

Perbandingan Gerusan Lokal yang Terjadi di Sekitar *Abutment* Dinding Vertikal Tanpa Sayap dan dengan Sayap pada Saluran Lurus, Tikungan 90°, dan 180° (Kajian Laboratorium)

Agung Wiyono

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan.
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung, 40132, E-mail: agungwhs@si.itb.ac.id

Joko Nugroho

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan.
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung, 40132, E-mail: joko@si.itb.ac.id

Widyaningtias

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan.
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung, 40132, E-mail: widya@si.itb.ac.id

Eka Risma Zaidun

Alumni Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan.
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung, 40132, E-mail: gypsian_girl@yahoo.com

Abstrak

Fenomena kerusakan jembatan akibat gerusan pada pondasi pier atau abutment sulit diamati secara langsung. Salah satu metode untuk menyederhanakan adalah dengan pemodelan fisik di laboratorium. Tujuan penulisan jurnal ini adalah membandingkan gerusan yang terjadi di sekitar abutment dinding vertikal tanpa sayap dan dengan sayap pada saluran lurus, tikungan 90°, dan 180°. Perbandingan difokuskan pada gerusan lokal jenis live-bed scour dan terjadinya transportasi sedimen sepanjang pengaliran debit 4, 5, 6, dan 7 liter/detik pada model saluran. Penelitian dilakukan dengan membangun model saluran terbuka dengan dinding fiberglass dan dasar saluran terbuat dari semen, saluran memiliki bagian lurus serta sudut tikungan 90° dan 180°. Hasil parameter fisik berupa kecepatan dan kedalaman gerusan, dibandingkan secara analitik dengan menggunakan Formula Laursen (1960), Froehlich (1989), dan Mellvile (1997). Hasil perbandingan menunjukkan bahwa pada abutment dinding vertikal tanpa sayap, hasil perhitungan Formula Laursen paling mendekati hasil pengamatan dengan persentase kesalahan 20,02%. Sedangkan untuk abutment dinding vertikal dengan sayap, persentase kesalahan terkecil sebesar 28,17%, dengan menggunakan Formula Froehlich (1989). Untuk abutment dinding vertikal tanpa sayap, kedalaman gerusan maksimum terjadi di sekitar hulu abutment, dan segmen tengah abutment untuk abutment dinding vertikal dengan sayap. Untuk kedua tipe abutment sedimentasi tertinggi terjadi di sebelah hilir.

Kata-kata Kunci: Abutment, gerusan, saluran menikung, saluran lurus, dan sedimentasi.

Abstract

The damage phenomenon of the bridge due to scour on pier foundation or abutment is difficult to observe directly. One of the methods to simplify this phenomenon is modeling in the laboratory. The purpose of this research is to compare scouring around vertical wall and vertical wing-wall abutment in straight channel, 90°, and 180° curve channel. Scouring comparison focused on the live-bed scour and the occurrence of sediment transport along the 4, 5, 6, and 7 liters / second discharge on the channel model. Results of physical parameters such as velocity and depth of scouring compared with the analytical using Laursen (1960), Froehlich (1989), and Mellvile (1997) formula. The result from each calculation will be compared with the observation data. The result shows that maximum scouring for vertical wall and vertical wing-wall abutment occurred in upstream and middle of abutment respectively. Furthermore, sedimentation for both of types is around downstream of abutment. From the analytical comparison, Laursen's Formula gives closer accuracy for vertical wall abutment than others formulas, with the percentage of error is about 20,02%. While, Froehlich's Formula gives 28,17% for wing-wall abutment.

Keywords: Abutment, scouring, curve channel, straight channel, and sedimentation.

1. Pendahuluan

Gerusan adalah fenomena alam yang disebabkan oleh aliran air yang mengikis dasar saluran. Gerusan yang terjadi pada pondasi *pier* atau *abutment* adalah hal yang biasa terjadi. Dari studi terdahulu, pada tahun 1973 saja, di seluruh belahan dunia, sudah terjadi 383 kerusakan jembatan, 25% disebabkan oleh adanya *pier*, dan 72% karena *abutment* (Richardson dan Richardson, 1993). Pada tahun 1960-1984, dari 108 kerusakan jembatan yang terjadi, 29 kerusakan diakibatkan oleh gerusan karena adanya *abutment* (*National Roads Boards of New Zeland*). Sedangkan dari penelitian Kandasamy dan Melville (1998), 6 dari 10 kerusakan jembatan yang terjadi di New Zeland disebabkan juga oleh *abutment*. Selain itu, 70% dari pengeluaran untuk perbaikan dan perawatan jembatan, terlokasikan untuk kerusakan akibat gerusan karena adanya *abutment*.

Keberadaan *abutment* di sebagian tebing sungai hingga masuk ke dalam sungai menyebabkan lebar sungai mengalami penyempitan dan akan menimbulkan pengaruh pada perilaku aliran yang melewatinya. Perubahan perilaku aliran yang direpresentasikan dalam kecepatan aliran ini akan menimbulkan perubahan pula pada distribusi sedimen. Pada debit yang sama, penyempitan badan sungai mengakibatkan bertambahnya kecepatan, yang menyebabkan terjadinya gerusan lokal. Gerusan lokal di sekitar *abutment*, bisa berupa *live-bed scour* ataupun *clear water scour*.

Fenomena alam ini tidak bisa diamati secara langsung. Salah satu metode untuk menyederhanakannya adalah dengan pemodelan. Pemodelan fisik, yang umumnya menggunakan model geometrik, sangat membantu dalam memvisualisasikan baik gejala-gejala alam ataupun respon yang diberikan oleh struktur akibat dari fenomena-fenomena alam tersebut.

Untuk kasus sungai alam, penyederhanaan dilakukan dengan memodelkannya sebagai saluran dengan tikungan. Meandering yang terjadi sepanjang aliran sungai disederhanakan menjadi tikungan bersudut. Dasar saluran alam yang mempunyai tingkat keragaman tinggi, dalam pemodelan juga mengalami penyederhanaan baik itu menjadi seragam jenisnya (*live-bed model*), ataupun bahkan dimodelkan sebagai *fix bed model*. Astuti dan Widyaningti (2006) telah melakukan pemodelan untuk *abutment* dinding vertikal pada saluran lurus, tikungan 90° dan 180°.

2. Gerusan di Sekitar Abutment

Untuk memahami terjadi gerusan di sekitar *abutment*, perlu dipelajari proses terjadinya transportasi sedimen, jenis dan mekanisme terjadinya gerusan serta jenis *abutment* yang ditinjau.

2.1 Transportasi sedimen

Secara teoritis saluran stabil adalah suatu keadaan dimana gerusan dan pengendapan tidak terjadi disepanjang sungai atau saluran. Dalam proses mempelajari gerusan, tidak lepas dari karakteristik sedimen yang ada.

Transportasi sedimen dan sifat-sifat aliran, pada sungai alam akan terganggu dengan adanya penahan sedimen yang dibangun melintang sungai. Saat dasar sungai berubah, perubahan akan berlangsung secara lambat laun sehingga akan tercapai keadaan sungai yang stabil yang disebabkan oleh sifat-sifat hidraulik aliran dan transportasi sedimen. Titik dimana partikel pada dasar saluran mulai bergerak adalah faktor yang paling penting dalam mekanika transport sedimen. Distribusi kecepatan dan pergerakan sedimen pada tikungan saluran dapat dilihat pada **Gambar 1**.

2.2 Jenis dan mekanisme gerusan

Ada beberapa jenis gerusan yang terjadi di sepanjang saluran terbuka selama terjadi aliran dari hulu ke hilir. Gerusan yang terjadi pada sungai dapat digolongkan menjadi :

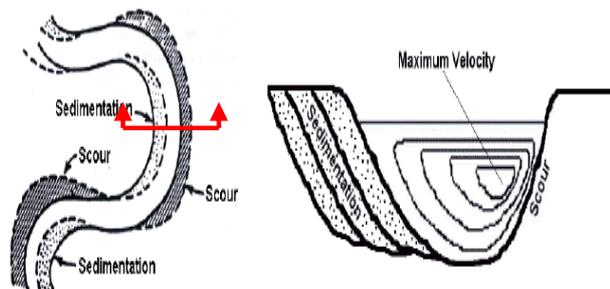
1. Gerusan umum (*general scour*)
Gerusan umum ini merupakan suatu proses alami yang terjadi pada saluran terbuka.
2. Gerusan lokal (*local scour*)
Gerusan lokal ini pada umumnya diakibatkan oleh adanya bangunan air, misalnya tiang, pilar atau *abutment* jembatan. Ada dua macam gerusan lokal, yaitu :

i *Clear water scour*

Terjadi jika tegangan geser yang terjadi lebih besar daripada tegangan geser kritis. Pergerakan sedimen hanya terjadi pada sekitar *abutment*. Ada dua macam:

$$1. \text{ Untuk } \left(\frac{U}{U_{cr}} \right) \leq 0,5$$

Gerusan lokal tidak terjadi dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.



