

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Sungai

Sungai adalah suatu alur yang panjang diatas permukaan bumi tempat mengalirnya air yang berasal dari hujan dan senantiasa tersentuh air serta terbentuk secara alamiah (Sosrodarsono, 1994 dalam Daties 2012).

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 sistem yang teratur dan kompleks yang saling mempengaruhi satu sama lain terhadap setiap komponennnya. Komponen penyusun sungai yaitu berbentuk alur percabangan sungai, morfologi sungai (*river morphology*), formasi sungai (*river bed form*), dan ekosistem sungai (*river ecosystem*). Bentuk alur *meander* dipengaruhi oleh kemiringan memanjang bentang alam, jenis material dasar sungai, dan vegetasi di daerah bersangkutan (Maryono, 2007).

1. Alur Sungai

Dalam Daties (2012) disebutkan suatu alur sugai dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu :

a. Bagian Hulu

Bagian hulu merupakan daerah konservasi dan juga daerah sumber erosi karena memiliki kemiringan lereng yang besar (lebih besar dari 15%) sehingga hulu menjadi daerah yang rentan mengalami erosi. Alur di bagian hulu biasanya memiliki kecepatan yang lebih besar daripada bagian hilir sehingga pada saat terjadi banjir material hasil erosi yang diangkut tidak hanya partikel sedimen yang halus tetapi juga pasir, kerikil, bahkan batu.

b. Bagian Tengah

Bagian tengah merupakan daerah peralihan dari bagian hulu dan hilir. Pada bagian ini memiliki kemiringan dasar sungai yang landau sehingga kecepatan aliran lebih kecil dibandingkan di bagian hulu. Selain itu, bagian ini merupakan daerah keseimbangan proses sedimentasi dan proses erosi yang sangat bervariasi dari musim ke musim.

c. Bagian Hilir

Pada bagian hilir memiliki kemiringan yang landau sehingga kecepatan alirannya relatif kecil. Hal ini menyebabkan terjadinya banjir di beberapa tempat di sekitar hilir dan rentan terjadi pengendapan atau sedimentasi. Sedimen yang terbentuk biasanya berupa endapan pasir halus, lumpur, endapan organik, dan jenis endapan lain yang bersifat stabil.

2. Aliran di Saluran Terbuka

Saluran terbuka adalah saluran yang mengalirkan air dengan suatu permukaan bebas. Pada aliran saluran terbuka terdapat permukaan bebas yang berhubungan dengan atmosfer dimana permukaan bebas tersebut merupakan suatu batas antara fluida yang berbeda kerapatannya yaitu cairan dan udara, dan pada permukaan ini terdapat tekanan atmosfer. Permukaan bebas pada saluran ini dipengaruhi oleh kecepatan, kekentalan, gradient, dan geometri saluran. Menurut asalnya saluran dapat digolongkan menjadi saluran alam (*natural*) dan saluran buatan (*artificial*). Yang dimaksud dengan saluran alam meliputi semua alur air yang terbentuk secara alamiah di bumi. Saluran alam memiliki variable aliran yang tidak teratur terhadap ruang dan waktu. Variabel tersebut adalah tampang lintang saluran, kekasaran, kemiringan dasar, belokan, debit aliran dan lain sebagainya.

3. Perilaku aliran

Tipe aliran dapat dibedakan menggunakan bilangan Reynolds, tipe-tipe aliran tersebut adalah sebagai berikut :

- a. Aliran laminar, adalah suatu tipe aliran yang ditunjukkan oleh gerak gerik partikel menurut garis arusnya yang halus dan sejajar. Dengan nilai Reynolds lebih kecil dari lima ratus ($Re < 500$).
- b. Aliran turbulen, adalah aliran yang memiliki garis-garis arus yang halus dan sejajar. Aliran turbulen memiliki nilai bilangan Reynold lebih kecil dari seribu ($Re < 1000$).
- c. Aliran transisi, merupakan aliran yang paling sulit diamati dan memiliki bilangan Reynolds antara lima ratus sampai dengan seribu ($500 < 1000$). Persamaan untuk menghitung bilangan Reynolds adalah sebagai berikut :

$$Re = \frac{U.L}{\nu} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana : Re = bilangan Reynolds

U = kecepatan aliran (m/dtk)

L = panjang karakteristik (meter)

V = viskositas kinematik (m^2/dtk)

