

Perbandingan gerusan pada bendung di hilir kolam olak tipe *vlughter* dengan proteksi riprap dan groundsill

Ihlasul Mubasir Mas'ad^{1,*}, Dwi Astuti Wahyu Wulan Pratiwi¹, Shofwatul Fadilah¹

¹Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Indonesia

Article Info

Available online:

Keywords:

Scour
Dam
Vlughter
Riprap
Groundsill

Abstract

Hydraulic jump is a phenomenon occurring in channels due to a change in flow from supercritical to subcritical. This phenomenon can be found in dam structures where the stilling basin becomes a crucial part of the dam that needs to be well-designed to dissipate the energy resulting from the hydraulic jump. However, downstream issues in dam bodies also often arise in the form of erosion in the downstream part of the dam's stilling basin (endsill). Therefore, this study focuses on the investigation of erosion protection downstream of the dam to determine the optimal protection type to reduce erosion in the downstream area. The erosion study was conducted at the Hydraulics Laboratory, Department of Civil Engineering, Universitas Islam Indonesia, using a sluice gate model with a vlughter-type stilling basin subjected to three variations of the upstream flow depth (h_0). The flow was allowed to run for 60 minutes in each variation. The study involved two experimental conditions: one without protection and the other with protection using riprap and groundsill. The channel bed material used was fine sand (with a sieve diameter of 7mm) with a thickness of 5 cm along the channel. The experimental results indicate that the magnitude of erosion is influenced by the flow velocity and upstream flow depth (h_0) and is also affected by gravity (Froude number) and Reynolds number. Based on the observations of erosion experiments in the downstream stilling basin, it can be concluded that using riprap protection is more effective in reducing erosion compared to groundsill protection.

Corresponding Author:

Ihlasul Mubasir Mas'ad
18511034@alumni.uii.ac.id

Copyright © 2024 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Kolam olak merupakan salah satu bagian utama dari tubuh bendung yang berfungsi untuk meredam energi. Dalam perancangan bendung perlu adanya peredam energi berupa kolam olak (Pangestu dan Astuti, 2018). Energi yang diredam oleh kolam olak adalah energi yang diakibatkan oleh perubahan jenis aliran pada saluran. Perubahan jenis aliran tersebut terjadi karena aliran berubah dari superkritik menjadi subkritik akibat pembendungan pada saluran. Perubahan tersebut menyebabkan terjadinya loncatan hidraulik. Perubahan jenis aliran dari

superkritik menjadi subkritik menyebabkan terjadinya loncatan hidraulik (Raju, 1986; Fitriana, 2014). Loncat hidraulik tersebut menyebabkan terjadinya gerusan sedimen pada dasar saluran.

Dampak dari gerusan tersebut dapat diantisipasi dengan membuat kolam olak di hilir saluran (Saputra dkk, 2019). Beberapa jenis kolam olak yang digunakan untuk mengantisipasi gerusan antara lain adalah kolam olak tipe USBR, *bucket*, *vlughter*, *schoklitch*. Dalam pemilihan jenis kolam olak yang digunakan tergantung dari jenis aliran yang terjadi pada saluran (KP-04 Kementrian

PU, 2013). Akan tetapi dalam beberapa kasus di lapangan masih banyak terjadi gerusan di hilir meskipun telah diberikan kolam olak. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan kajian mengenai perbandingan gerusan pada bendung di hilir kolam olak tipe *vlughter* dengan proteksi riprap dan *ground sill*.

Tinjauan Pustaka

Karakteristik aliran

Klasifikasi aliran tergantung pada gangguan-gangguan yang terjadi pada aliran yang dapat mempengaruhi gerak dari partikel fluida (Faruk dan Kamiran, 2012). Salah satu gangguan yang mungkin dialami oleh aliran adalah pengaruh dari kekentalan terhadap kelembaman yang membuat aliran memiliki sifat laminar dan turbulen. Untuk menyatakan pengaruh kekentalan terhadap kelembaman dapat dinyatakan dalam bilangan Reynold (Re). Bilangan Reynold dapat dicari menggunakan Pers. (1) berikut ini.

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (1)$$

dengan Re adalah angka Reynold, v adalah kecepatan aliran rata-rata (m/s), D adalah diameter pipa (m), ν adalah kekentalan kinematik (m^2/s). Penggolongan aliran berdasarkan bilangan Reynolds yang berhubungan dengan karakteristik aliran pada saluran terbuka menurut Triatmodjo (2003) dalam bukunya hidraulika II adalah, aliran disebut laminar bila $Re < 500$, aliran disebut turbulen bila $Re > 1000$, dan aliran disebut transisi bila $500 < Re < 1000$.

Pengaruh gravitasi bumi terhadap keadaan aliran dapat dinyatakan dengan perbandingan gaya inersia dengan gaya gravitasi. Perbandingan tersebut dapat dinyatakan dengan Pers. (2) berikut ini.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (2)$$

