

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Perilaku Aliran

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

1. Aliran kritis, merupakan aliran yang mengalami gangguan permukaan, seperti yang diakibatkan oleh riak 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 ($Fr = 1$).
2. Aliran sub kritis, pada aliran ini biasanya kedalaman aliran lebih besar dari pada kecepatan aliran rendah, semua riak yang timbul dapat bergerak melawan arus. Apabila bilangan lebih kecil dari satu ($Fr < 1$) maka termasuk aliran sub kritik.
3. Aliran super kritis, pada aliran ini kedalamn aliran relatif lebih kecil dan kecepatan relatif 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 super kritis.

Persamaan untuk menghitung bilangan Froude, yaitu:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (3.1)$$

dimana:

Fr = bilangan Froude

U = kecepatan aliran (m/dtk)

g = percepatan gravitasi (m/dtk^2)

h = kedalaman aliran (m)

Nilai U diperoleh dengan rumus:

$$U = \frac{Q}{A} \quad (3.2)$$

dimana:

Q = debit aliran (m^3/dtk)

A = luas saluran (m^2)

Dan nilai A diperoleh dengan rumus:

$$A = b \times h \quad (3.3)$$

dimana:

h = tinggi aliran (m)

b = lebar saluran (m)

B. Gerusan

Gerusan merupakan proses alam yang dapat mengakibatkan kerusakan pada struktur bangunan di daerah aliran air. Penambahan gerusan akan terjadi dimana ada perubahan setempat dari geometri sungai seperti karakteristik tanah dasar setempat dan adanya halangan pada alir sungai berupa bangunan sungai. Adanya halangan pada alur sungai akan menyebabkan perubahan pola aliran. Perubahan pola aliran tersebut menyebabkan gerusan lokal di sekitar bangunan tersebut. Bangunan bagian bawah jembatan (pangkal dan pilar jembatan) sebagai suatu struktur bangunan tidak lepas pula dari pengaruh gerusan lokal tersebut (Ikhsan dan Hidayat, 2006).

Menurut Raudkivi dan Etteman (1982) dalam Halim (2014:33) membedakan tipe gerusan adalah sebagai berikut :

1. Gerusan umum di alur sungai, tidak berkaitan sama sekali dengan ada atau tidaknya bangunan sungai.
2. Gerusan lokal di alur sungai, terjadi karena penyempitan aliran sungai menjadi terpusat.
3. Gerusan lokal di sekitar bangunan, terjadi karena pola aliran lokal di sekitar bangunan sungai.

Gerusan yang terjadi selalu diawali dengan perubahan aliran di atas permukaan dasar. Karena berbagai macam kecepatan dan arah aliran yang ada di permukaan dasar tersebut menimbulkan perpindahan butiran sedimen dasar. Kemudian aliran di atas permukaan lubang gerusan semakain lebar, sehingga menampakkan lubang gerusan yang dapat diamati proses gerusannya. Pengaruh kecepatan aliran akan lebih dominan sehingga menjadi penyebab terjadi keluar dan masuknya partikel dasar ke dalam lubang gerusan, namun kedalaman tetap

dan konstan. Dalam keadaan seimbang kedalaman maksimum akan lebih besar dari rata-rata kedalaman gerusan.

Waktu yang digunakan dalam mengamati gerusan juga berperan dalam menentukan kedalaman gerusan dan faktor kecepatan aliran di atas permukaan butiran menjadi tolok ukur kemampuan aliran tersebut membawa butiran sedimen.

Maka perlu diperhatikan bahwa jika aliran yang menyebabkan gerusan terjadi perlahan, hingga mencapai kedalaman maksimum maka kondisi alirannya adalah *clear water scour*, sedangkan jika aliran tersebut berubah-ubah hingga pada akhir pengamatan dengan pencapaian kondisi dimana masuknya butiran ke lubang gerusan sama dengan yang keluar dari lubang gerusan maka gerusan tersebut dapat disebut sebagai *live bed scour*.