Gambar 1. Distribusi kecepatan dan pergerakan sedimen pada tikungan saluran (Webb, 2000)

2. Untuk $0,5 \leq \left(\frac{U}{U_{cr}} \right) \leq 1,0$

Gerusan lokal terjadi menerus dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

ii *Live-bed scour*

Terjadi karena adanya perpindahan sedimen. yaitu jika

$$\left(\frac{U}{U_{cr}} \right) > 1,0$$

dimana:

U : kecepatan aliran rata-rata (m/detik)

U_{cr} : kecepatan aliran kritis (m/detik)

a. *Abutment*

Abutment adalah struktur penyangga jembatan. Biasanya terletak di tebing sungai. Pembangunan *abutment* yang memakan lebar sungai menyebabkan penyempitan (*vortex*). Pada debit yang sama, penyempitan badan sungai inilah salah satu kondisi yang mempengaruhi terjadinya gerusan lokal. Gerusan lokal di sekitar *abutment*, bisa berupa *live-bed scour* ataupun *clear water scour*, terjadi di sekitar hulu *abutment* dan berakhir di hilir *abutment*.

Jenis *abutment* ada beberapa macam:

1. *Spill-through abutment*
2. Dinding vertikal tanpa sayap
3. Dinding vertikal dengan sayap

b. *Formula local-scour pada abutment*

Berikut ini dipaparkan beberapa formula berkaitan dengan gerusan local pada *abutment*.

i. **Laursen (1960)**

Formula yang dihasilkan adalah:

$$\frac{L_a}{y_a} = 2,75 \frac{y_s}{y_a} \left[\frac{\left(\frac{1}{11,5} \frac{y_s}{y_a} + 1 \right)^{7/6}}{\left(\frac{\tau_1}{\tau_c} \right)^{1/2}} - 1 \right] \quad (1)$$

dimana:

L_a : panjang *abutment* (meter)

y_a : kedalaman aliran (meter)

y_s : kedalaman maksimum gerusan (meter)

t₁ : tegangan geser dasar salura (kgmeter.detik²)

t_c : tegangan kritis untuk gerak awal sedimen (kg/meter.detik²)

Formula di atas hanya bisa diselesaikan dengan cara iterasi. Selanjutnya, Richardson, et.al., (1991) menyederhanakan formula di atas menjadi:

$$\frac{y_s}{y_a} = 1,3 \left(\frac{L'}{y_a} \right)^{0,48} \quad (2)$$

dimana:

y_s : kedalaman maksimum gerusan (meter)

y_a : kedalaman aliran (meter)

L' : lebar *abutment* (meter)

Formula Laursen yang telah dimodifikasi tersebut bisa diselesaikan dengan cara yang lebih sederhana, yaitu:

$$y_s = 1,3 \left(\frac{L'}{y_a} \right)^{0,48} y_a \quad (3)$$

ii. **Froehlich (1989)**

Formula Froehlich ini adalah salah satu formula pendekatan empiris yang diperoleh dari kajian laboratorium

$$\frac{y_s}{y_a} = 2,27 K_1 K_2 \left(\frac{L'}{y_a} \right)^{0,43} Fr^{0,61} + 1 \quad (4)$$

dimana:

y_s : kedalaman gerusan (meter)

y_a : kedalaman aliran (meter)

K₁ : koefisien bentuk *abutment* (dapat dilihat pada **Tabel 1**)

K₂ : koefisien sudut *abutment* terhadap aliran

$$K_2 = (\theta/90)^{0,13}$$

q < 90° : untuk aliran di hulu *abutment*

q > 90° : untuk aliran di hilir *abutment*

L' : lebar *abutment* (meter)

Fr : bilangan Froude

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g y_a}} \quad (5)$$

U : kecepatan aliran (m/dt)

g : percepatan gravitasi = 9.81 m/s²

y_a : kedalaman aliran (meter)

iii. **Mellville (1997)**

Berikut adalah formula Melville yang dikembangkan untuk perhitungan kedalaman gerusan pada *clear-water scour* dan *live-bed scour*:

$$y_s = K_{yL} K_i K_1 K_2 (y_a L_a)^{0,5} \quad (6)$$

dimana:

- y_s : kedalaman gerusan (meter)
- y_a : kedalaman aliran (meter)
- L_a : panjang *abutment* (meter)
- K_{yL} : faktor kombinasi antara kedalaman aliran dengan panjang *abutment* = $10y$
- K_i : faktor intensitas aliran = U/U_{cr}
- U : kecepatan aliran (m/dt)
- U_{cr} : kecepatan kritis saat sedimen akan bergerak (m/dt)
- K_1 : faktor bentuk *abutment* (dapat dilihat pada **Tabel 1**)
- K_2 : faktor *alignment abutment*

3. Metode Penelitian Laboratorium

3.1 Model saluran terbuka

Pemodelan fisik untuk mempelajari perbandingan gerusan lokal yang terjadi di sekitar *abutment* dinding vertikal tanpa sayap dan dengan sayap pada saluran lurus, tikungan 90 derajat, dan 180 derajat ini dilakukan di Laboratorium Uji Model Hidraulika, Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung.

Saluran terbuka ini dimodelkan dengan dinding *fiberglass* dan dasar saluran terbuat dari semen, saluran memiliki bagian lurus serta sudut tikungan 90° dan 180°. Panjang as saluran dari hulu ke hilir adalah 12,4 meter, lebar saluran 0,5 meter dan tinggi saluran 0,4 meter, dengan dasar pasir yang ditimbun setinggi 0,2 meter. Saluran terbagi menjadi lima bagian, dari hulu ke hilir yaitu:

1. Bagian lurus I :
Saluran lurus sepanjang 3 meter, memiliki segmen antara 200 cm – 0 cm

2. Bagian tikungan I :
Saluran menikung 180° dan berjari-jari as 1,25 meter, memiliki segmen antara 0° - 180°
3. Bagian lurus II :
Saluran lurus sepanjang 1,5 meter, memiliki segmen antara 0 – 150 cm
4. Bagian tikungan II:
Saluran meni-kung 90° dan berjari – jari as 1,25 meter, memiliki segmen antara 0° - 90°
5. Bagian lurus III:
Saluran lurus sepanjang 2 meter, memiliki segmen antara 0 – 100 cm

Model saluran terbuka dengan tikungan 180° dan 90° ini bila dikembangkan untuk *prototype* di lapangan dengan asumsi *undistorted scale* adalah 1 : 50, maka akan serupa dengan saluran dengan panjang as 620 meter (0,6 km), lebar 25 meter, dan tinggi saluran hingga dasar adalah 10 meter. Sedangkan waktu pengaliran selama 6 (enam) jam pada model apabila diaplikasikan untuk *prototype* akan membutuhkan waktu pengaliran selama 42,4 jam atau 42 jam 24 menit.

3.2 Material dasar

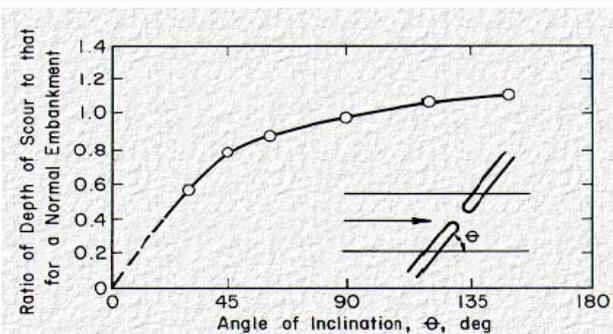
Material dasar yang digunakan dalam penelitian berupa pasir dari Gunung Galunggung. Butiran pasir ini keras, tidak mudah pecah, sedemikian sehingga tidak mudah tergerus. Penggunaan pasir dari Gunung Galunggung bertujuan untuk mempermudah penelitian, yaitu:

1. Kondisinya relatif sama untuk setiap kali *running*.
2. Tidak dibutuhkan dalam jumlah yang banyak karena dapat digunakan untuk beberapa kali *running*.
3. Sudah tersedia di Laboratorium Uji Model Hidraulika ITB.

