

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Konsep Gerusan Lokal

Proses yang mengikuti aliran pada sungai adalah proses penggerusan, angkutan sedimen dan pengendapan, dimana proses tersebut berurutan mengikuti arah aliran sungai. Gerusan adalah proses penurunan dasar sungai karena erosi di bawah elevasi permukaan alami atau proses semakin dalamnya dasar sungai karena interaksi antara karakteristik aliran dengan karakteristik material dasar sungai. Proses penggerusan akan terjadi secara alami, baik karena pengaruh morfologi sungai seperti tikungan sungai atau penyempitan aliran sungai, atau pengaruh adanya bangunan hidrolika yang menghalangi aliran seperti pilar jembatan.

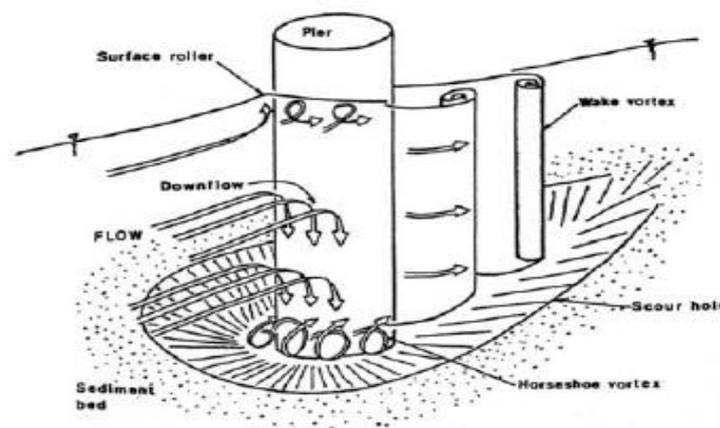
Gerusan yang dihasilkan secara langsung akibat adanya suatu bangunan dinamakan gerusan lokal (*local scouring*). Proses terjadinya gerusan lokal biasanya dipicu oleh tertahannya angkutan sedimen yang dibawa bersama aliran oleh struktur bangunan dan peningkatan turbulensi aliran akibat gangguan suatu struktur (Affandi, 2007).

Gerusan lokal di pilar adalah fungsi dari karakteristik material dasar sungai, konfigurasi dasar, karakteristik aliran dan geometri pilar. Karakteristik aliran untuk gerusan lokal pada pilar adalah kecepatan dan kedalaman di hulu pilar, sudut vektor kecepatan di pilar (*angle of attack*) dan tingkat permukaan air, dan kondisi tekanan aliran.

Gerusan lokal mengakibatkan pengangkutan material di sekitar pilar, abutment dan tanggul. Hal ini disebabkan oleh percepatan aliran dan menghasilkan pusaran yang disebabkan oleh penghalang yang menghalangi aliran (Department of Transport and Main Roads, 2013). Bentuk pilar yang memiliki potensi kedalaman gerusan terkecil adalah pilar bentuk bulat (Jazaul dan Hidayat, 2006).

Gerusan yang terjadi di sekitar pilar adalah akibat sistem pusaran (*Vortex system*) yang timbul karena aliran dirintangi pilar tersebut. Aliran mendekati pilar dan tekanan stagnasi akan menurun dan menyebabkan aliran kebawah (*down flow*) yaitu aliran dari kecepatan tinggi menjadi kecepatan rendah. Kekuatan *down flow* akan mencapai maksimum ketika berada tepat pada dasar saluran. Komponen aliran vertikal menjadi penyebab permulaan terjadinya gerusan (Ariyanto, 2010). Kecepatan aliran yang akan mendorong sistem pusaran di sekitar pilar, pada dasar struktur aliran bawah ini membentuk pusaran yang pada akhirnya menyapu sekeliling dan bagian bawah struktur dengan memenuhi seluruh aliran (Miller, 2003 dalam Prayuda, 2015). Peristiwa ini dinamakan pusaran tapal kuda (*horseshoe vortex*) dimana jika dilihat dari atas bentuk pusaran tersebut akan mirip dengan bentuk tapal kuda. Pusaran ini akan stabil setelah keseimbangan gerusan lokal telah terbentuk.

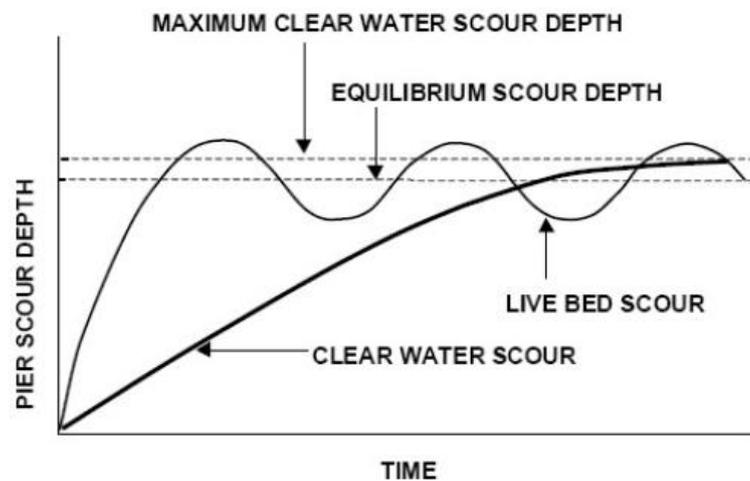
Karena tekanan stagnasi di depan pilar, permukaan air meningkat dan membentuk *bow wave* (peningkatan permukaan aliran) yang disebut sebagai gulungan permukaan (*surface roller*). Kemudian *horseshoe vortex* (pusaran tapal kuda) berkembang sebagai akibat dari pemisahan aliran di hilir lingkaran lubang gerusan yang tergerus oleh *down flow*. *Horseshoe vortex* memanjang ke arah hilir lubang gerusan, melewati sisi samping pilar. Aliran memisah di sisi samping pilar dan membentuk system *wake vortex* (aliran pusaran di samping pilar). Intensitas turbulensi bertambah, konsekuensinya gerusan dan angkutan sedimen meningkat.



