

# STUDI GERUSAN DAN PERLINDUNGANNYA DI HILIR KOLAM OLAKAN BENDUNG TIPE USBR-I

## *Study Of Scour And Countermeasure In Downstream Of Weir Stilling Basin USBR Type-I*

Jaji Abdurrosyid, Gurawan Jati Wibowo, M. Nursahid  
Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta.  
Jl. A. Yani No. 1, Tromol Pos 1, Pabelan Kartasura, Surakarta 57102.  
e-mail : [jaji\\_abdurrosyid@ums.ac.id](mailto:jaji_abdurrosyid@ums.ac.id) atau [jarrosyid@yahoo.com](mailto:jarrosyid@yahoo.com)

### ABSTRACT

*In the downstream of a weir, especially in stilling basin, there is a phenomenon called hydraulic jump caused by flow change from supercritical flow to sub critical flow. The hydraulic jump in weir stilling basin causes bed scour, particularly in the downstream of weir that is not protected. Therefore, laboratory study of scour and its countermeasure in the downstream of weir is required. This study was conducted at Hydraulic Laboratory of Surakarta River Research Centre using recirculation flume. The recirculation flume dimensions were : length = 24 m; width = 49 cm; and height = 60 cm. The bed material of recirculation flume was fine sand (diameter of sieve = 2 mm) with 20 cm thickness layered along the flume. The slope of flume was 0.004, and it was assumed that there was no sediment load in the upstream of weir. This study used weir model USBR-I. The model was placed about  $\pm 9$  m from the upstream. The experiment was conducted using 8 discharge variation running and 3 protection variation running. The result shows that the maximum scour depends on flow velocity, shear velocity, and flow height in the downstream of stilling basin. In addition, it is also affected by Reynold number and gravitation (as Froude number). These parameters are interdependent significantly. Furthermore, there is significant scour reduction in the downstream of stilling basin which is protected using either  $\frac{1}{4} L_{maks}$  rip-rap,  $\frac{1}{2} L_{maks}$  rip-rap, and  $L_{maks}$  rip-rap. In addition, protection using  $L_{maks}$  length rip-rap can protect scour with smallest scour depth. However, scour is still happened in the downstream of stilling basin although there is protection along  $L_{maks}$ .*

*Keywords : hydraulic jump, scour depth, scour protection, rip-rap.*

### PENDAHULUAN

Peninggian muka air karena adanya pembendungan mengakibatkan adanya perbedaan tinggi energi (*head*) antara hulu dengan hilir bendung, apabila air dari hulu melintas bendung akan mempunyai energi yang besar sehingga kecepatan aliran yang melintas akan menjadi semakin besar. Oleh karena itu aliran yang mengalir pada permukaan bendung yang miring dalam keadaan superkritis sedangkan kondisi aliran di bagian hilir yang landai adalah subkritis. Perubahan aliran dari superkritis ke subkritis menyebabkan terjadinya loncatan hidraulik (Raju, 1986). Akibat loncatan hidraulik ini sering menimbulkan gulungan ombak atau pusaran (*vortex*) yang bisa menyebabkan gerusan pada dasar saluran, terutama bagian hilir yang tidak diberi perlindungan.

Dengan peristiwa loncatan air di hilir bendung, dapat mengurangi energi aliran. Dengan adanya loncatan air maka diperlukan kolam olakan yang dapat melindungi dasar sungai. Beberapa model

kolam olakan telah diperkenalkan oleh *United States Bureau Of Reclamation* (USBR) yang telah teruji konstruksinya, sehingga memudahkan dalam penelitian. Tipe USBR ini terdiri dari tipe USBR-I dengan angka Froude  $< 2,5$ , USBR-II dengan angka Froude  $> 3$ , USBR-III dengan angka Froude  $> 4,5$ , dan USBR-IV dengan angka Froude antara 2,5-4,5 (Mays, 1999). Walaupun menggunakan kolam olakan tipe USBR yang dapat meredam energi, akan tetapi kenyataannya masih terjadi gerusan pada dasar saluran di sebelah hilir kolam olakan (Abdurrosyid, 2005), hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan tersebut. Oleh karena itu perlu adanya kajian laboratorium mengenai gerusan dan penanggulangannya/perlindungannya di sebelah hilir kolam olakan. Penelitian ini akan mengkaji tentang gerusan di sebelah hilir kolam olakan bendung tipe USBR dan penanggulangannya dengan menggunakan matras/bronjong batu (*riprap*) yang diikat dengan anyaman kawat. Penggunaan bronjong ini merupakan yang paling murah dan praktis bila diterapkan di lapangan, sehingga dijadikan model

proteksi dalam penelitian ini. Secara rinci, tujuan khusus penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar ukuran panjang yang optimal dari bangunan proteksi yang dipasang di hilir kolam olakan, untuk mengetahui pola gerusan yang terjadi di hilir kolam olakan tanpa proteksi dan dengan proteksi, dan untuk menentukan fungsi variabel yang berpengaruh terhadap gerusan lokal di hilir kolam olakan tipe USBR-I.

Ada beberapa penelitian serupa yang pernah dilaksanakan tentang fenomena gerusan di bagian hilir kolam olakan bendung, akan tetapi sampai saat ini studi tentang proteksi gerusan di hilir kolam olakan bendung masih belum banyak diteliti. Seperti halnya beberapa ilmuwan yang pernah meneliti tentang proses gerusan di hilir bendung disebutkan dalam Breusers dan Raudkivi (1991) antara lain : Schoklitsch (1932), Eggenberger (1944), Muller (1944), Ghetti dan Zanollo (1954), Li (1955), Hartung (1957), Shalash (1959), Breusers (1966), Raudkivi (1967), Kotoulas (1967), Dietz (1969), Catakli et al (1973). Sedangkan dalam Hoffmans dan Verheij (1997), disebutkan antara lain : Mosonyi dan Schoppmann (1968), Van der Meulen dan Vinje (1975), Popova (1981), Buchko (1986), Blazejemski (1991). Semua penelitian tersebut belum mengkaji tentang proteksi gerusan di hilir kolam olakan (*stilling basin*), penelitian tersebut hanya sebatas mengamati kedalaman gerusan di hilir bendung, bentuk geometri lubang gerusan, pengaruh kolam olakan terhadap reduksi gerusan. USBR (1955, dalam Chow 1995) meneliti tentang pengaruh kolam olakan (*stilling basin*) terhadap peredaman energi yang bisa mereduksi gerusan, Novak (1955, dalam Breusers dan Raudkivi, 1991) melaporkan hasil pengamatannya tentang penggunaan kolam olakan yang panjangnya mencukupi loncatan hidraulik dapat mereduksi gerusan sebesar 45% sampai 65% bila dibandingkan tanpa menggunakan kolam olakan. Kumar dkk (1982) meneliti gerusan di hilir bendung. Farhoudi dan Smith (1982) meneliti tentang skala waktu (*time scale*) gerusan di hilir loncatan hidraulik. Farhoudi dan Smith (1985) meneliti tentang profil gerusan lokal (*local scour*) di hilir loncatan hidraulik. Mohammed dan McCorquodale (1992) meneliti tentang gerusan di hilir apron dari pintu air. Hoffmans dan Pilarczyk (1995) meneliti tentang gerusan lokal di hilir bangunan hidraulik yang diberi apron atau lapisan lindung pada daerah loncatan hidraulik. Peterka (1964, dalam Mays 1999) meneliti tentang ukuran batu dalam *riprap* kasar buatan yang berbentuk kutil (*wart*). Abdurrosyid (2005) meneliti tentang gerusan di hilir kolam olakan tipe USBR-III tanpa meneliti tentang proteksi gerusannya. Pada penelitian ini yang dikaji adalah proteksi gerusan di hilir kolam olakan bendung tipe USBR-I yaitu

dengan memasang *riprap* atau matras bronjong batu yang dianyam dengan kawat di bagian hilir kolam olakan.

