MODEL LABORATORIUM GERUSAN LOKAL PADA PILAR JEMBATAN TIPE *GROUPED CYLINDER*

Arie Perdana Putra [1)] Mudjiatko [2)] Siswanto [2)]
[1)] Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil [2)] Dosen Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Riau, Pekanbaru 28293
E-mail : arieperdanaputra@gmail.com

ABSTRACT

Local scour at bridge pillars that occurs continuously will cause damage to the bridge structure. Many forms of pillar have been developed to minimize local scouring, but yet provide maximum results. Laboratory model has been developed to identify the local scour phenomena on the grouped cylinder pillar by looking at the phenomena with and without pillar protector. The bed of model is using 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. Three variations of the 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 then included in the transitional flow and turbulent flow occur in Fr_2 scored 3081,683 and Fr_3 scored 4381,188. Hjulstorm graphic shows that the granules of gradation used in this research in moving zone. Hydrodynamic flow in pillar causes downflow on the front pillar and wake vortices are formed on the back, so that the presence of these forces will create a horseshoe vortex at the bottom of the pillar. The equilibrium of scour depth against time function occurred at minute 75. The maximum ratio of scour depth (d_s/b) is 2,9 which occurs in Q_3P. Pillar protector of curtain type can reduce scour depths of up to 62,07 %. Sediment transport analysis result prove that the higher Froude number is used the bigger the granules are transported.

Key word : *local scouring, laboratory model, grouped cylinder pillar, hydrodynamic flow, depth ratio.*

I. PENDAHULUAN

Keberadaan sungai sangat besar manfaatnya bagi kehidupan manusia, kegiatan penambangan material sungai untuk memenuhi kebutuhan material konstruksi juga merupakan salah satu manfaat sungai bagi manusia dan juga akan menimbulkan kerusakan lingkungan apabila tidak dikendalikan secara baik dan benar. Tingginya kebutuhan material konstruksi akan berdampak kepada eksploitasi sungai yang tinggi pula sehingga pada kurun waktu tertentu akan menyebabkan perubahan morfologi sungai.

Adanya bangunan air seperti pilar dan abutmen jembatan juga dapat menyebabkan perubahan karakteristik aliran seperti kecepatan dan atau turbulensi sehingga menimbulkan perubahan transpor sedimen dan terjadinya gerusan. Gerusan dapat menyebabkan terkikisnya tanah di sekitar pondasi dari sebuah bangunan yang terletak pada aliran air (Breusers & Raudkivi, 1991).

Banyak kasus-kasus tentang runtuhnya bangunan jembatan bukan hanya disebabkan oleh faktor konstruksi, namun persoalan gerusan di sekitar pilar menjadi penyebab lain. Berbagai bentuk pilar jembatan telah dikembangkan untuk meminimalkan gerusan dasar akan tetapi belum memberikan hasil yang maksimal, oleh karena itu perlu dicari solusi lain untuk menangani masalah gerusan lokal ini seperti dengan penambahan bangunan pengaman pilar.

Model laboratorium digunakan untuk mendekatkan fenomena hidrodinamika aliran model laboratorium dengan kondisi pilar jembatan yang ada, sehingga nantinya didapat alternatif pengendalian secara teknis dari bangunan-bangunan sungai terhadap kemungkinan keruntuhan atau kerusakan akibat gerusan lokal.

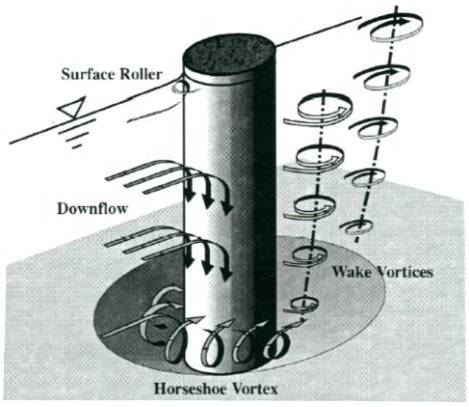
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui fenomena gerusan yang terjadi pada pilar jembatan tipe *cylinder grouped* dan pengaruh penambahan bangunan pengaman pilar terhadap kedalaman gerusan lokal. Sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah memberikan informasi tentang pola aliran, gerusan lokal dan kedalaman gerusan di sekitar pilar jembatan tipe *cylinder grouped*.