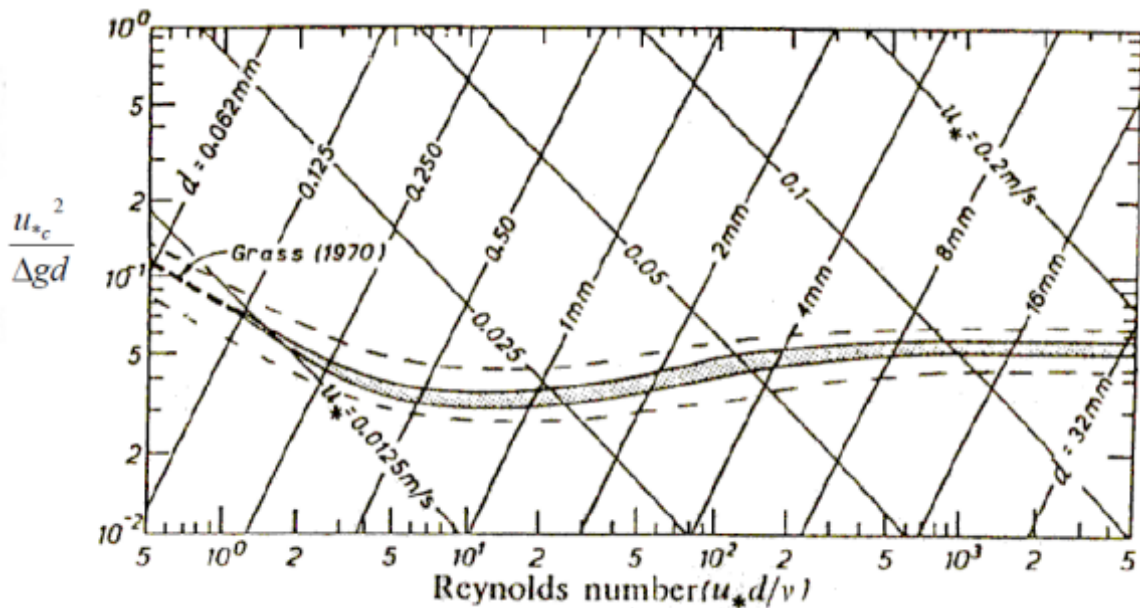
dengan Fr adalah bilangan Froude, v adalah kecepatan aliran rata-rata (m/s), g adalah gaya gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$), dan D adalah kedalaman hidraulis (m). Penggolongan jenis aliran dari hasil perhitungan dengan

menggunakan persamaan Froude menurut Triatmodjo (2003) dalam bukunya hidraulika II adalah, aliran disebut sub-kritis bila $Fr < 1$, aliran disebut super-kritis bila $Fr > 1$, dan aliran disebut kritis bila $Fr = 1$.

Gerusan

Fenomena gerusan dapat terjadi karena adanya perubahan pola aliran saat melewati penampang sungai yang mengakibatkan material dasar sungai akan terangkut dari daerah asalnya sedikit demi sedikit. Proses pengangkutan tersebut terjadi secara berulang-ulang, hingga mencapai suatu keseimbangan dasar sungai yang baru (Pangestu dan Astuti, 2018). Menurut Legono (1990) dalam Zulfan, (2017), gerusan adalah sebuah proses semakin dalamnya dasar sungai dikarenakan adanya interaksi antara aliran dengan material yang ada di sungai. Raudkivi dan Eltema (1982) dalam Abdurrazyid, dkk. (2009) menjelaskan bahwa gerusan dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu gerusan umum (*general scour*), yaitu gerusan yang tidak berkaitan dengan nada atau tidaknya bangunan hidraulik. Gerusan ini terjadi karena energi dari aliran itu sendiri. Gerusan terlokalisir (*localized scour*), yaitu gerusan yang terjadi akibat penyempitan alur sungai sehingga aliran menjadi lebih terpusat. Gerusan lokal (*local scour*), gerusan yang terjadi di sekitar bangunan hidraulik, penyebabnya adalah pola aliran lokal yang terjadi di sekitar bangunan sungai.

Pada dasarnya setiap butiran sedimen memiliki gaya yang bekerja dengan besaran nilai tertentu. Untuk membuat sedimen bergerak melintasi jarak yang cukup jauh, diperlukan gaya yang lebih besar dari pada gaya yang bekerja pada butiran sedimen. Kondisi aliran yang dapat membuat butiran sedimen bergerak dinamakan kondisi kritik. Breuser dan Raudkivi (1991) dalam Affandi (2007) mengatakan parameter permulaan gerak butiran dapat dilihat pada diagram yang dinamakan diagram shield yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Shield

Proses terjadinya gerusan diawali pada satu atau dua titik gerusan, kemudian gerusan tersebut akan semakin dalam dan membesar. Pada aliran seragam dan permanen, proses perkembangan gerusan terjadi sangat cepat pada awal pembentukan gerusan, dan akan semakin melambat setelahnya. Untuk mengetahui kedalaman gerusan yang terjadi dapat menggunakan metode Lacey. Metode Lacey digunakan untuk menghitung kedalaman gerusan umum. Untuk mencari kedalaman gerusan menggunakan metode Lacey dapat menggunakan Pers. (3) berikut ini.

$$R = 0,47 \left(\frac{Q}{f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

dengan R adalah kedalaman gerusan (m), Q adalah debit *outflow* (m^3/s), dan d_{50} adalah diameter rata-rata material (mm).