## LANDASAN TEORI

Menurut Neill (1973), pengertian gerusan (*scour*) adalah penurunan dasar sungai karena erosi di bawah elevasi permukaan alami atau datum yang diasumsikan. Menurut Legono (1990), gerusan adalah proses semakin dalamnya dasar sungai karena interaksi antara aliran dengan material dasar sungai.

Menurut Raudkivi dan Ettema (1983), gerusan dibedakan atas tiga tipe, yaitu :

1. Gerusan umum (*general scour*), gerusan ini terjadi tidak berkaitan sama sekali dengan ada atau tidaknya bangunan hidraulik. Gerusan ini disebabkan oleh energi dari aliran air.
2. Gerusan terlokalisir (*localized scour / constriction scour*) di alur sungai, terjadi karena penyempitan alur sungai, sehingga aliran menjadi lebih terpusat.
3. Gerusan lokal (*local scour*) di sekitar bangunan, terjadi karena pola aliran lokal di sekitar bangunan sungai.

Gerusan lokal dan gerusan terlokalisir dapat terjadi dalam dua kondisi, yaitu kondisi gerusan dengan air jernih (*clear-water scour*) dan kondisi gerusan dengan air tidak jernih (*live-bed scour*). *Clear-water scour* terjadi jika material dasar di hulu bangunan dalam keadaan diam (tidak ada gerakan material dasar), atau secara teoritik bahwa tegangan geser dasar ( $\tau_0$ ) lebih kecil atau sama dengan tegangan geser dasar kritik ( $\tau_c$ ). *Live-bed scour* terjadi disertai dengan adanya angkutan sedimen dari material dasar, terjadi ketika kondisi aliran dalam saluran menyebabkan material dasar bergerak. Hal tersebut menunjukkan bahwa tegangan geser pada dasar saluran lebih besar dari tegangan dasar kritiknya. Kesetimbangan kedalaman gerusan tercapai jika jumlah material yang bergerak dari lubang gerusan sama dengan material yang disuplai ke lubang gerusan (Raudkivi dan Ettema, 1983).

Menurut Breusers dan Raudkivi (1991), gerusan lokal (*local scour*) pada struktur hidraulik harus ditambah dengan gerusan umum (*general scour*) dan gerusan terlokalisir (*localized scour/constriction scour*) untuk mendapatkan kedalaman gerusan maksimum yang akan digunakan dalam perencanaan. Pada analisis ini harus dibedakan antara *clear-water scour* dan *live-bed scour*, karena pada perkembangan selanjutnya hubungan antara kedalaman gerusan dengan waktu dan kecepatan sangat bergantung pada kondisi tersebut.

Chow (1985), mengklasifikasikan aliran berdasarkan pengaruh kekentalan dan gravitasi dibandingkan dengan gaya inertiannya. Karena pengaruh kekentalan kinetik aliran bersifat laminar dan turbulen. Pengaruh kinetik tersebut dinyatakan dalam bilangan *Reynold*. Pengaruh gravitasi menyebabkan aliran bersifat subkritik, kritik dan superkritik. Pengaruh gravitasi ini dinyatakan dalam bilangan *Froude*.

Simon dan Senturk (1992), mengemukakan bahwa persamaan-persamaan untuk memprediksi kedalaman gerusan (*scour depth*) hampir semuanya berdasarkan data laboratorium ataupun pemikiran induktif dari persamaan-persamaan kontinuitas sedimen. Persamaan-persamaan untuk mengestimasi gerusan diturunkan melalui tiga metode, yaitu :

1. Tipe persamaan yang dibentuk dari analisa dimensi beberapa variabel dan kajian hubungan antara parameter tak berdimensi, seperti perbandingan kedalaman gerusan terhadap kedalaman aliran, bilangan *Froude* dan lain-lain.
2. Tipe persamaan yang dibentuk dari penggunaan hubungan angkutan sedimen dan perubahan-perubahan dalam angkutan karena percepatan aliran.
3. Tipe persamaan yang dibentuk dengan analisa regresi dari data yang ada.

Breusers dan Raudkivi (1991), mengemukakan hasil observasinya bahwa untuk aliran dangkal, kedalaman gerusan berkembang dan sangat tergantung dengan kedalaman aliran, tetapi untuk kedalaman aliran besar, kedalaman gerusan hampir tidak tergantung kepada kedalaman aliran. Pengaruh kedalaman aliran diasumsikan tergantung kepada nilai perbandingan  $U^*/U_*c$  dan  $Y/b$ . Pengaruh  $Y/b$  tidak dibedakan antara *clear-water scour* dan *live-bed scour*. Untuk  $U^*/U_*c$  bernilai konstan, pengaruh kedalaman aliran dapat diabaikan jika  $Y/b > 2$ . Kedalaman gerusan tergantung dari beberapa variabel, yaitu karakteristik fluida, material dasar, aliran dalam saluran dan bentuk pilar atau abutmen jembatan yang dapat ditulis:

$$Y_s = f(\rho, \nu, g, d, \rho_s, Y, U, \dots) \quad (1)$$

dengan  $Y_s$  = kedalaman gerusan  $\rho$  = rapat massa fluida,  $\nu$  = kekentalan kinematik fluida,  $g$  = percepatan gravitasi,  $d$  = diameter butiran sediment,  $\rho_s$  = rapat massa sedimen,  $Y$  = kedalaman aliran,  $U$  = kecepatan aliran rata-rata,  $L_b$  = lebar abutmen,  $U^*$  = kecepatan geser,  $U_*c$  = kecepatan geser kritis,

dan  $b$  = lebar saluran. Jika persamaan tersebut dibuat tidak berdimensi, maka persamaan menjadi :

$$\frac{Y_s}{L_b} = f \left( \frac{UL_b}{g L_b^3}, \frac{U^2}{g L_b}, \frac{Y}{L_b}, \frac{d}{L_b} \right) \quad (2)$$

dengan  $\Delta$  = rapat massa relatif dari butiran terendam,  $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho}$ , dengan  $Y_s$  = kedalaman

gerusan. Jadi kedalaman gerusan relatif adalah merupakan fungsi *Reynold* dan *Froud* abutment.

