

## BAB III LANDASAN TEORI

### A. Tinjauan Umum

Hidrolika adalah bagian dari ilmu yang mempelajari perilaku air baik dalam keadaan diam atau yang disebut hidrostatika maupun dalam keadaan bergerak atau disebut hidrodinamika. Untuk mengetahui karakteristik suatu aliran air sungai dengan lebar penampang yang besar memerlukan pendekatan beberapa pengamatan dengan melakukan pengukuran. Selanjutnya dilakukan kegiatan analisis terhadap fenomena aliran yang terjadi dengan menggunakan model tertentu. Model merupakan penyederhanaan dari suatu realita atau kondisi sesungguhnya di *real world* (Thomas dan Hugget, 1980).

Sifat aliran air dalam suatu sungai dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah debit sungai (volume air) yang tergantung pada daerah aliran sungai tersebut. Faktor kemiringan sungai (*gradient*) yang dapat digunakan sebagai petunjuk tingkat kecepatan aliran. *Gradient* sungai dapat dihitung dengan bantuan garis kontur yang memotong sungai pada peta topografi. Kemudian faktor lebar penampang sungai yang dapat mempengaruhi kecepatan arus. Semakin lebar penampang sungai maka kecepatan arus akan semakin lambat dan sebaliknya semakin sempit penampang sungai kecepatan arus akan semakin cepat.

Model hidrolika pada penelitian ini digunakan untuk mendapatkan tinggi muka air, kecepatan aliran dan tegangan geser. Hidrolika juga digunakan dalam menganalisa koefisien manning atau koefisien kekasaran saluran pada sisi kiri, sisi kanan, dan dasar saluran atau sungai. Analisa koefisien manning didasarkan pada tinggi muka air dan kecepatan aliran permukaan hasil pengamatan di lapangan. Berdasarkan data debit yang diperoleh dari hasil pengukuran lapangan dan beberapa *input* nilai angka koefisien kekasaran saluran maka akan diperoleh suatu nilai *output* berupa nilai tinggi muka air dan kecepatan aliran yang paling mendekati hasil pengamatan di lapangan. Nilai koefisien manning inilah yang akan digunakan dalam analisa hidrolika selanjutnya terhadap kecepatan aliran, muka air, kecepatan geser dan kapasitas tampung limpasan air paska erupsi

Merapi pada Oktober-November 2010 di Sungai Progo. Analisis hidrolika pada penelitian ini menggunakan *software* HEC-RAS versi 4.1.0 untuk memodelkan aliran satu dimensi pada sungai Progo.

Triatmodjo (1993) menyebutkan bahwa dalam aliran satu dimensi, kecepatan di setiap titik pada tampang lintang mempunyai besar dan arah yang sama. Sebenarnya jenis aliran semacam ini sangat jarang terjadi. Tetapi dalam analisa hidrolika, aliran tiga dimensi dapat disederhanakan menjadi aliran satu dimensi berdasarkan beberapa anggapan, misalnya mengabaikan perubahan kecepatan vertikal dan melintang terhadap kecepatan pada arah memanjang. Keadaan pada tampang melintang adalah nilai rerata dari kecepatan, rapat massa, dan sifat-sifat lainnya. Perubahan kecepatan hanya terjadi pada arah aliran.

#### **B. HEC-RAS Versi 4.1.0**

HEC-RAS adalah sebuah program aplikasi yang didesain untuk melakukan berbagai analisis hidrolika terhadap pemodelan aliran satu dimensi pada saluran atau sungai, River Analysis System (RAS). *Software* ini dibuat oleh Hydrologic Engineering Center (HEC) yang merupakan satu divisi di dalam Institute for Water Resources (IWR), di bawah US Army Corps of Engineers (USACE). HEC-RAS Versi 4.1.0 memiliki empat komponen hitungan hidrolika satu dimensi yaitu a) hitungan profil muka air aliran permanen, b) simulasi aliran tidak permanen, c) hitungan angkutan sedimen, d) analisis kualitas air.

Menurut Simple Geometry River (2011) apabila kecepatan, kedalaman, dan debit aliran tidak berubah terhadap waktu dalam kasus aliran permanen, maka ketiga parameter tersebut merupakan fungsi waktu dalam kasus aliran tak permanen (*unsteady flow*). Contoh dari aliran tidak permanen adalah perubahan debit di dalam pipa atau saluran, aliran banjir di sungai dan aliran di muara sungai yang dipengaruhi pasang surut.