Riprap dan groundsill

Riprap merupakan susunan bongkahan batu alam atau blok-blok buatan dengan dimensi dan volume tertentu yang digunakan sebagai peredam energi di hilir saluran. Riprap dapat digunakan untuk mengurangi kedalaman pernggerusan pada dasar saluran. Dalam penelitian ini menggunakan proteksi riprap

jenis bongkahan batu alam. Ukuran riprap yang digunakan dapat dihitung menggunakan persamaan EM1601 dari *National Cooperation Highway Research Program* (NCHRP) seperti pada Pers. (4) berikut ini.

$$d_{30} = y (S_f C_s C_v C_T) \left[\frac{(V_{des})}{\sqrt{k_1 (S_g - 1) g y}} \right]^{2.5} \quad (4)$$

dengan d_{30} adalah diameter rata-rata butiran, y adalah kedalaman aliran rata-rata, S_f adalah faktor kemiringan, C_s adalah koefisien stabilitas, C_v adalah koefisien distribusi kecepatan, C_T adalah koefisien ketebalan selimut, V_{des} adalah kecepatan karakteristik disain, K_1 adalah faktor kemiringan koreksi, R_c adalah jari-jari hidraulis, W adalah lebar permukaan aliran, S_g adalah berat jenis riprap, dan g adalah percepatan gravitasi.

Groundsill adalah struktur ambang melintang yang biasa digunakan untuk mengendalikan kemiringan dan ketinggian dasar sungai agar dapat mengurangi degradasi (penggerusan) pada sungai. *Groundsill* diletakkan pada alur sungai untuk menjaga agar elevasi lapisan endapan sedimen pada dasar saluran tidak cepat mengalami penurunan.

Metode Penelitian

Data penelitian

Penelitian ini dimodelkan dalam skala Laboratorium. Model fisik hidraulik adalah membuat bangunan air dengan ukuran yang diperkecil skalanya dari bangunan asli. Pengecilan ini disebut model (Wicaksono dan Dermawan, 2010). Pengujian dimulai dari persiapan benda uji, terdiri dari model bendung tipe bulat satu jari-jari, dengan dimensi lebar 10 cm, panjang 15 cm, dan tinggi 16 cm. Pasir yang digunakan sebagai material dasar saluran diambil dari pasir Gunung Merapi. Desain *groundsill* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki tinggi 5 cm, panjang 3,3 cm, dan lebar 10 cm. Dimensi riprap yang digunakan yaitu 7,5 mm, yang didapatkan dari hasil perhitungan menggunakan persamaan 4. Penelitian dilakukan menggunakan alat *flume* dengan panjang 5 m dan lebar 10 cm. Setelah itu dilakukan pengujian dengan mengklasifikasikannya menjadi 3 pengujian, yaitu pengujian tanpa menggunakan proteksi, pengujian menggunakan *groundsill*, dan

pengujian menggunakan proteksi riprap. Data yang diperoleh dianalisis untuk mendapatkan pola gerusan dan divisualisasikan menggunakan *software Golden Surfer v13.6.618*. Software ini membantu membuat visualisasi gerusan yang terjadi di hilir kolam olak agar dapat lebih mudah untuk dipahami.

Lokasi penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan di Laboratorium Hidrolika, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Hasil dan Pembahasan

Pengamatan gerusan dilakukan selama 60 menit untuk 1 kali pengamatan. Dilakukan 12 kali percobaan, tanpa proteksi 3 kali percobaan, dengan proteksi riprap 4 kali percobaan, dan dengan proteksi *groundsill* 4 kali percobaan. Pada Tabel 1 dan Tabel 2 dapat dilihat bahwa bilangan Froude yang terjadi pada tiap percobaan menunjukkan bahwa aliran yang diamati dalam kondisi sub-kritis.

Tabel 1. Karakteristik aliran berdasarkan Froude

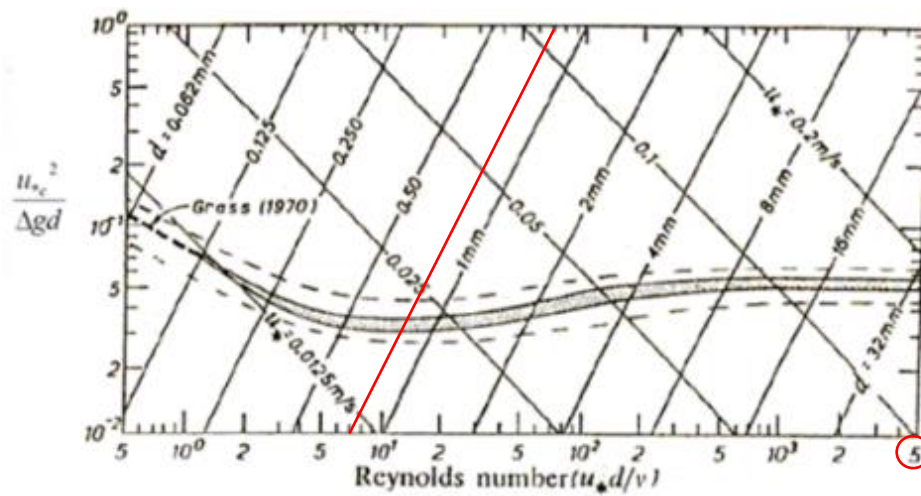
L	h ₀ (m)	Bilangan Froude (Fr)		
		Tanpa Proteksi	Groundsill	Riprap
L _{maks}	0,175	0,319	0,337	0,357
L _{maks}	0,18	0,359	0,361	0,369
L _{maks}	0,185	0,377	0,378	0,385
½ L _{maks}	0,185	-	0,399	0,399

Tabel 2. Karakteristik aliran berdasarkan Reynolds

L	h ₀ (m)	Angka Reynold (Re)		
		Tanpa Proteksi	Groundsill	Riprap
L _{maks}	0,175	2872,549	2910,346	2949,151
L _{maks}	0,180	4421,715	4426,887	4452,927
L _{maks}	0,185	5462,986	5468,956	5499,005
½ L _{maks}	0,185	-	5560,105	5560,105

Berdasarkan angka Reynold, hasil pada tiap percobaan tersebut menunjukkan karakteristik aliran pada hilir bendung adalah turbulen. Menurut Triatmojo (2013), aliran pada saluran terbuka akan turbulen saat angka

Reynold (Re) > 1000 dan laminar saat angka Reynold (Re) <500. Hubungan antara angka Reynold dan gerusan dapat dilihat di diagram shield pada Gambar 2.