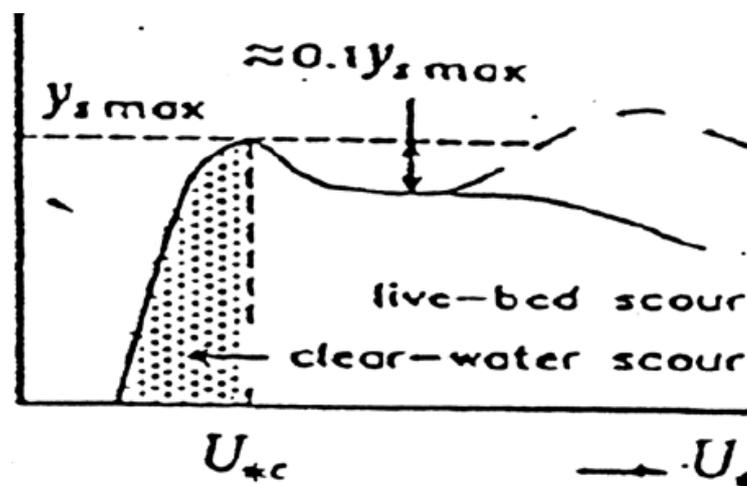
Gambar 3. 1 Skema Gerusan Lokal di Sekitar Pilar Silinder

(HEC-18, 2012 dalam Department of Transport and Main Roads, 2013)

Gerusan lokal diklasifikasikan menjadi *clear water scour* dan *live bed scour* (Miller, 2003 dalam Affandi, 2007). Bila tidak ada perpindahan sedimen pada bed menjauhi struktur, fenomena ini disebut *clear water scour*. Pada kondisi ini, tegangan geser aliran kurang dari yang dibutuhkan untuk perpindahan sedimen (kurang dari tegangan geser kritis). Pada saat sedimen mulai bergerak dari bed menjauhi struktur, proses ini dinamakan *live bed scour*. Dalam hal ini, tegangan geser aliran dari struktur lebih besar daripada nilai kritis yang dibutuhkan sedimen untuk bergerak dan terangkut.

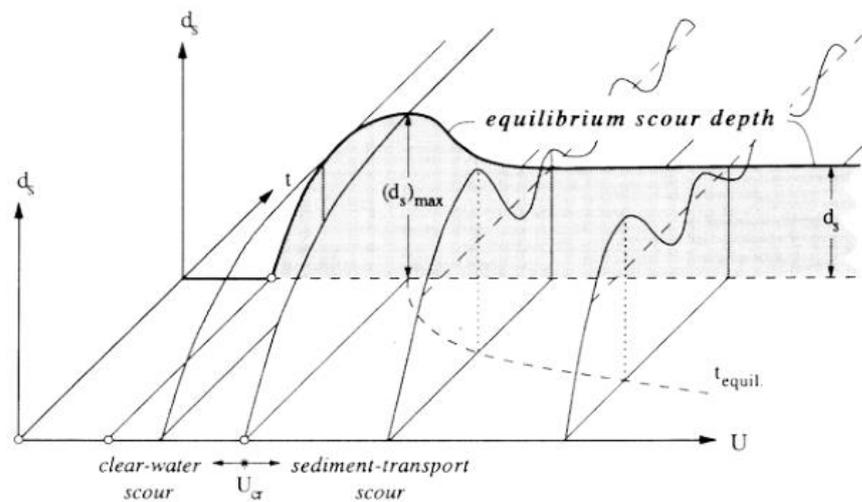


Gambar 3.2 Hubungan Kedalaman Gerusan dengan Waktu
(Breuser dan Raudkivi, 1991 dalam Affandi, 2007)



Gambar 3.3 Hubungan Kedalaman Gerusan (y_s) dengan Kecepatan Geser (u^*)
(Breuser dan Raudkivi, 1991 dalam Affandi 2007)

Chabert dan Engeldinger (1956) dalam Breuser dan Raudkivi (1991) dalam Affandi (2007) menyatakan lubang gerusan yang terjadi pada alur sungai umumnya merupakan korelasi antara kedalaman gerusan dengan kecepatan aliran sehingga lubang gerusan tersebut merupakan fungsi waktu Gambar 3.2. Sedangkan Breusers dan Raudkivi (1991) menyatakan bahwa kedalaman gerusan maksimum merupakan fungsi kecepatan geser Gambar 3.3.



Gambar 3.4 Hubungan kedalaman gerusan (y_s) dengan kecepatan geser (v^*) dan waktu (t) (Rahmadani, 2014).

Menurut Rahmadani (2014) grafik diatas menunjukkan bahwa kedalaman gerusan untuk *clear water scour* dan *live-bed scour* merupakan fungsi dari kecepatan geser. Kestimbangan gerusan tergantung pada keadaan yang ditinjau yaitu gerusan dengan air tanpa sedimen (*clear-water scour*) atau gerusan dengan air besedimen (*live-bed scour*). Pada *clear-water scour*, gerakan dasar sungai diasumsikan hanya terjadi pada sekitar pilar. Kestimbangan tercapai bila tegangan geser yang terjadi di dekat permukaan lubang gerusan sudah tidak mampu untuk mengangkut material karena *clear water scour* cenderung terjadi pada material dasar yang kasar. Sedangkan pada keadaan *live-bed scour*, gerakan dasar sungai terjadi pada hampir sepanjang dasar sungai.