Tes gradasi agregat juga dilakukan untuk pasir yang hanyut terbawa ke hilir selama proses pengaliran debit 7 liter/detik.

Tabel 1. Koefisien bentuk *abutment* (Mellville, 1997)

Bentuk <i>Abutment</i>	K_1
Dinding vertikal	1,00
Dinding vertikal dengan sayap	0,75
Spill-through <i>abutment</i>	0,45



Gambar 2. Faktor koreksi untuk kemiringan *abutment* terhadap aliran (Richardson dan Davis, 1995)

3.3 *Abutment*

Abutment yang digunakan ada 2 (dua) jenis; *abutment* dinding vertikal tanpa sayap (*vertical-wall abutment*) dan *abutment* dinding vertikal dengan sayap (*wing-wall abutment*).

3.3.1 *Abutment* dinding vertikal tanpa sayap

Abutment dinding vertikal tanpa sayap yang digunakan dalam percobaan terbuat dari bahan kayu. Spesifikasi ukuran dari *abutment* yang digunakan (lihat **Gambar 5**) adalah :

1. panjang : 12 cm
2. lebar : 9 cm
3. tinggi : 40 cm

Abutment yang digunakan dalam berjumlah empat buah dan ditempatkan pada:

1. Bagian saluran lurus (panjang 3 meter), yaitu pada titik 100 cm
2. Bagian menikung 180°, yaitu pada titik 90°
3. Bagian saluran lurus (panjang 1,5 meter), yaitu pada titik 70 cm
4. Bagian menikung 90°, yaitu pada titik 45°

Penempatan keempat *abutment* tersebut didasarkan pada perbedaan kondisi pada setiap segmen saluran, yaitu :

1. Pada segmen lurus I, kondisi saluran adalah saluran lurus. Dimana, air yang masuk pada segmen saluran tersebut berasal dari saluran lurus sebelumnya.
2. Pada segmen Tikungan I, kondisi saluran adalah tikungan saluran sebesar 180°.
3. Pada segmen lurus II, kondisi saluran adalah saluran lurus yang diapit oleh dua tikungan. Kondisi pada saluran lurus ini jelas berbeda dengan segmen saluran lurus I. Aliran air yang datang dari tikungan sebelumnya memberikan pengaruh terhadap kondisi aliran air pada segmen saluran ini.
4. Pada segmen Tikungan II, kondisi saluran adalah tikungan saluran sebesar 90°. Distribusi kecepatan aliran air pada segmen ini akan berbeda dengan distribusi kecepatan aliran air pada tikungan 180°.

3.3.2 *Abutment* dinding vertikal dengan sayap

Pada prinsipnya, spesifikasi dan penempatan *abutment* dinding vertikal dengan sayap sama dengan *abutment* dinding vertikal tanpa sayap yang sudah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Sebagai tambahan, sayap dipasang dengan sudut 45 derajat dari dinding samping *abutment*. Gambar peletakan *abutment* di model saluran terbuka dapat dilihat pada **Gambar 3**.

3.4 Alat ukur dan alat bantu

Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini adalah, sebagai berikut:

3.4.1 Alat ukur kecepatan (*Currentmeter*)

Currentmeter ini menggunakan kipas (*fan*) dan sebuah mesin penghitung (*counter*) untuk menghitung intensitas putaran dalam satuan Hertz (Hz). *Currentmeter* ini dilengkapi dengan grafik kalibrasi untuk mengkonversi satuan dari Hertz ke satuan cm/detik.

3.4.2 Alat ukur debit (*Thomson Weir*)

Pengukuran dilakukan di bagian hilir saluran setelah masuk ke bak penenang. Alat ini umumnya digunakan untuk debit kecil.

Perhitungan debit yang mengalir pada *Thomson Weir* menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2 \cdot g} \cdot (h_{Th})^{2.5} \quad (7)$$

dimana:

Q : debit aliran (m³/dt)

α : 90°

C_d : koefisien debit Thomson

C_d : 0,58 (untuk air kotor)

C_d : 0,59 (untuk air irigasi)

C_d : 0,61 (untuk air bersih)

g : 9,81 m/dt²

h_{Th} : tinggi aliran diatas pintu Thomson (m)



Gambar 3. *Abutment* dinding vertikal dengan sayap dan penempatannya pada model saluran terbuka

Dengan memasukkan $\alpha = 90^\circ$, $C_d = 0,58$ dan $g = 9,81$ m/dt², Debit yang mengalir dihitung dengan rumus :

$$Q = 1,38.h_{Th}^{2,5} \text{ (m}^3/\text{dt)} \quad (8)$$

3.4.3 Alat ukur topografi dasar saluran dan muka air

Alat ukur topografi dasar saluran dan muka air dalam penelitian ini adalah meteran taraf dengan ketelitian hingga 0,1 mm.

3.4.4 Alat ukur berat

Alat ukur berat yang digunakan dalam penelitian ini adalah timbangan dengan kapasitas 5000 gram dengan ketelitian hingga 25 gram.

3.4.5 Alat suplai air (pompa air)

Pompa digunakan untuk menaikkan air dari saluran penampung yang berada di sekeliling laboratorium ke saluran pengatur. Kapasitas pompa ini berkisar 20 liter/detik hingga 240 liter/detik.

Sedangkan peralatan bantu yang digunakan adalah:

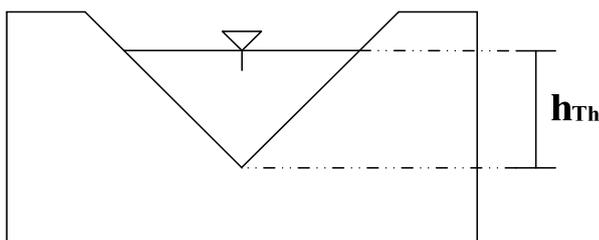
1. Formulir pencatatan data
2. Kantong penangkap pasir (tepat pada bagian hilir saluran) Disiapkan dua buah, untuk dipakai secara bergantian
3. Kabel listrik
4. Benang dan label (untuk penggambaran kontur)
5. Kamera dan alat dokumentasi lainnya

3.5 Pengukuran dan pengamatan

3.5.1 Langkah percobaan

Langkah-langkah dalam melakukan percobaan dalam penelitian ini adalah :

1. Meratakan pasir setinggi 20 cm sepanjang saluran.
2. Mengukur elevasi awal saluran.
3. Mengalirkan debit aliran ke dalam saluran. Pada penelitian kali ini debit rencana yang dialirkan sebesar 4, 5, 6, dan 7 liter/detik.



Gambar 4. Sketsa pengukuran muka air pada pelimpah Thomson

4. Mengukur kecepatan aliran air dengan menggunakan *currentmeter* pada posisi yang telah ditentukan. Pengukuran kecepatan ini dilakukan pada awal pengaliran, sebagai *initial condition*, dan pada waktu debit sudah relatif stabil.
5. Mengukur elevasi akhir saluran dengan menggunakan meteran taraf pada posisi yang telah ditentukan.
6. Membuat kontur dasar saluran dengan benang dan label ketinggian kontur interval 1 cm.

3.5.2 Pengukuran kecepatan

Pembacaan intensitas kecepatan pada setiap titik pengukuran akan dilakukan dua kali, yaitu pada 0,2d dan 0,8d dengan d adalah kedalaman. Kecepatan aliran diukur pada titik-titik yang sudah ditentukan. Pengukuran ini dilakukan 2 (dua) kali, pada awal pengaliran, sebagai *initial condition*, dan pada waktu debit sudah relatif stabil.

3.5.3 Pengukuran topografi dasar saluran

Pengukuran topografi dasar saluran untuk setiap pengaliran, dilakukan dua kali, yaitu sebelum dan sesudah percobaan. Tujuan dari pengukuran topografi adalah untuk mengetahui perubahan topografi dasar saluran yang terjadi pada setiap percobaan.

