GERUSAN LOKAL DI SEKITAR PILAR JEMBATAN BENTUK OBLONG DENGAN MATERIAL DASAR SUNGAI KAMPAR

Imam Syafni L [1)] Mudjiatko [2)] Trimaijon [2)]
[1)] Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil [2)] Dosen Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Riau, Pekanbaru 28293
E-mail : imamsyafni.l@gmail.com

ABSTRACT

Local scours that occur continuously will cause damage to the pillars of the bridge that can endanger the stability of the bridge structure. Laboratory model has been developed to identify the phenomena of local scour on the oblong pillar with and without pillar protector. Kampar sand with grain size d_{35} = 0,285 mm, d_{50} = 0,330 mm and d_{65} = 0,380 mm and Gs = 2,63 is used in the bed of flume model. Three variations of flow used in this research is classified on the type of subcritical flow with Froude number ranged from 0,46354 – 0,76903. Reynolds number in Fr_1 scored 1658,416 (transitional flow), Fr_2 scored 3081,683 and Fr_3 scored 4381,188 then included in the turbulent flow. The results of the data analysis showed base granular moves in each test Froude value shown in the diagram Shields. Hjulstorm graphic also shows that the granules of gradation used in this research in moving zone. Hydrodynamic flow on the pillars of the downflow lead and create horsehoe vortex at the base of the pillar which eroded material around the pillar . Scour that occurs started having equilibrium at minute 75 . The maximum ratio of scour depth (d_s/b) is 0,44 which occurs in Q_3P_L .Pillar protector of curtain type can reduce scour depths up to 28,57%. Sediment transport analysis results proved that the higher the Froude number is used, the bigger the granules are transported.

Key Word : *local scouring, laboratory model, oblong pillar, hydrodynamic flow, depth ratio*

I. PENDAHULUAN

Gerusan lokal (*local scouring*) merupakan proses alamiah yang terjadi di sungai akibat pengaruh morfologi sungai atau adanya bangunan air yang menghalangi aliran seperti pilar jembatan, abutmen, krib sungai dll. Exploitasi sungai untuk memenuhi kebutuhan material konstruksi merupakan salah satu penyebab berubahnya morfologi sungai sehingga mempengaruhi gerusan yang terjadi. Adanya bangunan air menyebabkan perubahan karakteristik aliran seperti kecepatan aliran dan turbulensi, sehingga menimbulkan perubahan transpor sedimen dan terjadinya gerusan. Angkutan sedimen akan menyebabkan penurunan pada dasar saluran, ini sebagai akibat dari ketidakstabilan material sehingga pergerakan sedimen dasar untuk menstimbangkan kemiringan dasar sungai semakin besar.

Penelitian mengenai gerusan lokal di sekitar pilar jembatan telah banyak dilakukan, yang banyak menitikberatkan terhadap variasi debit aliran, sudut dan bentuk pilar. Penelitian ini

menitikberatkan pada pengaruh pilar jembatan berbentuk oblong dan keberadaan pengaman pilar terhadap gerusan lokal yang terjadi pada kondisi *clear water scour* dengan menggunakan material dasar dari Sungai Kampar.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Mekanisme Gerusan Lokal

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

Breusers dkk. (1977) dan Ansari dkk. (2002) dalam Patrick (2006) menyebutkan bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan lokal dapat dikelompokkan dalam beberapa parameter, antara lain:

a. Parameter aliran sungai : Kecepatan aliran, kedalaman aliran, kecepatan geser, distribusi kecepatan dan kekasaran dasar sungai.
b. Parameter pilar : Dimensi pilar, jarak antar pilar, jumlah pilar dan sudut pilar terhadap arah aliran.
c. Parameter sedimen dasar : Distribusi ukuran butiran, rapat massa butiran, bentuk butiran, ke-kohesif-an tanah dasar sungai.
d. Parameter fluida : Rapat massa, percepatan gravitasi dan kekentalan kinematik.

B. Pengendalian Gerusan Lokal

Metode pengendalian gerusan dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti misalnya dengan *apron*, *rip-rap*, plat (*collar*), tirai, dan lain-lain (Breusers dan Raudkivi, 1991) dalam Istiarto (2012). Pengendalian dengan bangunan *rip-rap*, dilakukan dengan cara menimbun batu atau kerikil kedalam lubang gerusan. Ukuran batu tergantung pada kecepatan rerata aliran maksimum yang lewat di sekitar pilar. *Rip-rap* merupakan perlindungan jembatan yang paling umum digunakan untuk mencegah gerusan di pilar dan abutment jembatan. Sejumlah penambahan fisik ke abutmen dan pilar jembatan dapat membantu mencegah gerusan, seperti pemasangan bronjong dan batu. Penambahan tumpukan lembaran atau *interlocking* blok beton prefabrikasi juga dapat menawarkan perlindungan. Tingkat efektifitas reduksi gerusan dengan menggunakan tirai merupakan fungsi banyaknya tiang, jarak spasi dari masing-masing tiang kecil dan sudut yang dibuat oleh dua arah tiang-tiang (Chabert dan Engeldinger, 1956).