Pada pemodelan aliran tidak permanen menggunakan HEC-RAS, ditetapkan syarat batas untuk melakukan analisa aliran tidak permanen. Pada bagian *upstream* sistem dapat dimodelkan dengan tipe kondisi batas : hidrograf aliran, hidrograf perancah, hidrografi aliran dan perancah. Pada *downstream* dari sistem

sungai dapat dimodelkan dengan tipe kondisi batas : kurva ukuran, kedalaman normal, hidrografi perancah, hidrografi aliran, hidrografi perancah dan aliran. Selain itu, kondisi awal ditetapkan berdasarkan data debit aliran mula-mula atau data elevasi air yang diketahui pada potongan stasiun permodelan.

### C. Persamaan Pada HEC-RAS

Hitungan hidrolika aliran pada dasarnya adalah mencari kedalaman dan kecepatan aliran di sepanjang alur yang ditimbulkan oleh debit yang masuk ke dalam alur dan kedalaman aliran di batas hilir. Hitungan hidrolika aliran di dalam HEC-RAS dilakukan dengan membagi aliran ke dalam dua kategori, yaitu aliran permanen dan aliran tak permanen. HEC-RAS menggunakan metode hitungan yang berbeda untuk masing-masing kategori aliran tersebut. Untuk aliran permanen, HEC-RAS memakai persamaan energi kecuali di tempat-tempat yang kedalaman alirannya melewati kedalaman kritis. Di tempat terjadi loncat air, pertemuan alur, dan aliran dangkal melalui jembatan, HEC-RAS memakai persamaan (kekekalan) momentum. Di tempat terjadi terjunun, aliran melalui peluap, dan aliran melalui bendung, HEC-RAS memakai persamaan-persamaan empiris. Untuk aliran tak permanen, HEC-RAS memakai persamaan kekekalan massa (*continuity, conservation of mass*) dan persamaan momentum. Kedua persamaan dituliskan dalam bentuk persamaan diferensial parsial, yang kemudian diselesaikan dengan metode *finite difference approximation* berskema implisit.

#### 1. Persamaan Energi

HEC-RAS menghitung profil muka air di sepanjang alur urut dari satu tampang lintang ke tampang lintang berikutnya. Prosedur perhitungan didasarkan pada penyelesaian persamaan aliran satu dimensi melalui saluran terbuka. Aliran satu dimensi ditandai dengan besarnya kecepatan yang sama pada seluruh penampang atau digunakan kecepatan rata-rata. Profil muka air dihitung dari suatu penampang dengan Persamaan Energi melalui prosedur iterative yang disebut dengan *Standard Step Method*. Persamaan Energi yang dimaksud adalah :

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_f + h_e \quad (3.1)$$

dengan :

$Y_1, Y_2$  = kedalaman air penampang 1 dan 2 (m)

$Z_1, Z_2$  = elevasi dasar saluran pada penampang 1 dan 2 (m)

$V_1, V_2$  = kecepatan rata-rata aliran pada penampang 1 dan 2 (m/dt)

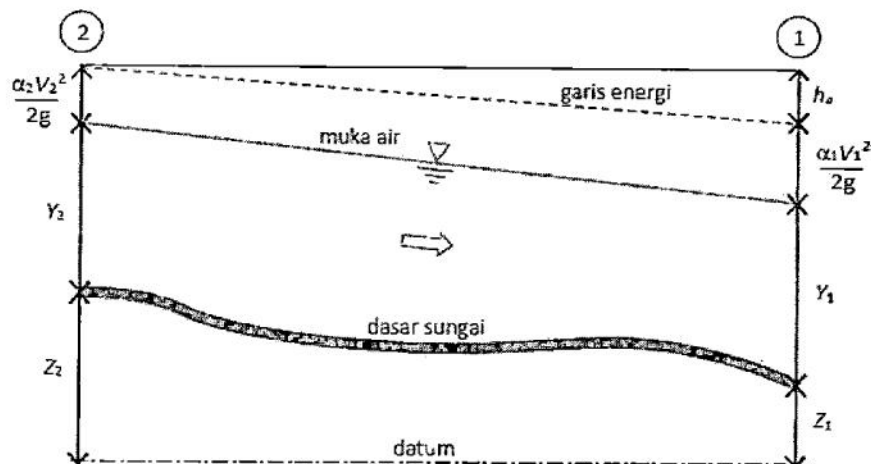
$\alpha_1, \alpha_2$  = koefisien energi pada penampang 1 dan 2

$g$  = percepatan gravitasi (m/dt<sup>2</sup>)

$h_f$  = kehilangan tekanan akibat gesekan (m)

$h_e$  = kehilangan tekanan akibat pusaran (m)

Gambar 2.1 Diagram aliran berubah beraturan mengilustrasikan profil aliran yang menunjukkan komponen aliran sesuai dengan suku-suku pada persamaan energi. Dari diagram aliran pada Gambar 3.1, tampak bahwa kedalaman aliran diukur ke arah vertikal.