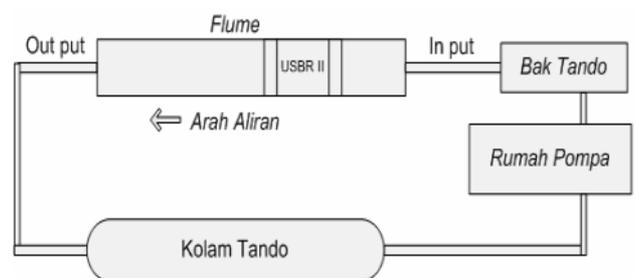
Jiid (1989, dalam Simon dan Senturk, 1992), mengemukakan bahwa *riprap* adalah melengkapi lantai *apron* secara menerus di bagian hilir yang berfungsi untuk melindungi gerusan pada dasar saluran, karena terbukti bahwa gerusan disebabkan oleh perpindahan endapan sedimen atau akibat pusaran aliran sebagai kompensasi dari peredaman energi. Beberapa kondisi yang memerlukan *riprap* antara lain yaitu pengaruh peredaman energi dan pencegahan gerusan lokal, terjadi kelukan (*curvature*) karena adaptasi terhadap penurunan (*settlement*), sebagai tahanan pelindung kemampuan sedimen melintas saluran dan menggerus.

Mays (1999), mengemukakan bahwa batu *riprap* yang diletakkan di dasar dan tebing pada bagian hilir kolam olakan digunakan untuk melindungi erosi yang disebabkan oleh ombak dan sisa energi yang direduksi oleh kolam olakan.

## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Laboratorium Hidraulika Balai Sungai PUSLITBANG Sumber Daya Air Surakarta, dengan menggunakan *sediment-recirculating flume* yang berukuran lebar 0,48 m dan panjang saluran 20 m, dengan posisi model bendung USBR diletakkan pada jarak as sejauh  $\pm 9$  m dari hulu (tando) seperti yang nampak pada Gambar 1.

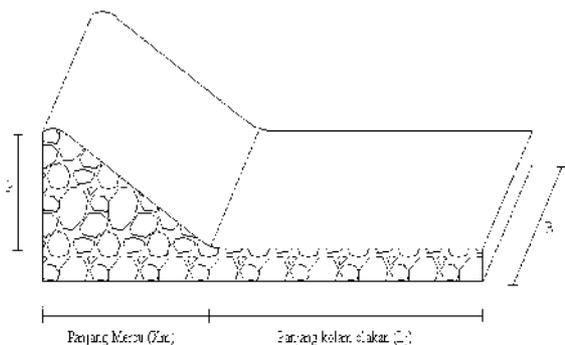
Model bendung dengan mercu tipe bulat dan kolam olakan tipe USBR-I dengan dimensi sesuai dengan Gambar 2. Sedangkan model proteksi berupa *rip-rap* dengan anyaman kawat seperti Gambar 3.



Gambar 1. *Recirculating flume*

Model USBR-I :

$$L_j = 71,52 \text{ cm} \quad P = 20,0 \text{ cm} \quad X_m = 27,65 \text{ cm} \quad B = 48,0 \text{ cm}$$



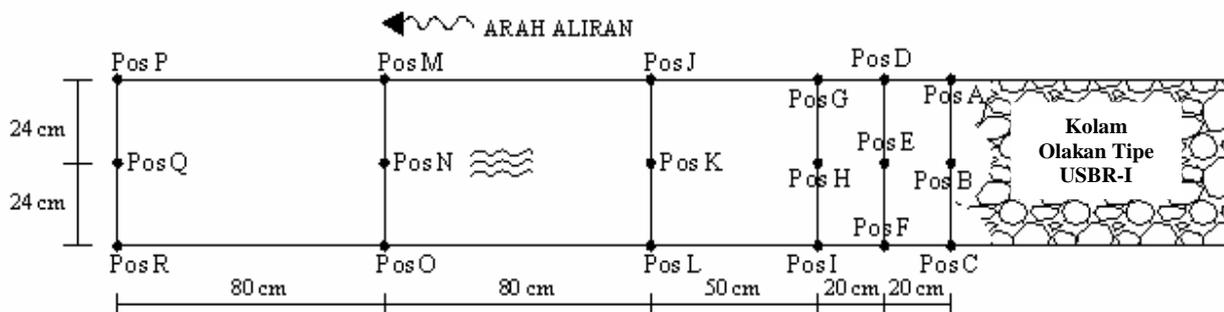
Gambar 2. Bendung dan kolam olakan tipe USBR-I



Gambar 3. Rip-rap anyaman kawat

Penelitian ini dilakukan sebanyak 17 *running* dengan dua tahap pengukuran, tahap pertama 8 *running* dan tahap kedua 9 *running*, yaitu **tahap pertama** adalah *Running* untuk mengetahui variabel-variabel yang berpengaruh terhadap kedalaman gerusan (seperti kecepatan aliran, kecepatan gesek, kedalaman aliran, kedalaman gerusan, angka Froude dan angka Reynold), ini dilakukan tanpa menggunakan proteksi gerusan sebanyak 8 variasi debit seperti yang terlihat pada Tabel-1, **tahap kedua** adalah *Running* pengendalian/proteksi terhadap gerusan dengan debit konstan dipakai debit terbesar (28,8 lt/dt) dengan variasi penelitian meliputi: pengukuran kedalaman gerusan dan panjang gerusan terhadap bronjong / *riprap* dari susunan batu yang dianyam dengan kawat dibagian hilir sejauh  $\frac{1}{4} L_{maks}$ ,  $\frac{1}{2} L_{maks}$ , dan  $L_{maks}$ . Kesemuanya untuk masing-masing variasi *riprap* dilakukan *running* 3 kali dengan debit konstan 28,8 l/dt, hasil *running* dirata-rata untuk mendapatkan kedalaman gerusan dan panjang gerusan rata-rata.

Adapun pengukuran kedalaman gerusan dilakukan pada 18 posisi pengamatan seperti yang nampak pada Gambar 4.