C. Menghitung Gerusan Lokal Pada Pilar Jembatan

Ada beberapa metoda yang dapat dipakai untuk menghitung kedalaman gerusan yang terjadi pada dasar sungai di sekitar pilar.

Laursen dan Toch (1956) dalam Achmadi (2001) mengembangkan persamaan gerusan yang terjadi pada pilar jembatan sebagai fungsi lebar pilar dan kedalaman aliran. Persamaannya sebagai berikut :

$$d_s = 1{,}35\ b^{0,7} y^{0,3}$$

Shen (1969), Breuser dan Raudkivi (1991) dalam Achmadi (2001) menyebutkan bahwa kedalaman gerusan merupakan fungsi angka *Reynolds*. Berdasarkan data laboratorium persamaannya adalah :

$$d_s = 1{,}05\ b^{0,075}$$

Simons (1977) dalam Achmadi (2001) mengembangkan persamaan :

$$d_s = K\, y \left(\frac{b}{y}\right)^{0,65} F^{0,43}$$

Dengan :

K = 2,0 pilar berujung kotak
K =1,5 pilar berujung bulat
K = 1,2 pilar berujung runcing.

Persamaan yang dikembangkan oleh Dr. David Froehlich (Froehlich, 1988) dalam Achmadi (2001) mengatakan bahwa kedalaman gerusan sebagai fungsi bilangan *Froude*, lebar pilar, sudut aliran, jenis pilar dan ukuran butiran. Persamaan tersebut seperti di bawah ini:

$$d_s = 0{,}32\ b\ K \left(\frac{b'}{b}\right)^{0,02} \left(\frac{y}{b}\right)^{0,46} F^{0,2} \left(\frac{b}{d_{50}}\right)^{0,08} + 1{,}0$$

Dengan :

K = 1,3 untuk pilar persegi
K = 1,0 untuk pilar lingkaran, dan
K = 0,7 untuk pilar segitiga.

Persamaan Colorado State University (CSU) (Richardson, 1990) dalam Achmadi (2001)adalah persamaan yang paling banyak digunakan di Amerika. Persamaan tersebut seperti di bawah ini:

$$d_s = 2{,}0\ y\ K_1\ K_2 K_3\ F^{0,43} \left(\frac{b}{y}\right)^{0,65}$$

Dimana:

d_s : kedalaman gerusan (m)
b : lebar pilar (m)
y : kedalaman aliran (m)
Fr : bilangan *Froude*
d_{50}: ukuran butiran lolos 50% (m)

Tabel 1. Faktor koreksi K_1

Bentuk dari Ujung Pilar	K_1
Persegi	1,1
Lingkaran	1,0
Silinder Lingkaran	1,0
Kumpulan Silinder	1,0
Segitiga	0,9

(Richardson, 1990 dalam Achmadi, 2001)

Tabel 2. Faktor koreksi K_2

Sudut Aliran	l/b = 4	l/b = 8	l/b =12
0	1,0	1,0	1,0
15	1,0	2,0	2,5
30	2,0	2,5	3,5
45	2,3	3,3	4,3
90	2,5	3,9	5,0

(Richardson, 1990 dalam Achmadi, 2001)

Tabel 3. Faktor koreksi K_3

Kondisi Saluran	Ukuran (m)	K_3
Clear water scour	n.a	1,1
Pane bed/anti dunes	n.a	1,1
Small dunes	0,6 – 3,0	1,1
Medium dunes	3,0 – 9,1	1,1 – 1,2
Large dunes	> 9,1	1,3

(Richardson, 1990 dalam Achmadi, 2001)

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Bahan

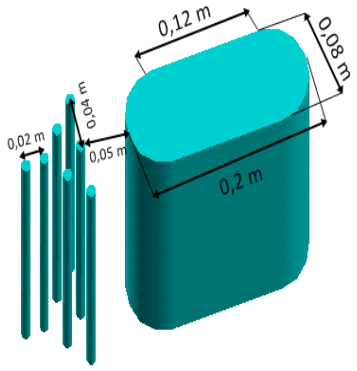
Bahan yang dibutuhkan dalam pemodelan ini ialah pasir sungai Kampar lolos saringan No. 10 dengan ukuran gradasi butiran d_{35} = 0,285 mm, d_{50} = 0,330 mm, d_{65} = 0,380 mm dan Gs = 2,63 dan tanah liat sebagai pembentuk dasar model sungai.