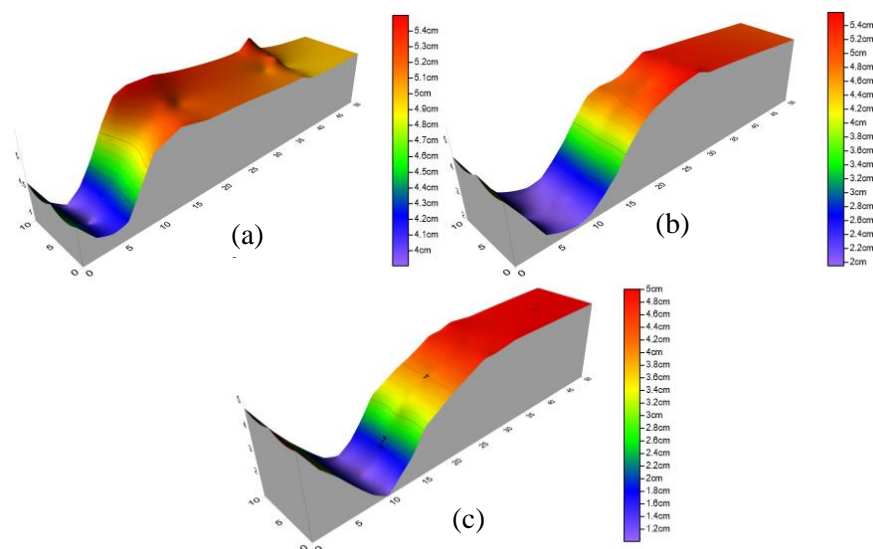


Gambar 2. Diagram Shield Hubungan Diameter Agregat Halus dengan Angka Reynolds

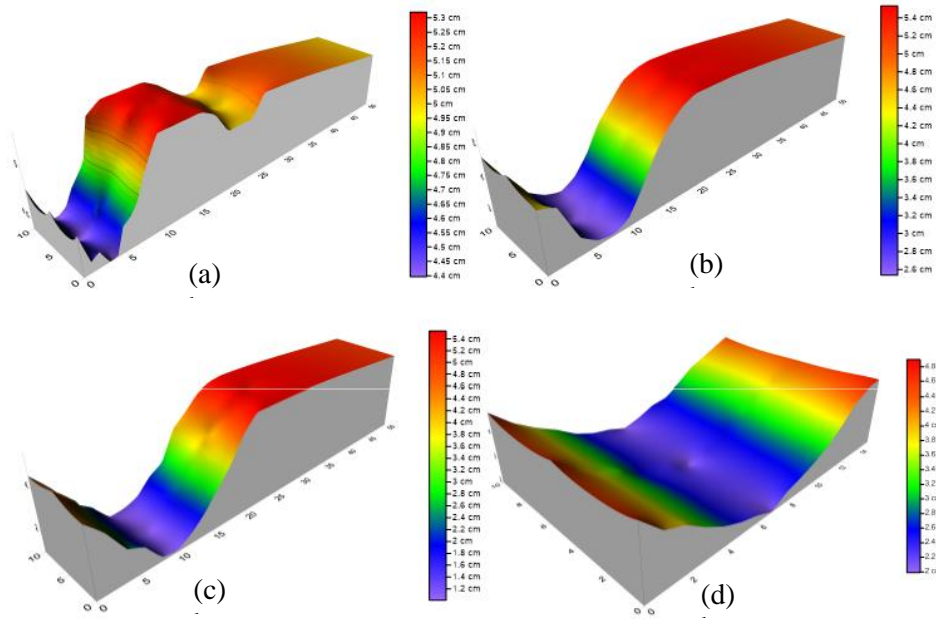
Angka Reynold (Re) yang didapatkan pada penelitian ini yaitu sebesar 2000 sampai dengan 5000, sehingga pada diagram shield di atas angka Reynold pada sumbu x dilambangkan dengan lingkaran berwarna merah. Angka Reynold tersebut akan dihubungkan dengan diameter butiran rata-rata (d_{50}) sebesar 0,7 mm yang pada diagram shield di atas dilambangkan dengan garis diagonal berwarna merah, sehingga dari hubungan kedua parameter dalam diagram shield di atas dapat disimpulkan bahwa butiran sedimen pada percobaan penelitian ini dapat mengalami pergerakan. Karena hasil

dari diagram shield berada di atas garis *threshold*, maka pada percobaan ini terjadi *transports* sedimen pada aliran airnya.