Tipe aliran juga dapat dibedakan menggunakan bilangan Froude, yaitu:

- a. Aliran kritis, merupakan aliran yang mengalami gangguan permukaan, akibat riak yang terjadi dikarenakan batu yang dilempar ke dalam sungai tidak akan bergerak menyebar melawan arus. Suatu aliran dapat dikategorikan sebagai aliran kritis apabila memiliki bilangan Froude sama dengan satu ($Fr=1$).
- b. Aliran subkritis, pada aliran ini biasanya kedalaman lebih besar dan kecepatan aliran rendah, semua riak yang timbul dapat bergerak melawan arus. Suatu aliran dapat dikategorikan sebagai aliran subkritis apabila memiliki bilangan Froude lebih kecil dari satu ($Fr < 1$).
- c. Aliran superkritis, pada aliran ini kedalaman aliran relatif lebih kecil dan kecepatan relatif tinggi, semua riak yang ditimbulkan dari suatu

gangguan mengikuti arah arus. Suatu aliran dapat dikategorikan sebagai aliran superkritis apabila memiliki bilangan Froude lebih besar dari satu ($Fr > 1$).

Persamaan untuk menghitung bilangan Froude adalah sebagai berikut :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h}} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana : Fr = bilangan Froude

U = kecepatan aliran (m/dtk)

g = percepatan gravitasi (m/dtk²)

h = kedalaman aliran (m)

Nilai U diperoleh dengan rumus :

$$U = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana : Q = debit aliran (m³/dtk)

A = luas saluran (m²)

Nilai A diperoleh dengan rumus :

$$A = b \cdot h \dots\dots\dots(4)$$

Dimana : h = tinggi aliran (m)

b = lebar saluran (m)

B. Pilar Jembatan

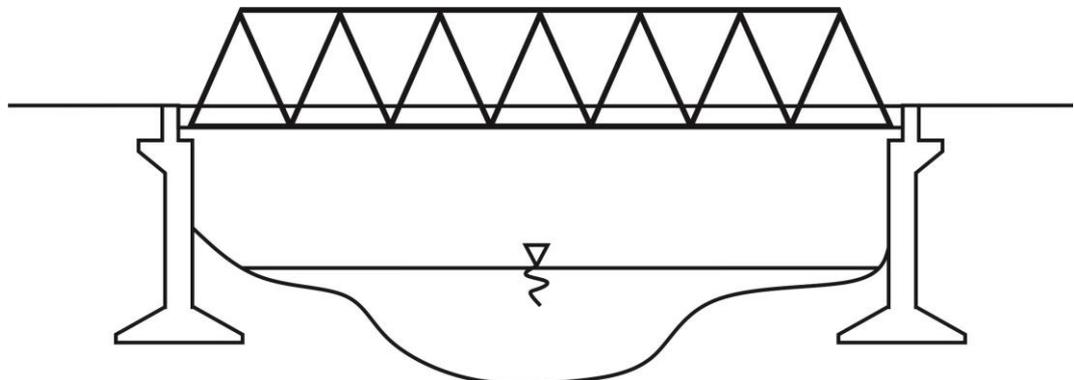
Pilar merupakan bagian dari struktur bawah jembatan yang terletak di tengah-tengah bentang antara dua abutmen yang berfungsi memikul beban bangunan atas dan bangunan lainnya, beban tersebut selanjutnya disalurkan ke tanah yang keras oleh pondasi. Adapun beberapa hal yang harus diperhatikan dalam menggunakan pilar pada suatu konstruksi jembatan antara lain ditinjau dari :

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

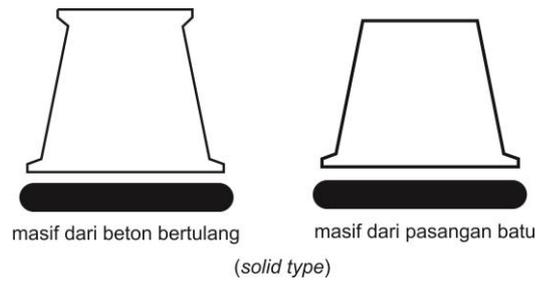
Pada umumnya pilar jembatan dipengaruhi oleh aliran (arus) sungai, sehingga dalam perencanaan perlu diperhatikan dari segi keamanan dan kekuatan bahan-bahan hanyutan dan aliran sungai itu sendiri. Maka bentuk dan penempatan pilar tidak boleh menghalangi aliran air terutama pada saat terjadi banjir.

