

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Gerusan

Gerusan merupakan penurunan dasar sungai karena erosi di bawah permukaan alami ataupun yang di asumsikan. Gerusan adalah proses semakin dalamnya dasar sungai karena interaksi antara aliran dengan material dasar sungai (Legono, (1990) dalam Daties, (2012).

Gerusan didefinisikan sebagai pembesaran dari suatu aliran yang disertai pemindahan material melalui aksi gerakan fluida. Gerusan lokal (local scouring) terjadi pada suatu kecepatan aliran dimana sedimen ditranspor lebih besar dari sedimen yang disuplai. Transpor sedimen bertambah dengan meningkatnya tegangan geser sedimen, gerusan terjadi ketika perubahan kondisi aliran menyebabkan peningkatan tegangan geser dasar (Laursen, (1952) dalam Daties, (2012).

Sifat alami gerusan mempunyai fenomena sebagai berikut:

- a. Besar gerusan akan sama selisihnya antara jumlah material yang diangkut keluar daerah gerusan dengan jumlah material yang diangkut masuk ke dalam daerah gerusan.
- b. Besar gerusan akan berkurang apabila penampang basah di daerah gerusan bertambah. Untuk kondisi aliran bergerak akan terjadi suatu keadaan gerusan yang disebut gerusan batas, besarnya akan asimtotik terhadap waktu.

1. Tipe Gerusan

Tipe gerusan yang diberikan oleh Raudviki dan Ettema (1982) dalam Sucipto (2004) adalah sebagai berikut:

- a. Gerusan umum di alur sungai, tidak berkaitan sama sekali dengan ada atau tidak adanya bangunan sungai.
- b. Gerusan dilokalisir di alur sungai, terjadi karena penyempitan aliran sungai menjadi terpusat.

- c. Gerusan lokal disekitar bangunan, terjadi karena pola aliran lokal disekitar bangunan sungai.

Gerusan dari jenis (b) dan (c) selanjutnya dapat dibedakan menjadi gerusan dengan air bersih (*clear water scour*) maupun gerusan dengan air beresedimen (*live bed scour*). Gerusan dengan air bersih berkaitan dengan suatu keadaan dimana dasar sungai di sebelah hulu bangunan dalam keadaan diam (tidak ada material yang terangkut). Sedangkan gerusan dengan air beresedimen terjadi ketika kondisi aliran dalam saluran menyebabkan material dasar bergerak. Peristiwa ini menunjukkan bahwa tegangan geser pada saluran lebih besar dari nilai kritiknya.

2. Gerusan Lokal

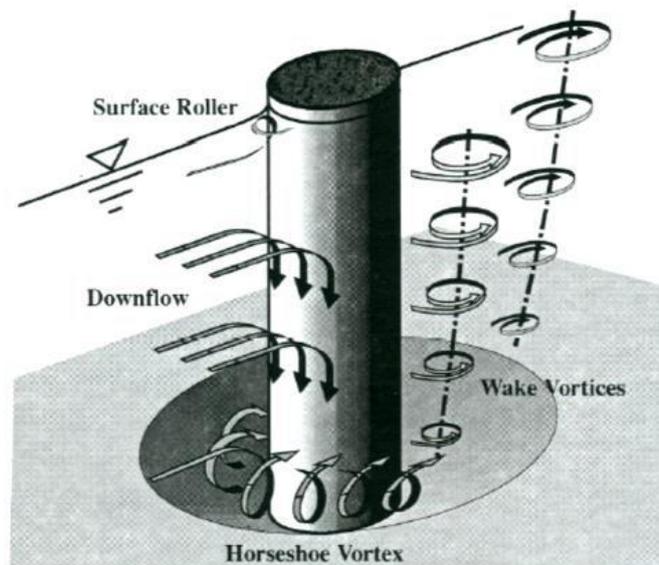
Proses gerusan dimulai pada saat partikel yang terbawa bergerak mengikuti pola aliran bagian hulu kebagian hilir saluran. Pada kecepatan yang lebih tinggi maka partikel yang terbawa akan semakin banyak dan lubang gerusan akan semakin besar, baik ukuran maupun kedalamannya bahkan kedalaman gerusan maksimum akan dicapai pada saat kecepatan aliran mencapai kecepatan kritik. Lebih jauh lagi ditegaskan bahwa kecepatan gerusan relatif tetap meskipun terjadi peningkatan kecepatan yang berhubungan dengan transpor sedimen baik yang masuk maupun yang keluar lubang gerusan, jadi kedalaman rata-rata terjadi pada kondisi *equilibrium scour depth* (Chabert dan Engal Dinger, 1956 dalam Breuser dan Raudkiv, 1991).