Gambar 3.1 Diagram aliran berubah beraturan

## 2. Kehilangan Tinggi Energi

Kehilangan (tinggi) energi,  $h_e$ , di antara dua tampang lintang terdiri dari dua komponen, yaitu kehilangan energi karena gesekan (*friction losses*) dan kehilangan energi karena perubahan tampang (*contraction or expansion losses*). Kehilangan energi antara tampang 2 dan 1 dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$h_e = L S_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.2)$$

dengan :

- $L$  = panjang ruas sungai antar kedua tampang yang diberi bobot menurut debit
- $S_f$  = *representative friction slope* antar kedua tampang,
- $C$  = koefisien kehilangan energi akibat perubahan tampang (kontraksi atau ekspansi)

Panjang ruas sungai antar dua tampang yang diberi bobot sesuai dengan debit dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (3.3)$$

dengan :

- $L_{lob}, L_{ch}, L_{rob}$  = panjang ruas sungai di sisi kiri (*left overbank*), alur utama (*main channel*), di sisi kanan (*right overbank*),
- $Q_{lob}, Q_{ch}, Q_{rob}$  = debit yang mengalir melalui *left overbank*, *main channel* dan *right overbank*.

### 3. Kapasitas Angkut Tampang

Kapasitas angkut dan kecepatan rata-rata di suatu tampang dihitung dengan membagi tampang menjadi beberapa bagian; di setiap bagian, kecepatan terbagi merata. Bagian-bagian tersebut dikelompokkan menjadi tiga alur yaitu alur bantaran kiri (*left overbank*), alur utama (*main channel*), dan alur bantaran kanan (*right overbank*). Besarnya debit dihitung perbagian penampang sungai dengan mengacu pada persamaan *Manning's* berikut :

$$Q = K S_f^{2/3} \quad (3.4)$$

$$K = \frac{1}{n} A R^{2/3} \quad (3.5)$$

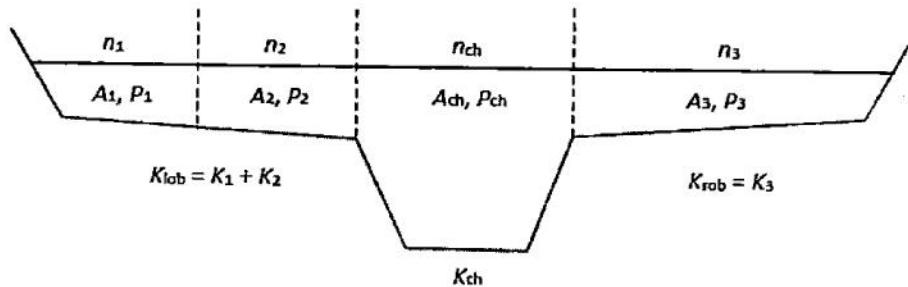
dimana :

- $K$  = kapasitas angkut tiap bagian tampang,
- $n$  = koefisien kekasaran Manning tiap bagian tampang.

$A$  = luas tampang basah tiap bagian tampang,

$R$  = radius hidrolis tiap bagian tampang.

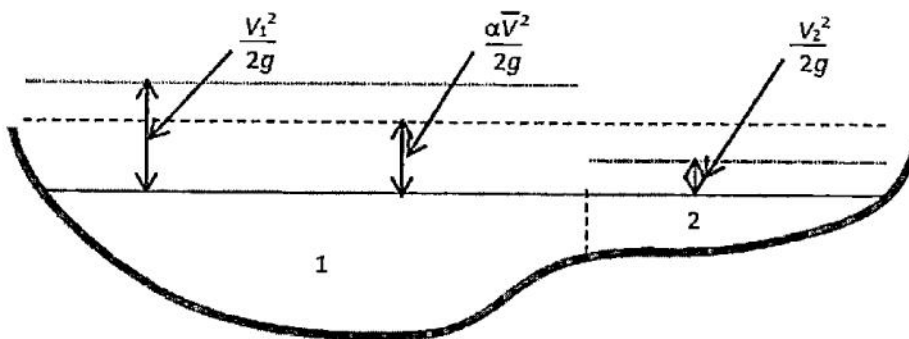
Kapasitas angkut total suatu tampang adalah jumlah kapasitas angkut bagian tampang seperti yang diperlihatkan Gambar 3.2 Pembagian tampang untuk keperluan hitungan kapasitas angkut.