Sedangkan untuk gerusan total terjadi lebih lambat dari gerusan lokal. Tetapi, pada dasarnya terdapat hubungan antara gerusan total dan gerusan lokal yang disebabkan oleh faktor kedalaman gerusan dan area penelitian yang ditinjau (*domain*). Hubungan tersebut didasarkan pada kedalaman aliran yang terjadi, akibat gerusan total dengan kedalaman aliran yang terjadi disekitar pilar (Yunar, 2005).

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 disebarkan 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.

Bentuk pilar akan berpengaruh pada kedalaman gerusan lokal. Hal ini juga tergantung pada rasio panjang dan lebar (l/b) bentuk mempunyai koefisien yang

berbeda, Breusers dan Raudkivi (1991) mengusulkan suatu koefisien bentuk pilar (K_s), hanya bentuk silinder (*cylindrical*) yang mempunyai nilai $K_s = 1$, yang terbesar adalah bentuk segi empat dan terkecil bentuk persegi panjang dengan sisi depan miring.

Pada *clear water scour*, penambahan kedalaman gerusan terbentuk secara perlahan-lahan, dan kapasitas keluarnya angkutan sedimen pada lubang gerusan adalah nol. Pada *live bed scour*, kedalaman gerusan bertambah dengan cepat dan akan mencapai nilai keseimbangan, jika kapasitas keluarnya angkutan sedimen adalah sama dengan masuknya angkutan sedimen pada lubang gerusan. Clayer (1973) dalam Hoffmans dan Verheij (1997) membandingkan kedalaman penggerusan dari pilar persegi empat dengan ujung pilar berbentuk persegi, bundar, segitiga. Penggerusan terbesar terjadi pada ujung pilar persegi sedangkan ujung segitiga memberikan hasil penggerusan terkecil.

C. HEC-RAS Versi 5.0.3

HEC-RAS adalah sebuah program aplikasi yang didesain untuk melakukan berbagai analisis hidrolika terhadap permodelan 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 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 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, hidrograf aliran dan perancah. Pada *downstream* dari sistem sungai dapat dimodelkan dengan tipe kondisi batas : kurva ukuran, kedalaman normal, hidrograf perancah, hidrograf aliran, hidrograf perancah dan aliran. Selain itu, kondisi awal ditetapkan berdasarkan data debit aliran mula-mula atau data elevasi air yang diketahui pada potongan stasiun permodelan.

D. 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 terjenun, aliran melalui peluap, dan aliran melalui bending, 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 urat 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 (Ven Te Chow, 1997 : 243) :

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + hf + he \quad (3.4)$$

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)

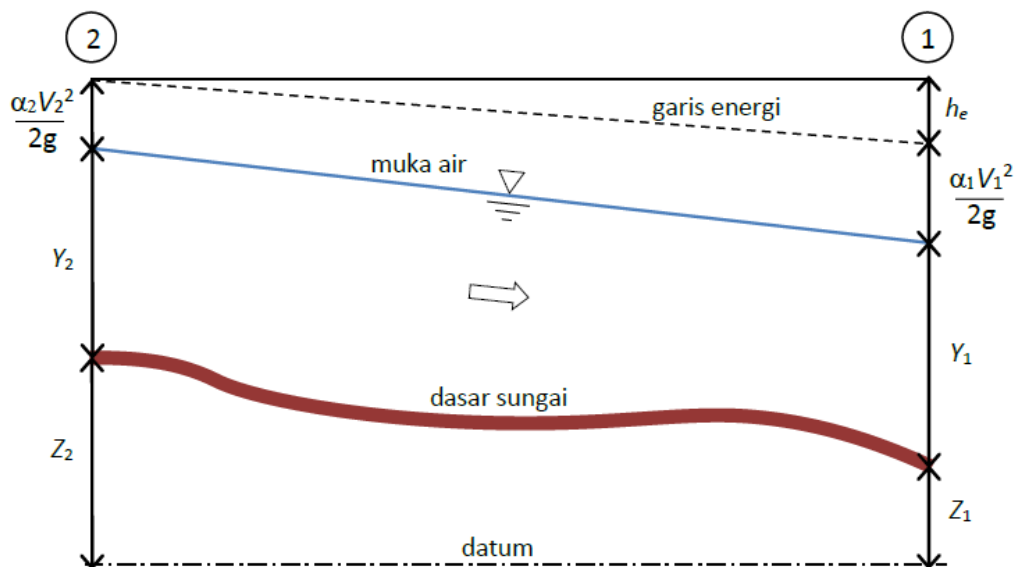
α_1, α_2 = koefisien energi pada penampang 1 dan 2