4. Hasil Pemodelan dan Analisis

4.1 Hasil perhitungan kedalaman gerusan lokal dan analisisnya

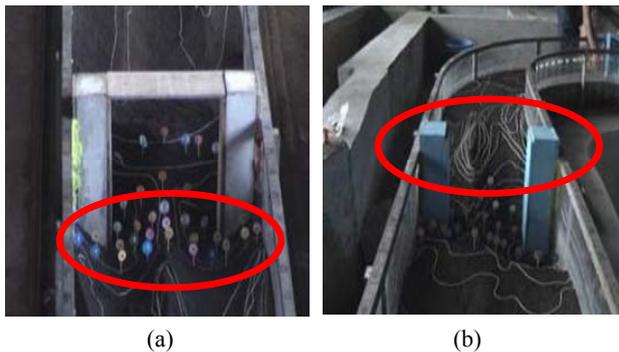
Dengan mempertimbangkan analisis parameter-parameter pengaliran, seperti debit, Bilangan Froude, dan kedalaman aliran, maka berikut adalah formula-formula yang bisa digunakan untuk menghitung kedalaman gerusan lokal berdasarkan percobaan yang dilakukan di Laboratorium Uji Model Hidraulika:

1. Laursen (1960)
2. Froehlich (1989)
3. Mellville (1997)

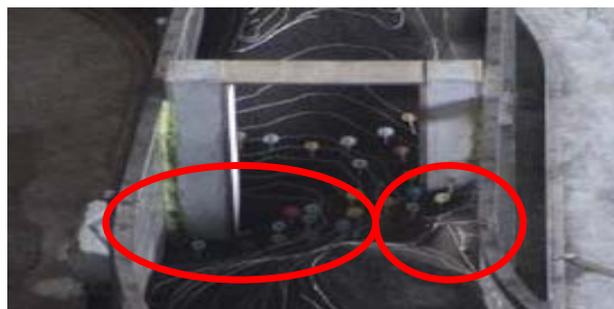
Ketiga formula ini sama dengan formula yang digunakan dalam analisis perhitungan kedalaman gerusan lokal untuk kasus *abutment* dinding vertikal tanpa sayap.

4.1.1 Analisis perbandingan kedalaman gerusan di sekitar 4 (empat) *abutment* dinding vertikal tanpa sayap dalam potongan melintang dan memanjang untuk 4 (empat) debit rencana

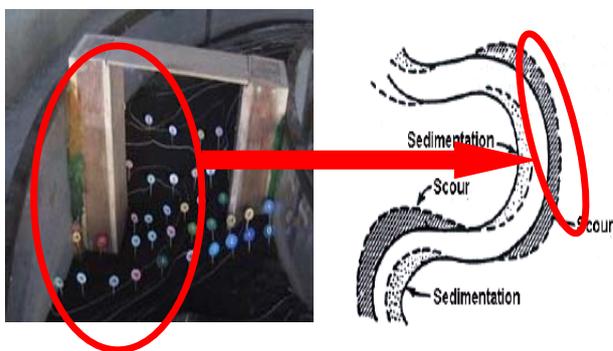
Selama pengaliran 4 (empat) debit yang direncanakan, apabila dilihat dalam potongan melintang, gerusan lokal terbesar di sekitar *abutment* relatif terjadi setelah pengaliran debit 7 liter/detik. Hal ini sangat masuk akal, mengingat secara logika, debit yang terbesar memang sepentasnya memberikan hasil gerusan yang paling besar pula.



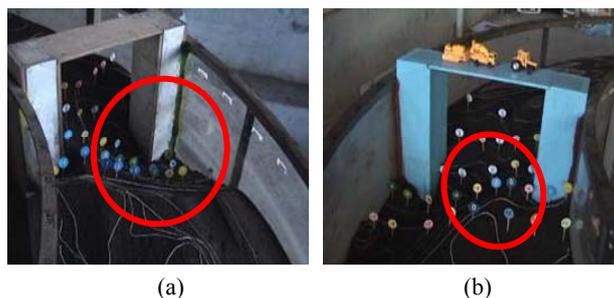
Gambar 5. Segmen *Abutment* 1; (a) Posisi gerusan maksimum hasil pengaliran debit 7 liter/detik, (b) Posisi sedimentasi tertinggi hasil pengaliran debit 5 liter/detik



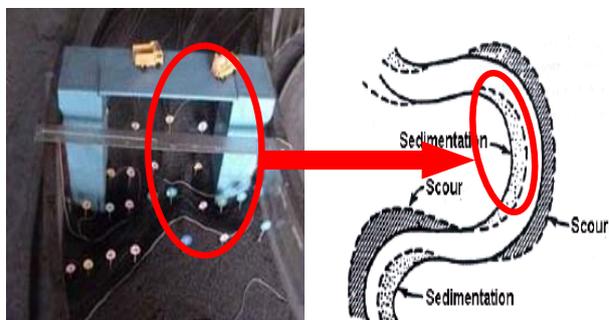
Gambar 8. Segmen abutmen 3, posisi gerusan maksimum dan sedimentasi tertinggi hasil pengaliran debit 7 liter/detik



Gambar 6. Segmen abutment 2, posisi gerusan maksimum hasil pengaliran debit 7 liter/detik



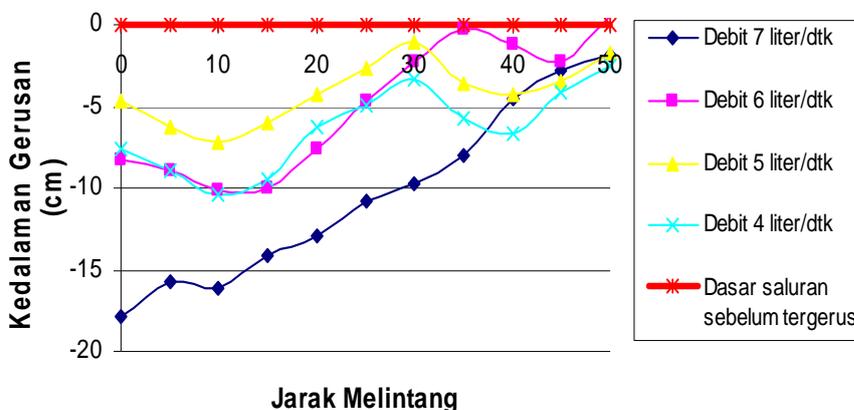
Gambar 9. Segmen abutmen 4; (a) Posisi gerusan maksimum hasil pengaliran debit 7 liter/detik, (b) Posisi sedimentasi tertinggi hasil pengaliran debit 6 liter/detik



Gambar 7. Segmen *abutment* 2, posisi sedimentasi tertinggi hasil pengaliran debit 4 liter/detik

Secara teori dapat dibuktikan dengan rumus debit, $Q = V.A$, dimana Q adalah debit yang mengalir ($m^3/detik$), V adalah kecepatan aliran ($m/detik$), dan A adalah luas penampang basah (m) yang merupakan fungsi dari kedalaman aliran dan lebar saluran. Dari rumus tersebut dapat dilihat hubungan secara linier bahwa untuk debit yang besar, dengan luas penampang basah yang konstan, akan menghasilkan kecepatan aliran yang besar pula..

Dokumentasi gerusan lokal maksimum dan sedimentasi tertinggi yang terjadi di sekitar *abutment* dinding vertikal tanpa sayap untuk masing-masing segmen *abutment* dapat dilihat pada Gambar 8 hingga Gambar 10.



Gambar 10. Kedalaman gerusan pada segmen hulu *abutment* 2 (Segmen 85°) untuk 4 (Empat) debit rencana

Gerusan lokal maksimum terjadi pada pengaliran debit rencana 7 liter/detik, di daerah hulu dan tengah *abutment*. Grafik yang memvisualisasikan potongan melintang gerusan lokal maksimum tersebut dapat dilihat pada **Gambar 10**.