Gambar 3.2 Pembagian tampang untuk keperluan hitungan kapasitas angkut.

#### 4. Tinggi Energi Kinetik Rata-Rata

HEC-RAS adalah model satu-dimensi, maka walaupun suatu tampang lintang dikelompokkan ke dalam beberapa bagian, namun hanya ada satu muka air di tampang lintang tersebut. Dengan demikian, di satu tampang hanya ada satu nilai tinggi energi kinetik (rata-rata). Untuk satu muka air, tinggi energi kinetik rata-rata dihitung dengan merata-ratakan tinggi energi kinetik di ketiga bagian tampang (*left overbank, main channel, right overbank*) yang diberi bobot berdasarkan debit di setiap bagian tampang. Gambar 3.3 menunjukkan contoh hitungan tinggi energi kinetik rata-rata di sebuah tampang yang dibagi menjadi *right overbank* dan *main channel* (tidak ada *left overbank*).



Gambar 3.3 Hitungan tinggi energi kinetik rata-rata di suatu tampang.

Untuk menghitung tinggi energi kinetik rata-rata, diperlukan koefisien tinggi kecepatan,  $\alpha$ , yang dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$\frac{\alpha V^2}{2g} = \frac{\frac{Q_1 V_1^2}{2g} + \frac{Q_2 V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (3.6)$$

dengan demikian :

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) V^2} \quad (3.7)$$

atau pada umumnya :

$$\alpha = \frac{|Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_n V_n^2|}{Q V^2} \quad (3.8)$$

#### 5. Tinggi Hilang Karena Gesekan

Kehilangan energi akibat gesekan (*friction loss*) merupakan perkalian antara kemiringan garis energi karena gesekan (*friction slope*),  $S_f$ , dan panjang ruas sungai antara dua tampang,  $L$ .

Kemiringan garis energi karena gesekan (*friction slope*) di suatu tampang dihitung dengan persamaan Manning sebagai berikut :

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad (3.9)$$

#### 6. Koefisien Persempitan dan Perlebaran Tampang

Koefisien kehilangan energi karena kontraksi dan ekspansi dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$h_e = C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.10)$$

Dalam persamaan tersebut  $C$  adalah koefisien kontraksi atau ekspansi. HEC-RAS menganggap aliran melewati kontraksi (persempitan tampang) apabila tinggi kecepatan hilir lebih besar daripada tinggi kecepatan hulu. Sebaliknya, ketika tinggi kecepatan hulu lebih besar daripada tinggi kecepatan hilir, HEC-RAS menganggap aliran melewati ekspansi (perlebaran tampang).

### 7. Persamaan Aliran Satu Dimensi

Cara HEC-RAS memodelkan aliran di bantaran didasarkan pada metode yang awalnya dikembangkan oleh Fread (1976) dan Smith (1978), yang kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh Barkau (1982). Secara garis besar, metode ini adalah aliran melalui alur utama dan melalui bantaran sebagai dua aliran yang melewati dua tampang saluran terpisah serta menuliskan persamaan kontinuitas dan persamaan momentum untuk masing-masing tampang tersebut.

Penyederhanaan dilakukan dengan menganggap muka air di kedua tampang saluran pada arah lateral (tegak lurus arah aliran) datar atau horizontal. Dengan demikian: 1) transfer momentum di antara kedua tampang dapat diabaikan, dan 2) debit terbagi ke kedua ujung tampang berdasarkan kapasitas angkut (*conveyance*) masing-masing tampang yaitu :

$$Q_c = \Phi Q \quad (3.11)$$

dengan :

$Q_c$  = debit aliran melalui alur utama (*channel*),

$Q$  = debit total aliran,

$\Phi = K_c / (K_c + K_f)$

$K_c$  = kapasitas angkut tampang alur utama,

$K_f$  = kapasitas angkut tampang bantaran.

