

TEKANAN DAN TEGANGAN GESEK ALIRAN SUPERKRITIK DI DASAR SALURAN CURAM

Yeri Sutopo

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang

Abstrak. Tujuan penelitian ini adalah: (1) tersedianya hasil analisis tegangan gesek aliran di dasar saluran curam yang berkemiringan 13° dan 20° ; dan (2) tersedianya hasil analisis tekanan aliran di dasar saluran curam yang berkemiringan 13° dan 20° . Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 9,5 l/s adalah 157,2 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 11,4 l/s adalah 157,69 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 20,9 l/s adalah 158,07 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 9,5 l/s adalah 164,0219 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 11,4 l/s adalah 171,8636 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 20,9 l/s adalah 235,9513 N/m². Nilai tekanan p_h di dasar saluran curam atau 0 mm adalah positif, yaitu antara nilai +9,81 sampai dengan +31,2 N/m²; sementara itu, pada posisi di atas dasar yaitu antara +1 mm nilai tekanan adalah negatif, yaitu antara nilai -78,48 sampai dengan -198,4 N/m². Nilai tekanan uap air atau p_v pada suhu 5°C adalah 1177,2 N/m², sedangkan pada suhu 10°C adalah 2452,5 N/m². Dengan demikian semua nilai tekanan di dasar aliran lebih kecil dibandingkan tekanan uap air atau $p_h > p_v$. Berdasarkan dua kondisi yaitu tegangan gesek τ_0 dan tekanan di dasar aliran p_h , dapat dikatakan bahwa erosi di dasar saluran yang mempunyai kemiringan dasar antara 13° sampai dengan 20° , serta debit antara 9,5 l/s sampai dengan 20,9 l/s diduga selalu terjadi.

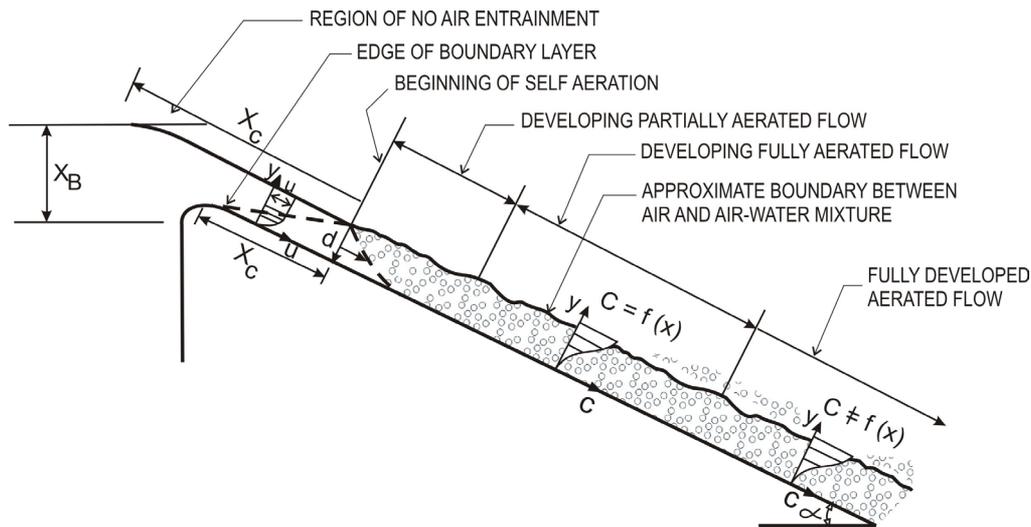
Kata kunci: tekanan, tegangan gesek, saluran curam

PENDAHULUAN

Kikisan dan gerusan adalah proses gesekan pada permukaan dasar sungai atau saluran yang menyebabkan lapisan itu terkelupas sedikit demi sedikit. Makin tinggi kecepatan aliran, makin besar kikisan atau gerusan yang terjadi. Kecepatan yang tinggi pada aliran menyebabkan terjadinya tekanan rendah atau negatif dalam aliran, terutama di dasar saluran atau sungai.