Menurut (Wiyono, 2006) variabel-variabel yang berpengaruh pada gerusan lokal, meliputi:

1. Kondisi Fluida, yaitu:
 - Kerapatan (ρ)
 - Kekentalan (ν)
 - Gravitasi (g)
 - Kecepatan (U)
 - Kedalaman aliran (d_0)
2. Kondisi dasar sungai
 - Diameter butiran sedimen (D_s)
 - Kerapatan massa (ρ_s)
 - Distribusi butiran
 - Bentuk butiran
3. Faktor ginetik pilar
 - Tebal pilar (b)
 - Panjang pilar (L)
 - Bentuk muka pilar
 - Sudut arah pilar (α)
 - Jenis antar pilar (λ)

Karena variabel sangat banyak maka dikaji yang relatif dominan dan kedalaman gerusan (d_s) merupakan fungsi:

$$d_s = f(\rho, \nu, D_s, \rho_s, d_0, U, b, \alpha, \lambda). \quad (3.1)$$

B. HEC-RAS Versi 5.0.3

HEC-RAS merupakan program aplikasi untuk memodelkan aliran yang berada di sungai, *River Analysis System (RAS)*. *Software* HEC-RAS ini dibuat oleh *Hydrolic Engineering Center* yang merupakan satu divisi didalam *Institute For Water Resources (IWR)*, dibawah *US Army Corps Of Engineers (USACE)*. HEC-RAS versi 5.0.3 baru dirilis pada September 2016.

HEC-RAS 5.0.3 dapat melakukan analisi hitungan satu dimensi pada profil muka air aliran permanen (*Steady Flow*), hitungan satu/dua dimensi pada

profil muka air aliran tidak permanen (*Unsteady Flow*), hitungan angkutan sedimen, analisis kualitas air, dan fitur desain hidraulik.

Satu elemen penting dalam HEC-RAS adalah keempat komponen tersebut memakai data geometri yang sama, routine hitungan hidraulika yang sama, serta beberapa fitur desain hidraulik yang dapat diakses setelah hitungan profil muka air berhasil dilakukan. HEC-RAS merupakan program aplikasi yang mengintegrasikan fitur *graphical user interface*, analisis hidraulik, manajemen dan penyimpanan data, grafik, serta pelaporan (Istiarto, 2012).

Modul aliran permanen HEC-RAS mampu memperhitungkan pengaruh berbagai hambatan aliran, seperti jembatan (*bridges*), gorong-gorong (*culverts*), bendung (*weirs*), ataupun hambatan di bantaran sungai.

Menurut Istiarto (2012) parameter geometri saluran yang dibutuhkan oleh HEC-RAS adalah alur, tampang panjang dan lintang, kekasaran dasar (koefisien Manning), serta kehilangan energi di tempat perubahan tampang saluran (koefisien ekspansi dan kontraksi). HEC-RAS juga membutuhkan geometri struktur hidraulik yang ada di sepanjang saluran, misal jembatan, pintu air, bendung, peluap, dan sejenisnya.

Menurut Istiarto (2011), FHWA (2001) bahwa umumnya dalam tahap mendesain jembatan cukup dibutuhkan parameter aliran pada debit desain. Dengan demikian, cukup dilakukan analisis aliran permanen (*steady flow analysis*).

C. Persamaan Pada HEC-RAS

Menurut Prayuda (2015) 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.

HEC-RAS 5.0.3 dapat melakukan analisis hitungan satu dimensi pada profil muka air aliran permanen (*Steady Flow*), hitungan satu/dua dimensi pada profil muka air aliran tidak permanen (*Unsteady Flow*), hitungan angkutan sedimen, analisis kualitas air, dan fitur desain hidraulik.

HEC-RAS memiliki empat komponen model satu dimensi (Istiarto, 2012) dalam Utami dkk (2016):

1. Hitungan profil muka air aliran permanen

Langkah hitungan profil muka air yang dilakukan oleh modul aliran permanen HEC-RAS didasarkan pada penyelesaian persamaan energi (satu-dimensi). Kehilangan energi dianggap diakibatkan oleh gesekan (Persamaan Manning) dan *kontraksi/ekspansi* (koefisien dikalikan beda tinggi kecepatan). Persamaan momentum dipakai manakala dijumpai aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*), misalnya campuran regime aliran sub-kritik dan super-kritik (*hydraulic jump*), aliran melalui jembatan, aliran di percabangan sungai (*stream junctions*) (Istiarto, 2014).

2. Simulasi aliran tak permanen

Unsteady Flow Simulation. Program ini mampu mensimulasikan aliran tak permanen satu dimensi pada sungai yang memiliki alur kompleks. Semula, modul aliran tak permanen HEC-RAS hanya dapat diaplikasikan pada aliran sub-kritik, namun sejak diluncurkannya versi 3.1, modul HEC-RAS dapat pula mensimulasikan regime aliran campuran (sub-kritik, super-kritik, loncat air, dan *draw-downs*).

3. Hitungan transport sedimen

Sediment Transport/Movable Boundary Computations. Program ini mampu mensimulasikan transport sedimen satu dimensi (simulasi perubahan dasar sungai) akibat gerusan atau deposisi dalam waktu yang cukup panjang (umumnya tahunan, namun dapat pula dilakukan simulasi perubahan dasar sungai akibat sejumlah banjir tunggal).

4. Hitungan kualitas air

Water Quality Analysis. HEC-RAS dapat dipakai untuk melakukan analisis temperatur air serta simulasi transport beberapa konstituen kualitas air, seperti *Algae*, *Dissolved Oxygen*, *Carbonaceous Biological Oxygen Demand*, *Dissolved Dissolved Nitrite Nitrogen*, *Dissolved Nitrate Nitrogen*, and *Dissolved Organic Nitrogen*.

Pada HEC-RAS 5.0.3, hitungan hidrolika dibagi menjadi 3 (tiga) kategori yaitu aliran permanen 1 dimensi (*1D Steady Flow*), aliran tidak permanen 1 dimensi (*1D Unsteady Flow*), dan aliran tidak permanen 2 dimensi (*2D Unsteady Flow*).