Dengan anggapan tersebut, maka persamaan aliran satu dimensi dapat digabungkan menjadi satu kelompok persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(\Phi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial(1-\Phi)Q}{\partial x_f} = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\Phi^2 Q^2 / A_c)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\Phi)^2 Q^2 / A_f]}{\partial x_f} + g A_c \left[ \frac{\partial z}{\partial x_c} + S_{fc} \right] + g A_c \left[ \frac{\partial z}{\partial x_f} + S_{ff} \right] = 0 \quad (3.13)$$



Dalam kedua persamaan di atas, subskrip  $c$  mengacu pada alur utama dan subskrip  $f$  mengacu pada bantaran. Persamaan di atas dijabarkan dengan pendekatan beda hingga implisit dan persamaan yang diperoleh diselesaikan dengan cara iterasi Newton-Raphson.

#### D. 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 atau tegangan geser (*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 tegangan geser ( $\tau_0$ ) pada penampang sungai yang besarnya adalah :

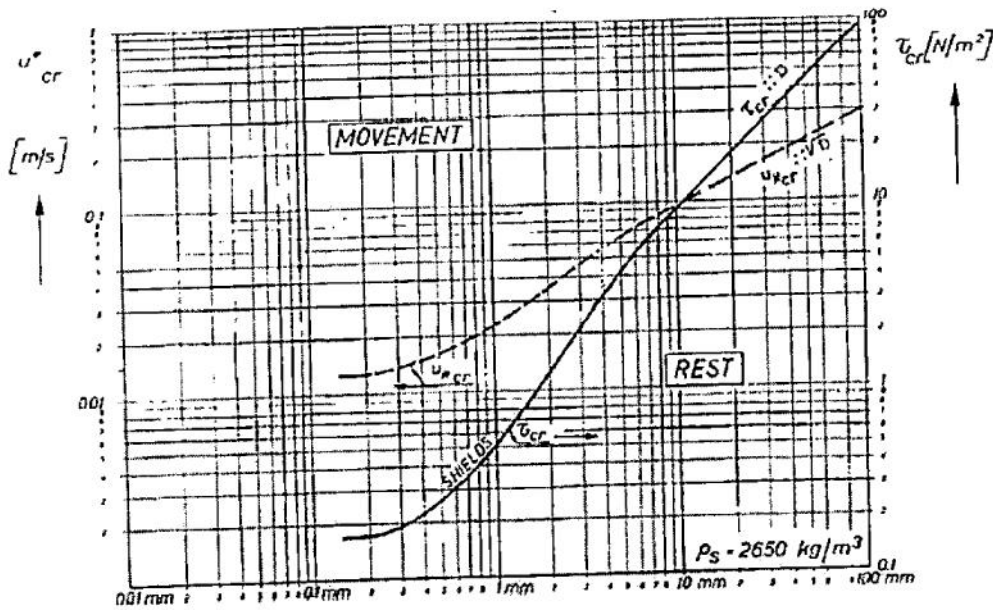
$$\tau_0 = \rho_w g h l \quad (3.14)$$

dimana :

- $\rho_w$  = rapat massa air ( $\text{kg/m}^3$ )
- $g$  = gaya gravitasi ( $\text{m/dt}^2$ )
- $h$  = tinggi air (m)
- $l$  = kemiringan alur dasar sungai

Erosi dasar sungai terjadi jika tegangan geser ( $\tau_0$ ) lebih besar dari tegangan geser kritis ( $\tau_{cr}$ ) pada dasar dan tebing sungai. Tegangan geser kritis adalah tegangan geser yang terjadi tepat pada saat butiran akan bergerak. Besarnya tegangan geser kritis didapatkan dengan menggunakan Grafik *Shield* berdasarkan data ukuran butiran tanah dasar sungai. Grafik *Shield* ditunjukkan pada Gambar 3.4

Awal gerak butir sedimen sangat penting dalam kaitannya dengan transpor sedimen. Karena pergerakan butir sedimen sangat tidak teratur maka dilakukan beberapa pendekatan dalam mendefinisikan awal gerak sedimen. Salah satunya adalah pendekatan tegangan geser kritis. Pendekatan ini didasarkan pada konsep bahwa gaya geser yang bekerja pada aliran dianggap paling berperan terhadap pergerakan butir sedimen.



Sumber : Van Te Chow, 1959

Gambar 3.4 Grafik *Shield*.