B. Model Saluran

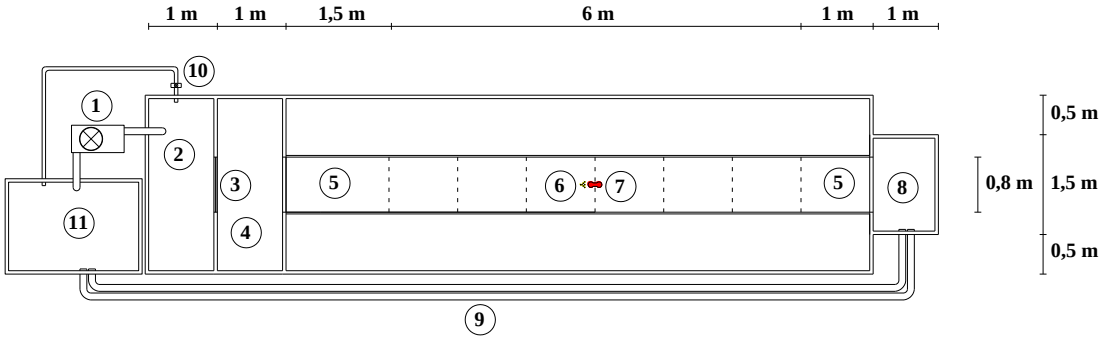
Recirculating sediment flume ini dilengkapi dengan pompa, bak penenang, bak penampung sedimen dan saluran model sungai berdimensi panjang 8,5 m, lebar 0,8 m dan tinggi 0,2 m, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.

C. Model Pilar Jembatan

Pilar yang digunakan pilar tipe oblong dengan dengan panjang 0,2 m dan lebar 0,08 m seperti terlihat pada Gambar 2. Model pengaman pilar yang digunakan pengaman tipe tirai yang diletakkan di hulu pilar yang disusun berbentuk triangular dengan jarak 5 cm dari hulu model pilar jembatan oblong. Bentuk pengaman pilar tipe tirai ini menyerupai pengaman pilar yang terdapat pada jembatan Kuok, Kabupaten Kampar.



Gambar 2. Model pilar oblong

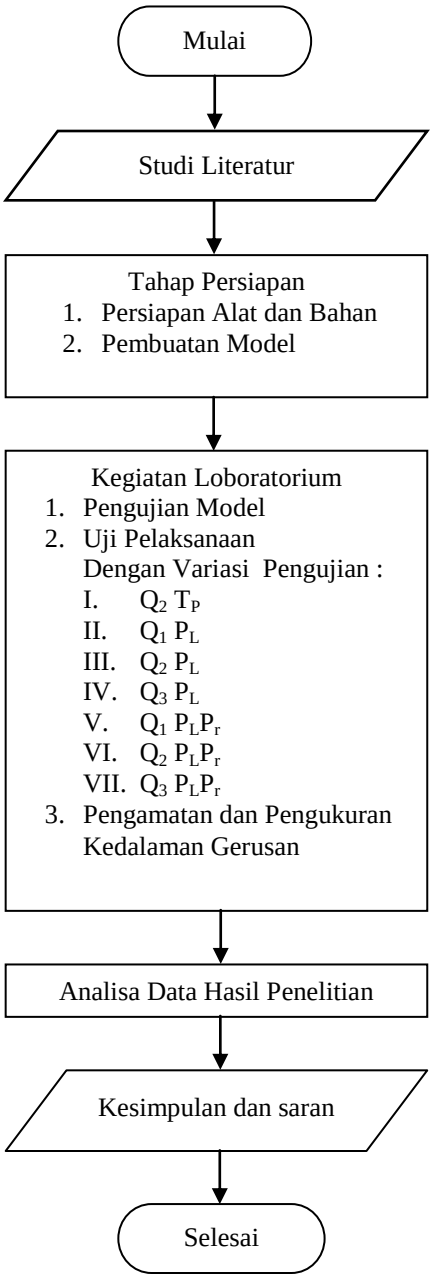


1. Pompa
2. Bak Tampungan
3. Segitiga *Thomson*
4. Bak Penenang
5. Peredam Energi
6. Pelindung Pilar
7. Pilar
8. Bak Penampung Sedimen
9. *Return Rlow*
10. Pengatur Debit
11. Kolam Penampungan

Gambar 1. *Recirculating Sediment Flume*

D. Bagan Alir Penelitian

Tahapan penelitian dapat dilihat pada diagram alir penelitian seperti pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Bagan Alir Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Aliran