Gaya yang disebabkan oleh tekanan negatif akan menarik unsur-unsur pada struktur bangunan hidraulik yang selanjutnya akan mengakibatkan pengelupasan pada permukaan dasar bangunan. Lama kelamaan pengelupasan dasar bangunan hidraulik akan membentuk lubang kecil yang selanjutnya menjadi lubang besar yang membahayakan struktur hidraulik.

Tujuan penelitian ini sebagai berikut: (1) Tersedianya hasil analisis tegangan gesek aliran di dasar saluran curam yang berkemiringan 13° dan 20°; dan (2) tersedianya hasil analisis tekanan aliran di dasar saluran curam yang berkemiringan 13° dan 20°.



Gambar 1. Pemasukan udara sepanjang pelimpah

Salah satu karakteristik penting dalam aliran di permukaan saluran lancar adalah udara masuk dari atmosfer ke dalam aliran dan bercampur dengan air. Falvey (1980: 7) mendefinisikan pemasukan udara sebagai proses masuknya udara dari atmosfer ke dalam badan air. Pemasukan udara ditandai dari adanya air putih dalam aliran. Pemasukan udara seperti yang diuraikan di atas dapat juga disebut sebagai *self aeration*.

Persamaan tekanan aliran di dasar saluran curam p_h diturunkan berdasarkan Wood (1983: 454). Kecepatan aliran percampuran antara air dan udara dijabarkan seperti persamaan di bawah ini.

$$u_m = u_w(1 - C) + u_a C \quad (1)$$

Densitas aliran percampuran antara air dan udara dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\rho_m = \rho_a C + \rho_w(1 - C) \quad (2)$$

Berdasarkan persamaan Bernoulli, maka,

$$(1/2\rho_a u_a^2)C + 1/2(\rho_w u_w^2)(1 - C) = p_h - p_0 \quad (3)$$

$$\frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C}{(1 - C)} \left(\frac{u_a}{u_w} \right)^2 + 1 = \frac{2(p_h - p_0)}{\rho_w (1 - C) u_w^2} \quad (4)$$

maka, tekanan di dasar saluran curam p_h dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini.

$$1/2\rho_w (1 - C) u_w^2 = p_h - p_0 \quad (5)$$

Keterangan:

- u_w : Kecepatan air (m/dt)
- u_a : Kecepatan udara (m/dt)
- ρ_a : Masa jenis air (kg/m³)
- ρ_w : Masa jenis udara (kg/m³)
- p_a : Tekanan atmosfer (N)
- p_0

Metode yang dapat digunakan untuk menentukan kecepatan geser dasar u_* atau tegangan geser τ_0 pada aliran seragam yaitu: (1) persamaan energi; (2) metode Clauser, yaitu suatu langkah yang menerapkan data distribusi kecepatan; dan (3) mengukur secara langsung kecepatan geser dan tegangan geser (Kironoto, 2007: 254).

Kecepatan geser pada suatu dasar saluran dapat diestimasi berdasarkan metode kemiringan garis energi menurut persamaan:

$$u_* = \sqrt{ghi_f}$$

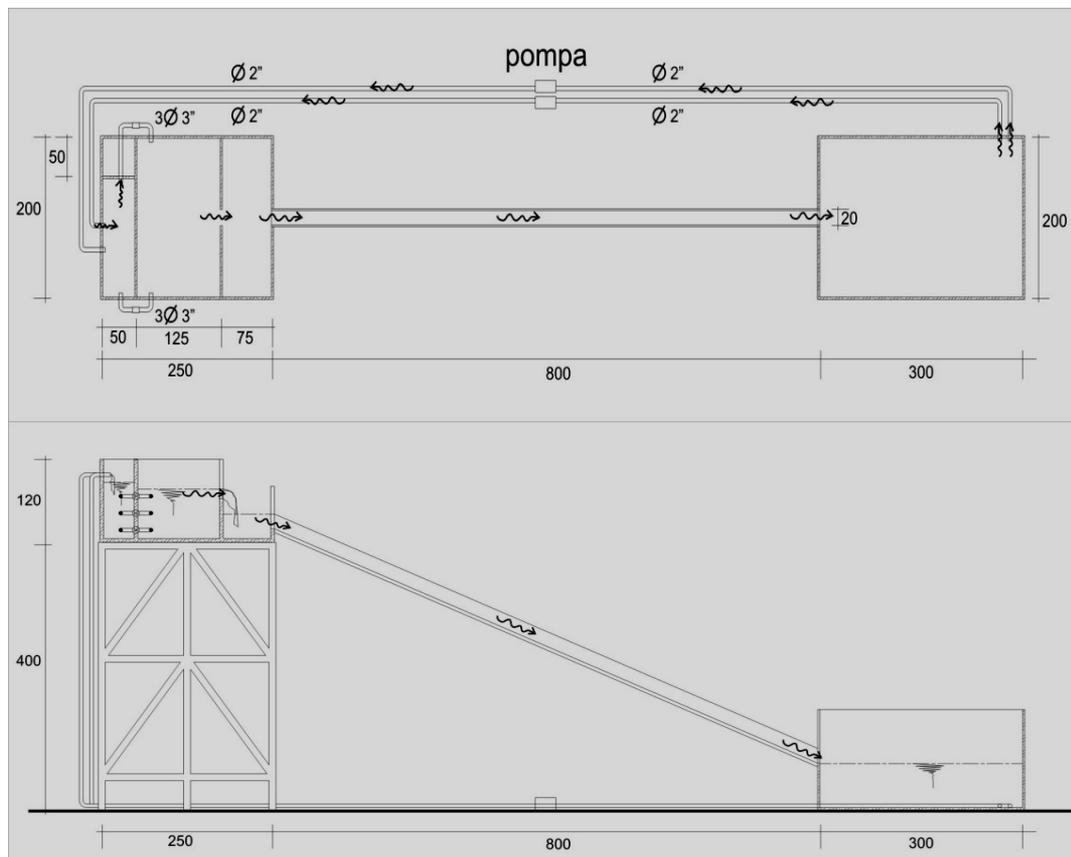
Metode ini telah banyak digunakan terutama untuk aliran seragam karena pertimbangan bahwa cara perhitungannya relatif sederhana, namun demikian metode ini memiliki kelemahan dalam hal tingkat ketelitian yang rendah. Hal ini disebabkan kesulitan dalam menentukan kemiringan garis energy secara teliti (Kironoto, 2007: 254).

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilaksanakan di Laboratorium Hidraulika Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM. Pada penelitian ini digunakan saluran curam yang mempunyai panjang 10 m, lebar 0,2 m dengan kemiringan berubah-ubah mulai 13°, dan 20°, yang menyatu dengan dinding bak air. Penyaluran air ke dalam bak dilakukan dari tangki yang dikendalikan oleh katup. Debit divariasikan, yaitu 0,014 m³/dt dan 0,205 m³/dt. Instrumen berupa *V-Notch* digunakan untuk mengkalibrasi hasil pengukuran debit.

Di titik $x=4,0$ m (hasil hitungan) dianggap $X_c = 0$ yang menjadi referensi aliran hulu yang merupakan awal dari posisi ”*developing*”. Tekanan aliran diukur di zona ”*developing*”, di tiga

titik tengah longitudinal pada $x=6,5; 7,5$, semuanya terletak di dasar aliran.



Gambar 2. Rencana eksperimen pada model saluran luncur

Tekanan uap p_v tidak diukur dan dihitung namun diambil dari dokumentasi yang sudah ada di dalam beberapa buku teks Mekanika Fluida” seperti yang tersaji dalam Tabel di atas. Dalam analisis data yang berkaitan dengan erosi di dasar saluran digunakan kriteria perbandingan antara p_h dan p_v . Jika $p_h < p_v$ maka erosi di dasar saluran diduga dapat terjadi (Chanson, 1988: 5).