D. Persamaan Pada Aliran Permanen

1. Persamaan Energi

HEC-RAS menghitung profil muka air dari satu penampang ke penampang berikutnya dengan persamaan energi melalui prosedur iterasi yang disebut dengan *Standard Step Method*. Persamaan energi yang dimaksud adalah: (*HEC-RAS Reference Manual, 2016*)

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (3.2)$$

Dimana:

Z_1, Z_2 = Elevasi dari saluran utama 1 dan 2 (m)

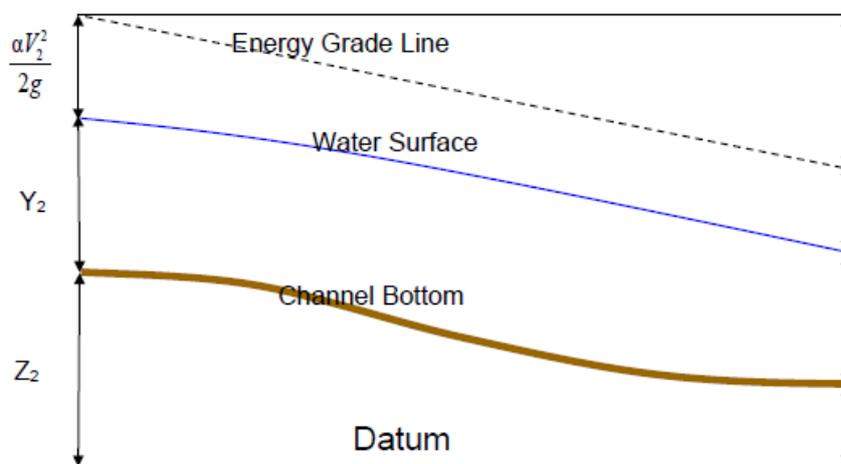
Y_1, Y_2 = Kedalaman air penampang 1 dan 2 (m)

α_1, α_2 = Koefisien energi pada penampang 1 dan 2

V_1, V_2 = Kecepatan aliran rata – rata (debit total / daerah aliran total) (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s)

h_e = Kehilangan Energi (m)



Gambar 3.5 Hubungan pada Persamaan Energi

(*HEC-RAS Reference Manual, 2016*)

2. Kehilangan Tinggi Energi

Kehilangan (tinggi) energi (h_e) diantara dua penampang terdiri dari dua komponen yaitu, kehilangan energi karena gesekan (*friction losses*) dan kehilangan energi karena perubahan tampang (Konstrasi / ekspansi). Persamaan dari kehilangan energi adalah sebagai berikut: (*HEC-RAS Reference Manual*, 2016)

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.3)$$

Dimana:

L = Panjang jangkauan kedua penampang yang diberi bobot menurut debit

\bar{S}_f = Kemiringan garis energi karena gesekan diantara dua penampang

C = Koefisien atas kehilangan energi (penyempitan atau perluasan)

Dimana panjang jangkauan kedua penampang yang diberi bobot, jumlahkan sebagai: (*HEC-RAS Reference Manual*, 2016)

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (3.4)$$

Dimana:

L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} = Panjang ruas penampang sungai untuk aliran di sisi kiri, tengah, dan sisi kanan.

\bar{Q}_{lob} , \bar{Q}_{ch} , \bar{Q}_{rob} = Debit yang mengalir pada sisi kiri, tengah, dan sisi kanan.

3. Kapasitas Angkutan Sedimen

Penentuan dari kapasitas angkut dan koefisien kecepatan untuk penampang dihitung dengan membagi aliran beberapa bagian, yang kecepatannya didistribusikan secara merata. Pendekatan yang digunakan dalam HEC-RAS adalah untuk membagi aliran di daerah bantaran tampang aliran. Kapasitas angkut dihitung dengan membagi penampang sungai dengan mengacu pada persamaan *Manning's*: (*HEC-RAS Reference Manual*, 2016)

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (3.5)$$

$$K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3} \quad (3.6)$$

Dimana:

K = Kapasitas tampang sedimen

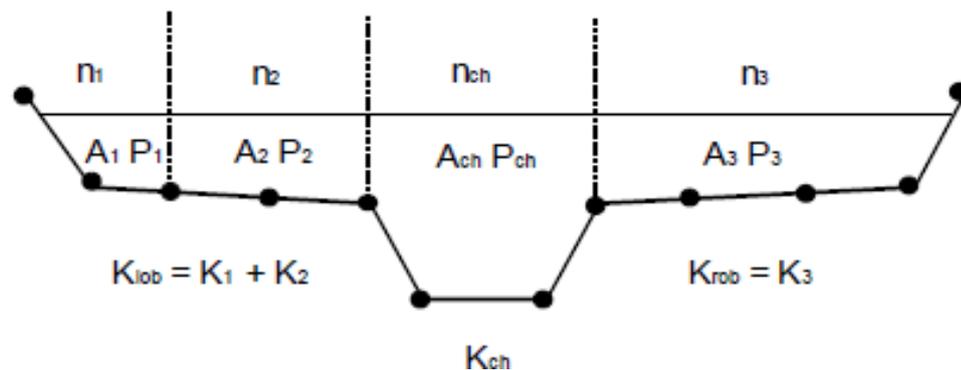
S_f = Kemiringan pada garis energi

n = Angka kekasaran (*manning*)

A = Luas tampang aliran (tampang basah) setiap bagian tampang

R = Radius hidrolis

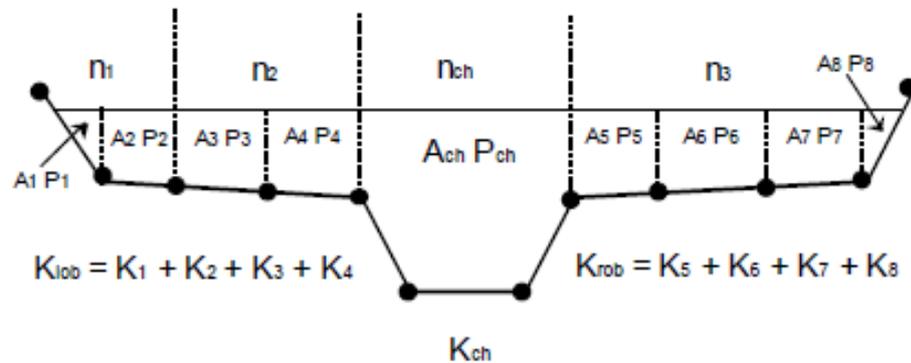
Program ini menjumlahkan semua angkutan tambahan di bantaran yang diperoleh dari bantaran kiri dan bantaran kanan. Angkutan sedimen pada saluran dihitung secara normal sebagai elemen angkutan tunggal. Total angkutan sedimen untuk penampang diperoleh dengan menjumlahkan angkutan pada tiga bagian (kiri, tengah, dan kanan) perhatikan **Gambar 3.2**.