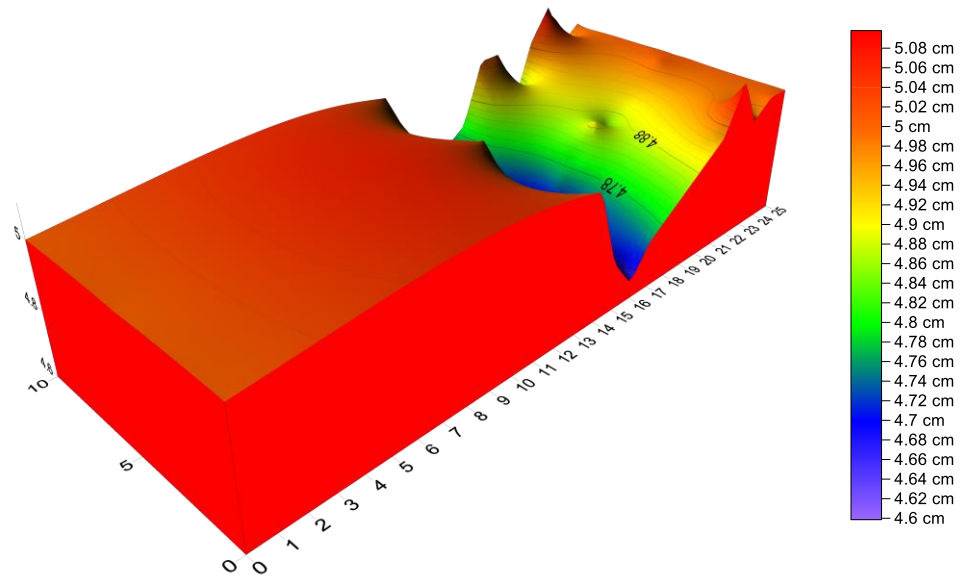
Berdasarkan pengamatan pada proses penggerusan di hilir kolam olak, gerusan mulai terjadi pada hilir saat awal jatuhnya air di *endsill*, kemudian melebar di sepanjang aliran seiring berjalannya pengaliran. Semakin jauh dari kolam olak, gerusan yang terjadi semakin dangkal. Sebagaimana ditunjukkan pada pola gerusan di hilir kolam olak pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



Gambar 3. Pola gerusan tanpa proteksi (a) $h_0 = 0,175$ m (b) $h_0 = 0,18$ m (c) $h_0 = 0,185$ m

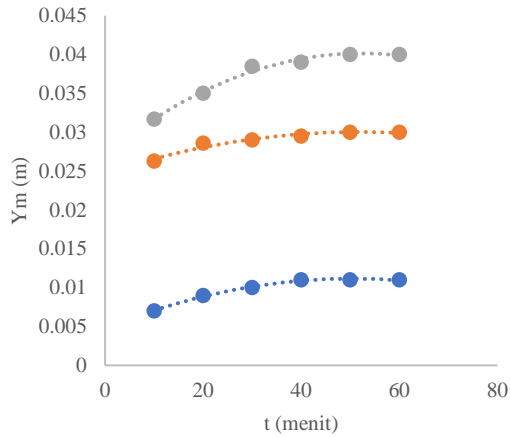


Gambar 4. Pola gerusan dengan *groundsill* (a) $L_{maks} h_0 = 0,175$ m (b) $L_{maks} h_0 = 0,18$ m
(c) $L_{maks} h_0 = 0,185$ m (d) $\frac{1}{2} L_{maks} h_0 = 0,185$ m



Gambar 5. Pola gerusan dengan riprap

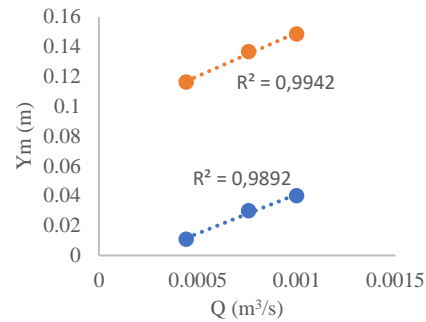
Hubungan antara parameter gerusan dengan waktu pengaliran disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik hubungan kedalaman gerusan terhadap waktu

Pada masing-masing variasi ketinggian air hulu diperoleh kedalaman gerusan yang berbeda-beda. Kedalaman gerusan terbesar terjadi saat ketinggian air hulu 0,185 m atau debit 0,001 m³/s, dengan kedalaman gerusan sebesar 0,04 m. Dari hasil pengamatan grafik tersebut dapat dilihat bahwa peningkatan gerusan sangat tinggi pada menit-menit awal pengaliran, seiring dengan semakin lama waktu pengaliran, peningkatan kedalaman gerusan menjadi semakin kecil. Terlihat bahwa pada saat waktu pengaliran mencapai 50 menit, kedalaman gerusan sudah mengalami kesetimbangan dan tidak lagi terjadi gerusan. Hubungan antara kedalaman gerusan dengan waktu saat pengamatan menunjukkan hubungan fungsi non-linier atau peningkatan kedalamannya tidak konstan dan berubah-ubah.

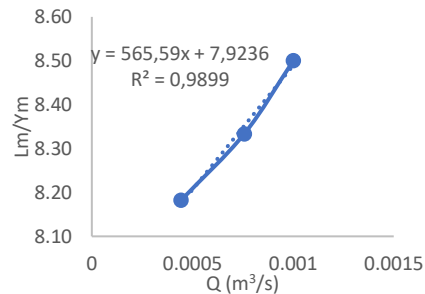
Pengamatan gerusan dilakukan dengan menggunakan dua metode. Yaitu dengan pengamatan langsung secara visual di Laboratorium, dan pengamatan dengan menggunakan metode Lacey. Grafik hubungan antara variasi ketinggian air hulu atau debit dengan kedua metode pengamatan gerusan tersebut dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik hubungan kedalaman gerusan dengan debit aliran

Gambar 7 menunjukkan terjadi perbedaan yang cukup signifikan antara hasil pengamatan kedalaman gerusan yang dilakukan di Laboratorium dan yang dilakukan menggunakan metode Lacey. Perbedaan terjadi karena beberapa hal, di antaranya perhitungan metode Lacey hanya mempertimbangkan faktor debit aliran dan faktor lumpur, sehingga hasil perhitungan hanya menunjukkan gerusan secara umum saja. Akan tetapi pada percobaan di Laboratorium mempertimbangkan adanya bangunan peredam energi berupa kolam olak.