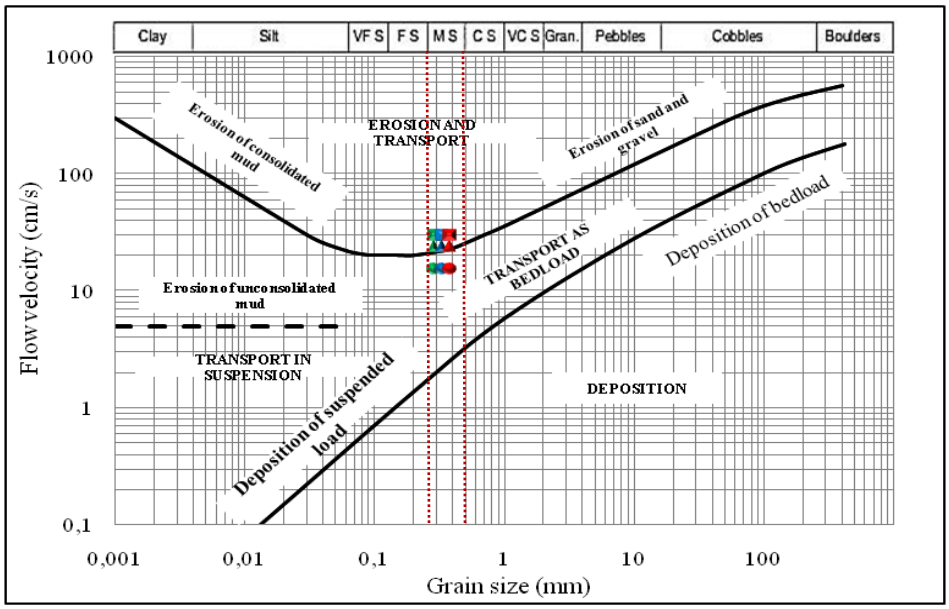
Berdasarkan bilangan *Froude* yang terjadi pada ketiga variasi debit bernilai Fr_1 = 0,46354, Fr_2 = 0,67044 dan Fr_3 = 0,76903 bernilai < 1, maka jenis aliran yang terjadi ialah aliran subkritis. Berdasarkan bilangan *Reynolds* yang terjadi pada Fr_1sebesar 1658,416 maka tergolong kedalam aliran transisi dan jenis aliran turbulen terjadi pada Fr_2sebesar 3081,683 dan Fr_3 sebesar 4381,188.

Kecepatan pada bagian tengah saluran mempunyai nilai kecepatan yang lebih besar dibandingkan nilai kecepatan pada sisi kanan maupun kiri. Kecepatan aliran pada dinding saluran bernilai mendekati nol, hal ini dipengaruhi oleh adanya gaya gesek yang terjadi pada permukaan dinding saluran. Untuk menghindari pengaruh dinding saluran terhadap kecepatan aliran yang dapat mempengaruhi gerusan pada model pilar, maka model pilar oblong diposisikan di tengah saluran.

B. Gerak Awal Butiran

Gerak awal butiran ditandai dengan besarnya parameter tegangan gesek awal aliran lebih besar dari tegangan gesek kritis, $\tau_o > \tau_c$. Dari hasil perhitungan didapat nilai tegangan gesek kritis (τ_c) yang terjadi dalam aliran lebih kecil dari pada tegangan gesek awalnya, sehingga menyebabkan butiran dasar yang diwakili oleh d_{35}, d_{50} dan d_{65} dalam keadaan bergerak.

Hjulstorm juga mengemukakan sebuah grafik gerak butiran, yang membandingkan antara ukuran butiran dasar dengan kecepatan aliran.



Gambar 4. Grafik gerak awal butiran Hjulstorm

Butiran sedimen dasar yang digunakan pada penelitian ini juga berada pada zona bergerak seperti terlihat pada Gambar 4.

Kecepatan aliran pada pengujian Fr_1 membuat material dasar saluran berada pada zona bergerak tapi masih dalam kondisi menggelinding atau menggeser atau gabungan keduanya dengan selalu bertumpu pada dasar saluran (*rolling and sliding*). Hal ini dapat dikaitkan pada kondisi jenis aliran yang terjadi pada pengujian, dimana bilangan *Reynolds* pada Q_1 bernilai 1658,416 (< 2000) atau berjenis aliran transisi.

Pengujian pada Fr_2 kecepatan aliran yang ada membuat butiran dasar d_{35} bergerak sepanjang dasar dengan cara meloncat-loncat (*saltation*), namun untuk butiran d_{50} dan d_{65} masih bisa dikatakan bergerak dengan kondisi menggelinding.