Gambar 3.6 Metode pembagian tampang untuk angkutan sedimen

(*HEC-RAS Reference Manual*, 2016)

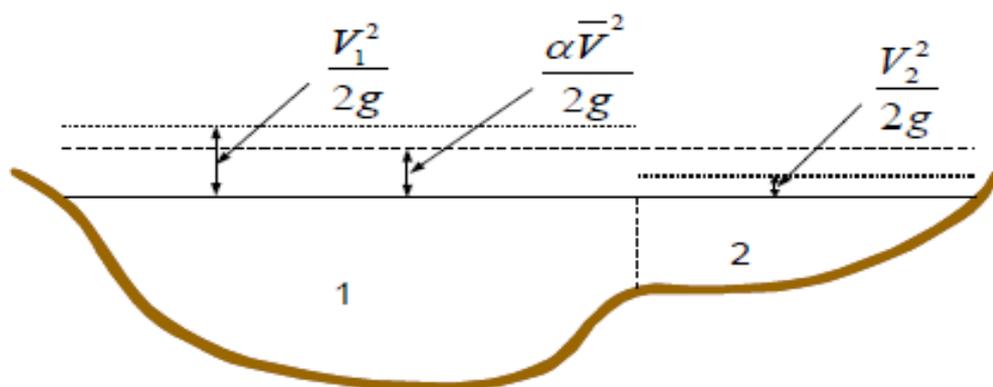
Metode alternatif yang tersedia pada HEC-RAS untuk menghitung kapasitas angkutan sedimen diantara setiap titik koordinat pada bantaran (**Gambar 3.3**). Angkutan sedimen kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan nilai total dari tepi kiri dan tepi kanan penampang. Metode ini digunakan pada kesatuan program HEC-2. Metode ini dipertahankan sebagai pilihan dalam HEC-RAS untuk menerbitkan kembali penyelidikan yang dikembangkan oleh HEC-2.



Gambar 3.7 Metode alternative dari pembagian tampang untuk angkutan sedimen
(HEC-2 Style)
(HEC-RAS Reference Manual, 2016)

4. Energi Kinetik

Karena HEC-RAS memodelkan model satu dimensi, jadi hanya ada satu muka air dan karena itu hanya ada satu energi yang di perhitungkan pada setiap penampang. Untuk mendapatkan ketinggian muka air, energi kinetik rata-rata dapat diperoleh dengan merata-ratakan tinggi energi kinetik di ketiga bagian tampang (tepi kiri, tengah, dan tepi kanan). **Gambar 3.8** berikut memperlihatkan bagaimana energi kinetik diperoleh dari tampang lintang bagian tengah dan tepi kanan (tidak ada bagian tepi kiri).



Gambar 3.8 Contoh perhitungan memperoleh energi kinetik
(HEC-RAS Reference Manual, 2016)

Untuk menghitung energi kinetik rata – rata diperlukan koefisien tinggi kecepatan α , yang dihitung dengan cara sebagai berikut: (*HEC-RAS Reference Manual, 2016*)

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

$$\alpha = \frac{2g \left[Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g} \right]}{(Q_1 + Q_2) \bar{V}^2} \quad (3.8)$$

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) \bar{V}^2} \quad (3.9)$$

Pada umumnya:

$$\alpha = \frac{[Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_n V_n^2]}{Q \bar{V}^2} \quad (3.10)$$

Koefisien kecepatan α di hitung berdasarkan dengan angkutan sedimen di ketiga aliran (sisi kiri, tengah, dan sisi kanan). Juga dapat di tulis dengan hubungan angkutan sedimen dan luas area, sebagai berikut: (*HEC-RAS Reference Manual, 2016*)

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3} \quad (3.11)$$

Dimana:

A_t = Total luas area tampang lintang

A_{lob}, A_{ch}, A_{rob} = Luas area bantaran/tepi kiri, tengah, dan tepi kanan (perspektif)

K_t = Total angkutan sedimen

K_{lob}, K_{ch}, K_{rob} = Angkutan sedimen bantaran/tepi kiri, tengah, dan tepi kanan (perspektif)

5. Kehilangan Energi Akibat Gesekan

Kehilangan energi akibat gesekan pada HEC-RAS sebagai hasil dari \bar{S}_f dan L (Persamaan 3.3), dimana \bar{S}_f adalah kemiringan karena gesekan (*Friction slope*) untuk jangkauan dan panjang sungai L didefinisikan pada persamaan 3.4 . Kemiringan karena gesekan (kemiringan garis energi) pada setiap penampang dihitung dengan persamaan *Manning* sebagai berikut: (*HEC-RAS Reference Manual, 2016*)

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad (3.12)$$

6. Koefisien Penyempitan dan Pelebaran Tampang

Penyempitan dan pelebaran tampang pada HEC-RAS dihitung dengan persamaan: (*HEC-RAS Reference Manual, 2016*)

$$h_{ce} = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (3.13)$$

Dimana:

C = Koefisien Penyempitan atau pelebaran (lihat **Tabel 3.1**)

Tabel 3. 1 Koefisien Penyempitan dan Perluasan Tampang

	Penyempitan	Perluasan
Tidak berubah	0.0	0.0
Masa berangsur - angsur	0.1	0.3
Karena ada Jembatan	0.3	0.5
Tiba – tiba	0.6	0.8

Sumber : *HEC-RAS Reference Manual (2016)*

HEC-RAS mengasumsi bahwa penyempitan (kontraksi) terjadi apabila tinggi kecepatan hilir lebih besar daripada kecepatan hulu. Demikian juga sebaliknya, ketika tinggi kecepatan hulu lebih besar dari kecepatan hilir akan terjadi perluasan (ekspansi).