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 (*down flow*), karena aliran yang datang dari hulu dihalangi oleh pilar. Aliran arah vertikal ini akan terus menuju dasar yang selanjutnya akan membentuk pusaran. Pada 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.

Interaksi aliran dan pilar akan membentuk busur ombak (*bow wave*) yang disebut *surface roller* yang kemudian bergerak kesamping dan terjadi pemisahan aliran yang selanjutnya membentuk *wake vortex* dibagian belakang pilar jembatan, seperti diilustrasikan pada gambar berikut :



Gambar 1. Ilustrasi gerusan lokal di sekitar pilar jembatan
(Sumber : Melville & Coleman, 2000 dalam Alabi, 2006)

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). Proteksi gerusan tipe tirai ialah pengendalian gerusan dengan cara meletakkan sejumlah tiang yang diletakkan dengan jarak tertentu pada bagian hulu pilar. Berdasarkan penelitian pamakaian tiang-tiang kecil yang dipasang di depan pilar dalam bentuk zig-zag mampu mereduksi kedalaman gerusan mencapai 38,5 %, dimana tingkat efektifitas reduksi gerusan dengan menggunakan tirai merupakan fungsi banyaknya tiang, jarak spasi dari masing-masing tiang (Ikhsan dan Solichin, 2008).

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 :

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

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:

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

$$b' = b \cos\beta + l \sin\beta$$

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) dikemukakan oleh Richardson (1990) dalam Achmadi (2001) adalah persamaan yang paling banyak digunakan di Amerika. Persamaan tersebut seperti di bawah ini:

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

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.

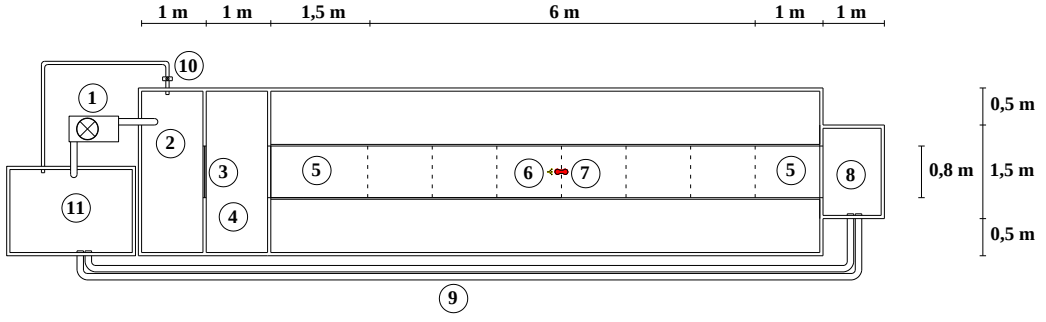
B. Model Saluran

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 2.

C. Model Pilar Jembatan

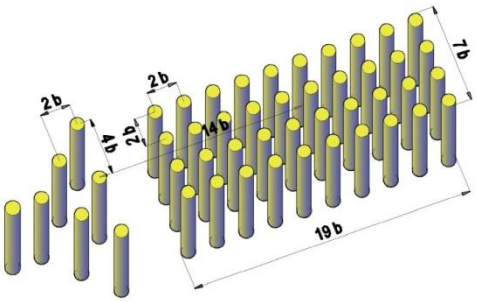
Model pilar jembatan digunakan tipe *grouped cylinder* dengan jumlah tiang sebanyak 40 buah tiang yang disusun dengan jarak 2b atau dua kali lebar pilar, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.