Gambar 4. Titik-Titik Pengamatan Gerusan Pada Flume

Tabel 1. Hasil pengukuran dan analisis Laboratorium

Q (l/dt)	Y3' (m)	Yme (m)	U3 (m/dt)	Fr3	Re	Lme (m)
10,9	0,088	0,048	0,258	0,278	2834	1,015
11,5	0,091	0,050	0,264	0,280	2976	0,91
15,7	0,104	0,076	0,285	0,282	3856	1,16
20,6	0,130	0,100	0,337	0,298	5355	1,16
24,2	0,134	0,127	0,366	0,319	6123	1,52
26,7	0,127	0,140	0,378	0,339	5993	1,57
27,5	0,148	0,147	0,400	0,332	7390	1,61
28,8	0,150	0,161	0,400	0,329	7865	1,90

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kajian Gerusan di Hilir Kolam Olakan Tanpa Proteksi Untuk Tipe USBR-I

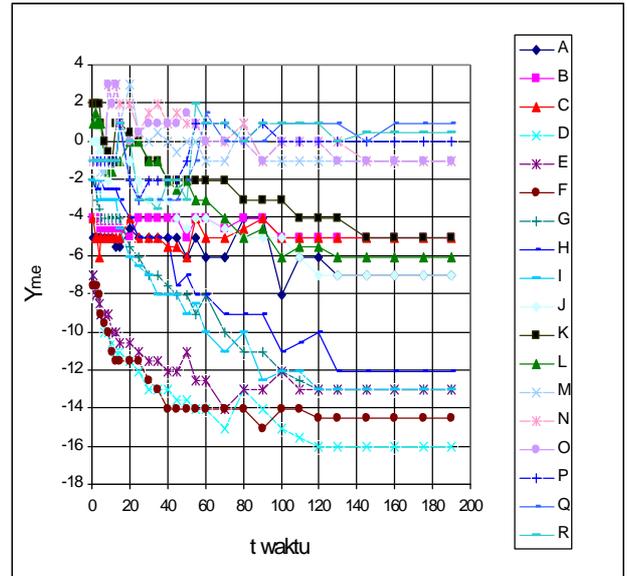
Penelitian ini dilakukan tanpa menggunakan proteksi di hilir bendung pada kondisi aliran terjadi angkutan sedimen/*live-bed scour* (LBS). Pengamatan kedalaman gerusan seimbang (*equilibrium scour depth*) dilakukan 240 menit, akan tetapi saat mencapai waktu 190 menit sudah terjadi keseimbangan. Hubungan antara kedalaman gerusan dan waktu yang terjadi selama pengamatan menunjukkan hubungan fungsi non-linier, hal ini dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil penelitian yang dilakukan untuk *running* 8 debit dapat dilihat pada Tabel-1. Pada tabel tersebut terlihat bahwa angka Froude yang terjadi di hilir aliran lebih kecil dari 1, hal ini menunjukkan bahwa aliran dalam kondisi sub-kritis, sedangkan angka Reynold pada seluruh *running* menunjukkan angka di atas 2000, hal ini menandakan bahwa aliran dalam kondisi turbulen dan *live-bed*.

Pada gambar 5 tersebut terlihat adanya kecenderungan dari posisi titik A di hilir dekat kolam olakan hingga posisi titik R di hilir jauh dari kolam olakan menunjukkan kedalaman gerusan semakin dangkal ke arah hilir jauh kolam olakan, dan pada akhirnya terjadi pengendapan sedimen setelah posisi titik R. Grafik tersebut menunjukkan kedalaman maksimum gerusan paling maksimum (terdalam) yaitu kedalaman gerusan yang terjadi pada posisi titik D.

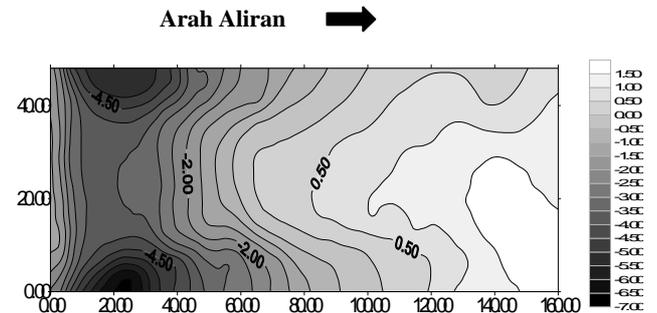
Menurut pengamatan selama berlangsungnya proses gerusan di hilir kolam olakan, gerusan terjadi dimulai pada hilir dekat kolam olakan kemudian berkembang terus sepanjang aliran hingga mencapai panjang tertentu. Gerusan terus berlangsung hingga membentuk lubang gerusan (*scour hole*) yang dalamnya cenderung mengalami pendangkalan ke arah hilir jauh kolam olakan. Sedang di bagian hilir lubang gerusan terjadi pengendapan sedimen (*deposition*).

Menurut pengamatan selama berlangsungnya proses gerusan di hilir kolam olakan, gerusan terjadi dimulai pada hilir dekat kolam olakan kemudian berkembang terus sepanjang aliran hingga mencapai panjang tertentu. Gerusan terus berlangsung hingga membentuk lubang gerusan (*scour hole*) yang dalamnya cenderung mengalami pendangkalan ke arah hilir jauh kolam olakan. Sedang di bagian hilir lubang gerusan terjadi pengendapan sedimen (*deposition*). Pengendapan ini berkembang terus hingga akhirnya tererosi kembali ke bagian hilir, akhirnya terkumpul serta endapan bertambah di bagian hilir dan semakin panjang seiring dengan

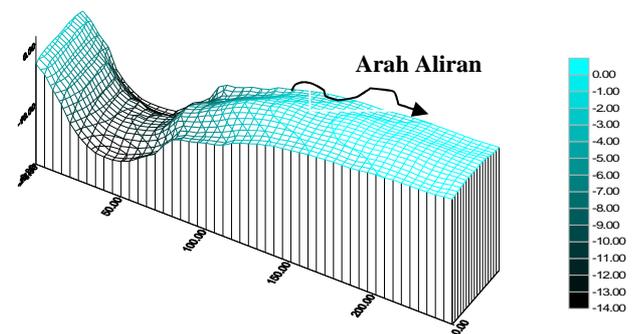
bertambahnya waktu. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 5. Grafik kedalaman gerusan terhadap waktu pada posisi 18 titik pengamatan dalam kondisi *live-bed scour* untuk  $Q = 28,8$  lt/dt, tipe USBR-I

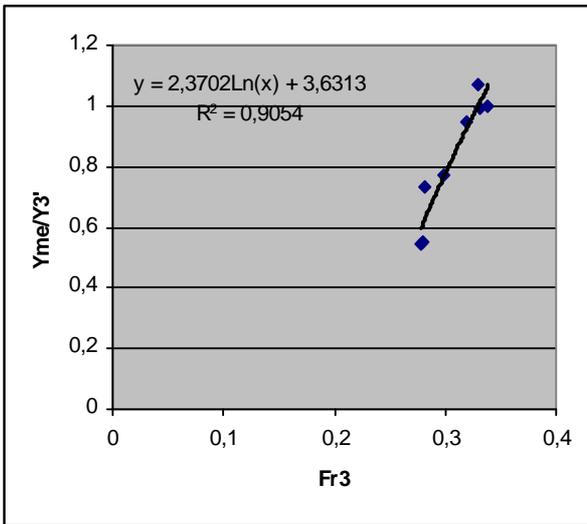


Gambar 6. Kontur permukaan gerusan di hilir kolam olakan tanpa proteksi dalam kondisi *live-bed scour*,  $Q = 28,8$  lt/dt, tipe USBR-I