Laursen (1952) dan Sucipto (2004) mendefinisikan gerusan sebagai pembesaran dari suatu aliran yang disertai pemindahan material melalui aksi gerakan fluida. Gerusan lokal (*local scouring*) terjadi pada suatu kecepatan aliran dimana sedimen ditransport lebih besar dari sedimen yang disuplai. Transpot sedimen bertambah dengan meningkatnya tegangan geser sedimen, gerusan terjadi ketika perubahan kondisi aliran menyebabkan peningkatan tegangan geser dasar.

3. Mekanisme Gerusan

Menurut Richardson dkk. (1990) dalam Achmadi (2001), gerusan yang terjadi di sekitar pilar jembatan ialah akibat sistem pusaran (*horseshoe vortex*) yang timbul karena aliran dirintangi oleh suatu bangunan. Sistem pusaran yang menyebabkan lubang gerusan (*scour hole*), berawal dari sebelah hulu pilar, yaitu pada saat mulai timbul komponen aliran dengan arah aliran ke bawah (*down flow*), karena aliran yang datang dari hulu dihalangi oleh pilar. Aliran arah vertikal ini akan terus menuju dasar yang selanjutnya akan membentuk pusaran. Pada dasar saluran komponen aliran berbalik arah vertikal ke atas, peristiwa ini diikuti dengan terbawanya material dasar sehingga terbentuk aliran spiral yang akan menyebabkan gerusan dasar dan akan terus berlanjut hingga tercapai kesetimbangan.

Interaksi aliran dan pilar akan membentuk busur ombak (*bow wave*) yang disebut *surface roller* yang kemudian bergerak kesamping dan terjadi pemisahan aliran yang selanjutnya membentuk *wake vortex* dibagian belakang pilar jembatan, seperti diilustrasikan pada gambar berikut :



Gambar 3.1 Ilustrasi gerusan lokal di sekitar pilar jembatan
(Sumber : Melville & Coleman, 2000 dalam Alabi, 2006)

B. HEC-RAS Versi 5.0.3

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

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*). *Steady Flow* adalah kondisi aliran yang kecepatannya tidak berubah dengan waktu.

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.

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*).

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 11energy yang dimaksud adalah:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \dots \dots \dots (1)$$

Dimana:

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

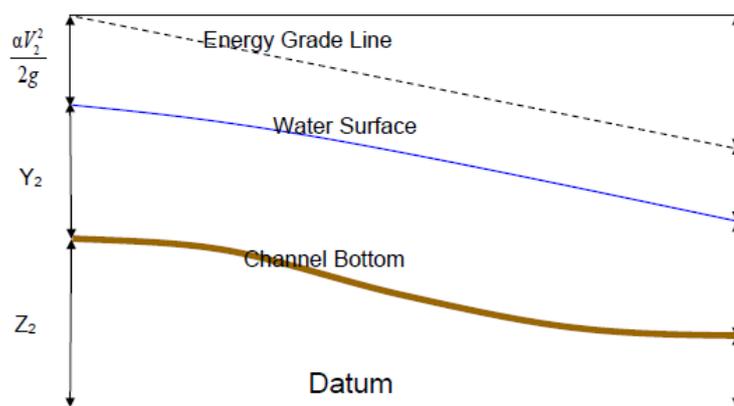
Y_1, Y_2 = Kedalaman air penampang 1 dan 2 (m)

α_1, α_2 = Koefisien 11energy pada penampang 1 dan 2

V_1, V_2 = Kecepatan aliran rata – rata (total perubahan / total area aliran) (m/s)

g = Percepatan grafitasi (m/s)

h_e = Kehilangan Energi (m)



Gambar 3.2 Hubungan pada Persamaan Energi
(HEC-RAS Reference Manual, 2016)

Kehilangan 11energy (h_e) diantara 2 (dua) penampang disebabkan oleh gesekan (*friction losses*) dan kehilangan 11energy (Konstrasi / ekspansi). Persamaan dari kehilangan 11energy adalah sebagai berikut:

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

Dimana:

L = Panjang jangkauan kedua penampang yang diberi bobot menurut debit

\bar{S}_f = Kemiringan garis 11energy karena gesekan diantara 2 (dua) penampang

C = Koefisien atas kehilangan 12nergy (penyempitan atau perluasan)

Dimana panjang jangkauan kedua penampang yang diberi bobot, jumlahkan sebagai:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob}+L_{c\Box}\bar{Q}_{c\Box}+L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob}+\bar{Q}_{c\Box}+\bar{Q}_{rob}} \dots\dots\dots (3)$$