Model pilar seperti ini diadopsi dari bentuk pilar yang terdapat pada jembatan Kuok dan jembatan Air Tiris, kabupaten Kampar.



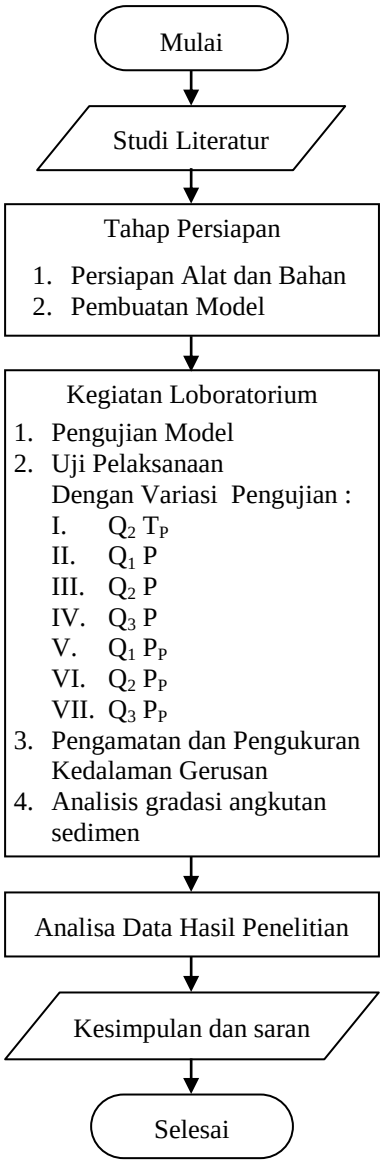
1. Pompa
2. Bak Tampungan
3. Segitiga *Thomson*
4. Bak Penenang
5. Peredam Energi
6. Pelindung Pilar
7. Pilar
8. Bak Penampung Sedimen
9. *Return Rlow*
10. Pengatur Debit
11. Kolam Penampungan