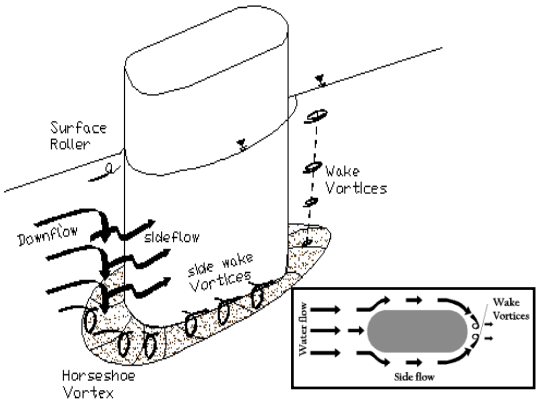
Pengujian pada Fr_3 nilai kecepatan aliran bertambah besar dan melampaui kecepatan jatuh partikel, maka partikel akan terangkat/melayang (*suspended*). Hal ini berkaitan dengan kondisi aliran yang terjadi pada kedua jenis pengujian tersebut, yaitu pada kondisi aliran turbulen (Re > 2000). Berdasarkan diagram Hjulstorm, butiran dasar termasuk dalam golongan *Medium Sand* (MS) dimana ukuran butiran yang digunakan berada dalam rentang 0,25 – 0,50 mm.

C. Hubungan Pola Aliran Terhadap Pola Gerusan

Pola aliran yang menyebabkan gerusan lokal merupakan hasil dari pembendungan air pada hulu dan akselerasi aliran di sekitar bagian depan pilar. Pada bagian permukaan aliran yang berinteraksi dengan pilar jembatan akan terjadi *surface roller* yang terjadi akibat aliran yang berkecepatan tinggi pada permukaan terhalang oleh adanya model pilar jembatan, dengan adanya proses pembendungan ini sebagian dari aliran

akan bergerak arah vertikal dan sebagian lagi mengalir terus searah horizontal melalui sisi model pilar berupa aliran samping (*side flow*).

Ilustrasi dari hubungan pola aliran terhadap gerusan lokal yang terjadi pada model pilar oblong terlihat pada Gambar 5 berikut ini.

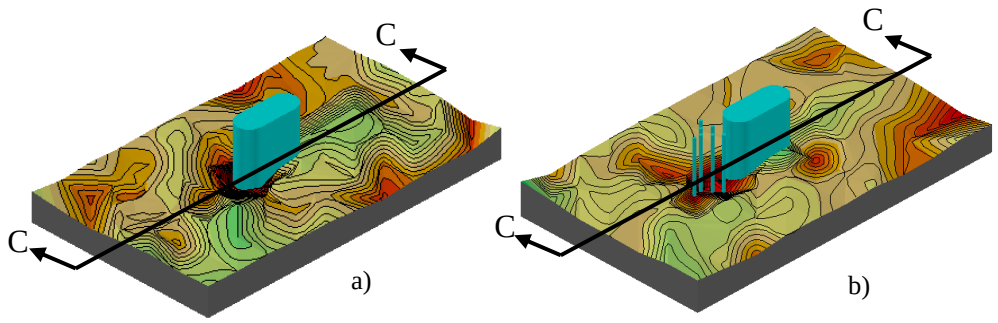


Gambar 5. Ilustrasi pola aliran pada model pilar jembatan oblong

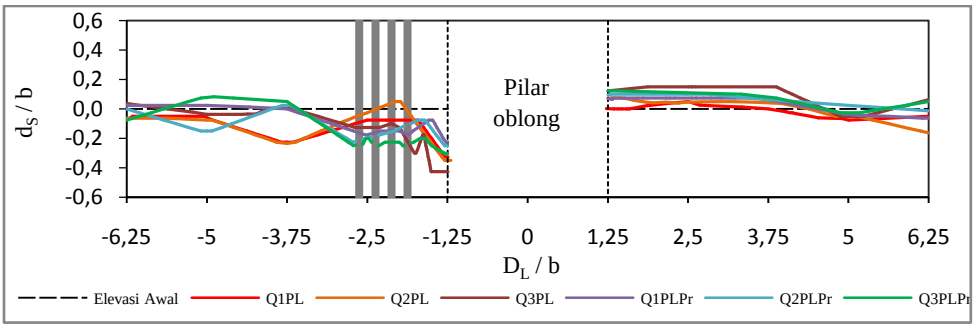
Aliran arah vertikal akan bergerak mengikuti sisi pilar ke arah bawah mencapai dasar saluran dengan kecepatan tinggi (*jet flow*), selanjutnya menekan air yang berada di bawahnya dan menciptakan pusaran pada bagian depan pilar, pusaran ini akan menggerus material dasar yang berada di sekitar pilar atau disebut juga dengan fenomena pusaran tapal kuda (*horseshoe vortex*). Aliran yang bergerak arah horizontal yang melewati sisi samping model pilar akan membentuk *side wake vortices*, hal ini disebabkan karena adanya perbedaan kecepatan aliran yang terjadi antara bagian samping depan dengan aliran yang mengalir melewati sisi samping pilar. Pusaran aliran yang melewati sisi samping pilar (side *wake vortices*) mengangkut material dasar saluran oleh adanya gaya *vortex* menuju hilir model pilar oblong. Pada bagian hilir model pilar oblong, tekanan aliran *wake vortices* semakin berkurang dikarenakan sisi samping pilar oblong memiliki ukuran panjang sehingga kemampuan gerusan aliran juga berkurang dan mengakibatkan material yang terbawa dari hulu dari sisi samping sebagian mengalami deposisi pada bagian hilir model pilar oblong.

