

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Konsep Gerusan

Gerusan merupakan fenomena alam yang terjadi akibat erosi terhadap aliran air pada dasar dan tebing saluran alluvial. Juga merupakan proses menurunnya atau semakin dalamnya dasar sungai di bawah elevasi permukaan alami (datum) karena interaksi antara aliran dengan material dasar sungai. Gerusan yang terjadi disekitar 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 (Rahmadani, 2014).

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

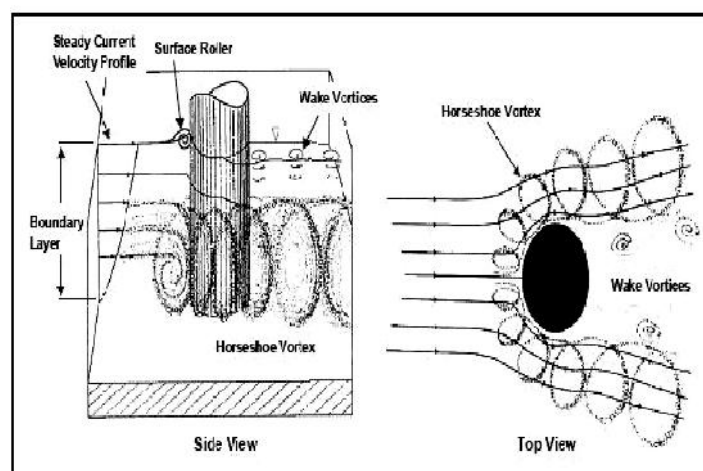
Sifat alami gerusan mempunyai fenomena sebagai berikut:

- a. Besar gerusan akan sama selisihnya antara jumlah material yang diangkut keuar daerah gerusan dengan jumlah material yang diangkut masuk ke dalam daerah gerusan
- b. Besar gerusan akan berkurang apabila penampang basah di daerah gerusan bertambah. Pada kondisi aliran bergerak terdapat keadaan gerusan yaitu gerusan batas, besarnya asimtotik terhadap waktu.

Menurut Laursen sifat alami gerusan mempunyai fenomena sebagai berikut :

1. Besar gerusan akan sama selisihnya antara jumlah material yang diangkut keluar daerah gerusan dengan jumlah material yang diangkut masuk ke dalam daerah gerusan.
2. Besar gerusan akan berkurang apabila penampang basah di daerah gerusan bertambah (misal karena erosi). Untuk kondisi aliran bergerak akan terjadi suatu keadaan gerusan yang disebut gerusan batas, besarnya akan asimtotik terhadap waktu.

Menurut Miller (2003) dalam Agustina, dkk (2007), jika struktur ditempatkan pada suatu arus air, aliran air di sekitar struktur tersebut akan bertambah, dan gradient kecepatan vertikal (*vertical velocity gradient*) dari aliran akan berubah menjadi gradient tekanan (*pressure gradient*) ini merupakan hasil dari aliran bawah yang membentur bed. Pada dasar struktur, aliran bawah ini membentuk pusaran yang akhirnya menyapu sekeliling dan bagian bawah struktur dengan memenuhi seluruh aliran. Hal ini dinamakan pusaran tapal kuda (*horseshoe vortex*), karena dilihat dari atas bentuk pusaran ini mirip tapal kuda.

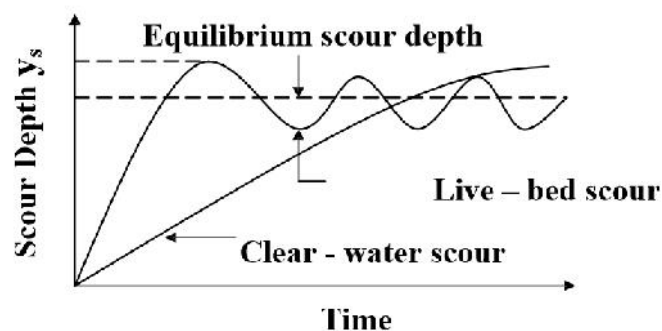


Gambar 3.1. Mekanisme gerusan akibat pola aliran air di sekitar pilar (Miller, 2003 dalam Agustina dan Qudus, 2007).