Berbeda dengan abutmen yang selalu ada dalam suatu struktur jembatan, pilar belum tentu digunakan dalam suatu struktur jembatan. Bentuk dari dinding pilar ini bisa masif (*solid*), kota atau beberapa kotak (*cellular*), biasa terdiri dari kolom-kolom (*trestle*) atau dari satu kolom saja (*hammer head*).

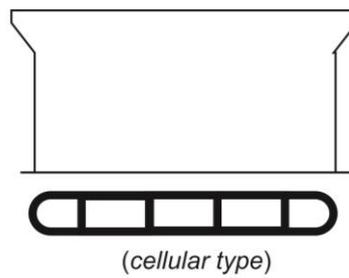
Keberadaan pilar pada aliran sungai menyebabkan perubahan pada pola aliran sungai. Perubahan pola aliran tersebut akan mengakibatkan terjadinya gerusan lokal di sekitar pilar.



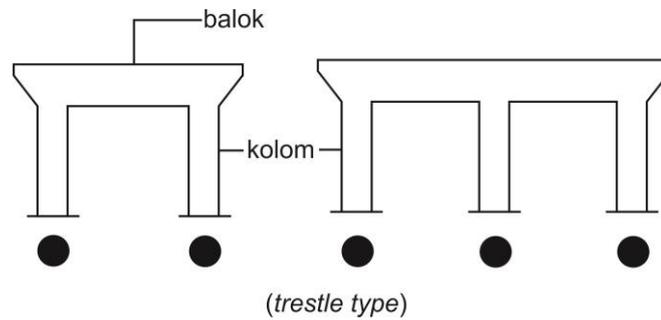
Gambar 3.1 Jembatan rangka baja tanpa pilar



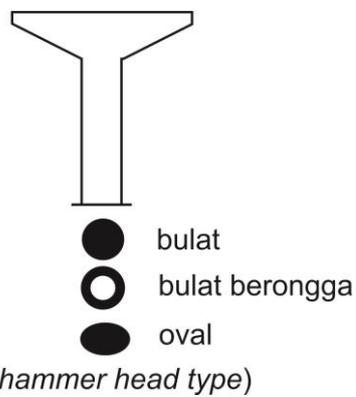
Gambar 3.2 Bentuk pilar jembatan tipe *solid*



Gambar 3.3 Bentuk pilar jembatan tipe *cellular*



Gambar 3.4 Bentuk pilar jembatan tipe *trestle*



Gambar 3.5 Bentuk pilar jembatan tipe *hammer head*

C. Gerusan

Gerusan merupakan proses erosi atau semakin dalamnya dasar sungai dibawah elevasi permukaan alami yang terjadi jika jumlah material yang ditranspor keluar daerah lebih banyak dari jumlah material yang ditranspor masuk ke dalam daerah 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 aliran sungai berupa bangunan air. 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).

Sifat alami gerusan memiliki fenomena sebagai berikut :

- a. Besar gerusan akan sama selisihnya antara jumlah material diangkut keluar daerah gerusan dengan jumlah material yang diangkut 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.

Kedalaman dan area gerusan pada pilar jembatan menurut Ikhsan dan Hidayat (2006) dipengaruhi oleh sebagian atau keseluruhan faktor-faktor berikut :

- a. Kemiringan, garis lurus normal (*natural alignment*) dan perubahan saluran.
- b. Jenis dan sejumlah material dasar yang diangkut.
- c. Debit aliran (Q).
- d. Keterbatasan atau perubahan aliran yang melalui jembatan dan saluran.
- e. Geometri dan garis lurus normal pilar.

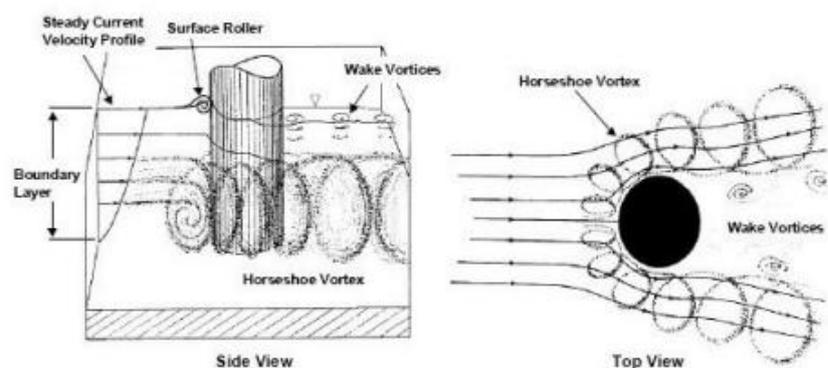
- f. Perubahan alami atau perubahan aliran buatan manusia atau struktur sedimen.
- g. Kecelakaan, seperti runtuhnya struktur.