Gambar 2. *Recirculating sediment flume*



Gambar 3. Ilustrasi 3D model pilar dan pengaman pilar jembatan

D. Bagan Alir Penelitian



Gambar 4. Bagan alir penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

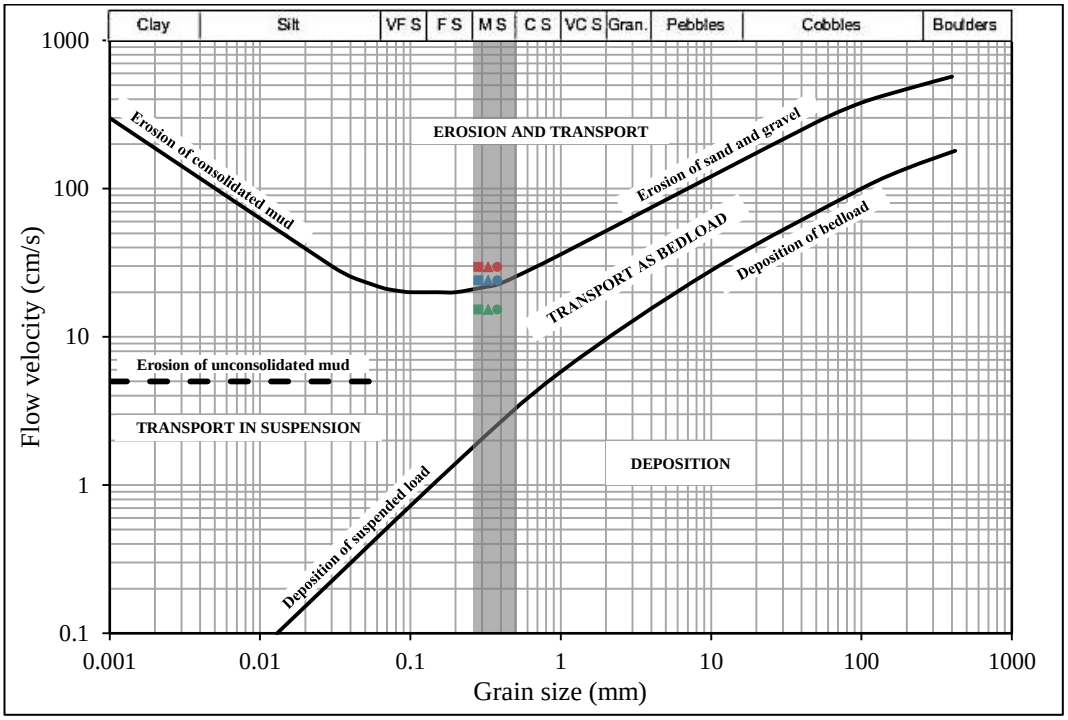
A. Karakteristik Aliran

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_1 sebesar 1658,416 maka tergolong kedalam aliran transisi dan jenis aliran turbulen terjadi pada Fr_2 sebesar 3081,683 dan Fr_3 sebesar 4381,188.

Pengukuran kecepatan permukaan yang dibandingkan dengan kecepatan gesernya menghasilkan kecepatan pada bagian tengah saluran mempunyai nilai kecepatan yang lebih besar dibandingkan nilai kecepatan pada sisi kanan maupun kiri, sehingga dinding tidak berpengaruh terhadap gerusan lokal yang terjadi.

B. Gerak Awal Butiran

Gerak awal butiran ditandai dengan besarnya parameter tegangan gesek awal aliran lebih besar dari tegangan gesek kritisnya, $\tau_o > \tau_c$. Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan 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 mengemukakan sebuah grafik seperti terlihat Gambar 5 yang membandingkan antara ukuran butiran dasar dengan kecepatan aliran yang terjadi dalam aliran.



Gambar 5. Grafik gerak awal butiran *Hjulstorm*

Menurut grafik *Hjulstorm* ini pengujian pada Fr_1 kecepatan aliran yang terjadi 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*).

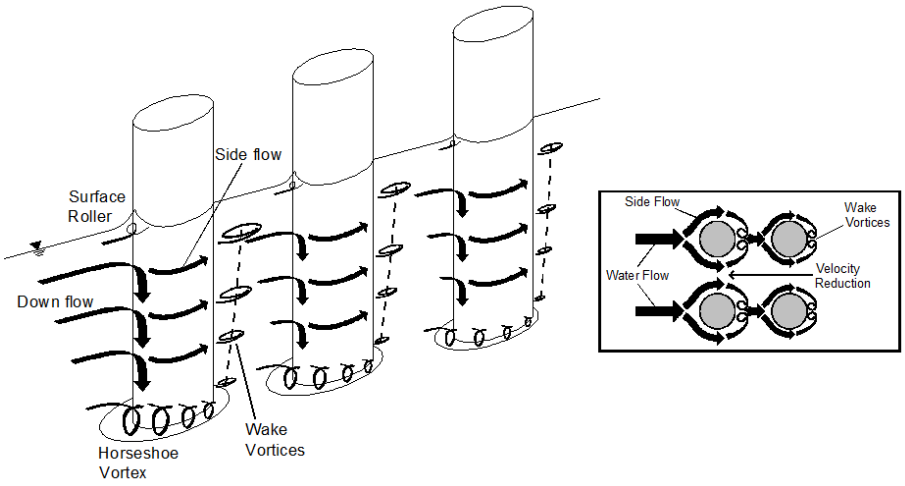
Pada pengujian Fr_2 kecepatan aliran yang ada membuat butiran dasar d_{35} bergerak sepanjang dasar dengan cara meloncat-loncat (*saltation*) namun untuk butiran d_{50} dan d_{65} masih bisa dikatakan bergerak dengan kondisi menggelinding, sedangkan untuk pengujian pada Fr_3 kecepatan aliran yang semakin bertambah besar dan melampaui kecepatan jatuh dari partikel sedimen menyebabkan partikel bergerak dengan cara terangkat/melayang (*suspended*).