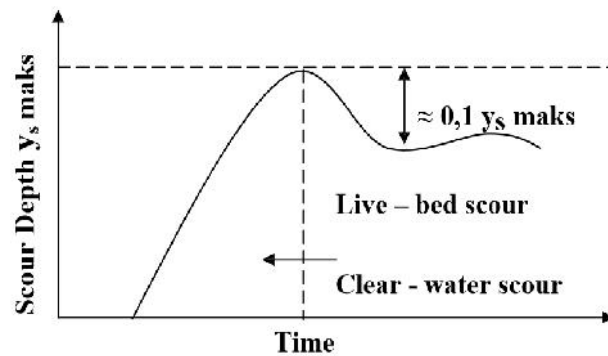
Menurut Raudkivi dan Ettema ada tiga tipe gerusan, yaitu:

- Gerusan umum di alur sungai, tidak berkaitan dengan ada atau tidak adanya struktur (bangunan) air.
- Gerusan dilokalisir di alur sungai, terjadi karena penyempitan aliran sungai menjadi terpusar.
- Gerusan lokal disekitar bangunan, terjadi karena adanya struktur (bangunan) air.

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



Gambar 3.2. Hubungan kedalaman gerusan (y_s) dengan waktu (sumber: Breuser dan raudkivi, 1991:62 dalam Wibowo, 2007).



Gambar 3.3. Hubungan kedalaman gerusan (y_s) dengan waktu (sumber: Breuser dan raudkivi, 1991:62 dalam Wibowo, 2007).

3.2 Gerusan Lokal pada Sungai

Menurut Maryono (2007) disebutkan bahwa sungai memiliki aliran yang kompleks untuk diprediksi, tetapi dengan pengamatan dan penelitian jangka waktu yang panjang, sungai dapat diartikan sebagai sistem yang teratur yaitu bahwa semua jenis komponen penyusun sungai adalah sistem yang teratur atau dapat diprediksi. Sistem sungai merupakan system yang teratur dan kompleks yang saling memengaruhi satu sama lain terhadap setiap komponennya. Komponen penyusun sungai yaitu bentuk alur dan percabangan sungai, morfologi sungai (*river morphology*), formasi sungai (*river bed form*), dan ekosistem sungai (*river ecosystem*). Jenis material sungai, vegetasi di sekitar sungai, kemiringan memanjang bentang alam memengaruhi bentuk meander.

1. Alur Sungai

Ada tiga bagian alur sungai menurut Daties (2012), diantaranya :

a. Bagian Hulu

Bagian hulu memiliki kemiringan lereng yang besar lebih dari 15%, sehingga hulu menjadi daerah yang rentan mengalami erosi. Pada bagian hulu memiliki kecepatan aliran yang lebih besar dari pada bagian hilir, sehingga pada alur ini saat terjadi banjir tidak hanya partikel sedimen halus saja yang terangkut akan tetapi juga pasir, kerikil bahkan batu.

b. Bagian Tengah

Bagian tengah adalah daerah peralihan bagian hulu dan hilir. Pada bagian ini memiliki kemiringan dasar sungai yang landai sehingga kecepatan aliran lebih kecil daripada bagian hulu. Selain itu, bagian ini merupakan daerah keseimbangan proses sedimentasi dan proses erosi yang sangat beragam dari setiap musim.

c. Bagian Hilir

Kecepatan aliran pada bagian hilir relative lambat karena melalui dataran yang mempunyai kemiringan yang landai. Hal tersebut menyebabkan terjadinya banjir disekitar hilir dan rentan terjadi sedimentasi. Sedimen yang terbentuk biasanya berupa endapan pasir halus, endapan organic, lumpur.