D. Perubahan Topografi Dasar Terhadap Kondisi Permukaan Awal

Gaya hidrodinamika aliran yang terjadi pada suatu bentuk pilar akan menyebabkan terjadinya gerusan pada material dasar. Aktifitas gerusan ini terjadi secara terus menerus hingga mencapai suatu titik kesetimbangan pada fungsi waktu tertentu. Pada saat kesetimbangan ini terjadi maka aktifitas gerusan akan semakin kecil sehingga bentuk gerusan yang terjadi cenderung tetap. Gerusan ini secara langsung menyebabkan perubahan topografi dasar di sekitar pilar. Pola gerusan dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. a) Pola gerusan lokal tanpa pengaman pilar dan b) Pola gerusan lokal dengan pengaman pilar

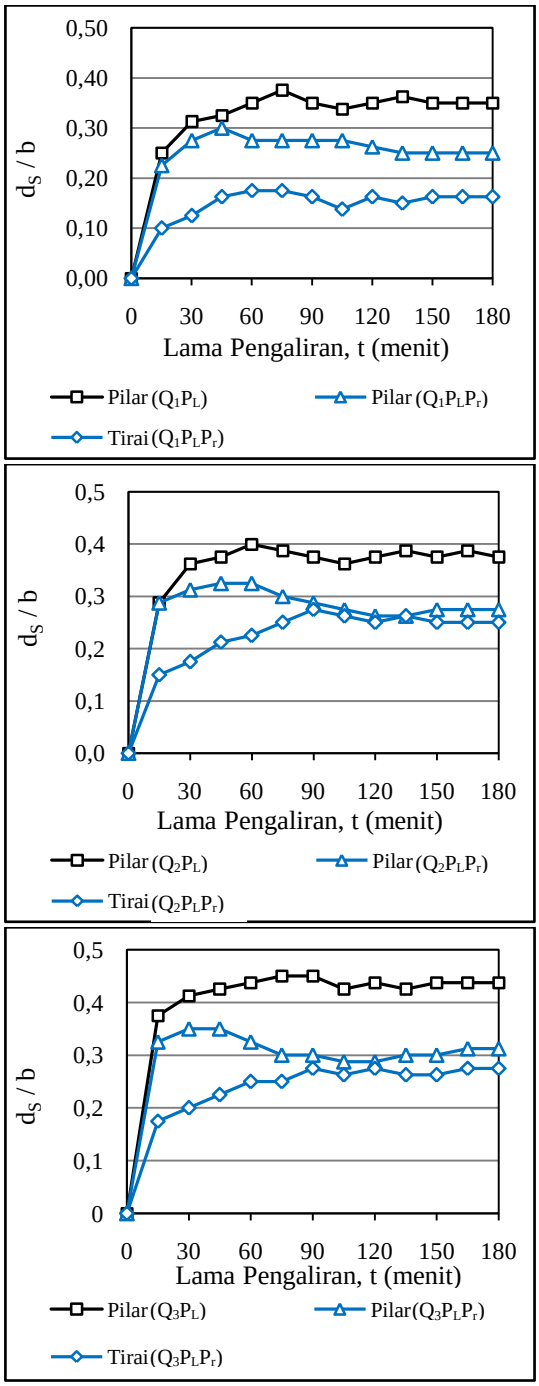


Gambar 7. Potongan memanjang C-C

Perubahan pola gerusan yang terjadi mulai terlihat pada bagian pengaman pilar, terutama pada pengujian $Q_1P_LP_r$, $Q_2P_LP_r$, dan $Q_3P_LP_r$. Keberadaan pengaman pilar mempengaruhi rasio gerusan yang terjadi pada sisi depan model pilar. Rasio kedalaman gerusan (ds/b) maksimum di bagian depan pilar terjadi pada pengujian Q_3P_L yaitu sebesar 0,44. Sedangkan rasio kedalaman gerusan pada pengujian $Q_1P_LP_r$ terkecil daripada pengujian lainnya. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, hal tersebut terjadi karena dipengaruhi oleh keberadaan pengaman pilar yang mampu mengubah pola aliran sehingga mempengaruhi pola gerusan dan meminimalisir kedalaman gerusan yang terjadi pada model pilar. Pada bagian tengah hilir pilar, terlihat kondisi dasar saluran cenderung mengalami deposisi.