Dari hasil *plotting* grafik yang menunjukkan visualisasi kedalaman gerusan yang terjadi selama pengaliran 4 (empat) debit rencana dalam potongan melintang, dapat dilihat bahwa gerusan maksimum selalu terjadi di sekitar *abutment*, pada segmen hulu dan tengah *abutment*. Hal ini sejalan dengan teori bahwa pada saat aliran menumbuk *abutment*, akan menimbulkan energi yang besar untuk menggerus sedimen (pasir) di sekitarnya. Apabila kecepatan kritis sedimen untuk bergerak lebih kecil dibandingkan kecepatan aliran saat itu, maka akan terjadi perpindahan sedimen. Kondisi inilah yang disebut *live-bed scour*. Namun apabila turbulensi, perbedaan kecepatan di atas dan di bawah butiran, serta *drag force* hanya mengakibatkan kondisi

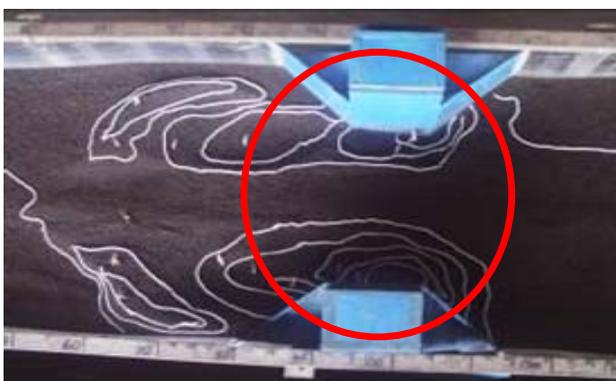
$$0,5 \leq \left(\frac{U}{U_{cr}} \right) \leq 1,0$$

maka gerusan yang terjadi disebut

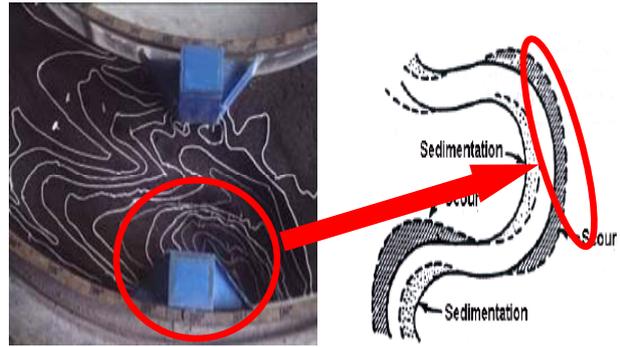
clear water scour, dimana gerusan lokal terjadi menerus dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

4.1.2 Analisis pengamatan kedalaman gerusan yang terjadi selama pengaliran 4 (empat) debit rencana di model dengan *abutment* dinding vertikal dengan sayap

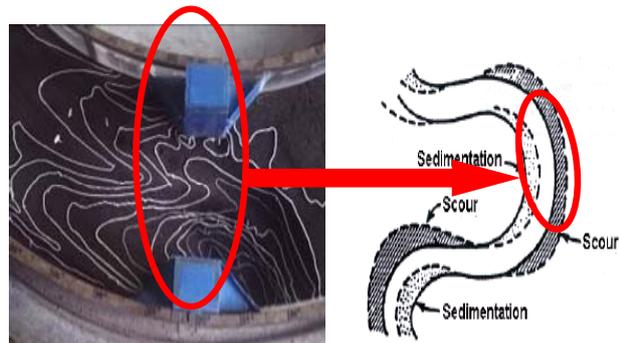
Secara umum gerusan paling dalam terjadi pada daerah sekitar tengah *abutment*. Sedangkan sedimentasi tertinggi untuk debit 4, 5, dan 6 liter/detik terjadi di hilir *abutment*, sementara untuk debit 7 liter/detik terjadi di hulu *abutment*. Bentuk *abutment* dinding vertikal dengan sayap ini merupakan salah satu faktor yang menyebabkan perbedaan posisi dan besarnya gerusan maksimum dan sedimentasi tertinggi, bila dibandingkan dengan model dengan *abutment* dinding vertikal tanpa sayap.



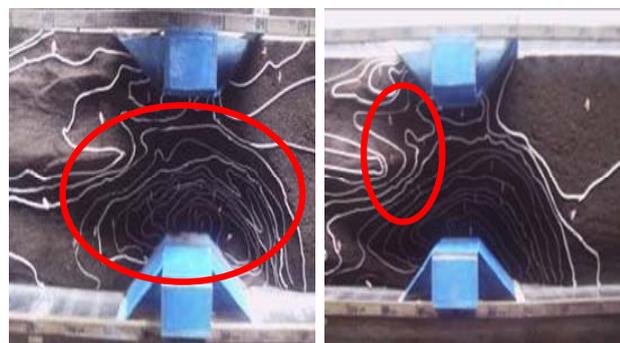
Gambar 11. Segmen *abutment* 1, posisi gerusan maksimum dan sedimentasi tertinggi hasil pengaliran debit 7 liter/detik



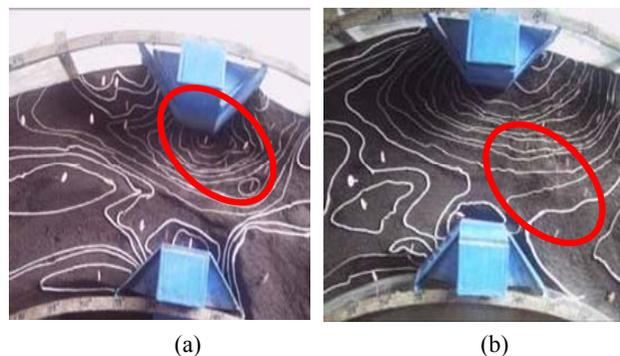
Gambar 12. Segmen *abutment* 2, posisi gerusan maksimum hasil pengaliran debit 7 liter/detik



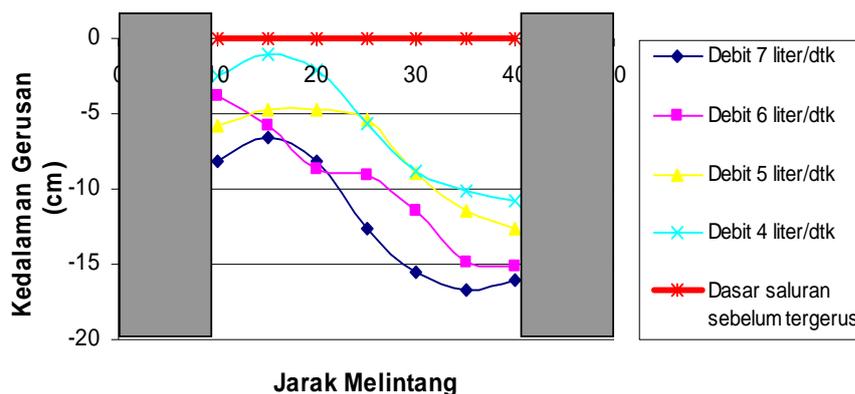
Gambar 13. Segmen *abutment* 2, posisi sedimentasi tertinggi hasil pengaliran debit 4 liter/detik



Gambar 14. Segmen *abutmen* 3; (a) Posisi gerusan maksimum hasil pengaliran debit 7 liter/detik, (b) posisi sedimentasi ter tinggi hasil pengaliran debit 6 liter/detik



Gambar 15. Segmen *abutmen* 4; (a) Posisi gerusan maksimum hasil pengaliran debit 7 liter/detik, (b) posisi sedimentasi tertinggi hasil pengaliran debit 6 liter/detik



Gambar 16. Kedalaman gerusan pada segmen tengah abutment 4 (segmen 45°) untuk 4 (empat) debit rencana

Dokumentasi gerusan lokal maksimum dan sedimentasi tertinggi yang terjadi di sekitar abutment dinding vertikal tanpa sayap untuk masing-masing segmen abutment dapat dilihat pada Gambar 11 hingga Gambar 15.

Gerusan lokal maksimum terjadi pada pengaliran debit rencana 7 liter/detik, di daerah tengah abutment. Grafik yang memvisualisasikan potongan melintang gerusan lokal maksimum tersebut dapat dilihat pada Gambar 16.