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

#### 1. Tegangan Geser Pada Dasar Sungai

Besarnya tegangan geser yang terjadi pada dasar sungai adalah :

$$\tau_b = 0,97 \rho_w g h I_b \quad (3.15)$$

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

$$0,97 \rho_w g h I_b = \tau_{cr,b} \quad (3.16)$$

$$I_b = \frac{\tau_{cr,b}}{0,97 \rho_w g h} \quad (3.17)$$

$$V_{cr,b} = \frac{1}{n} R^{2/3} I_b^{1/2} \quad (3.18)$$

#### 2. Tegangan Geser Pada Tebing Sungai

Besarnya tegangan geser yang terjadi pada tebing sungai adalah :

$$\tau_s = 0,75 \rho_w g h I_s \quad (3.19)$$

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

$$\tau_{cr,s} = K_\beta \tau_{cr} \quad (3.20)$$

$$K_\beta = \cos \beta \sqrt{1 - \left(\frac{\text{tg}\beta}{\text{tg}\phi}\right)^2} \quad (3.21)$$

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

$$0,75 \rho_w g h I_s = \tau_{cr,s} \quad (3.22)$$

$$I_b = \frac{\tau_{cr,s}}{0,75 \rho_w g h} \quad (3.23)$$

$$V_{cr,s} = \frac{1}{n} R^{2/3} I_s^{1/2} \quad (3.24)$$

dimana :

$\tau_b$  = tegangan geser pada dasar sungai ( $\text{kg/m}^2$ )

$\tau_{cr,b}$  = tegangan geser kritis pada dasar sungai ( $\text{kg/m}^2$ )

$\tau_s$  = tegangan geser pada tebing sungai ( $\text{kg/m}^2$ )

$\tau_{cr}$  = tegangan geser kritis

$\beta$  = sudut lereng sungai ( $^\circ$ )

$\phi$  = 30-40 (tergantung diameter butiran dari grafik pada Gambar 3.5)

$\tau_{cr,s}$  = tegangan geser kritis pada tebing sungai ( $\text{kg/m}^2$ )

$\rho_w$  = rapat massa air ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  = gaya gravitasi ( $\text{m/dt}^2$ )

$h$  = tinggi air (m)

$I_b$  = kemiringan alur dasar sungai

$V_{cr,b}$  = kecepatan kritis dasar sungai (m/dt)

$I_s$  = kemiringan alur tebing sungai

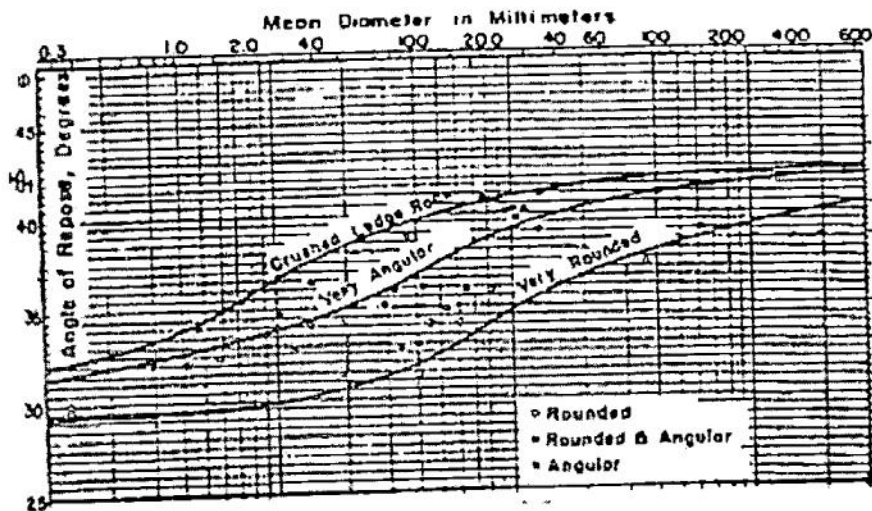
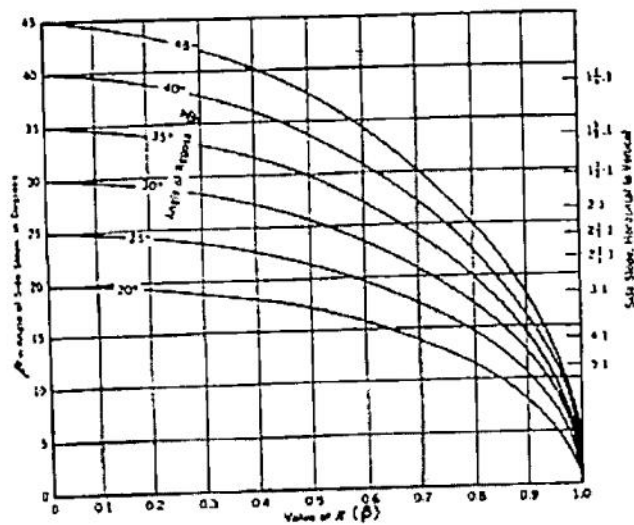
$V_{cr,s}$  = kecepatan kritis tebing sungai (m/dt)