Fenomena cara bergeraknya butiran dasar ini dapat dikaitkan pada kondisi jenis aliran yang terjadi pada pengujian, dimana bilangan *Reynolds* pada Fr_1 bernilai 1658,416 atau berjenis aliran transisi ($500 < Re < 2000$) dan kondisi aliran yang terjadi pada Fr_2 dan Fr_3 berjenis aliran turbulen ($Re > 2000$). Grafik ini juga memperlihatkan bahwa butiran dasar yang digunakan termasuk dalam golongan *Medium Sand* (MS), dimana ukuran butiran yang termasuk dalam jenis ini berada dalam rentang 0,25 – 0,50 mm.

C. Hubungan Pola Aliran Terhadap Pola Gerusan

Berdasarkan tipe pilar jembatan *grouped cylinder*, fenomena aliran yang terjadi sedikit berbeda jika dibandingkan dengan pola aliran yang terjadi pada tipe

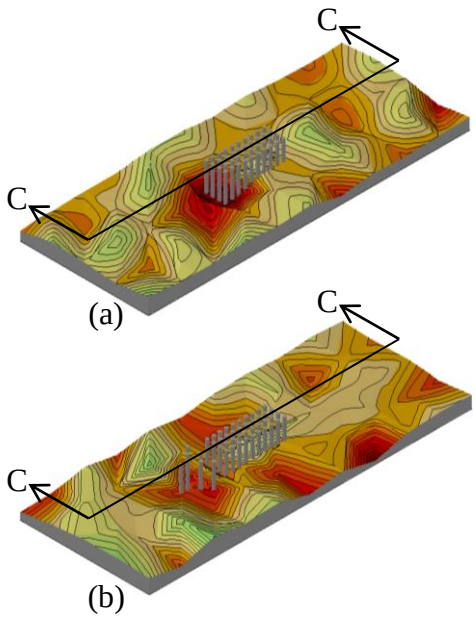
pilar tunggal. Untuk tipe pilar ini, *wake vortices* yang terbentuk tidaklah sebesar yang terjadi pada tipe pilar tunggal. Hal ini disebabkan karena jarak antara pilar yang berdekatan akan memperkecil *wake vortices* yang terjadi, dengan semakin kecilnya energi untuk mengangkut butiran dasar saluran, maka gerusan lokal yang terjadi juga akan semakin kecil seiring arah menjauh dari hulu grup pilar dan pada bagian hilir dari grup pilar *wake vortices* yang terjadi sedikit membesar karena tidak ada lagi penghambat pada bagian belakang pilar.



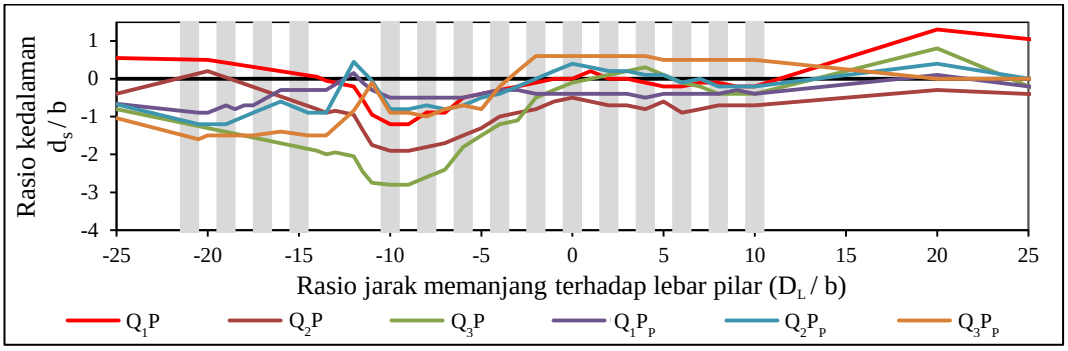
Gambar 6. Ilustrasi pola aliran pada model pilar jembatan

