots\dots (3.93)$$

dimana: L_r = Panjang nail diatas bidang longsor (m)

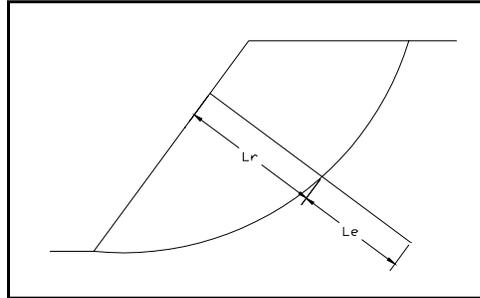
L_e = Panjang nail dibawah bidang longsor (m), L_e ≥ 1 m.

F = Gaya yang harus diberikan satu batang *nail* (kg)

r = Diameter lubang *nail* (m)

c = Kohesi tanah (kg/m^2)

Panjang batang *nail* (L) minimal harus mencapai pada bidang gelincir dengan angka keamanan yang memenuhi syarat.



Gambar 3.38. Panjang L_r Dan L_e

3.8.2. Akibat Arus Sungai

Alternatif konstruksi perkuatan tebing untuk mengantisipasi longsoran yang diakibatkan oleh arus sungai adalah krib bronjong batu. Krib bronjong batu adalah bangunan bronjong batu yang dibuat mulai dari tebing sungai ke arah tengah guna mengatur arus sungai. Tujuan utamanya adalah:

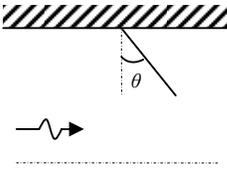
- Mengatur arah arus sungai
- Mengurangi kecepatan arus sungai sepanjang tebing sungai
- Mempercepat sedimentasi
- Menjamin keamanan tanggul atau tebing terhadap gerusan
- Mempertahankan lebar dan kedalaman air pada alur sungai
- Mengkonsentrasikan arus sungai dan memudahkan penyadapan

Secara umum cara pembuatan krib bronjong batu ditetapkan secara empiris dengan memperhatikan pengalaman masa lalu dalam pembuatan krib yang hampir sejenis. Tinggi krib bronjong batu adalah setinggi bantaran sungai atau setinggi muka air banjir harian rata-rata.

Panjang dan kemiringan krib bronjong batu ditetapkan secara empiris yang didasarkan pada pengamatan data sungai yang bersangkutan antara lain situasi sungai, lebar sungai, kemiringan sungai, debit banjir, kedalaman air, debit normal, transportasi sedimen dan kondisi sekeliling sungai. Jarak antar krib sebesar 3 kali

panjang krib. Jika pada lokasi pelaksanaan belum terdapat krib, maka kemiringan krib dapat direncanakan seperti ditunjukkan pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10. Arah Aliran Dan Sudut Sumbu Krib

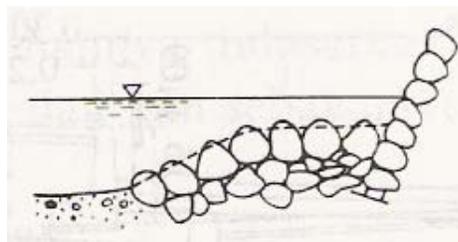
Lokasi pembuatan krib di sungai	Arah aliran dan sudut sumbu krib θ	
Bagian lurus	10 ⁰ - 15 ⁰	
Belokan luar	5 ⁰ - 15 ⁰	
Belokan dalam	0 ⁰ - 10 ⁰	

Sumber: Tim Penyusun Dosen Perguruan Tinggi Swasta, 1997

3.9. Konstruksi Perkuatan Dasar Sungai

Konstruksi perkuatan dasar sungai menggunakan *dumping stone*. *Dumping stone* atau lapis lindung batu (*rip-rap*) merupakan konstruksi yang paling sederhana diantara beberapa jenis konstruksi perkuatan dasar sungai. Apabila di sekitar lokasi pekerjaan terdapat bahan batu yang beratnya melebihi berat dari batu dasar sungai, maka bahan batu tersebut dapat digunakan tanpa kekhawatiran akan hanyut. Batu yang dipergunakan biasanya batu kali yang besar-besar, batu belah dan batu gunung yang dibelah-belah dalam berbagai bentuk dan ukuran.

Pada saat pemasangan lapis lindung batu, maka batu-batu yang ukurannya besar-besar ditempatkan pada permukaan agar dapat melindungi permukaan dasar sungai terhadap gerusan. Sedangkan batu-batu dengan ukuran yang lebih kecil ditempatkan pada lapisan yang lebih bawah dan celah-celah diantaranya diisi dengan kerikil sungai. Mengenai penempatan *dumping stone* dapat dilihat pada Gambar 3.39.



Sumber: Tim Penyusun Dosen Perguruan Tinggi Swasta, 1997

Gambar 3.39. Contoh *Dumping Stone*

Besar diameter batuan minimum yang dapat digunakan sebagai *dumping stone* dapat diketahui dengan menggunakan Grafik *Shield* (dapat dilihat pada Gambar 3.10). Besar gaya seret kritis (σ_{cr}) yang digunakan adalah sebesar gaya seret yang terjadi di dasar sungai (σ_b), sehingga:

$$\tau_{cr} = \tau_b \quad \dots\dots\dots (3.94)$$

$$\tau_{cr} = 0,97 \times \rho_w \times g \times h \times I_b \quad \dots\dots\dots (3.95)$$

dimana: τ_{cr} = Gaya seret kritis dasar sungai (kg/m²)

τ_b = Gaya seret dasar sungai (kg/m²)

ρ_w = Rapat massa air (kg/m³)

g = Gaya gravitasi (m/dt²)

h = Tinggi air (m)

I_b = Kemiringan alur dasar sungai

Kemudian dengan menggunakan Grafik *Shield* dapat diketahui butiran minimal yang dapat digunakan sebagai *dumping stone*.