$I_b$  = kemiringan alur dasar sungai

$V_{cr,b}$  = kecepatan kritis dasar sungai (m/dt)

$R$  = jari-jari hidrolik (m)

$n$  = angka kekasaran Manning



Sumber : Van Te Chow, 1959

Gambar 3.5 Grafik hubungan antara diameter butiran dan  $\Phi$

### E. Angka Kekasaran Manning

Pada tahun 1889 seorang insinyur Irlandia, Robert Manning mengemukakan sebuah rumus yang akhirnya diperbaiki menjadi rumus yang sangat dikenal sebagai :

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \tag{3.25}$$

dimana :

$V$  = kecepatan rata-rata (m/dt)

$R$  = jari-jari hidrolis (m)

$S$  = kemiringan saluran

$n$  = kekasaran dari *Manning*.

Rumus ini dikembangkan dari tujuh rumus berbeda, berdasarkan data percobaan *Bazin* yang selanjutnya dicocokkan dengan 170 percobaan. Akibat sederhananya rumus ini dan hasilnya yang memuaskan dalam pemakaian praktis, rumus *Manning* menjadi sangat banyak dipakai dibandingkan dengan rumus aliran seragam lainnya untuk menghitung aliran saluran terbuka.

Angka kekasaran manning adalah suatu nilai koefisien yang menunjukkan kekasaran suatu permukaan saluran atau sungai baik pada sisi maupun dasar saluran atau sungai. Nilai kekasaran manning memiliki hubungan terhadap kecepatan aliran yang terjadi pada suatu penampang. Semakin besar nilai angka kekasaran manning, maka kecepatan aliran pada suatu penampang akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya semakin kecil angka kekasaran manning maka kecepatan aliran yang terjadi pada suatu penampang akan semakin besar.

Nilai angka kekasaran manning berbeda-beda tergantung dari tipe saluran. Adapun nilai angka kekasaran manning tersebut disajikan pada Tabel 3.1 Angka kekasaran manning.

Tabel 3.1 Angka kekasaran Manning

Tipe Saluran dan Deskripsinya	Minimum	Normal	Maksimum
A. Saluran, dilapis atau dipoles			
A-1 Logam			
a. Baja dengan permukaan licin			
1. Tidak dicat	0,011	0,012	0,014
2. dicat	0,012	0,013	0,017
b. Baja dengan permukaan bergelombang	0,021	0,025	0,03
A-2 Bukan Logam			
a. Semen			
1. Acian	0,01	0,011	0,013
2. Adukan	0,011	0,013	0,015

Tabel 3.2 Angka kekasaran Manning - Lanjutan

Tipe Saluran dan Deskripsinya	Minimum	Normal	Maksimum
b. Kayu			
1. Diserut, tidak diawetkan	0,01	0,012	0,014
2. Diserut, diawetkan dengan creosote	0,011	0,012	0,015
3. Tidak diserut	0,011	0,013	0,015
4. Papan	0,012	0,015	0,018
5. Dilapis dengan kertas kedap air	0,01	0,014	0,017
c. Beton			
1. Dipoles dengan sendok kayu	0,011	0,013	0,015
2. Dipoles sedikit	0,013	0,015	0,016
3. Dipoles	0,015	0,017	0,02
4. Tidak dipoles	0,014	0,017	0,02
5. Adukan semprot, penampang rata	0,016	0,019	0,023
6. Adukan semprot, penampang bergelombang	0,018	0,022	0,025
7. Pada galian batu yang teratur	0,017	0,02	
8. Pada galian batu yang tak teratur	0,022	0,027	
d. Dasar beton dipoles sedikit dengan tebing dari			
1. Batu teratur dalam adukan	0,015	0,017	0,02
2. Batu tak teratur dalam adukan	0,014	0,02	0,024
3. Adukan batu, semen, diplester	0,016	0,02	0,024
4. Adukan batu dan semen	0,02	0,025	0,03
5. Batu kosong atau rip-rap	0,02	0,03	0,035
e. Dasar kerikil dengan tebing dari			
1. Batu acuan	0,017	0,02	0,025
2. Batu tak teratur dalam adukan	0,02	0,023	0,026
3. Batu kosong atau rip-rap	0,023	0,033	0,036
f. Bata			
1. Diglasir	0,011	0,013	0,015
2. Dalam adukan semen	0,012	0,015	0,018
g. Pasangan batu			
1. Batu pecah disemen	0,017	0,025	0,03
2. Batu kosong	0,023	0,032	0,035
h. Batu potong, diatur	0,013	0,015	0,017
i. Aspal			
1. Halus	0,013	0,013	
2. Kasar	0,016	0,016	
j. Lapisan dari tanaman	0,03		0,05