7. Persamaan Aliran Tetap Satu Dimensi

Mengikuti asumsi secara mutlak dalam menganalisa pernyataan yang digunakan dalam versi HEC-RAS terbaru ini HEC-RAS 5.0.3 bahwa:

- a. Aliran adalah aliran tetap (*Steady flow*)
- b. Aliran yang berubah secara bertahap (Kecuali pada bangunan struktur hidraulik seperti: Jembatan, Gorong – gorong, dan Bendungan. Pada sebagian lokasi, dimana aliran dapat dengan cepat berubah, persamaan momentum atau persamaan empiris lainnya digunakan.)
- c. Aliran satu dimensi (komponen arah kecepatan selain arah aliran tidak dicatat)
- d. Saluran sungai memiliki kemiringan (*slope*) yang kecil, kurang dari 1:10.

Aliran diasumsikan stabil/tetap (*steady*) karena hubungan waktu tidak bergantung pada persamaan energi (Persamaan 3.2). Aliran diasumsikan berubah secara bertahap karena persamaan 3.2 berdasarkan pada dasar bahwa adanya distribusi tekanan hidrostatis ada pada masing-masing penampang. Pada lokasi dimana aliran dengan cepat berubah, HEC-RAS beralih ke persamaan momentum atau persamaan empiris yang lain.

Batas slope yang kurang dari 1:10 berdasarkan fakta bahwa bermula dari persamaan energi dihitung tekanan vertikalnya, dengan:

$$H_p = d \cos \theta \quad (3.14)$$

Dimana:

H_p = Tekanan vertikal

d = Kedalaman aliran

θ = Kemiringan saluran bawah ditandakan dengan derajat

Tabel 3.2 Kemiringan dan nilai $\cos \theta$

Kemiringan	Derajat	$\cos \theta$
1:10	5,71	0,995
2:10	11,31	0,981
3:10	16,70	0,958
4:10	21,80	0,929
5:10	26,57	0,894

Sumber : *HEC-RAS Reference Manual* (2016)

8. Angka Kekasaran (*Manning's*)

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 semakin kecil kecepatan aliran pada suatu penampang.

Berdasarkan buku open channel hydraulics yang ditulis Ven T. Chow (1988) dalam Putro dan Hadihardaja (2013) disebutkan bahwa kesulitan terbesar dalam pemakaian Rumus Manning adalah menentukan koefisien kekasaran n , sebab tidak ada cara yang tertentu untuk pemilihan nilai n . Pada pengetahuan saat ini, memilih nilai n sebenarnya memperkirakan hambatan aliran pada saluran tertentu, yang benar-benar tidak dapat diperhitungkan.

Nilai n selanjutnya dikenal dengan nama koefisien kekasaran Manning, dimana dipengaruhi oleh: kekasaran permukaan, tetumbuhan, ketidak teraturan saluran trase saluran, pengendapan dan penggerusan, hambatan, ukuran dan bentuk saluran, taraf air dan debit.

Pemilihan angka *manning* dengan tepat dapat memperhitungkan elevasi muka air. Pada dasarnya, angka *Manning* seharusnya dikalibrasi saat sewaktu-waktu mengamati informasi tentang elevasi muka air tersedia. Ada beberapa referensi pengguna yang dapat di akses untuk menunjukkan angka *manning* untuk beberapa tipe saluran. Kompilasi yang luas dari angka

kekasaran untuk saluran utama dan daratan banjir dapat ditemukan pada buku *Chow-1959 "Open-Channel Hydraulics"*. Buku ini menyajikan beberapa tipe saluran, dengan gambaran saluran yang mana angkanya telah terkalibrasi (**Tabel 3.3**).

Tabel 3.3 Angka Kekasaran *Manning*

Tipe Saluran dan Deskripsinya	Minimum	Normal	Maksimum
A. Saluran Alami			
1. Saluran Utama			
a. Bersih, lurus, terisi penuh, tanpa celah atau ceruk dalam	0,025	0,030	0,033
b. Seperti diatas, tapi lebih banyak batu dan rumput liar	0,030	0,035	0,040
c. Bersih, berkelok, banyak ceruk, bertebing	0,033	0,040	0,045
d. Seperti diatas, tapi banyak rumput liar dan batu	0,035	0,045	0,050
e. Seperti diatas, tidak terisi penuh, banyak kemiringan dan penampang yang tidak efektif	0,040	0,048	0,055
f. Seperti "d" tapi lebih banyak batu	0,045 0,050	0,050 0,070	0,060 0,080
g. Daerah lembam, rumput liar, ceruk dalam	0,70	0,100	0,150
h. Jangkauan rumput liar banyak, ceruk dalam, atau saat banjir banyak kayu dan semak – semak			
2. Dataran Banjir			
a. Padang rumput tanpa belukar			
1) Rumput pendek	0,025	0,030	0,035

2) Rumput Tinggi	0,030	0,035	0,050
b. Area Tanam			
1) Tanpa Tanaman	0,020	0,030	0,040
2) Kumpulan Tanaman dibariskan	0,025	0,035	0,045
3) Kumpulan tanaman di ladang	0,030	0,040	0,050
c. Belukar			
1) Belukar terpencar, banyak rumput liar	0,035	0,050	0,070
2) Belukar dan pohon yang jarang, pada musim dingin	0,035	0,050	0,060
3) Belukar dan pohon yang jarang, pada musim panas	0,040	0,060	0,080
4) Belukar sedang, pada musim dingin	0,045	0,070	0,110
5) Belukar sedang, pada musim panas	0,070	0,100	0,160
d. Pohon			
1) Lahan kosong dengan tunggul pohon, tanpa tunas	0,030	0,040	0,050
2) Seperti diatas, banyak tunas	0,050	0,060	0,080
3) Banyak pohon tegak, sedikit pohon turun, sedikit semak-semak, ranting mendekati aliran	0,080	0,100	0,120