E. Hubungan Kedalaman Gerusan Terhadap Waktu

Perkembangan gerusan maksimum dari setiap variasi pengujian terjadi pada hulu pilar oblong. Untuk melihat hubungan perkembangan gerusan setiap variasi debit yang memiliki bilangan *Froude* yang berbeda, maka dibuat grafik yang menyatakan hubungan rasio kedalaman gerusan (d_S/b) terhadap waktu pengamatan (t), seperti terlihat dalam Gambar 8 berikut ini.

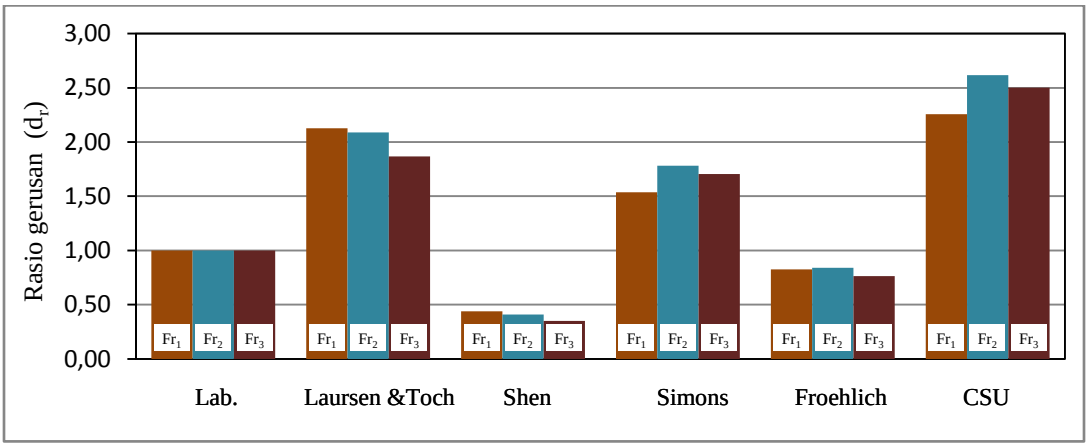


Gambar 8. Perkembangan rasio kedalaman gerusan (d_S/b) terhadap fungsi waktu (t)

Kedalaman gerusan pada sebagian besar variasi pengujian mulai mencapai titik kesetimbangan gerusan pada menit ke 75. Selanjutnya pengaruh kecepatan aliran akan mempengaruhi proses masuk dan keluarnya sedimen pada lubang gerusan. Akan tetapi kedalaman gerusan pada dasarnya tetap konstan atau dengan kata lain kedalaman rerata gerusan sudah berada pada titik kesetimbangan (*equilibrium scour depth*).

F. Perbandingan Kedalaman Gerusan Pengukuran dengan Perhitungan

Perhitungan kedalaman gerusan dilakuakan berdasarkan dari data-data yang telah didapatkan pada tahap sebelumnya. Persamaan gerusan yang dipakai dalam perhitungan ini adalah persamaan yang dikemukakan oleh Laursen & Toch (1956), Shen (1969), Simons (1977), Froehlich (1988) dan Colorado State University (CSU) yang dikemukakan oleh Richardson (1990). Selanjutnya kedalaman gerusan (d_S) hasil pengujian dibandingkan dengan persamaan gerusan yang ada dalam bentuk rasio gerusan (dr) seperti terlihat pada Gambar 9.



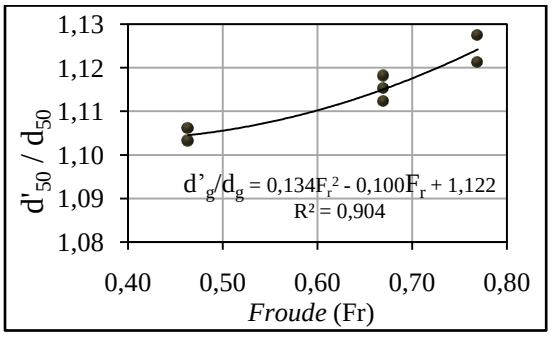
Gambar 9. Rasio gerusan (d_r) setiap variasi pengujian

Berdasarkan nilai rasio gerusan (d_r) yang didapatkan dari perbandingan nilai kedalaman gerusan yang dihasilkan dari persamaan gerusan terhadap kedalaman gerusan lokal pengukuran, maka persamaan Froehlich memberikan hasil yang paling mendekati dengan nilai kedalaman yang terjadi pada model pilar oblong dalam kondisi pilar tanpa tirai pengaman jika dibandingkan dengan formula gerusan lainnya. Pada kondisi model pilar dengan tirai pengaman, persamaan Froehlich juga memiliki nilai yang paling mendekati dengan kondisi yang terjadi pada model pilar oblong.

G. Analisis Angkutan Sedimen

Setiap pelaksanaan pengujian selesai dilaksanakan, dilakukan analisa butiran terhadap sedimen yang terangkut selama pengujian berlangsung. Analisa gradasi butiran dilakukan untuk mengetahui diameter butiran sedimen yang terangkut oleh aliran pada tiap pengujiannya.