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

2. Kapasitas Angkutan Sedimen

Ketentuan dari kapasitas angkut dan koefisien kecepatan untuk tampang lintang dihitung dengan membagi aliran kedalam beberapa bagian, kecepatan terbagi merata . HEC-RAS menggunakan pendekatan pembagian aliran pada area bantaran tampang aliran. Kapasitas angkut dihitung dengan pembagi penampang sungai dengan mengacu pada persamaan *Manning's*:

$$Q = KS_f^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

$$K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

K = Kapasitas tampang sedimen

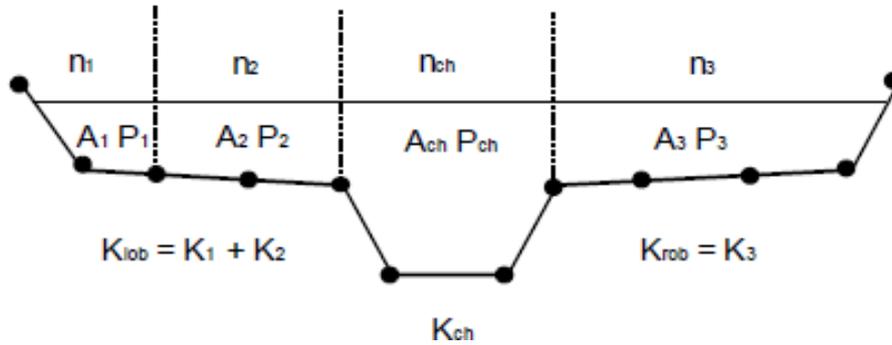
S_f = Kemiringan pada garis energi

n = Angka kekasaran (*manning*)

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

R = Radius hidrolik

Program ini menjumlahkan tambahan angkutan pada bantaran yang diperoleh dari bantaran kiri dan bantaran kanan. Angkutan sedimen pada saluran dihitung secara normal sebagai elemen angkutan sedimen. Total kapasitas angkutan sedimen untuk suatu penampang adalah dengan menjumlahkan angkutan pada tiga bagian (kiri, tengah, dan kanan) perhatikan Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Metode Pembagian Tampang Untuk Angkutan Sedimen
(HEC-RAS Reference Manual, 2016)

Metode Alternatif tersedia pada HEC-RAS untuk menghitung kapasitas sedimen diantara setiap titik koordinat pada penampang. Angkutan sedimen kemudian di totalkan untuk mendapatkan nilai total dari tepi kiri dan tepi kanan. Metode ini digunakan pada kesatuan program HEC-2. Metode ini dipertahankan sebagai opsi sampai HEC-RAS memerintahkan untuk menerbitkan kembali penyelidikan yang dikembangkan oleh HEC-2.

3. Energi Kinetik

Karena memodelkan dengan model satu dimensi, jadi hanya satu muka air dan untuk itu ada satu energi yang diperhitungkan antar tampang lintang. Untuk memberi elevasi muka air, energi kinetik (rata-rata) yang diperoleh dari perhitungan tinggi energi kinetik dari ketiga tampang lintang (tepi kiri, tengah, dan tepi kanan).

Untuk menghitung energi kinetic rata – rata diperlukan koefisien tinggi kecepatan α , yang dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$\alpha \frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \dots\dots\dots (6)$$

$$\alpha = \frac{2g \left[Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g} \right]}{(Q_1 + Q_2) \bar{v}^2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) \bar{v}^2} \dots\dots\dots (8)$$

Pada umumnya:

$$\alpha = \frac{[Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_n V_n^2]}{Q \bar{V}^2} \dots \dots \dots (9)$$

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:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3} \dots \dots \dots (10)$$

Dimana:

- A_t = Total luas area tampang lintang
- A_{lob}, A_{ch}, A_{rob} = Luas area bantaran/tepi kiri, tengah, dan tepi kanan (persfektif)
- K_t = Total angkutan sedimen
- K_{lob}, K_{ch}, K_{rob} = Angkutan sedimen bantaran/tepi kiri, tengah, dan tepi kanan (persfektif)

4. 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 garis energi karena gesekan (*Friction slope*) dan panjang sungai L didefinisikan pada persamaan 3.4 . Kemiringan garis energi karena gesekan (*friction slope*) disuatu tampang dihitung dengan persamaan *Manning* sebagai berikut:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \dots \dots \dots (11)$$

5. Penyempitan dan Perluasan Tampang

Penyempitan dan perluasan tampang pada HEC-RAS dihitung dengan persamaan:

$$h_{ce} = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \dots \dots \dots (12)$$

Dimana:

- C = Koefisien Penyempitan atau perluasan (lihat Tabel 3.1)

HEC-RAS mengasumsi bahwa penyempitan terjadi kapan saja saat kecepatan hilir lebih besar dari kecepatan hulu. Demikian juga, saat kecepatan hulu lebih besar dari kecepatan hilir akan terjadi perluasan.