Gambar 7. Gambar tiga dimensi kontur permukaan gerusan di hilir kolam olakan tanpa proteksi dalam kondisi *live-bed scour* untuk  $Q = 28,8$  lt/dt, tipe USBR-I

Hubungan antara perbandingan kedalaman gerusan maksimum dan kedalaman aliran dengan angka *Froude* ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik hubungan antara kedalaman gerusan maksimum dan kedalaman aliran dengan angka *Froude* ( $F_r$ ) tipe USBR-I

Hubungan pada Gambar 8 di atas dapat dinyatakan dalam persamaan *Logaritma* yaitu :

$$\frac{Y_{me}}{Y_3'} = 2,3702 \ln F_r + 3,6313 \quad (1)$$

dengan  $F_r = \left( \frac{U_3'}{\sqrt{g \cdot Y_3'}} \right)$ , dengan  $U_3'$  = kecepatan

aliran di hilir kolam olak setelah terjadi gerusan,  $Y_3'$  = kedalaman aliran di hilir kolam olak setelah terjadi gerusan.  $Y_3$  = kedalaman aliran di hilir kolam olak,  $Y_{me}$  = kedalaman gerusan maksimum keseimbangan,  $g$  = percepatan gravitasi.

Dengan angka korelasi  $R = 0,9515$  sehingga terdapat hubungan yang *relatif* sangat kuat antara angka *Froude* dengan kedalaman gerusan maksimum keseimbangan.

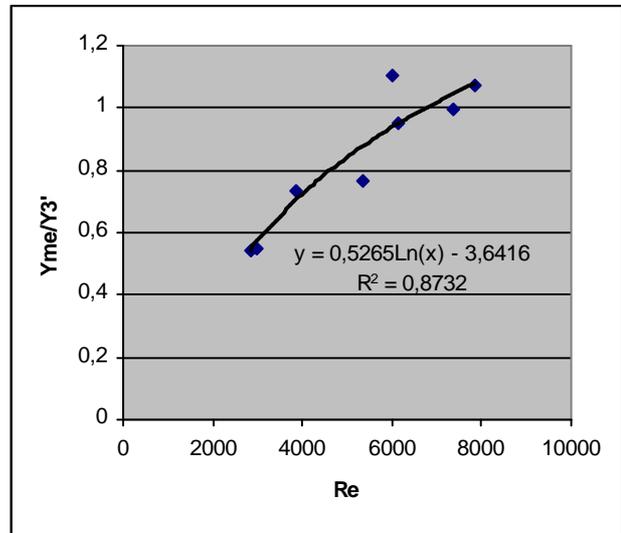
Hubungan antara perbandingan kedalaman gerusan maksimum dan kedalaman aliran dengan angka *Reynold* ditunjukkan pada Gambar 9.

Pada grafik Gambar 9 dapat dinyatakan dalam persamaan *Logaritma* yaitu :

$$\frac{Y_{me}}{Y_3'} = 0,4024 \ln Re - 3,314 \quad (2)$$

dengan  $Re = \left( \frac{U_3' \cdot R}{\nu} \right)$ , dengan  $R$  = jari-jari hidraulik,

$\nu$  = kekentalan kinematik aliran.  $U_3'$  = kecepatan aliran di hilir kolam olak setelah terjadi.



Gambar 9. Grafik hubungan antara kedalaman gerusan maksimum dan kedalaman aliran dengan angka *Reynold* ( $Re$ ) tipe USBR-I

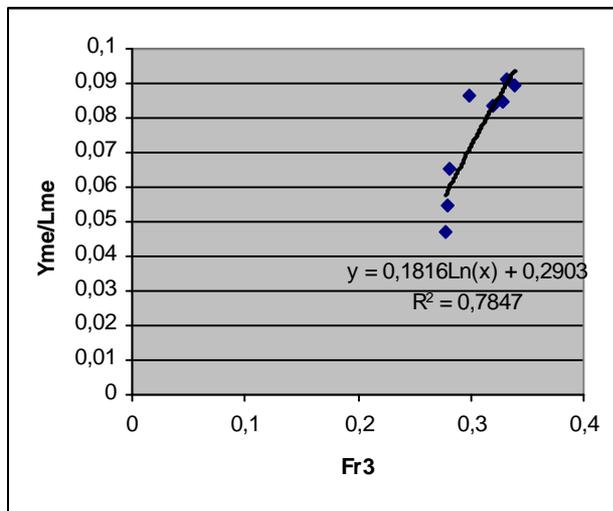
Dari hasil penelitian dapat dicermati bahwa semakin besar angka *Reynold*, perbandingan kedalaman gerusan maksimum keseimbangan terhadap kedalaman aliran semakin besar.

Dengan angka korelasi  $R = 0,9344$  sehingga terdapat hubungan yang relatif kuat antara angka *Reynold* dengan kedalaman gerusan maksimum keseimbangan. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar angka *Reynold* akan semakin besar perbandingan antara kedalaman gerusan maksimum keseimbangan dengan kedalaman aliran, sehingga akan semakin besar pula kedalaman gerusannya.

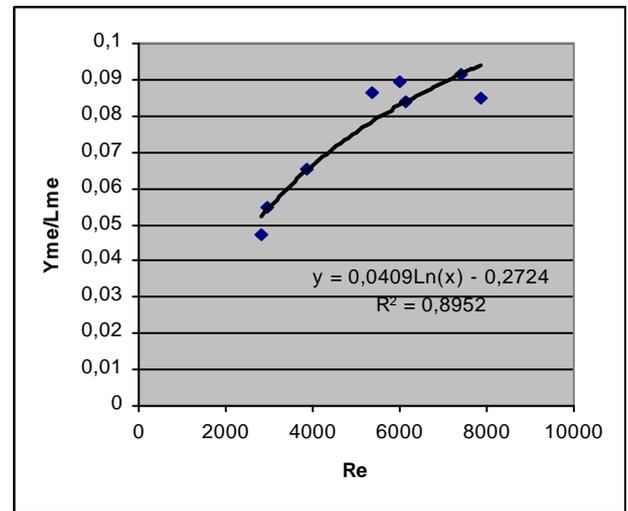
Hubungan antara perbandingan kedalaman gerusan maksimum dan panjang gerusan maksimum dengan angka *Froude* ditunjukkan pada Gambar 10. hubungan antara parameter tersebut dapat dinyatakan dalam persamaan *logaritma* yaitu :

$$\frac{Y_{me}}{L_{me}} = 0,1816 \ln F_r + 0,2903 \quad (3)$$

Dengan angka korelasi  $R = 0,8858$  sehingga terdapat hubungan yang relatif sangat erat antara angka *Froude* dengan kedalaman gerusan maksimum keseimbangan dan panjang gerusan maksimum. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar angka *Froude* akan semakin besar perbandingan antara kedalaman gerusan maksimum keseimbangan dengan kedalaman aliran, sehingga kedalaman gerusan akan semakin besar.