e. Seperti diatas, tapi ranting masuk pada aliran	0,1	0,120	0,160
f. Banyak pepohonan, musim panas, lurus	0,110	0,150	0,2
3. Saluran di pegunungan, tanpa tanaman pada saluran, teping terjal dengan pohon dan belukar di sepanjang tebing			
a. Dasar: kerikil, kerakal, dan sedikit batu besar	0,030	0,040	0,050
b. Dasar: kerakal dan banyak batu besar	0,040	0,050	0,070
B. Saluran yang dibangun			
1. Beton			
a. Dipoles dengan sekop	0,011	0,013	0,015
b. Dipoles sedikit	0,013	0,015	0,016
c. Dipoles, dasar batu kali	0,015	0,017	0,020
d. Tidak dipoles	0,014	0,017	0,020
e. Adukan semprot, penampang rata	0,016	0,019	0,023
f. Adukan semprot, penampang bergelombang	0,018	0,022	0,025
g. Galian batu yang rata/teratur	0,017	0,021	
h. Galian batu yang tidak teratur	0,222	0,027	
2. Dasar beton dipoles sedikit dengan sisi:			
a. Batu dalam adukan	0,015	0,017	0,020
b. Batu tak teratur dalam adukan	0,017	0,020	0,024

c. Adukan batu dan semen, diplaster	0,016	0,020	0,024
d. Adukan batu dan semen	0,020	0,025	0,030
e. Batu kosong atau riprap	0,021	0,030	0,035
3. Dasar beton dipoles sedikit dengan sisi:			
a. Batu dalam adukan	0,015	0,017	0,020
b. Batu tak teratur dalam adukan	0,017	0,020	0,024
c. Adukan batu dan semen, diplaster	0,016	0,020	0,024
d. Adukan batu dan semen	0,020	0,025	0,030
e. Batu kosong atau riprap	0,021	0,030	0,035
4. Dasar batu kali dengan sisi:			
a. Beton	0,017	0,020	0,025
b. Batu tidak teratur dalam adukan semen	0,020	0,023	0,026
c. Batu kosong atau riprap	0,023	0,033	0,036
5. Bata			
a. Diglasir	0,011	0,013	0,015
b. Dalam adukan semen	0,012	0,015	0,018
6. Baja/Logam			
a. Permukaan halus	0,011	0,012	0,014
b. Permukaan berombak	0,021	0,025	0,030
7. Aspal			
a. Halus	0,013	0,013	
b. Kasar	0,030	0,016	
8. Lapisan tumbuhan	0,030		0,500

Tipe Saluran dan Deskripsinya	Minimum	Normal	Maksimum
C. Saluran yang digali atau ditimbun			
1. Tanah lurus dan seragam			
a. Bersih, baru selesai dibuat	0,016	0,018	0,020
b. Bersih, telah melapuk	0,018	0,022	0,025
c. Batu kali, penampang seragam, bersih	0,022	0,025	0,030
d. Rumput pendek, sedikit belukar	0,022	0,027	0,033
2. Tanah bergelombang dan lembam			
a. Tanpa Tanaman	0,023	0,025	0,030
b. Rumput, dan beberapa belukar	0,025	0,030	0,033
c. Banyak belukar atau tanaman air pada saluran dalam	0,030	0,035	0,040
d. Dasar tanah dan reruntuhan tebing	0,028	0,030	0,035
e. Dasar bebatuan dan belukar pada tebing	0,025	0,035	0,040
f. Dasar kerakal dan tepi bersih	0,030	0,040	0,050
3. Hasil Galian dan Timbunan			
a. Tanpa tumbuhan	0,025	0,028	0,033
b. Sedikit semak pada tebing	0,035	0,050	0,060
4. Pecahan batu			
a. Halus dan seragam	0,025	0,035	0,040
b. Tajam dan tidak beraturan	0,035	0,040	0,050
5. Saluran tak terawat, belukar dan semak – semak			
a. Dasar bersih, semak pada bagian sisi	0,040	0,050	0,080
b. Seperti diatas, lebih tinggi	0,045	0,07	0,110

Tipe Saluran dan Deskripsinya	Minimum	Normal	Maksimum
setinggi aliran			
c. Belukar lebat setinggi kedalaman aliran	0,050	0,080	0,120
d. Semak – semak lebat setinggi saluran	0,080	0,100	0,140

Sumber : *HEC-RAS Reference Manual* (2016)

E. Analisa Gerusan Pada Pilar

Gerusan pilar terjadi karena percepatan aliran disekitar pilar dan terbentuknya pusaran arus (horseshoe vortex). Pusaran tapal kuda mengikis material dari dasar pilar dan membentuk lubang gerusan. Faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan lokal di pilar yaitu kecepatan aliran dari hulu pilar, kedalaman aliran, lebar pilar, panjang pilar, ukuran dan gradasi material dasar sungai, sudut datang aliran, bentuk pilar dan konfigurasi dasar sungai.

Pada HEC-RAS menyajikan 2 (dua) persamaan/formula yang dapat dipakai untuk menganalisa besarnya kedalaman gerusan pada pilar, yaitu persamaan *Colorado State University* (CSU) dan persamaan *Froehlich* (1991). Pada HEC.18 Persamaan CSU lebih direkomendasikan untuk menghitung besarnya kedalaman gerusan. Persamaan CSU dapat menghitung kedalaman gerusan pilar pada kondisi *live-bed* dan *clear-water*. Persamaan CSU adalah sebagai berikut: (*HEC-RAS Reference Manual*, 2016)

$$y_s = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 a^{0.65} y_1^{0.35} Fr^{0.43} \quad (3.15)$$

Dimana :

y_s = Kedalaman gerusan (m)

y_1 = Kedalaman aliran pada hulu pilar (m)

K_1 = Faktor koreksi bentuk penampang pilar (**Tabel 3.4**)

K_2 = Faktor koreksi arah datang aliran air (**Tabel 3.5**)