6. Batas (*Limitation*) Aliran Tetap Satu Dimensi

Menurut anggapan secara mutlak dalam menganalisis pernyataan yang digunakan dalam HEC-RAS 5.0.3 bahwa:

- a. Aliran sungai adalah aliran tetap (*Steady flow*)
- b. Aliran berangsur – angsur berubah (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
- d. Saluran sungai memiliki kemiringan (*slope*) yang kecil, kurang dari 1:10.

Aliran dianggap tetap (*steady*) karena hubungan waktu tidak bergantung pada persamaan energi (Persamaan 2). Aliran dianggap berangsur – angsur berubah karena persamaan 2 berdasarkan pada dasar bahwa adanya pembagian tekanan hidrostatis pada setiap tampang. Pada lokasi dimana aliran dengan cepat berubah, HEC-RAS mengganti 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:

$$H_p = d \cos \theta \dots\dots\dots (13)$$

Dimana:

H_p = Tekanan vertikal

d = Kedalaman aliran

θ = Kemiringan saluran bawah ditandakan dengan derajat

D. Angka Kekasaran Manning

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

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \dots\dots\dots (14)$$

Dimana :

V = kecepatan rata-rata (m/dt)

R = radius/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 Lampiran 1.

E. Persamaan *Colorado State University*

Gerusan yang terjadi disekitar pilar jembatan ialah terjadi akibat sistem pusaran (*horseshoe vortex*) yang timbul karena aliran dirintangi oleh suatu bangunan. *Hoershoe vortex* mengangkat material dari sekitar pilar, dan membuat lubang gerusan. 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 *Froechlich* (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:

$$y_s = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 a^{0.65} y_1^{0.35} Fr^{0.43} \dots\dots\dots (15)$$

Dimana :

y_s = Kedalaman gerusan (m)

y_1 = Kedalaman aliran pada hulu pilar (m)

K_1 = Faktor koreksi bentuk penampang pilar (**Tabel 3.1**)

K_2 = Faktor koreksi arah datang aliran air

K_3 = Faktor koreksi kondisi dasar permukaan dan gundukan (**Tabel 3.2**)

K_4 = Faktor koreksi ketahanan dasar saluran (**Tabel 3.3**)

a = Tebal pilar (m)

L = Panjang pilar (m)

Fr = Angka Froude

V_1 = Kecepatan rata-rata aliran pada hulu pilar (m/s)

G = Nilar gravitasi (9.81 m/s^2)

Untuk pilar berbentuk *round nose* yang sejajar dengan aliran, kedalaman gerusan maksimumnya sebagai berikut:

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

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

Pilihan faktor koreksi K_w untuk lebar pilar pada air yang dangkal dapat diaplikasi dalam persamaan CSU

$$K_w = 2.58 \left(\frac{y}{a}\right)^{0.34} F^{0.65} , \text{ Untuk } V/V_C < 1 \dots\dots\dots (16)$$

$$K_w = 1.0 \left(\frac{y}{a}\right)^{0.13} F^{0.25} , \text{ Untuk } V/V_C > 1 \dots\dots\dots (17)$$

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 3.1 Faktor koreksi untuk bentuk penampang pilar (K1)

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

Sumber : *HEC-RAS 18* (1995)

Faktor koreksi untuk arah datang aliran (K2) dapat pula dikalkulasi dengan cara:

$$K_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{a} \sin \theta \right)^{0.65} \dots\dots\dots (18)$$

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, K₂ mennguasai dan K₁ harus bernilai 1.0.

Tabel 3.2 Faktor koreksi untuk kondisi dasar saluran (K3)

Kondisi Dasar	Tinggi Gundukan (m)	K3
<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 K4 mengurangi kedalaman gerusan untuk perlindungan lubang gerusan pada material dasar yang memiliki D₅₀ lebih besar atau sama dengan 0,007 kaki (0,002 m) dan D₉₅ 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:

$$K_4 = 0.4 (V_R)^{0.15} \dots\dots\dots (19)$$

$$V_R = \left[\frac{V_1 - V_{i50}}{V_{c50} - V_{i95}} \right] \dots\dots\dots (20)$$

$$V_{i50} = 0.645 \left[\frac{D_{50}}{a} \right]^{0.053} V_{c50} \dots\dots\dots (21)$$

$$V_{i95} = 0.645 \left[\frac{D_{95}}{a} \right]^{0.053} V_{c95} \dots\dots\dots (22)$$

$$V_{c50} = K_u y^{1/6} D_{50}^{1/3} \dots\dots\dots (23)$$

$$V_{c95} = K_u y^{1/6} D_{95}^{1/3} \dots\dots\dots (24)$$

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 3.3 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)