Gradasi butiran dari hasil analisa saringan di atas dibandingkan dengan gradasi butiran pada awal pengujian (d'_g/d_g) untuk selanjutnya dihubungkan terhadap bilangan *Froude* yang terjadi pada tiap pengujiannya. Hubungan antara butiran dengan bilangan *Froude* dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Hubungan d'_{50}/d_{50} terhadap bilangan *Froude*

Hasil perbandingan yang dilakukan pada tiap ukuran butiran memberikan *trend* garis yang sama, dimana semakin besar bilangan *Froude* yang digunakan maka semakin besar pula butiran yang terangkut.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang dilakukan terhadap gerusan lokal di sekitar pilar jembatan

bentuk oblong, diambil beberapa simpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan bilangan *Froude*, jenis aliran pada penelitian ini termasuk dalam jenis aliran subkritis dengan nilai Fr < 1. Berdasarkan nilai *Reynolds*, jenis aliran yang terjadi pada Fr_1 ialah jenis aliran transisi ($500 \leq Re \leq 2000$), Fr_2 dan Fr_3 jenis aliran yang terjadi ialah turbulen (Re > 2000).
2. Rasio kedalaman gerusan lokal terhadap lebar pilar (d_s/b) paling besar pada pengujian tanpa pengaman ialah sebesar 0,44 yang terjadi pada pengujian Q_3P_L. Pengaman pilar mereduksi rasio gerusan pada pengujian dengan menggunakan Fr_1 sebesar 28,57%, pengujian dengan Fr_2 mereduksi sebesar 26,67% dan pada pengujian dengan Fr_3 mampu mereduksi sebesar 28,57%.
3. Rasio gerusan mulai mencapai titik kesetimbangan (*equilibrium scour depth*) pada menit ke 75. Selanjutnya pengaruh kecepatan aliran akan mempengaruhi proses masuk dan keluarnya sedimen pada lubang gerusan, akan tetapi kedalaman gerusan pada dasarnya tetap konstan.
4. Hasil perhitungan kedalaman gerusan berdasarkan persamaan gerusan *Froehlich* memberikan hasil yang paling mendekati dengan kedalaman gerusan lokal yang terjadi pada model penelitian.
5. Hasil angkutan sedimen menunjukkan bahwa semakin besar nilai Froude maka semakin besar pula diameter yang terangkut.

B. Saran

Fenomena gerusan pada pilar akan terus berkembang seiring dengan modifikasi parameter pengujian, sehingga dapat disarankan beberapa hal sebagai berikut:

1. Jarak tirai pengaman terhadap model pilar bisa dijadikan penelitian berikutnya untuk mengetahui jarak optimum pengaruh tirai pengaman terhadap gerusan yang terjadi pada pilar.
2. Pengaruh saluran bermeander terhadap gerusan lokal pada pilar bisa dijadikan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Achmadi, Tri. 2001. *Model Hidraulik Gerusan Pada Pilar Jembatan*. Tesis. Semarang : Universitas Diponegoro.

Alabi, D.P. 2006. *Time Development Of Local Scour At A Bridge Pier Fitted With A Collar*. Tesis. Canada : University of Saskatchewan.

Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J. 1991. *Scouring*. IAHR Hydraulic Structure Design Manual. Rotterdam : A.A. Belkema.

Ikhsan, C dan Solichin. 2008. *Analisis Susunan Tirai Optimal Sebagai Proteksi Pada Pilar Jembatan Dari Gerusan Lokal*. Media Teknik Sipil/Juli 2008 : 85–90.

Istiarto. 2012. *Materi Kuliah Transport Sedimen*. Yogyakarta : UGM.

Laursen, E.M. and Toch A. 1956. *Scour Around Bridge Piers And Abutments*. Iowa Highway Research Board Bulletin No. 4 :1-60.

Melville, B.W. 1975. *Local Scour At Bridge Sites*. Tesis. New Zealand : University of Auckland.

Nichols, Gary. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. United Kingdom : Wiley-Blackwell.

Rinaldi dan Yulistiyanto, B. 2001. *Model Fisik Pengendalian Gerusan Di Sekitar Abutmen Jembatan*. Forum Teknik Sipil No. X/2-Agustus 2001 : 139–149.

Triatmodjo, B. 1996. *Hidraulika I*. Yogyakarta : Beta Offset.

Triatmodjo, B. 1996. *Hidraulika II*. Yogyakarta : Beta Offset.

Wibowo, O.M. 2007. *Pengaruh Aliran Terhadap Gerusan Lokal Di Sekitar Pilar Jembatan*. Skripsi.Semarang : Universitas Negeri Semarang.