Gambar 10. Grafik hubungan antara kedalaman gerusan maksimum dan panjang gerusan maksimum dengan angka Reynold ( $Re$ ) tipe USBR-I



Gambar 11. Grafik hubungan antara kedalaman gerusan maksimum dan panjang gerusan maksimum dengan angka Reynold ( $Re$ ) tipe USBR-I

Hubungan antara perbandingan kedalaman gerusan maksimum dan panjang gerusan maksimum dengan angka Reynold ditunjukkan pada Gambar 11. hubungan antara parameter tersebut dapat dinyatakan dalam persamaan *logaritma* yaitu :

$$\frac{Y_{me}}{L_{me}} = 0,0409 \ln R_e - 0,2724 \quad (4)$$

Dengan angka korelasi  $R = 0,9321$  sehingga terdapat hubungan yang relatif sangat erat antara angka Reynold dengan kedalaman gerusan maksimum keseimbangan dan panjang gerusan maksimum. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar angka Reynold akan semakin besar perbandingan antara kedalaman gerusan maksimum keseimbangan dengan kedalaman aliran, sehingga kedalaman gerusan akan semakin besar.

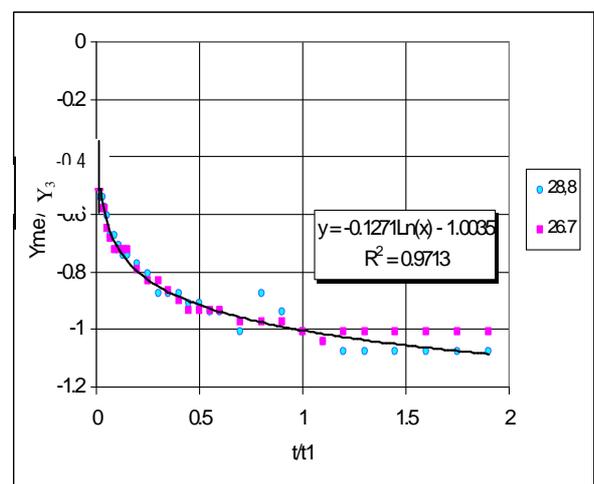
Hubungan antara kedalaman gerusan maksimum berbanding kedalaman air hilir dengan waktu gerus ( $t$ ) berbanding waktu karakteristik ( $t_1$ ) dapat dilihat pada Gambar 12, yang dimaksud dengan waktu gerus adalah lamanya proses penggerusan sampai mencapai keseimbangan, sedangkan waktu karakteristik adalah waktu yang dicapai pada saat kedalaman gerusan sama dengan kedalaman aliran hilir.

Berdasarkan data hasil percobaan hanya data percobaan *running* debit 28,8 lt/dt, 27,5 l/dt dan 26,7 lt /dt yang mencapai waktu karakteristik yaitu kondisi pada saat  $Y_{m.e} = Y_3$ .

Hubungan antara parameter  $\frac{Y_{me}}{L_{me}}$  dengan  $\frac{t}{t_1}$  diperoleh angka korelasi 0,9856. Hal ini menunjukkan tingkat hubungan antara kedua parameter tersebut erat. Sedangkan nilai korelasi mempunyai nilai positif menunjukkan hubungan tersebut searah, Hubungan tersebut dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut, yaitu :

$$\left( \frac{Y_{m.e}}{Y_3} \right) = -0,1271 \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) - 1,0035 \quad (5)$$

Sehingga dapat dikatakan kedalaman gerusan maksimum (*maximum of scour depth*) di hilir kolam olak sangat dipengaruhi oleh waktu karakteristik dan kedalaman aliran di hilir kolam olak.



Gambar 12. Grafik hubungan antara  $\frac{Y_{m.e}}{Y_3}$  dengan  $\frac{t}{t_1}$

Pada kajian lubang gerusan (*scour hole*), Gerusan terjadi dimulai pada hilir bendung dekat kolam olakan kemudian berkembang terus sepanjang aliran hingga mencapai panjang tertentu. Gerusan terus berlangsung hingga membentuk lubang gerusan (*scour hole*) yang dalamnya cenderung mengalami pendangkalan ke arah hilir jauh kolam olakan. Sedang di bagian hilir lubang gerusan terjadi pengendapan sedimen (*deposition*). Pengendapan ini berkembang terus hingga akhirnya tererosi kembali ke bagian hilir, akhirnya terkumpul serta endapan bertambah di bagian hilir dan semakin panjang seiring dengan bertambahnya waktu. Lubang gerusan tersebut dapat dilihat sebagaimana pada Gambar 6 dan Gambar 7 di atas.

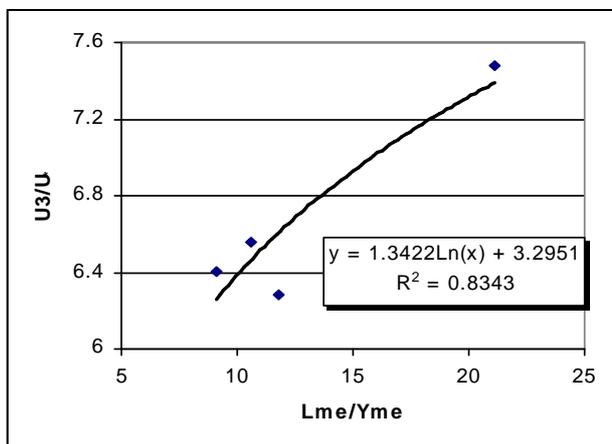
Panjang gerusan yang terjadi pada hilir bendung erat kaitannya dengan kecepatan aliran yang terjadi pada saluran tersebut seperti yang terlihat pada Gambar 13.

Pada gambar tersebut menjelaskan adanya pengaruh kecepatan aliran dengan panjang lubang gerusan sebagaimana dinyatakan dalam persamaan logaritmik berikut ini,

$$\frac{U_3'}{U_*} = 1,3422 \ln\left(\frac{L_{me}}{Y_{me}}\right) + 3,2951 \quad (6)$$

Logika dihubungkannya kecepatan aliran dengan besarnya panjang gerusan adalah karena apabila kecepatan aliran besar maka kecepatan geser akan semakin besar hal ini menyebabkan semakin panjang gerusan yang terjadi.

Persamaan tersebut mempunyai angka korelasi  $R = 0.9134$  sehingga terdapat hubungan yang erat antara kecepatan aliran dengan besarnya panjang gerusan dan dalamnya gerusan yang terjadi di hilir bendung.