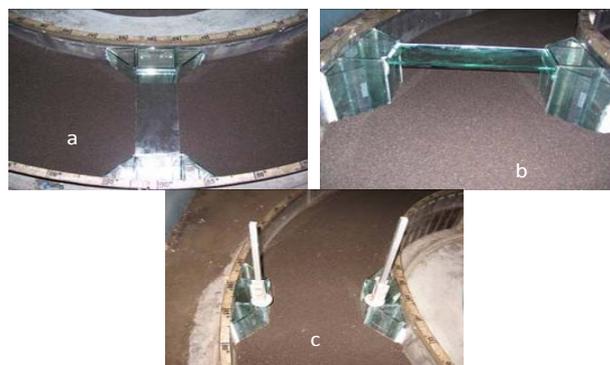
Dari hasil plotting grafik yang menunjukkan visualisasi kedalaman gerusan yang terjadi selama pengaliran 4 (empat) debit rencana dalam potongan melintang, dapat dilihat bahwa gerusan maksimum sebagian besar terjadi di segmen tengah abutment. Hal ini bisa dijelaskan dengan teori bahwa pada saat aliran mulai masuk bagian saluran dengan abutment, kontraksi yang ditimbulkan karena adanya abutment dinding vertikal dengan sayap lebih halus dibanding dengan abutment dinding vertikal tanpa sayap. Keberadaan sayap di samping kanan dan kiri abutment menyebabkan aliran menjadi lebih smooth saat menumbuk dinding abutment sehingga perbedaan kecepatan yang terjadi juga tidak terlalu besar. Pada saat aliran masuk ke segmen tengah abutment, badan saluran menjadi semakin sempit. Untuk pengaliran dengan debit yang sama hal ini menyebabkan peningkatan kecepatan yang mengakibatkan gerusan yang terjadi juga semakin besar. Sama seperti analisis sebelumnya apabila kecepatan kritis sedimen untuk bergerak lebih kecil dibandingkan kecepatan aliran saat itu, maka akan terjadi perpindahan sedimen. Kondisi inilah yang disebut live-bed scour. Namun apabila turbulensi, perbedaan kecepatan di atas dan di bawah butiran, serta drag force

hanya mengakibatkan kondisi
$$0,5 \leq \left(\frac{U}{U_{cr}} \right) \leq 1,0$$

maka gerusan yang terjadi disebut clear water scour, dimana gerusan lokal terjadi menerus dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

4.2 Visualisasi dan pengukuran kedalaman gerusan serta kecepatan yang terjadi di posisi tengah abutment dinding vertikal dengan sayap pada saluran dengan tikungan 180 derajat terhadap fungsi waktu

Untuk mendapatkan grafik kedalaman gerusan terhadap fungsi waktu dan distribusi kecepatan terhadap fungsi waktu, dilakukan pengukuran kedalaman gerusan dan distribusi kecepatan sepanjang aliran untuk setiap selang waktu 1 jam. Pengamatan dan pengukuran untuk mendapatkan kedua grafik tersebut dilakukan hanya di abutment kedua, yaitu di segmen saluran dengan tikungan 180°, dengan memasang abutment dinding vertikal dengan sayap yang terbuat dari kaca sehingga diharapkan untuk sisi dalam dan luar tikungan bisa terdokumentasikan kedalaman gerusan jam-jaman. Kedalaman gerusan untuk bagian tepi luar dan dalam tikungan dilihat dengan bantuan sebuah alat bernama periskop. Prinsip kerja periskop ini adalah menerima pantulan cahaya dari kaca sehingga kedalaman gerusan dapat terbaca dan terukur dengan menggunakan bacaan meteran yang menempel dan disesuaikan posisinya dengan periskop. Instalasi abutment kaca di segmen tikungan 180° dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Instalasi abutment kaca di segmen saluran tikungan 180° (a) Tampak atas, (b) dari arah hulu, (c) Abutment kaca dengan periskop

4.2.1 Debit 4 liter/detik

Hubungan antara kedalaman gerusan terhadap fungsi waktu dan distribusi kecepatan di posisi tengah abutment 2 (tikungan 180°) untuk debit rencana 4 liter/detik dapat dilihat pada Gambar 18.

4.2.2 Debit 5 liter/detik

Hubungan antara kedalaman gerusan terhadap fungsi waktu dan distribusi kecepatan di posisi tengah abutment 2 (tikungan 180°) untuk debit rencana 5 liter/detik dapat dilihat pada Gambar 19.

4.2.3 Debit 6 liter/detik

Hubungan antara kedalaman gerusan terhadap fungsi waktu dan distribusi kecepatan di posisi tengah abutment 2 (tikungan 180°) untuk debit rencana 6 liter/detik dapat dilihat pada Gambar 20.

4.2.4 Debit 7 liter/detik

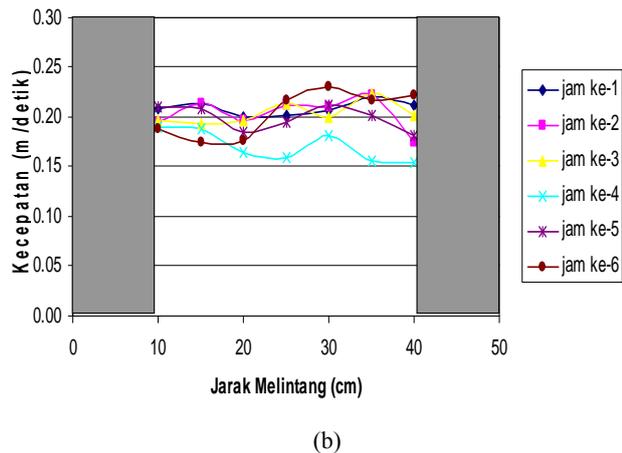
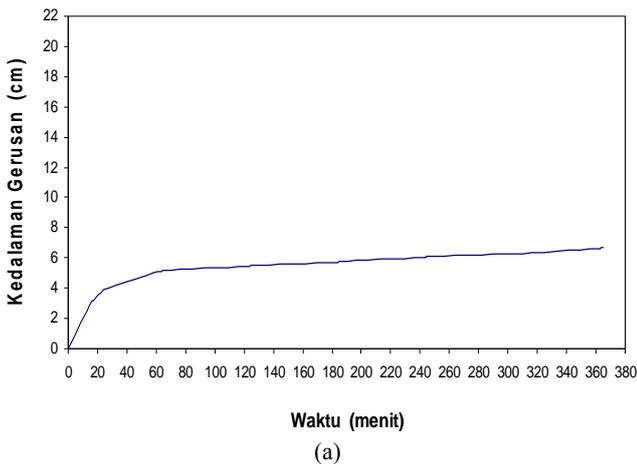
Hubungan antara kedalaman gerusan terhadap fungsi waktu dan distribusi kecepatan di posisi tengah

abutment 2 (tikungan 180°) untuk debit rencana 7 liter/detik dapat dilihat pada Gambar 21.

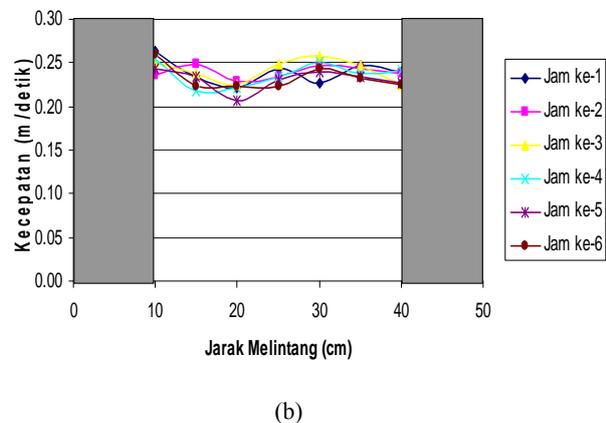
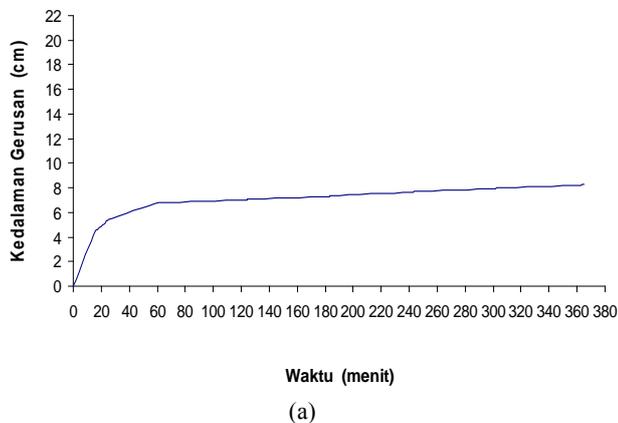
4.3 Analisis perhitungan angkutan sedimen

Sesuai tinjauan pustaka, dijelaskan bahwa angkutan sedimen dasar merupakan fungsi dari kapasitas transport aliran. Tujuan perhitungan ini yaitu memberikan jumlah maksimum material yang dapat diangkat untuk kondisi aliran dan jenis sedimen tertentu. Sebelum melakukan analisis lebih jauh, perlu diketahui jenis dari angkutan sedimen yang terjadi. Parameter yang berperan dalam analisis perhitungan angkutan sedimen ini adalah diameter butiran. Diameter butiran inilah yang akan menentukan metode perhitungan untuk mendapatkan besaran kecepatan kritis aliran (Van Rijn, 1984).