D. Perubahan Topografi Dasar Terhadap Kondisi Permukaan Awal

Adanya gaya hidrodinamika aliran yang terjadi pada suatu bentuk pilar akan menyebabkan terjadinya gerusan pada material dasar. Aktifitas gerusan ini terjadi secara terus menerus sampai dicapai suatu 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.



Gambar 7. Pola gerusan lokal pengujian tanpa pengaman (a) dan dengan pengaman pilar (b)

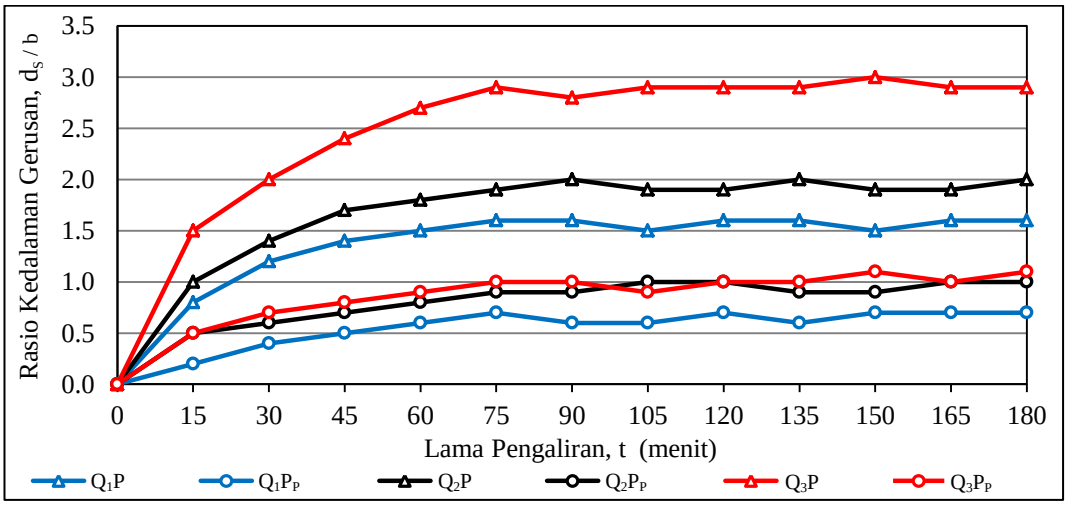


Gambar 8. Potongan memanjang C-C

Perbandingan kedalaman gerusan lokal terhadap lebar pilar (d_s/b) paling besar pada pengujian tanpa pengaman ialah sebesar 2,9 yang terjadi pada depan grup pilar pengujian Q_3P. Keberadaan pengaman pilar berbentuk tirai mampu mereduksi kedalaman gerusan yang terjadi dengan cara memindahkan posisi gerusan lokal sehingga gerusan maksimum tidak lagi terjadi pada grup pilar melainkan pada pengaman pilar. Pengaman pilar mampu mereduksi kedalaman gerusan yang terjadi pada pengujian dengan menggunakan Fr_1 sebesar 56,25 %, pada Fr_2 sebesar 50,00 % dan Fr_3 sebesar 62,07 %.

E. Perkembangan Kedalaman Gerusan Berdasarkan Fungsi Waktu

Perkembangan kedalaman gerusan yang terjadi selama pengujian dapat dilihat pada Gambar 9. Kedalaman gerusan pada sebagian besar variasi pengujian akan 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 sudah berada pada titik kesetimbangan (*equilibrium scour depth*).