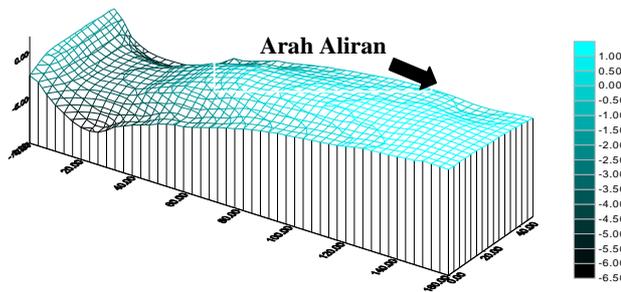
Gambar 13. Grafik hubungan antara  $U_3/U_*$  dengan  $L_{me}/Y_{me}$

## Kajian Gerusan di Hilir Kolam Olakan dengan Proteksi Untuk Tipe USBR-I

### a. Proteksi *Rip-rap* seperempat panjang gerusan maksimum ( $1/4 L_{maks}$ )

Panjang gerusan maksimum ( $L_{maks}$ ) tanpa proteksi untuk debit 28,8 lt/dt adalah 190 cm dan kedalaman gerusannya maksimum 16,1 cm. Untuk penelitian proteksi gerusan pertama menggunakan seperempat dari panjang gerusan maksimum ( $1/4 L_{maks}$ ), dilakukan *running* sebanyak tiga kali dengan debit yang sama yaitu 28.8 lt/dt dan pengamatan selama 120 menit karena telah terlihat perubahan kedalaman gerusan kecil dan mendekati kestabilan.

Hasil akhir *running* menunjukkan terlihat adanya gerusan disekitar hilir *rip-rap* yaitu dengan kedalaman gerusan rata-rata sebesar 8,1 cm dan panjang gerusan rata-rata sebesar 160,5 cm. Bentuk gerusan bisa dilihat dalam gambar tiga dimensi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14. Dari penelitian proteksi *rip-rap* seperempat panjang gerusan maksimum terlihat adanya gerusan yang masih besar dihilir proteksi.



Gambar 14. Kontur tiga dimensi Permukaan Gerusan di Hilir Proteksi *rip-rap* seperempat panjang gerusan maksimum Pada Kondisi *Live-Bed Scour* untuk  $Q = 28,8$  lt/dt , tipe USBR-I

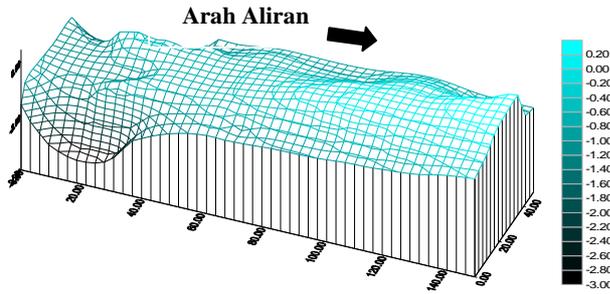
### b. Proteksi *Rip-rap* setengah panjang gerusan maksimum

Pada penelitian ini menggunakan proteksi  $1/2 L_{maks}$  dari debit 28,8 lt/dt, dilakukan *running* sebanyak tiga kali dengan debit yang sama yaitu 28.8 lt/dt dan pengamatan selama 120 menit karena telah terlihat mendekati kestabilan.

Hasil akhir *running* menunjukkan terlihat masih adanya gerusan disekitar hilir *rip-rap* yaitu dengan kedalaman gerusan rata-rata sebesar 3,1 cm dan panjang gerusan rata-rata sebesar 140,2 cm. Bentuk gerusan bisa dilihat dalam gambar tiga dimensi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15.

Dari penelitian terlihat masih terjadi adanya gerusan kecil dihilir proteksi, dengan demikian perlu

dilakukan proteksi maksimal dari panjang gerusan maksimum.

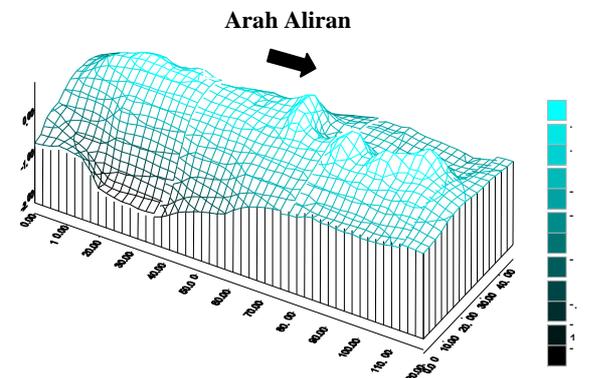


Gambar 15. Kontur tiga dimensi Permukaan Gerusan di Hilir Proteksi *rip-rap* setengah panjang gerusan maksimum Pada Kondisi *Live-Bed Scour* untuk  $Q = 28,8$  lt/dt, tipe USBR-I

### c. Proteksi *Rip-rap* sepanjang gerusan maksimum

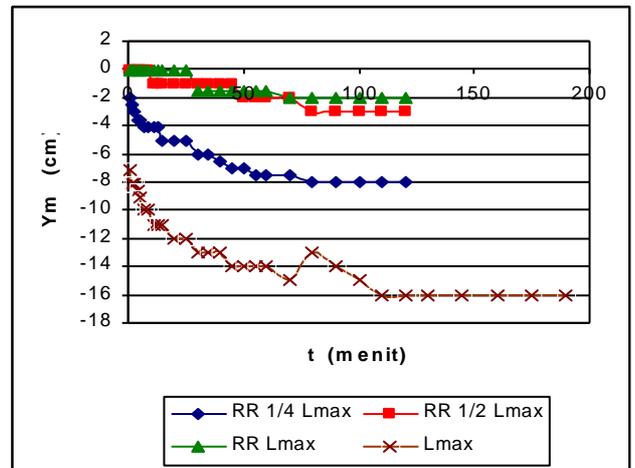
Pada penelitian ini menggunakan proteksi *rip-rap* sepanjang gerusan maksimum ( $L_{maks}$ ) dari debit  $28,8$  lt/dt, dilakukan *running* sebanyak tiga kali dengan debit yang sama yaitu  $28,8$  lt/dt dan pengamatan selama 120 menit karena telah terlihat perubahan kedalaman gerusan kecil dan mendekati kestabilan.

Hasil akhir *running* menunjukkan terlihat masih adanya gerusan disekitar hilir *rip-rap* yaitu dengan kedalaman gerusan rata-rata sebesar  $2,1$  cm dan panjang gerusan sebesar  $100,1$  cm, bentuk gerusan bisa dilihat dalam gambar kontur tiga dimensi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Kontur tiga dimensi Permukaan Gerusan di Hilir Proteksi *rip-rap* panjang gerusan maksimum Pada Kondisi *Live-Bed Scour* untuk  $Q = 28,8$  lt/dt, tipe USBR-I

Perbandingan antara kedalaman gerusan maksimum keseimbangan proteksi *rip-rap* dengan sebelum ada proteksi dengan waktu dapat dilihat pada grafik Gambar 17.



Gambar 17. Grafik Kedalaman Gerusan Maksimum Sebelum ada proteksi dan dengan proteksi dalam kondisi *live-bed scour* untuk  $Q = 28,8$  lt/dt, tipe USBR-I

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa kedalaman gerusan maksimum tanpa proteksi terjadi laju gerusan yang sangat besar dengan waktu untuk mencapai keseimbangan lebih lama dibandingkan dengan menggunakan proteksi *rip-rap* maupun batu lepas. Adapun nilai reduksi gerusannya dapat dilihat pada Tabel -2 berikut.