g = percepatan gravitasi (m/dt²)

hf = kehilangan tekanan akibat gesekan (m)

he = kehilangan tekanan akibat pusaran (m)

Gambar 3.1 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.



Sumber: HEC-RAS Simple Geometry River (2014)

Gambar 3.1 Diagram aliran berubah beraturan

2. Kehilangan Tinggi Energi

Kehilangan (tinggi) energi, he , 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 :

$$he = L S_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.5)$$

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 :

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (3.6)$$

dengan :

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} = panjang ruang 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 Sedimen

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 :

$$Q = K S_f^{1/2} \quad (3.7)$$

$$K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3} \quad (3.8)$$

dimana :

K = kapasitas angkut tiap bagian tampang

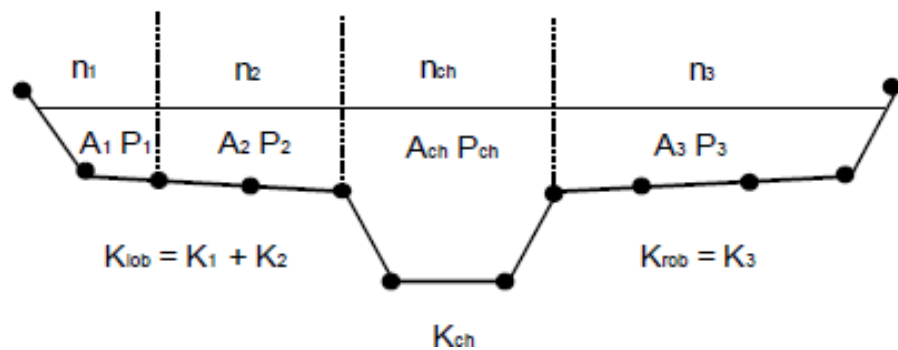
S_f = Kemiringan pada garis energi

n = koefisien kekasaran Manning tiap bagian tampang.

A = luas tampang basah tiap bagian tampang,

R = radius hidrolis tiap bagian tampang.

Program ini menjumlahkan tambahan angkutan pada bantaran yang diperoleh dari bantaran kiri dan bantara 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) seperti yang diperlihatkan Gambar 3.2.

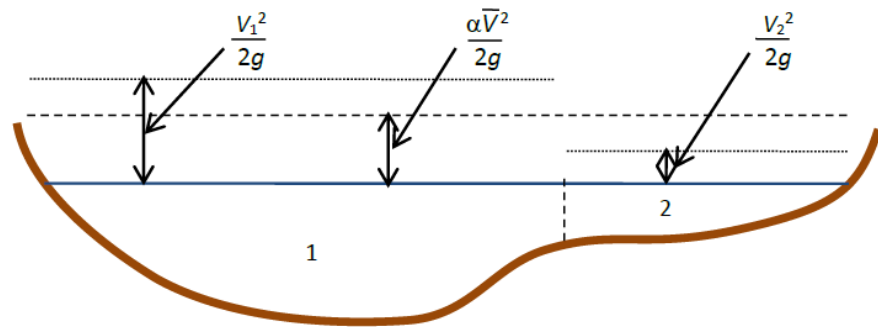


Sumber: HEC-RAS Simple Geometry River (2014)

Gambar 3.2 Metode pembagian tampang untuk angkutan sedimen

4. Tinggi Energi Kinetik Rata-Rata

Karena 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*).