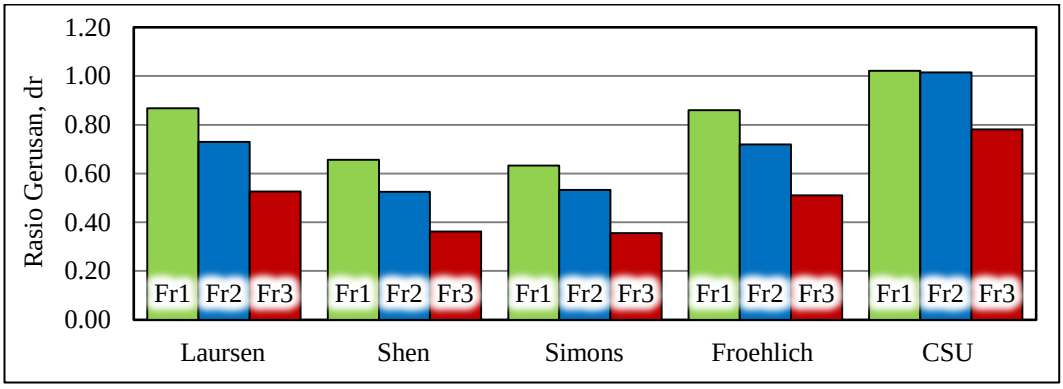


Gambar 9. Perkembangan rasio kedalaman (d_s/b) terhadap fungsi waktu (t)

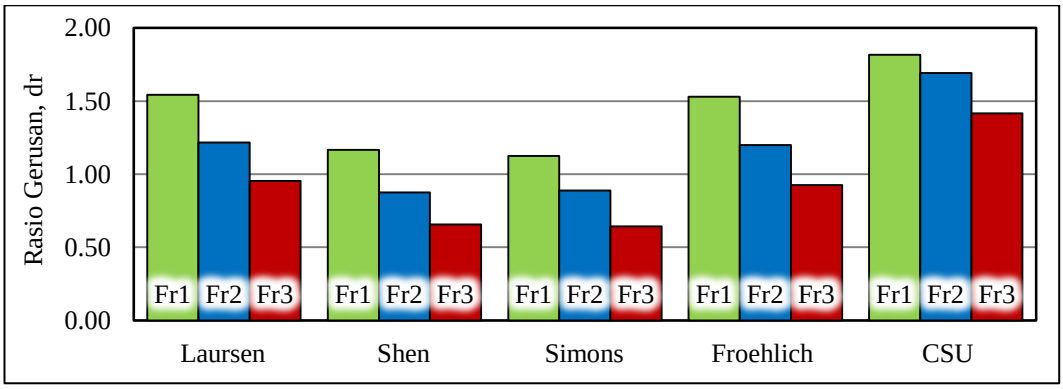
F. Perbandingan Kedalaman Gerusan Lokal Berdasarkan Hasil Perhitungan

Kedalaman gerusan lokal hasil pengujian dibandingkan dengan kedalaman gerusan lokal hasil perhitungan berdasarkan persamaan gerusan yang dikemukakan oleh Laursen & Toch (1956), Shen (1969), Simons (1977), Froehlich (1988) dan *Colorado State University* (CSU) yang dikemukakan oleh Richardson (1990).

Berdasarkan nilai rasio gerusan ($d_r \approx 1$), maka persamaan CSU memberikan hasil yang paling mendekati dengan nilai kedalaman yang terjadi pada model pilar dalam kondisi pilar tanpa tirai pelindung. Pada kondisi model pilar menggunakan tirai pelindung, persamaan *Simons* memberikan hasil yang paling mendekati dari hasil laboratorium pada pengujian menggunakan Fr_1 dan Fr_2, sedangkan untuk Fr_3 persamaan *Froehlich* memiliki nilai yang paling mendekati dengan kondisi yang terjadi pada model, seperti diperlihatkan pada gambar berikut :