Koefisien korelasi antara kedalaman gerusan dengan debit pengamatan secara langsung menunjukkan nilai 0,9892 sesuai Gambar 8, sedangkan perhitungan secara teori menggunakan metode Lacey menunjukkan nilai 0,9942. Hal tersebut menunjukkan bahwa kedalaman gerusan dengan besaran debit memiliki kaitan yang sangat erat. Jadi kedalaman gerusan maksimum sangat dipengaruhi oleh debit.



Gambar 8. Hubungan panjang gerusan dengan kedalaman gerusan terhadap debit

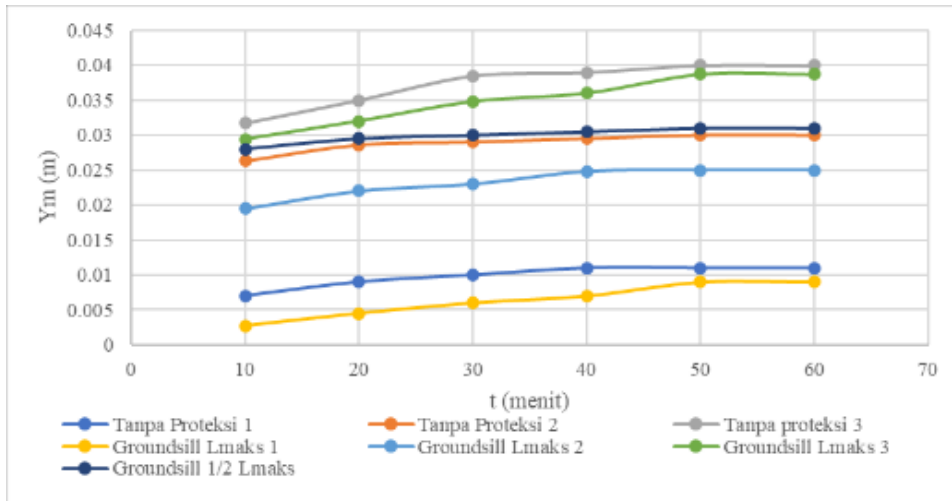
Berdasarkan Gambar 8 dapat disimpulkan bahwa semakin besar debit aliran maka akan semakin besar pula panjang gerusan dan kedalamannya sebagaimana dinyatakan dalam persamaan logaritmik berikut ini:

$$\frac{L_m}{Y_m} = 565,59 (Q) + 7,924$$

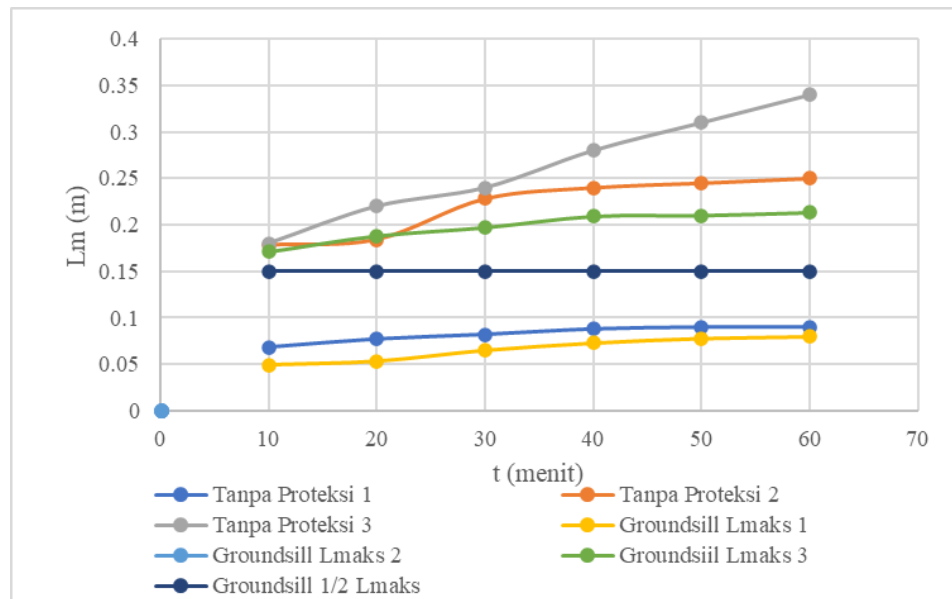
Logika dihubungkannya panjang gerusan dengan debit karena, jika aliran semakin besar, maka akan semakin besar pula gerusan yang terjadi. Hubungan antara keduanya menunjukkan angka korelasi sebesar 0,9884, sehingga kedalaman gerusan dengan debit

aliran memiliki hubungan yang sangat erat. Berdasarkan pengamatan diperoleh hasil bahwa pertambahan panjang gerusan lebih besar apabila dibandingkan dengan pertambahan kedalamannya.

Hasil percobaan menggunakan proteksi *groundsill* yang dilakukan sebanyak 4 kali percobaan, dengan 3 kali percobaan *groundsill* diletakkan sejauh L_{maks} dan satu percobaan *groundsill* diletakkan sejauh $\frac{1}{2} L_{maks}$ didapatkan grafik perbandingan sebelum ada proteksi *groundsill* dan setelah ada proteksi *groundsill* Gambar 9 dan Gambar 10.