1. Mekanisme Gerusan

Mekanisme gerusan disekitar pilar jembatan menurut Hanwar (1999:9) adalah ketika partikel sedimen yang menutupi pilar mulai berpindah, maka proses gerusan mulai terbentuk. Partikel yang tererosi ini akan mengikuti pola aliran dan terbawa dari dekat pilar kearah dasar sungai. Selanjutnya jika partikel-partikel sedimen lebih banyak tererosi, maka bentuk gerusan akan mencapai kedalaman gerusan maksimum.

Pada umumnya tegangan geser (*shear stress*) meningkat pada dasar saluran bagian depan struktur. Bila dasar saluran mudah tergerus maka lubang gerusan akan terbentuk di sekitar struktur. Fenomena ini disebut gerusan lokal (Nenny dan Imran, 2014).

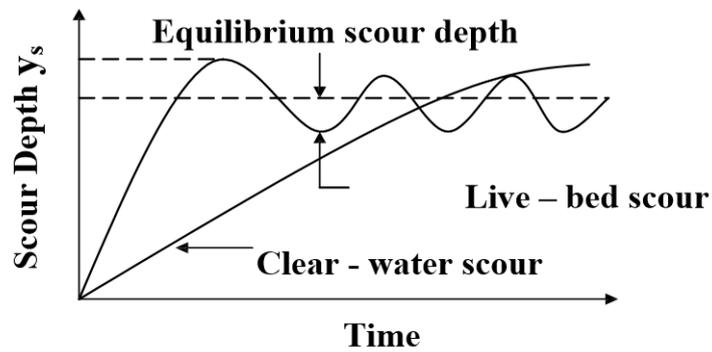
Proses gerusan di sekitar pilar sangat kompleks karena meliputi aliran tiga dimensi. Pada saat aliran melewati pilar, akan terjadi pemisahan aliran dan pemisahan ini akan meluas ke bagian hilir pilar. Sistem pusaran yang terjadi mempunyai bentuk seperti pusaran sepatu kuda (*horseshoe vortex*).



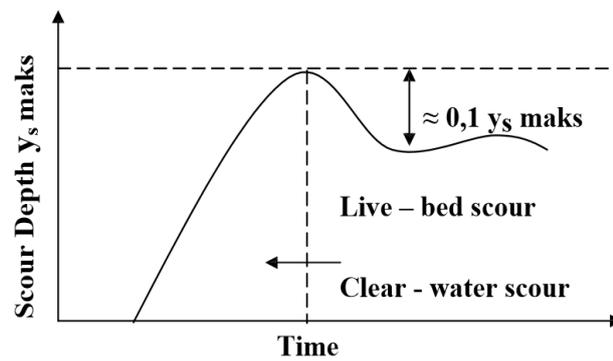
Gambar 3.6 Mekanisme gerusan akibat pola aliran air di sekitar pilar
(Sumber : Miller, 2003:6 dalam Sucipto, 2011)

Kedalaman gerusan pada *clear-water scour* dan *live-bed scour* merupakan fungsi kecepatan geser. Kedalaman gerusan maksimum terjadi

saat kecepatan geser u^* sama dengan kecepatan geser kritik yaitu pada daerah transisi antara *clear-water scour* dan *live-bed scour*.



Gambar 3.7 Hubungan kedalaman gerusan dengan waktu
(Sumber : Breuser dan Raudkivi, 1991:62 dalam Wibowo, 2007)



Gambar 3.8 Hubungan kedalaman gerusan dengan waktu
(Sumber : Breuser dan Raudkivi, 1991:62 dalam Wibowo, 2007)

2. Tipe Gerusan

Menurut Raudkivi dan Ettema (1982) dalam Istiarto (2002), perbedaan gerusan dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. Gerusan umum (*general scour*). Gerusan yang terjadi akibat dari proses alam dan tidak berkaitan sama sekali dengan ada tidaknya bangunan sungai.
2. Gerusan dilokalisasi (*constriction scour*). Gerusan yang diakibatkan penyempitan alur sungaisehingga aliran menjadi terpusat.
3. Gerusan lokal (*local scour*). Merupakan akibat langsung dari struktur pada alur sungai.