2. Aliran Air di Saluran Terbuka

Saluran terbuka merupakan saluran yang mengalirkan air dengan suatu permukaan bebas. Pada sepanjang saluran tekanan dipermukaan air adalah tekanan atmosfer. Permukaan bebas pada aliran ini dipengaruhi oleh kecepatan, kekentalan, gradient, dan geometri saluran. Menurut Triatmojo (1996:103) dalam Mulyandari (2010) Saluran terbuka adalah saluran air mengalir dengan muka air bebas. Pada saluran ini, misalnya sungai (saluran alam), variable aliran sangat tidak teratur terhadap ruang dan waktu. Variabel tersebut yaitu tampang lintang saluran, kekasaran, kemiringan dasar, belokan, debit aliran dan sebagainya.

3. Perilaku Aliran

Tipe aliran dapat dibedakan menggunakan bilangan Froude. Froude membedakan tipe aliran sebagai berikut:

- a. Aliran kritis, merupakan aliran yang mengalami gangguan permukaan, seperti yang diakibatkan oleh tiak yang terjadi karena batu yang dilempar ke dalam sungai tidak akan bergerak menyebar melawan arus. aliran dapat dikategorikan aliran kritis apabila Bilangan Froude memiliki nilai sama dengan satu ($Fr=1$).

- b. Aliran subkritis, pada aliran ini biasanya kedalaman aliran lebih besar daripada kecepatan aliran rendah, semua riak yang timbul dapat bergerak melawan arus. Apabila bilangan lebih kecil dari satu ($Fr < 1$) maka termasuk aliran subkritis.
- c. Aliran superkritis, pada aliran ini kedalaman aliran relative lebih kecil dan kecepatan relative tinggi, segala riak yang ditimbulkan dari suatu gangguan adalah mengikuti arah arus. Apabila bilangan Froude lebih besar dari satu ($Fr > 1$) maka aliran tersebut termasuk aliran superkritis. Persamaan untuk menghitung bilangan Froude, yaitu:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h}} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana: Fr = Bilangan Froude

U = kecepatan aliran (m/dtk)

g = percepatan gravitasi (m/dtk²)

h = kedalaman aliran (m)

Nilai U diperoleh dengan rumus:

$$U = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana: Q= debit aliran (m³/dtk)

A= Luas saluran (m²)

Nilai A diperoleh dengan rumus:

$$A = b \cdot h \dots \dots \dots (3)$$

Dimana: h= tinggi aliran (m)

b= Lebar saluran (m)

Sungai secara umum memiliki suatu karakteristik sifat yaitu terjadinya perubahan morfologi pada bentuk tampang aliran. Perubahan ini bisa terjadi karena faktor alam dan faktor manusia antara lain pembuatan bangunan - bangunan air seperti pilar, abutmen, bendung, bendungan, *checkdam*, dan sebagainya. Sifat sungai yang dinamis dalam waktu tertentu akan mampi menjadikan pengaruh kerusakan terhadap bangunan yang ada disekitarnya. Oleh karena itu, proses gerusan yang terjadi perlu dipelajari untuk mengetahui cara - cara pengendaliannya agar bangunan yang dibuat dapat bertahan dari pengaruh kerusakan (Nenny, dkk. 2014).

Aliran yang terjadi pada sungai biasanya disertai proses penggerusan/erosi dan endapan sedimen/deposisi. Proses penggerusan yang terjadi dapat diakibatkan karena kondisi morfologi sungai dan adanya bangunan sungai yang menghalangi aliran. Bangunan seperti pilar jembatan dapat meerubah pola aliran, sehingga secara umum dapat menyebabkan terjadinya gerusan lokal (Wibowo, 2007). Penelitian tentang pola gerusan di sekitar pilar dengan variasi bentuk pilar dilakukan untuk mrmprlajari pengaruh bentuk pilar terhadap pola gerusan dan besarnya kedalaman gerusan.