Tabel 2. Nilai reduksi gerusan tipe USBR-I

Notasi	Non Proteksi	RR $\frac{1}{4}$ Lm	RR $\frac{1}{2}$ Lm	RR Lm
Ym	16,1 cm	8,1 cm	3,1 cm	2,1 cm
Lm	190,0 cm	160,5 cm	140,2 cm	100,1 cm
Reduksi Ym		49,69 %	80,75 %	86,96 %
Reduksi Lm		15,53 %	26,21 %	47,32 %

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Aliran *live-bed* terjadi pada kondisi kecepatan aliran ( $U_0$ ) lebih besar dari kecepatan kritisnya ( $U_c$ ), hal ini ditandai dengan adanya pergerakan butiran sedimen sehingga aliran tampak keruh. Sedangkan kedalaman aliran di atas  $h_c$  adalah aliran *clear-water* yang berupa aliran air jernih dan belum ada pergerakan sedimen.
2. Dari kajian kedalaman gerusan di hilir kolam olakan tanpa proteksi untuk tipe USBR-I, terdapat hubungan antara lain :
  - a). Hubungan yang erat antara kedalaman gerusan maksimum dan kedalaman aliran di hilir kolam olakan dengan angka *Froude*, dimana semakin kecil angka *Froude*,

- kedalaman gerusan maksimum berbanding kedalaman aliran semakin besar.
- b). Hubungan yang erat antara kedalaman gerusan maksimum dan kedalaman aliran di hilir kolam olakan dengan angka *Reynold*, dimana semakin besar angka *Reynold*, kedalaman gerusan maksimum berbanding panjang gerusan maksimum semakin besar.
  - c). Hubungan yang erat antara kedalaman gerusan dan panjang gerusan maksimum dengan angka *Froude*, dimana semakin besar angka *Froude*, maka kedalaman gerusan maksimum berbanding panjang gerusan maksimum semakin besar.
  - d). Hubungan yang erat antara kedalaman gerusan dan panjang gerusan maksimum dengan angka *Reynold*, dimana semakin besar angka *Reynold*, maka kedalaman gerusan maksimum berbanding panjang gerusan maksimum semakin besar.
3. Kedalaman gerusan maksimum (*maximum of scour depth*) di hilir kolam olak sangat dipengaruhi oleh waktu karakteristik dan kedalaman aliran di hilir kolam olak.
  4. Berdasarkan kajian lubang gerusan (*scour hole*) terdapat hubungan yang erat antara kecepatan aliran, kecepatan geser, dengan besar panjang gerusan dan dalamnya gerusan yang terjadi di hilir bendung.
  5. Berdasarkan pengamatan proteksi gerusan di hilir kolam olakan untuk semua tipe USBR pada debit 28,8 lt/dt, dapat disimpulkan bahwa : Hasil pengamatan untuk kolam olakan tipe **USBR-I**, dengan adanya proteksi gerusan terjadi reduksi gerusan untuk **Rip-rap**  $\frac{1}{4} L_{maks}$  yaitu : 46,69 % untuk kedalaman gerusan dan 15,53 % untuk panjang gerusan. **Rip-rap**  $\frac{1}{2} L_{maks}$  yaitu : 80,75 % untuk kedalaman gerusan dan 26,21 % untuk panjang gerusan. **Rip-rap**  $L_{maks}$  yaitu : 86,96 % untuk kedalaman gerusan dan 47,32 % untuk panjang gerusan.
  6. Berdasarkan pengamatan dari beberapa proteksi/ pengendalian gerusan di hilir kolam olakan dengan *riprap* ( $\frac{1}{2} L_{maks}$ ), *riprap* ( $\frac{1}{4} L_{maks}$ ), *riprap* ( $L_{maks}$ ), didapatkan kesimpulan bahwa susunan *riprap* sepanjang  $L_{maks}$  (panjang gerusan maksimum tanpa proteksi) mampu mengendalikan gerusan dengan kedalaman gerusan paling kecil. Akan tetapi kalau ditinjau dari proses gerusannya, bahwa lubang gerusan sepanjang  $L_{maks}$  meskipun ditutup dengan proteksi penuh tetapi masih terjadi gerusan dan lubang gerusan di hilirnya meskipun kecil.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas seluruh pembiayaan penelitian ini yang merupakan bagian dari Research Grant Program Hibah Technological and Professional Skills Development Sector Project (TPSDP), Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta untuk Tahun Anggaran 2006 Batch III di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrosyid, Jaji, 2005, Gerusan di Hilir Kolam Olak Bendung, *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, Volume 5, Nomor 2, Hal 73-79, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta.
- Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J., 1991, *Scouring, IHAR Hydraulic Structure Design Manual*, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Chow, V.T., 1995, (ed. Suyatman, dkk.), *Hidraulika Saluran Terbuka*, Pen. Erlangga, Jakarta.
- Farhodi, J. dan Smith, K.V.H., 1982, Time Scale For Scour Downstream of Hydraulic Jump, *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 108, No. HY 10, Am. Soc. Civ. Engrs., pp. 1147-1162.
- Farhodi, J. dan Smith, K.V.H., 1985, Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump, *Journal of the Hydraulics Research*, Vol. 23, No. 4, Am. Soc. Civ. Engrs., pp. 343-358
- Hoffmans, G.J.C.M. and Verheij, 1997, *Scour Manual*, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Hoffmans, G.J.C.M. and Pilarczyk, K.W., 1995, Local Scour Downstream of Hydraulic Structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 121, No. 4, Am. Soc. Civ. Engrs., pp. 326-340.
- Kumar, D., et al., 1982, Flow Under Weir On Scoured Bed, *Journal of the Hydraulics Division*, Vol 108, No. HY 4, Am. Soc. Civ. Engrs., pp. 529-543.
- Mays, L.W., 1999, *Hydraulic Design Handbook*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Mohamed, M.S. dan McCorquodale, J.A., 1992, Short Term Local Scour, *Journal of Hydraulic Research*, Vol 30, No. 5, Am. Soc. Civ. Engrs., pp. 685-699.
- Neill, C. R., 1973, *Guide to Bridge Hydraulics*, Project Committee on Bridge Hydraulics – Roads and Transportation Association of Canada, Canada.

Raju, Ranga K.G., 1986, (ed. Yan Piter Pangaribuan), *Aliran Melalui Saluran Terbuka*, Pen. Erlangga, Jakarta.  
Raudkivi, A.J. and Ettema, R., 1983, Clear-Water Scour at Cylindrical Piers, *Journal of Hydraulic*

*Engineering*, Vol 109, No. 3, Am. Soc. Civ. Engrs., pp. 338-350.  
Simon, D. dan Senturk F., 1992, *Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamic*, Water Resources Pubns., New-York.

---