K_3 = Faktor koreksi kondisi dasar permukaan dan gundukan (**Tabel 3.6**)

- K4** = Faktor koreksi ketahanan dasar saluran (**Tabel 3.7**)
a = Tebal pilar (m)
L = Panjang pilar (m)
Fr = Angka Froude
V1 = Kecepatan rata-rata aliran pada hulu pilar (m/s)
g = Nilar gravitasi (9.81 m/s²)

Untuk pilar berbentuk *round nose* yang sejajar dengan aliran, kedalaman gerusan maksimumnya sebagai berikut: (*HEC-RAS Reference Manual, 2016*)

$$y_s \leq 2.4 \text{ kali lebar pilar (a) untuk } Fr_1 \leq 0.8$$

$$y_s \leq 3.0 \text{ kali lebar pilar (a) untuk } Fr_1 > 0.8$$

Pilihan faktor koreksi K_w untuk lebar pilar pada air yang dangkal dapat diaplikasi dalam persamaan CSU: (*HEC-RAS Reference Manual, 2016*)

$$K_w = 2.58 \left(\frac{y}{a}\right)^{0.34} F^{0.65} \quad \text{Untuk } V/V_C < 1 \quad (3.16)$$

$$K_w = 1.0 \left(\frac{y}{a}\right)^{0.13} F^{0.25} \quad \text{Untuk } V/V_C > 1 \quad (3.17)$$

Karena faktor koreksi dikembangkan berdasarkan batas data flume, maka tidak otomatis terhitung di HEC-RAS. Maka dari itu dapat diaplikasi secara manual faktor untuk memperhitungkan kedalaman gerusan, atau dapat di kombinasi dengan salah satu faktor koreksi (K_1 sampai K_4).

Tabel 3.4 Faktor koreksi untuk bentuk penampang pilar

Bentuk Ujung Pilar	K1
Persegi	1,1
Bulat	1,0
Lingkaran Silinder	1,0
Kumpulan Silinder	1,0
Tajam	0,9

Sumber : *HEC-RAS Reference Manual (2016)*

Faktor koreksi untuk arah datang aliran (K_2) dapat pula dikalkulasi dengan cara: (*HEC-RAS Reference Manual*, 2016)

$$K_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{a} \sin \theta \right)^{0.65} \quad (3.18)$$

Dimana:

L = Panjang Pilar (m)

θ = Sudut datang aliran

Jika L/a lebih besar dari 12, dipakai hasil $L/a = 12$ sebagai nilai yang paling besar.

Jika sudut datang aliran lebih besar dari 5 derajat, K_2 menguasai dan K_1 harus bernilai 1.0.

Tabel 3.5 Faktor koreksi untuk kondisi dasar saluran (K_3)

Kondisi Dasar	Tinggi Gundukan (m)	K_3
<i>Clear Water Scour</i>	-	1.1
Dasar rata dan aliran <i>anti-dune</i>	-	1.1
Gundukan kecil	$10 > H \geq 2$	1.1
Gundukan sedang	$30 > H \geq 10$	1.1 – 1.2
Gundukan besar	$H \geq 30$	1.3

Sumber : *HEC-RAS Reference Manual* (2016)

Faktor koreksi K_4 mengurangi kedalaman gerusan untuk perlindungan lubang gerusan pada material dasar yang memiliki D_{50} lebih besar atau sama dengan 0,007 kaki (0,002 m) dan D_{95} lebih besar atau sama dengan 0,066 kaki (0,020 m). Nilai faktor koreksi dari penelitian terbaru oleh Molinas di *Colorado State University* menunjukkan bahwa ketika kecepatan aliran datang (V_1) lebih kecil daripada kecepatan kritis (V_{c90}) terhadap ukuran D_{90} pada material dasar dan terdapat gradasi pada ukuran material dasar, D_{90} akan membatasi kedalaman gerusan. Persamaan yang dikembangkan oleh Jones untuk menganalisis data adalah sebagai berikut: (*HEC-RAS Reference Manual*, 2016)

$$K_4 = 0.4 (V_R)^{0.15} \quad (3.19)$$

$$V_R = \left[\frac{V_1 - V_{i50}}{V_{c50} - V_{i95}} \right] \quad (3.20)$$

$$V_{i50} = 0.645 \left[\frac{D_{50}}{a} \right]^{0,053} V_{c50} \quad (3.21)$$

$$V_{i95} = 0.645 \left[\frac{D_{95}}{a} \right]^{0,053} V_{c95} \quad (3.22)$$

$$V_{c50} = K_u y^{1/6} D_{50}^{1/3} \quad (3.23)$$

$$V_{c95} = K_u y^{1/6} D_{95}^{1/3} \quad (3.23)$$

Dimana:

V_r = Kecepatan rasio

V_1 = Kecepatan aliran rata – rata saluran atau area tepi saluran pada penampang hulu jembatan, f/t (m/s)

V_{i50} = Kecepatan pendekatan yang dibutuhkan untuk memicu gerusan pada pilar untuk ukuran butiran D_{50} , f/t (m/s)

V_{i95} = Kecepatan pendekatan yang dibutuhkan untuk memicu gerusan pada pilar untuk ukuran butiran D_{95} , f/t (m/s)

V_{c90} = Kecepatan kritis pada ukuran material dasar D_{90} (m/s)

V_{c50} = Kecepatan kritis pada ukuran material dasar D_{50} (m/s)

a = Tebal pilar (m)

y = Kedalaman air pada hulu pilar, ft (m)

K_u = 11.17 (*English units*), 6.19 (*S.I units*)

Tabel 3.6 Batasan Nilai K4 dan ukuran dasar sedimen

Faktor Koreksi	Ukuran material dasar minimum	Nilai minimum K4
K4	$D_{50} \geq 0.006 \text{ ft (0.002 m)}$	0.4
	$D_{95} \geq 0.06 \text{ ft (0.02 m)}$	

Sumber : *HEC-RAS Reference Manual* (2016)