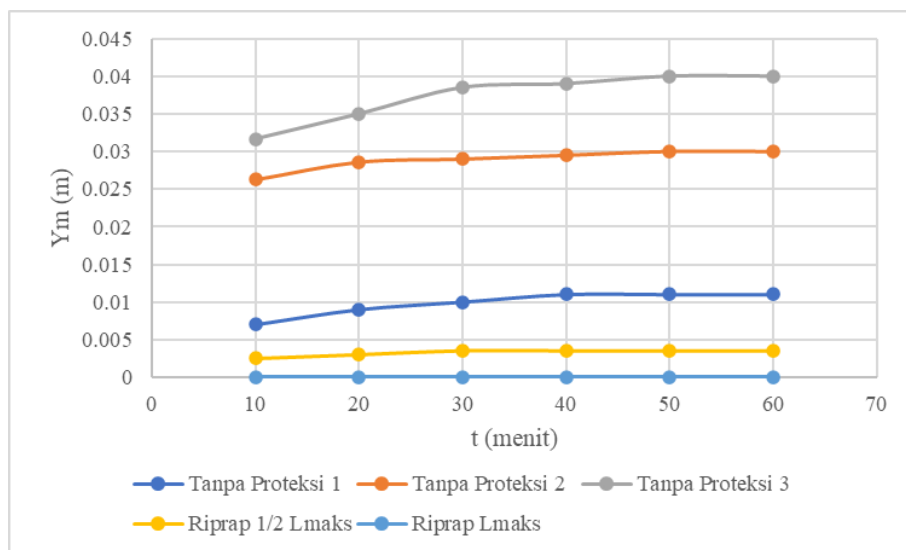
Gambar 9. Perbandingan kedalaman gerusan sebelum dan sesudah ada proteksi *groundsill*



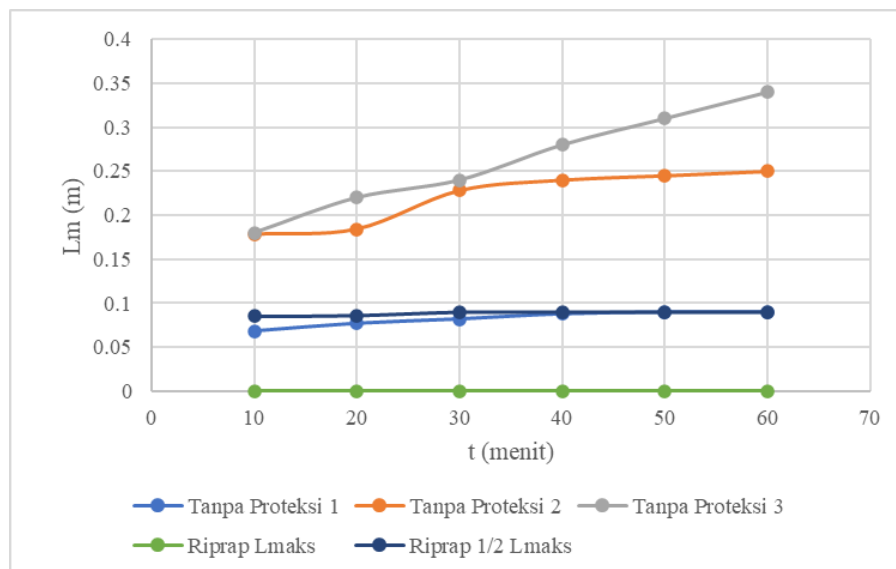
Gambar 10. Perbandingan panjang gerusan sebelum dan sesudah ada proteksi *groundsill*

Berdasarkan Gambar 9 dan Gambar 10 dapat disimpulkan bahwa proteksi *groundsill* dapat melindungi dasar saluran dari penggerusan akibat adanya bangunan air berupa bendung. Hal tersebut dapat terjadi karena sedimen yang terangkut oleh aliran akan tertahan oleh *groundsill*, sehingga nilai kedalaman dan panjang gerusan dapat dikurangi (reduksi).

Percobaan pengamatan gerusan menggunakan proteksi riprap yang dilakukan sebanyak 4 kali percobaan, dengan tiga kali percobaan riprap diletakkan sepanjang L_{maks} dan satu percobaan dilakukan dengan meletakkan riprap sepanjang $\frac{1}{2} L_{maks}$ didapatkan grafik perbandingan sebelum ada proteksi riprap dan setelah ada proteksi riprap dapat diamati pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Perbandingan kedalaman gerusan sebelum dan sesudah ada proteksi riprap



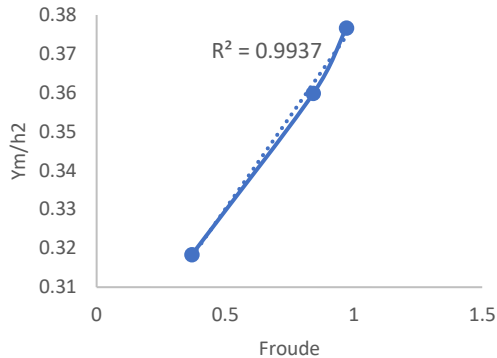
Gambar 12. Perbandingan panjang gerusan sebelum dan sesudah ada proteksi riprap

Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan bahwa proteksi riprap yang diletakkan sepanjang L_{maks} dapat mencegah terjadinya gerusan pada hilir bendung, sedangkan riprap

yang dipasang sejauh $\frac{1}{2} L_{maks}$ dapat mengurangi atau mereduksi kedalaman dan panjang gerusan yang terjadi di hilir bendung. Hal ini dapat terjadi karena perletakkan riprap

sejauh L_{maks} mengurangi energi aliran yang terjadi di hilir bendung, sehingga sedimen yang ada di bawah riprap tidak mengalami pergerakan atau *transport* sedimen.