Gambar 10. Rasio gerusan pada pengujian tanpa pengaman pilar

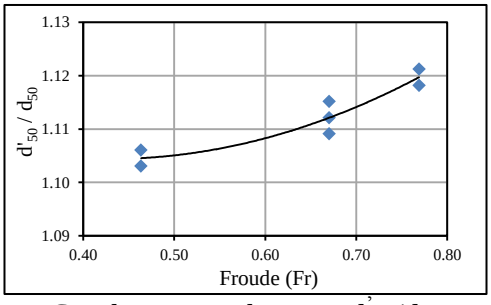


Gambar 11. Rasio gerusan pada pengujian dengan pengaman pilar

G. Analisa Angkutan Sedimen

Analisa gradasi butiran dilakukan untuk mengetahui diameter butiran sedimen yang terangkut oleh aliran pada tiap pengujiannya. Gradasi butiran dari hasil analisa saringan selanjutnya dibandingkan dengan gradasi butiran pada awal pengujian (d_g'/d_g) untuk selanjutnya dihubungkan terhadap

bilangan *Froude* yang terjadi pada tiap pengujiannya, seperti pada gambar berikut :



Gambar 12. Hubungan d'_{50}/d_{50} terhadap bilangan *Froude*

Hasil perbandingan yang dilakukan pada tiap ukuran butiran memberikan *trend* garis regresi yang sama, dimana semakin besar bilangan *Froude* yang digunakan maka semakin besar pula butiran yang terangkut. Hal ini membuktikan bahwa ukuran butiran yang digunakan dalam memperhitungkan kedalaman gerusan lokal memiliki hubungan yang sangat erat, dimana ukuran butiran yang digunakan dalam penelitian akan mempengaruhi dari hasil kedalaman gerusan lokal yang terjadi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang dilakukan terhadap model laboratorium gerusan lokal pada pilar jembatan tipe *cylinder grouped*, diambil beberapa simpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan bilangan *Froude*, jenis aliran termasuk dalam jenis aliran subkritis dengan nilai Fr <1. Berdasarkan bilangan *Reynolds* jenis aliran yang terjadi pada Fr_1 ialah jenis aliran transisi dengan nilai Re = 1658,416, sedangkan pada Fr_2 dan Fr_3 jenis aliran yang terjadi ialah turbulen dimana nilai Re > 2000.
2. Rasio kedalaman gerusan lokal terhadap lebar pilar (d_s/b) paling besar pada pengujian tanpa pengaman ialah sebesar 2,9 yang terjadi pada pengujian Q_3P. Kemampuan tirai pengaman mereduksi kedalaman gerusan yang terjadi pada pengujian dengan menggunakan Fr_1 sebesar 56,25 %, pada pengujian dengan Fr_2 mampu mereduksi sebesar 50,00 % dan pada uji dengan menggunakan Fr_3 mereduksi sebesar 62,07 %.
3. Gerusan 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 formula gerusan *Colorado State University* (CSU) memberikan hasil yang paling mendekati dengan kedalaman gerusan lokal yang terjadi pada model penelitian. Persamaan *Simons* memberikan hasil yang paling mendekati untuk kondisi pengujian menggunakan tirai pengaman pada Fr_1, sedangkan persamaan *Shen* memberikan hasil mendekati kedalaman gerusan yang terjadi pada Fr_2 dan Fr_3.
5. Hasil analisa angkutan sedimen membuktikan bahwa dengan semakin besar bilangan *Froude* yang digunakan maka semakin besar pula butiran yang terangkut.

B. Saran

Seiring dengan terus berkembangnya fenomena gerusan lokal ini maka disarankan melakukan penelitian lanjutan dengan bentuk pilar, sudut aliran, pengaruh adanya tambahan abutmen, jarak pengaman pilar dan variasi bentuk pengaman pilar, sehingga didapat perbandingan kedalaman gerusan dan efisiensi dari penggunaan pilar jembatan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

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

Alabi, P.D. 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.