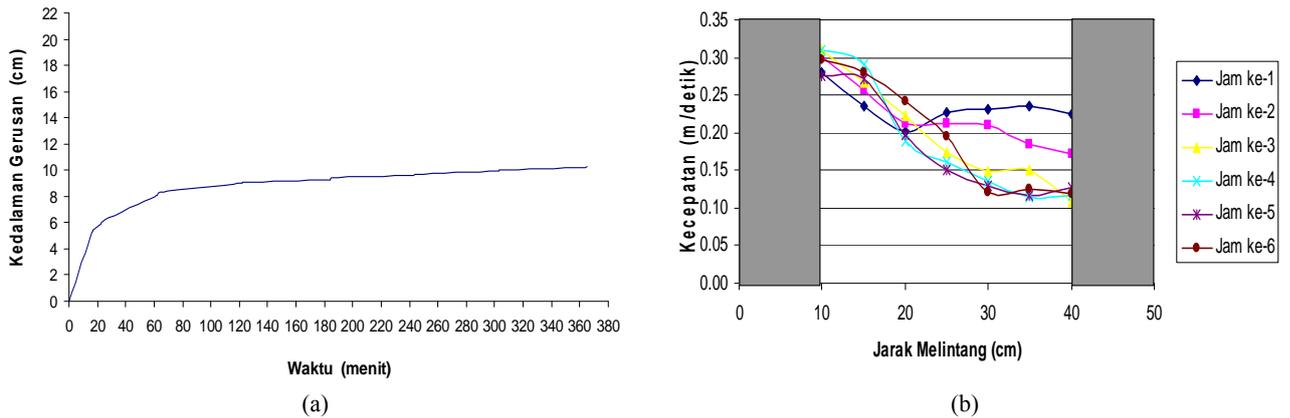
Penentuan jenis angkutan sedimen gerusan yang terjadi di model saluran dengan abutment dinding vertikal tanpa sayap dapat dilihat pada Tabel 2. Sedangkan untuk kasus pada abutment dinding vertikal dengan sayap dapat dilihat pada Tabel 3.



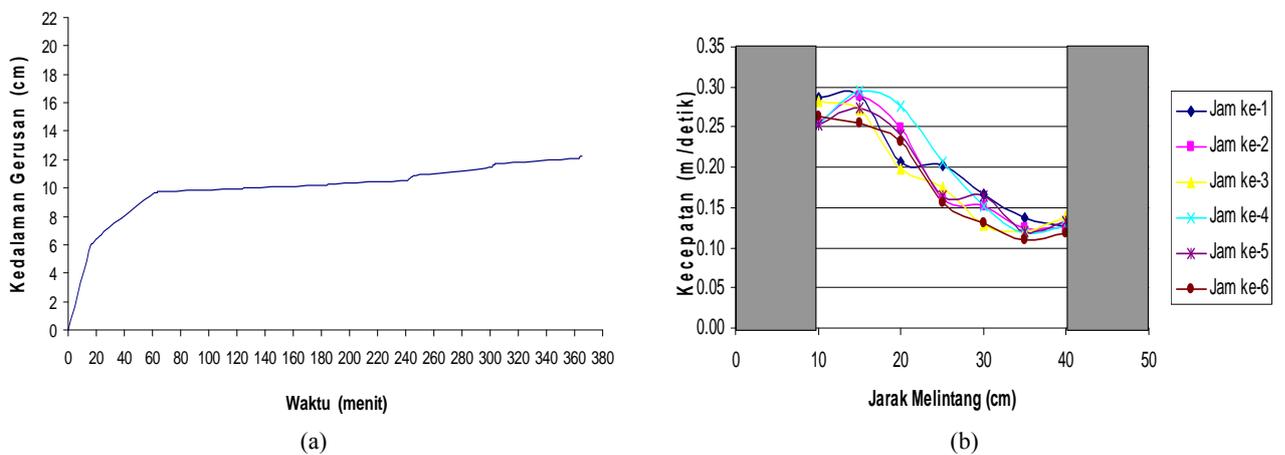
Gambar 18. (a) Hubungan kedalaman gerusan terhadap fungsi waktu, (b) Distribusi kecepatan jam-jaman di posisi tengah abutment 2 (tikungan 180°) untuk debit 4 liter/detik



Gambar 19. (a) Hubungan kedalaman gerusan terhadap fungsi waktu, (b) Distribusi kecepatan jam-jaman di posisi tengah abutment 2 (Tikungan 180°) untuk debit 5 liter/detik



Gambar 20. (a) Hubungan kedalaman gerusan terhadap fungsi waktu, (b) distribusi kecepatan jam-jaman di posisi tengah *abutment* 2 (tikungan 180^o) untuk debit 6 liter/detik



Gambar 21. (a) Hubungan kedalaman gerusan terhadap fungsi waktu, (b) Distribusi kecepatan jam-jaman di posisi tengah *abutment* 2 (Tikungan 180^o) untuk debit 7 liter/detik

Tabel 2. Penentuan jenis angkutan sedimen yang terjadi di model saluran dengan *abutment* dinding vertikal tanpa sayap

Debit Rencana Q (lt/dtk)	7	6	5	4
Kec. Aliran rata-rata hasil Pengamatan, U (m/dtk)	0,298	0,298	0,278	0,286
d50 (mm)			0,78	
d90 (mm)			1,50	
Lebar saluran B (cm)			50	
Kedalaman aliran normal y (cm)	4,7	4,2	3,6	2,8
Luas basah A (cm ²)	234	207	180	139
Keliling basah P (cm)	59,5	58,3	57,2	55,7
Jari-jari hidrolis Rb (cm)	3,94	3,56	3,15	2,50
Kecepatan kritis Ucr (m/det)	0,235	0,225	0,219	0,210
U/Ucr	1,272	1,255	1,241	1,357
Kesimpulan	<i>Live bed scour</i>	<i>Live bed scour</i>	<i>Live bed scour</i>	<i>Live bed scour</i>

Tabel 3. Penentuan jenis angkutan sedimen yang terjadi di model saluran dengan abutment dinding vertikal dengan sayap

Debit Rencana Q (lt/dtk)	7	6	5	4
Kec. Aliran rata-rata hasil Pengamatan, U (m/dtk)	0,298	0,298	0,31	0,304
d50 (mm)			0,9	
d90 (mm)			1,1	
Lebar saluran B (cm)			50	
kedalaman aliran normal y (cm)	2,69	3,36	3,87	4,61
Luas basah A (cm ²)	134,36	167,93	193,59	230,3
Keliling basah P (cm)	55,37	56,72	57,74	59,21
Jari-jari hidrolis Rb (cm)	2,43	2,96	3,35	3,89
Kecepatan kritis Ucr (m/det)	0,25	0,26	0,26	0,27
U/Ucr	1,21	1,16	1,17	1,12
kesimpulan	<i>Live bed scour</i>	<i>Live bed scour</i>	<i>Live bed scour</i>	<i>Live bed scour</i>

Tabel 4. Hasil perhitungan kedalaman gerusan lokal maksimum dengan beberapa metode untuk abutment dinding vertikal tanpa sayap dan prosentase kesalahan

Debit Q (lt/dtk)	Segmen Abutment	Kedalaman Gerusan Hasil Perhitungan y _s (cm) & Kesalahan (%)						Kedalaman Gerusan Maksimum Pengamatan (cm)
		Froehlich (cm)	Kesalahan (%)	Melville	Kesalahan (%)	Laursen (cm)	Kesalahan (%)	
4	100 cm	2,90	56,99	17,24	155,83	5,78	11,90	6,74
	90°	3,14	52,93	16,05	140,57	5,25	6,23	6,67
	70 cm	2,85	57,64	17,49	93,27	5,88	33,36	8,82
	45°	2,91	57,31	17,20	93,50	5,95	33,09	8,89
5	100 cm	3,44	60,00	18,84	119,33	7,01	23,79	7,88
	90°	3,52	39,66	18,46	216,61	7,05	13,99	9,63
	70 cm	3,86	59,87	17,04	76,91	6,65	26,96	5,83
	45°	3,83	51,41	17,17	117,85	6,55	1,03	8,59
6	100 cm	3,88	59,56	20,63	115,09	7,00	26,96	9,59
	90°	4,22	38,71	19,22	179,37	7,38	7,30	6,88
	70 cm	3,62	63,68	21,92	120,08	6,70	32,76	9,96
	45°	3,87	56,27	20,67	165,68	6,99	10,11	7,78
7	100 cm	4,69	57,79	20,75	86,97	7,82	29,51	11,10
	90°	5,33	70,00	18,72	5,28	8,46	52,40	17,78
	70 cm	5,20	68,43	19,09	15,93	8,34	49,39	16,47
	45°	4,65	65,98	20,89	52,93	7,79	43,00	13,66
	Rata-rata		56,98		127,36		20,02	
	Maksimum		67,64		216,61		23,36	
	Minimum		39,66		79,91		6,23	