Sumber: HEC-RAS Simple Geometry River (2014)

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

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

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

$$\alpha = \frac{2g \left[Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g} \right]}{(Q_1 + Q_2) \bar{V}^2} \quad (3.10)$$

dengan demikian :

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) V^2} \quad (3.11)$$

atau pada umumnya :

$$\alpha = \frac{|Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_n V_n^2|}{Q V^2} \quad (3.12)$$

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:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3} \quad (3.13)$$

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. 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 :

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad (3.14)$$

6. Koefisien Persempitan dan Perlebaran Tampang

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

$$h_e = C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.15)$$

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).

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)

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:

$$Q_c = \Phi Q \quad (3.16)$$

dengan :

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

Q = debit total aliran

$\Phi = Kc / (Kc + Kf)$

Kc = kapasitas angkut tampang alur utama

Kf = kapasitas angkut tampang bantaran.

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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(\Phi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial(1-\Phi)Q}{\partial x_f} = 0 \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{\Phi^2}{A_c}\right)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\Phi)^2 Q^2 / A_f]}{\partial x_f} + gA_c \left[\frac{\partial z}{\partial x_c} + s_{fc} \right] + gA_f \left[\frac{\partial z}{\partial x_f} + s_{ff} \right] = 0 \quad (3.18)$$

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. Barkau (1982) menyempurnakan cara penyelesaian di atas dengan

menjabarkan kedua persamaan ke dalam bentuk beda hingga yang penyelesaiannya lebih efisien dan stabil.

E. Persamaan Froehlich

Untuk menganalisis gerusan pilar, pertama model hidraulik rentang sungai yang memiliki jembatan harus ditempatkan. Model ini harus mencakup cross section di bagian hilir jembatan, sehingga kondisi batas hilir yang didefinisikan oleh pengguna tidak mempengaruhi hasil hidraulik jembatan hulu. Namun untuk mengevaluasi efek jangka panjang dari jembatan pada tingkat air profil di hulu, model harus mencakup beberapa cross section di hulu jembatan. Jika data tidak tersedia, model harus dikalibrasi sebanyak mungkin. Setelah kalibrasi hidraulik, masukkan data observasi, perancangan desain yang diperlukan untuk menganalisis gerusan. Secara umum, perancangan desain untuk analisis gerusan biasanya 100 tahun (dengan probabilitas 1%). Selain itu, disarankan untuk menggunakan perancangan desain 500 tahun (dengan probabilitas 0.2%) untuk mengevaluasi pondasi jembatan ketika banjir besar.

Gerusan jembatan bisa dihitung menggunakan persamaan CSU dari Colorado State University (Richardson d.k.k., 1990). Persamaan yang lain yang terdapat di HEC-RAS adalah persamaan Froehlich untuk digunakan dalam evaluasi gerusan. Persamaan Froehlich telah dibahas sebagai berikut:

$$Y_s = 0.32 \varphi (a')^{0.62} y_1^{0.47} Fr_1^{0.22} D_{50}^{-0.09} + a \quad (3.19)$$

dimana :

φ = faktor koreksi. Pilar persegi sebesar 1,3 ; pilar kapsul dan lingkaran sebesar 1,0 ; pilar tajam sebesar 0,7.

a' = efek pertimbangan dari pilar dan tabrakan aliran

y_1 = kedalaman aliran (m)

Fr_1 = angka Fraud

D_{50} = gradasi butiran rata-rata (m)

a = lebar pilar (m).

Untuk menghitung nilai a' dapat menggunakan rumus (Brunner, 2010):

$$a' = (a \cos \theta + L \sin \theta) \quad (3.20)$$

dimana:

θ = sudut datang aliran

L = panjang pilar (m)