3. Gerusan Lokal

Gerusan lokal (*local scouring*) merupakan proses alamiah yang terjadi di sungai akibat pengaruh morfologi sungai atau adanya bangunan air yang menghalangi aliran. Adanya bangunan air tersebut menyebabkan perubahan karakteristik aliran seperti kecepatan aliran dan turbulensi, sehingga menimbulkan perubahan transport sedimen dan terjadinya gerusan (Rahmadani, 2014).

4. Gerusan dalam Perbedaan Kondisi Angkutan

Gerusan dalam keadaan perbedaan kondisi angkutan dibedakan menjadi dua tipe, yaitu :

- a. Kondisi *clear-water scour*, dimana gerusan dengan air bersih ini terjadi apabila material dasar sungai di sebelah hulu gerusan dalam keadaan diam atau tidak terangkut.

Untuk $\frac{U}{U_{cr}} \leq 0,5$ yaitu, gerusan lokal tidak terjadi dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

Apabila $\frac{U}{U_{cr}} \leq 0,5 \leq 1,0$ maka, gerusan lokal terus-menerus terjadi dan proses sedimen tidak terjadi.

- b. Kondisi *live-bed scour*, dimana gerusan yang disertai dengan angkutan sedimen material dasar saluran, jika :

$$\frac{U}{U_{cr}} > 1,0$$

Dimana :

U = Kecepatan aliran rata-rata (m/dtk)

U_{cr} = Kecepatan aliran kritis (m/dtk)

Nilai U_{cr} dapat diperoleh dengan rumus:

$$U_{cr} = \sqrt{ghS} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana:

U = Kecepatan aliran rata-rata (m/det)

U_{cr} = Kecepatan aliran kritis (m/det)

g = Gaya gravitasi (m/det²)

h = Kedalaman aliran (m)

S = Kemiringan saluran

5. Persamaan Gerusan untuk Aliran Beraturan

Kedalaman gerusan tergantung dari beberapa variabel (lihat Breuser dan Raudkivi, 1991 dalam Mukti, 2016) yaitu karakteristik zat cair, material dasar, aliran dalam saluran, dan bentuk pilar jembatan. Penggerusan dasar sungai di bawah pilar akibat adanya aliran sungai yang mengikis lapisan tanah dasar dapat dihitung kedalamannya. Kondisi *clear-water* untuk dalamnya penggerusan dapat dihitung melalui persamaan Raudkivi (1991) yaitu sebagai berikut :

$$y_{se} = 2.3 K_{\sigma} \cdot K_s \cdot K_{\alpha} \cdot K_{dt} \cdot K_d \dots\dots\dots(5)$$

Dimana :

y_{se} = Kedalaman gerusan seimbang

K_{σ} = Fungsi dari standar deviasi geometrik distribusi partikel

K_s = Faktor bentuk pilar

- K_α = Faktor posisi pilar
 K_{dt} = Faktor ukuran pilar
 K_d = Faktor ketinggian aliran
 α = Sudut datang alir

Dalam Melville dan Satherland (1988) dalam Syarvina telah dijelaskan bahwa, kedalaman gerusan dari gerusan lokal dapat ditulis sebagai berikut:

$$y_{se} = 2.3 K_I \cdot K_\sigma \cdot K_S \cdot K_\alpha \cdot K_{dt} \cdot K_d \dots\dots\dots (6)$$

Dimana :

- y_{se} = Kedalaman gerusan seimbang
 K_σ = Fungsi dari standar deviasi geometrik distribusi partikel
 K_S = Faktor bentuk pilar
 K_α = Faktor posisi pilar
 K_{dt} = Faktor ukuran pilar
 K_d = Faktor ketinggian aliran
 K_I = Faktor intensitas aliran

Dengan :

$$K_I = 2,4 (U/U_C) \text{ jika } (U/U_C) < 1$$

$$K_I = 2,4 \text{ jika } (U/U_C) > 1$$

Dimana :

- U = Kecepatan Aliran rata-rata (m/dtk)
 U_C = Kecepatan aliran kritis (m/dtk)