Tabel 5. Hasil Perhitungan kedalaman gerusan lokal maksimum dengan beberapa metode untuk *abutment* dinding vertikal dengan sayap dan persentase kesalahan

Debit Q (lt/dtk)	Segmen <i>Abutment</i>	Kedalaman Gerusan Hasil Perhitungan y_s (cm) & Kesalahan (%)						Kedalaman Gerusan Naksimum Pengamatan (cm)
		Froehlich (cm)	Kesalahan (%)	Melville	Kesalahan (%)	Laursen (cm)	Kesalahan (%)	
4	100 cm	7.135	47.72	12.782	164.64	6.329	31.04	4.83
	90°	7.007	13.93	13.913	126.22	5.945	3.33	6.15
	70 cm	7.189	27.67	12.418	24.93	6.467	34.94	9.94
	45°	7.078	34.53	13.225	22.34	6.172	42.91	10.81
5	100 cm	7.913	39.56	14.755	160.24	6.717	18.46	5.67
	90°	7.922	16.67	14.692	116.38	6.739	0.76	6.79
	70 cm	8.070	27.43	13.799	24.09	7.065	36.47	11.12
	45°	4.161	35.23	13.352	5.97	7.243	42.52	12.60
6	100 cm	8.852	3.46	15.204	65.80	7.538	17.79	9.17
	90°	8.966	9.70	14.693	47.97	7.728	22.07	9.93
	70 cm	9.061	21.34	14.315	24.26	7.895	31.47	11.52
	45°	8.920	41.20	14.892	1.83	7.659	49.51	15.17
7	100 cm	9.723	44.66	15.911	9.44	8.196	53.35	17.57
	90°	9.812	27.75	15.581	14.74	8.330	38.66	13.58
	70 cm	9.955	18.80	15.099	23.16	8.536	30.37	12.26
	45°	9.890	40.99	15.311	8.65	8.444	49.62	16.76
	Rata-rata		28.17		52.54		31.45	
	Maksimum		47.72		164.64		53.35	
	Minimum		3.46		1.83		0.76	

Hasil perhitungan kedalaman gerusan maksimum dengan beberapa metode untuk *abutment* dinding vertikal tanpa sayap dan persentase kesalahannya dapat dilihat pada **Tabel 4**. Sedangkan untuk kasus pada *abutment* dinding vertikal dengan sayap dapat dilihat pada **Tabel 5**.

5. Kesimpulan

Berikut adalah kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian yang telah dilakukan:

- Abutment* dinding vertikal tanpa sayap:
 - Gerusan maksimum terjadi pada pengaliran debit 7 liter/detik, mencapai elevasi -17,8 cm. Gerusan maksimum ini terjadi di segmen hulu *abutment*.
 - Sedimentasi tertinggi hingga elevasi +2,53 cm terjadi setelah pengaliran debit 5 liter/detik, dan berada di segmen hilir *abutment*.
 - Gerusan maksimum untuk pengaliran setiap debit rencana terjadi sebagian besar di daerah hulu *abutment*.
- Abutment* dinding vertikal dengan sayap:
 - Gerusan maksimum mencapai elevasi -17,57 cm, terjadi pada pengaliran debit 7 liter/detik, terletak di tengah *abutment*.
 - Sedimentasi tertinggi dicapai hingga elevasi +3.07 cm, terjadi pada pengaliran debit 6 liter/detik. Sedimentasi tertinggi ini terjadi di segmen hilir *abutment*.
 - Gerusan maksimum untuk pengaliran setiap debit rencana terjadi relatif terjadi di segmen tengah *abutment*.
- Faktor kecepatan aliran mempunyai hubungan sebanding dengan kedalaman gerusan. Semakin besar kecepatan, maka gerusan yang terjadi juga semakin dalam.
- Hasil pengamatan dan pengukuran distribusi kecepatan untuk kondisi selama pengaliran dibandingkan dengan kondisi awal sebelum tergerus memberikan kesimpulan kecepatan untuk kondisi selama pengaliran relatif lebih besar dibanding

kondisi awal sebelum mulai tergerus. Hal ini sejalan dengan teori bahwa salah satu faktor yang menentukan besarnya gerusan adalah kecepatan aliran.

3. Jenis angkutan sedimen yang terjadi di sepanjang aliran untuk kedua jenis *abutment* adalah *live-bed scour*. Hal ini membenarkan bukti pengamatan, bahwa selama pengaliran empat debit rencana terjadi perpindahan sedimen dasar saluran.
 4. Untuk percobaan *abutment* dinding vertikal tanpa sayap dari hasil perhitungan dengan Formula Laursen (1960), Froehlich (1989), dan Mellville (1997), diperoleh formula yang paling mendekati kondisi aktual adalah Formula Laursen dengan persentase kesalahan 20,02%. Sedangkan untuk *abutment* dinding vertikal dengan sayap, dengan 3 (tiga) formula yang sama, persentase kesalahan terkecil adalah sebesar 28,17%, hasil perbandingan dengan menggunakan Formula Froehlich.
 5. Sesuai dengan jenis abutment berdasarkan standar internasional, setelah penelitian abutment dinding vertikal tanpa sayap dan dengan sayap ini perlu juga dilakukan penelitian untuk abutment spill-through.
 6. Untuk menunjang analisis yang lebih komprehensif, pengukuran kedalaman gerusan dan distribusi kecepatan jam-jaman perlu dilakukan di ketiga abutment lain selain abutment di segmen saluran dengan tikungan 180°. Peralatan pendukung yang sesuai perlu dipersiapkan sebelumnya.
 7. Percobaan mengalirkan keempat debit rencana sebaiknya tidak hanya dilakukan sekali untuk masing-masing debit. Hal ini penting sebagai bahan cross check terhadap validasi pengukuran dan pengamatan. Untuk itu pertimbangan waktu dan biaya penelitian menjadi faktor yang harus diperhatikan.
- Kandasamy, J.K and Melville, B.W., 1998, Maximum Local Scour Depth at Bridge Piers and Abutments, *Journal Hydraulic Research*, IAHR, 36(2), 183-198.
- Laursen, E.M., 1960, Scour at Bridge Crossings, *Journal Hydraulic Division*, ASCE, 86: 39-54.
- Melville, B.W., 1997, Pier and Abutments Scour: Integrated Approach, *Journal of Hydraulic Engineering*, 123 (2), 125-136.
- Richardson, E.V., Harrison, L.J., and Davis, S.R., 1991, *Evaluating Scour at Bridges*: Hydraulic Engineering Circular No. 18, Publication No. FHWA-IP-90-017, Office of Research and Development.
- Richardson, J.R. and Richardson, E.V., 1993, Discussion of Local Scour at Bridge Abutments, By B.W. Melville, *Journal Hydraulic Engineering*, ASCE, 119(9), 1069-1071.
- Richardson, E.V. and Davis, S.R. 1995, *Evaluating Scour at Bridges*, Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18), Publication No. FHWA-IP-90-017, Third Edition, Federal Highway Administration.
- van Rijn, L.C, 1984, Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport,, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110 (11), 1613-1641.
- Webb, D.J., 2000, *Bridge Scour: Application of Ground Penetrating Radar*, *Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical Methodologies and NDT to Transportation Facilities and Infrastructure*, Federal Highway Commission and Missouri Department of Transportation.

Daftar Pustaka

- Astuti, K.A dan Widyaningtias, 2006, *Gerusan yang Terjadi di Sekitar Abutment Dinding Vertikal Tanpa Sayap (Kajian Laboratorium)*, Tugas Akhir, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Bandung.
- Bharbhuiya, 2004, *Local Scour at Abutment: A Review*, *Sadhana*, 29 (5): 449-476.
- Froehlich, D.C., 1989, *Local Scour at Bridge Abutments*, San Francisco, California: Proceedings, ASCE, National Hydraulics Conference, 922-927.