Proses gerusan dapat terjadi karena adanya pengaruh morfologi sungai yang berupa tikungan atau adanya penyempitan saluran sungai. Morfologi sungai merupakan salah satu faktor yang menentukan dalam proses terjadinya gerusan, hal ini disebabkan aliran saluran terbuka mempunyai permukaan bebas (*free surface*). Kondisi aliran saluran terbuka berdasarkan pada kedudukan permukaan bebasnya cenderung berubah sesuai waktu dan ruang, disamping itu ada hubungan ketergantungan antara kedalaman aliran, debit air, kemiringan dasar saluran dan permukaan saluran bebas itu sendiri. Kondisi fisik saluran terbuka jauh lebih bervariasi di banding dengan saluran tertutup karena penampang melintang sungai dapat beraneka ragam dari bentuk bundar sampai bentuk tak beraturan. Hasil pola gerusan yang terjadi akan menjadi sangat kompleks dan sulit untuk dapat ditaksir perilaku hidrodinamikanya, terutama pola aliran di hulu dan hilir pilar (Rahmadani, 2014).

3.3 Pilar Jembatan

Pilar adalah suatu bangunan bawah yang terletak di tengah – tengah bentang antara dua buah abutment yang berfungsi juga untuk memikul beban-beban bangunan atas dan bangunan lainnya dan meneruskannya ke pondasi serta disebarakan ke tanah dasar yang keras. Beberapa hal yang menjadi pertimbangan dalam menggunakan pilar pada suatu konstruksi jembatan antara lain ditinjau dari:

1. Bentang jembatan yang akan direncanakan
2. Kedalaman sungai atau perilaku sungai
3. Elemen struktur yang akan digunakan

Pada umumnya pilar jembatan dipengaruhi oleh aliran (arus) sungai, sehingga dalam perencanaan perlu diperhatikan dari segi kekuatan dan keamanan dari bahan – bahan hanyutan dan aliran sungai itu sendiri, maka bentuk dan penempatan pilar tidak boleh menghalangi aliran air terutama pada saat banjir.

Kondisi fisik saluran terbuka jauh lebih bervariasi di banding dengan saluran tertutup karena penampang melintang sungai dapat beraneka ragam dari bentuk bundar sampai bentuk tak beraturan. Hasil pola gerusan yang terjadi akan menjadi sangat kompleks dan sulit untuk dapat ditaksir perilaku hidrodinamikanya, terutama pola aliran di hulu dan hilir pilar (Wibowo, 2007).

Dalam perancangannya telah diperhitungkan beberapa aspek seperti letak jembatan, aspek hidraulik sungai serta bentuk pilar yang akan memberikan pola aliran di sekitarnya. Struktur jembatan umumnya terdiri dari dua bangunan penting, yaitu struktur bangunan atas dan struktur bangunan bawah. Salah satu struktur utama bangunan bawah jembatan adalah pilar jembatan yang selalu berhubungan langsung dengan aliran sungai (Wibowo, 2007).

Pilar jembatan mempunyai berbagai macam bentuk seperti *lenticular*, bulat maupun *ellips* yang dapat memberikan pengaruh terhadap pola aliran. Aliran yang terjadi pada sungai biasanya disertai proses penggerusan/erosi dan endapan sedimen/deposisi. Proses penggerusan yang terjadi dapat diakibatkan karena kondisi morfologi sungai dan adanya bangunan sungai yang menghalangi aliran. Pembuatan pilar jembatan akan menyebabkan perubahan pola aliran sungai dan terbentuknya aliran tiga dimensi di sekitar pilar tersebut. Perubahan pola aliran tersebut akan menimbulkan terjadinya gerusan lokal di sekitar konstruksi pilar (Wibowo, 2007).

Bentuk pilar akan berpengaruh pada kedalaman gerusan lokal, pilar jembatan yang tidak bulat akan memberikan sudut yang lebih tajam terhadap aliran datang yang diharapkan dapat mengurangi gaya pusaran tapal kuda sehingga dapat mengurangi besarnya kedalaman gerusan. Hal ini juga tergantung pada panjang dan lebar (l/b) masing-masing bentuk mempunyai koefisien faktor bentuk K_s menurut Dietz (1971) dalam Breuser dan Raudkivi (1991:73).