Tabel 3.3 Angka kekasaran Manning - Lanjutan

Tipe Saluran dan Deskripsinya	Minimum	Normal	Maksimum
<b>B. Digali atau dikeruk</b>			
<b>a. Tanah lurus dan seragam</b>			
1. Bersih, baru dibuat	0,016	0,018	0,02
2. Bersih, telah melapuk	0,018	0,022	0,025
3. Kerikil, penampang seragam, bersih	0,022	0,025	0,03
4. Berumput pendek, sedikit tanaman pengganggu	0,022	0,027	0,033
<b>b. Tanah, berkelok-kelok dan tenang</b>			
1. Tanah tetumbuhan	0,023	0,025	0,03
2. Rumput dengan beberapa tanaman pengganggu	0,025	0,03	0,033
3. Banyak tanaman pengganggu atau tanaman air pada saluran yang dalam	0,03	0,035	0,04
4. Dasar tanah dengan tebing dari batu pecah	0,028	0,03	0,035
5. Dasar berbatu dengan tanaman pengganggu pada tebing	0,025	0,035	0,04
6. Dasar berkerakal dengan tebing yang bersih	0,03	0,04	0,05
<b>c. Hasil galian atau kerukan</b>			
1. Tanpa tetumbuhan	0,025	0,028	0,033
2. Semak-semak kecil di tebing	0,035	0,05	0,06
<b>d. Pecahan batu</b>			
1. Halus, seragam	0,025	0,035	0,04
2. Tajam, tidak beraturan	0,035	0,04	0,05
<b>e. Saluran tidak dirawat, dengan tanaman pengganggu dan belukar tidak dipotong</b>			
1. Banyak tanaman pengganggu setinggi air	0,05	0,08	0,12
2. Dasar bersih, belukar di tebing	0,04	0,05	0,08
3. Idem, setinggi muka air tertinggi	0,045	0,07	0,11
4. Banyak belukar setinggi air banjir	0,08	0,1	0,14
<b>C. Saluran Alam</b>			
<b>C-1 Saluran kecil (lebih atas pada taraf banjir &lt; 100 kaki)</b>			
<b>a. Saluran di daratan</b>			
1. Bersih lurus, terisi penuh, tanpa rekahan atau ceruk dalam	0,025	0,03	0,033
2. Seperti di atas, banyak batu-batu, tanaman pengganggu	0,03	0,035	0,04

Tabel 3.4 Angka kekasaran Manning - Lanjutan

Tipe Saluran dan Deskripsinya	Minimum	Normal	Maksimum
3. Bersih, berkelok-kelok, berceruk, bertebing	0,033	0,04	0,045
4. Seperti di atas, dengan batu-batu, tanaman pengganggu	0,035	0,045	0,05
5. Seperti di atas, tidak terisi penuh, banyak kemiringan dan penampang yang kurang efektif	0,04	0,048	0,055
6. Tenang pada bagian lurus, tanaman pengganggu, ceruk dalam	0,05	0,07	0,08
b. Saluran di pegunungan, tanpa tetumbuhan di saluran tebing umumnya terjal, pohon dan semak-semak sepanjang tebing			
1. Dasar: kerikil, kerakal dan sedikit batu besar	0,03	0,04	0,05
2. Dasar: kerakal dengan batu besar	0,04	0,05	0,07
C-2 Dataran Banjir			
a. Padang rumput tanpa belukar			
1. Rumput pendek	0,025	0,03	0,035
2. Rumput tinggi	0,03	0,035	0,05
b. Daerah pertanian			
1. Tanpa tanaman	0,02	0,03	0,04
2. Tanaman dibariskan	0,025	0,035	0,045
3. Tanaman tidak dibariskan	0,03	0,04	0,05
c. Belukar			
1. Belukar terpencah, banyak tanaman pengganggu	0,035	0,05	0,07
2. Belukar jarang dan pohon, musim dingin	0,035	0,05	0,06
3. Belukar jarang dan pohon, musim semi	0,04	0,06	0,08
4. Belukar sedang sampai rapat, musim dingin	0,045	0,07	0,11
5. Belukar sedang sampai rapat, musim semi	0,07	0,1	0,16

Sumber : Garry W. Brunner, 2010 (*Hydraulic Reference Manual*)