Hubungan antara kedalaman gerusan dengan kedalaman aliran dan angka Froude dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Hubungan kedalaman gerusan dengan kedalaman aliran dan angka Froude

Gambar 13 menunjukkan angka korelasi sebesar R sebesar 0,9937 sehingga terdapat hubungan yang kuat antara angka Froude dan kedalaman gerusan maksimum dengan kedalaman aliran. Sehingga kedalaman maksimum gerusan sangat dipengaruhi oleh angka Froude. Semakin tinggi angka Froude aliran, maka kedalaman gerusan dan kedalaman alirannya juga semakin dalam.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Setelah dilakukan pengamatan dan analisis data, didapatkan kesimpulan yaitu karakteristik aliran berdasarkan bilangan Reynold (Re) menunjukkan bahwa tipe aliran pada semua variasi ketinggian h_0 adalah turbulen. Hal tersebut terjadi karena nilai angka Reynold (Re) > 1000 pada seluruh variasi ketinggian h_0 . Sedangkan karakteristik aliran menurut bilangan Froude (Fr) menunjukkan bahwa tipe aliran pada semua variasi h_0 adalah sub-kritis, karena nilai angka Froude (Fr) < 1 pada semua variasi ketinggian h_0 . Kemudian berdasarkan hasil pengamatan pada percobaan gerusan di hilir kolam olak dapat disimpulkan bahwa percobaan DPG 1

L_{maks} dapat mereduksi kedalaman gerusan sebesar 18,18% dan mereduksi panjang gerusan sebesar 11,11%, sedangkan DPG 2 L_{maks} dapat mereduksi kedalaman gerusan sebesar 16,66% dan mereduksi panjang gerusan sebesar 34%, dan DPG 3 L_{maks} dapat mereduksi kedalaman gerusan sebesar 3,25% dan mereduksi panjang gerusan sebesar 37,35%, serta DPG 3 ½ L_{maks} dapat mereduksi kedalaman gerusan sebesar 22,5% dan mereduksi panjang gerusan sebesar 55,88%. Sementara itu pada percobaan DPR 1 L_{maks} hingga DPR 3 L_{maks} dapat mereduksi mencegah terjadinya gerusan sehingga tidak terdapat gerusan pada hilir kolam olak, akan tetapi pada percobaan DPR 3 ½ L_{maks} dapat mereduksi kedalaman gerusan sebesar 91,25% dan mereduksi panjang gerusan sebesar 73,53%. Dapat disimpulkan bahwa proteksi riprap dapat mereduksi gerusan di hilir kolam olak bendung apabila dibandingkan dengan proteksi *groundsill*.

Saran

Adapun saran yang dapat disampaikan oleh peneliti untuk melengkapi penelitian ini, antara lain untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan mengubah variasi proteksi yang digunakan di hilir bendung, dilakukan pengulangan pada saat pengambilan data untuk mengurangi *human eror* yang mungkin dapat terjadi saat pengambilan data, dan penambahan variable pengamatan, seperti panjang aliran turbulennya.

Daftar Pustaka

- Abdurrosyid, J., Jati Wibowo, G., & Nursahid, M. (2009). Studi gerusan dan perlingkungannya di hilir kolam olakan bendung tipe USBR-III.
- Affandi, M. R. (2007). Pengaruh Kedalaman Aliran Terhadap Perilaku Gerusan Lokal Di Sekitar Abutmen Jembatan. *Universitas Negeri Semarang*.
- Faruk, U., & Kamiran, K. (2012). Analisis Pengaruh Aliran Turbulen Terhadap Karakteristik Lapisan Batas pada Pelat Datar Panas. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 1(1), A57-A60.
- Fitriana, N. (2014). Analisis gerusan di hilir bendung tipe vluhter (uji model di laboratorium) (Doctoral dissertation, Sriwijaya University).
- Lagasse, P. F. (2006) Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality

- Control. (Vol. 568). Transportation Research Board.
- Pangestu, A. D., & Astuti, S. A. Y. (2018). Studi Gerusan di Hilir Bendung Kolam Olak Tipe Vlugther dengan Perlindungan Groundsill. *Teknisia*, 463-473.
- Raju, K. R., & Pangaribuan, Y. P. (1986). Aliran Melalui Saluran Terbuka. Erlangga, Jakarta.
- Saputra, D. T., Khaerudin, D. N., & Sulistyani, K. F. (2019, October). Kajian Pemilihan Jenis Kolam Olak Dari Segi Fisik Bendung Pada Bendung Di Dusun Darok. In *Prosiding SENTIKUIN (Seminar Nasional Teknologi Industri, Lingkungan dan Infrastruktur)* (Vol. 2, pp. D6-1).
- Te, C. V. (1989). Hidrolika Saluran Terbuka (*Open Channel Hydrolics*) Terjemahan. Erlangga, Jakarta, 2(5), 10.
- Triatmodjo, Bambang. (2003). Hidrolika II. Yogyakarta: Beta Offset.
- Zulfan, J. (2017). Optimasi hidraulik penanganan gerusan di hilir bendung. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 8(1), 15-28.