Kedalaman gerusan lokal tergantung pada kedudukan / posisi pilar terhadap arah aliran yang terjadi serta panjang dan lebarnya pilar. Karena kedalaman gerusan merupakan rasio dari panjang dan lebar serta sudut dari tinjauan terhadap arah aliran (Wibowo, 2007).

3.4 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 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.

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.

3.5 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.

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*).

3.6 Analisa Gerusan pada Pilar Jembatan

Gerusan yang terjadi disekitar pilar jembatan ialah terjadi akibat sistem pusaran (*horseshoe vortex*) yang timbul karena aliran dirintangi oleh suatu bangunan. *Horseshoe 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 *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) :

$$y_s = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 a^{0.65} y_1^{0.35} Fr^{0.43} \dots\dots\dots(4)$$

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

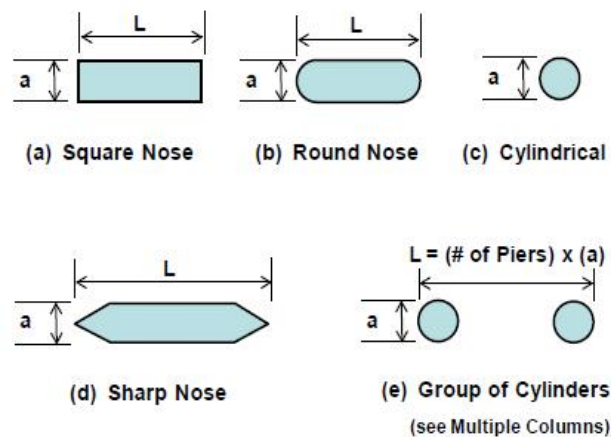
K_3 = Faktor koreksi kondisi dasar permukaan dan gundukan (Tabel 3.2)

K_4 = Faktor koreksi ketahanan dasar saluran (Tabel 3.3)

a = Tebal pilar (m)

Fr = Angka Froude

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).



Gambar 3.4. Beberapa bentuk pilar

(*Federal Highway Administration's (FHWA), 2012*)

Tabel 3.1. Faktor koreksi untuk bentuk penampang pilar

Bentuk Ujung Pilar	K1
Persegi	1,1
Kapsul	1,0
Lingkar Silinder	1,0
Kumpulan Silinder	1,0
Tajam	0,9

Sumber : HEC-RAS Reference Manual (2016).

Faktor koreksi untuk arah datang aliran (K2) dapat pula dikalkulasi dengan cara (HEC-RAS Reference Manual, 2016) :

$$K_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{a} \sin \theta \right)^{0.65} \dots\dots\dots(5)$$

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 ≥ 2	1.1
Gundukan sedang	30 > H ≥ 10	1.1 – 1.2
Gundukan besar	H ≥ 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) :

$$K_4 = 0.4 (V_R)^{0.15} \dots\dots\dots(6)$$

$$V_R = \left[\frac{V_1 - V_{i50}}{V_{c50} - V_{i95}} \right] \dots\dots\dots(7)$$

$$V_{i50} = 0.645 \left[\frac{D_{50}}{a} \right]^{0.053} V_{c50} \dots\dots\dots(8)$$

$$V_{i95} = 0.645 \left[\frac{D_{95}}{a} \right]^{0.053} V_{c95} \dots\dots\dots(9)$$

$$V_{c50} = K_u y^{1/6} D_{50}^{1/3} \dots\dots\dots(10)$$

$$V_{c95} = K_u y^{1/6} D_{95}^{1/3} \dots\dots\dots(11)$$

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	D50 0.006 ft (0.002 m)	0.4
	D95 0.06 ft (0.02 m)	

Sumber : HEC-RAS Reference Manual (2016)