Tegangan geser τ_0 dianalisis menggunakan metode kemiringan garis energi yang didekati dengan kemiringan dasar saluran atau talang i_b melalui persamaan sebagai berikut: $\tau_0 = \rho g R i_f$

Di samping itu, digunakan metode pengukuran langsung menggunakan instrumen yang dikembangkan sendiri. Instrumen ini berupa suatu balok yang dihubungkan dengan per. Balok dapat bergerak maju mundur jika mendapatkan dorongan dari aliran. Per dihubungkan dengan instrument berupa potensiometer yang lazim digunakan di equalizer. Data yang diperoleh berupa panjang geseran balok dari tempat semula yang merupakan wujud dari tegangan geser τ_0 .

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Tegangan Gesek

Tabel 1. Tegangan gesek τ_0 pada sudut 13° debit aliran 9,5 l/s

No	z rerata (mm)	L (mm)	Sudut	Sudut awal	Sudut Baru	S_w	τ_0 (tegangan gesek, N/m ²)
1.	18,146						
2.	15,492	6024	$0^\circ 1' 30''$	13°	$13^\circ 1' 30''$	0,2312	157,2

Sumber: Hasil penelitian 2011

Kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° , serta debit aliran sebesar 9,5 l/s mengakibatkan sudut kemiringan muka air menjadi sebesar $13^\circ 1' 30''$, sudut sebesar ini memiliki nilai S_w sebesar 0,2312. Berdasarkan nilai $S_w = 0,2312$, diperoleh nilai tegangan gesek $\tau_0 = 157,2$ N/m². Dengan demikian nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 9,5 l/s adalah 157,2 N/m².

Tabel 2. Tegangan gesek τ_0 pada sudut 13° debit aliran 11,4 l/s

No	z	z rerata (mm)	L (mm)	Sudut	Sudut awal	Sudut Baru	S_w	τ_0 (tegangan gesek, N/m ²)
1.	23,532	23,255						
2.	16,062	16,411	6024	$0^\circ 3' 54''$	13°	$13^\circ 3' 54''$	0,232	157,69

Sumber: Hasil penelitian 2011

Kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° , serta debit aliran sebesar 11,4 l/s mengakibatkan sudut kemiringan muka air menjadi sebesar $13^\circ 3' 54''$, sudut sebesar ini memiliki nilai S_w sebesar 0,232. Berdasarkan nilai $S_w = 0,232$, diperoleh nilai tegangan gesek $\tau_0 = 157,69$ N/m². Dengan demikian nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 11,4 l/s adalah 157,69 N/m².

Tabel 3 Tegangan gesek τ_0 pada sudut 13° debit aliran 20,9 l/s

No	z	z rerata (mm)	L (mm)	Sudut	Sudut awal	Sudut Baru	S_w	τ_0 (tegangan gesek, N/m ²)
5.	23,061	23,0474						
10.	33,421	33,0264	6024	$0^\circ 5' 41''$	13°	$13^\circ 5' 41''$	0,232492	158,0693

Sumber: Hasil penelitian 2011

Kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° , serta debit aliran sebesar 20,5 l/s mengakibatkan sudut kemiringan muka air menjadi sebesar $13^\circ 5' 41''$, sudut sebesar ini memiliki nilai S_w sebesar 0,233. Berdasarkan nilai $S_w = 0,233$, diperoleh nilai tegangan gesek $\tau_0 = 158,07$

N/m². Dengan demikian nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 20,9 l/s adalah 158,07 N/m².

Tabel 4 Tegangan gesek τ_0 pada sudut 20° debit aliran 9,5 l/s

No	z	z rerata (mm)	L (mm)	Sudut	Sudut awal	Sudut Baru	S_w	τ_0 (tegangan gesek, N/m ²)
1.	16,851	17,9336						
2.	15,436	15,2882	6,024	0°15'6"	20°	20°15'6"	0,36875	164,0219

Sumber: Hasil penelitian 2011

Kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20°, serta debit aliran sebesar 9,5 l/s mengakibatkan sudut kemiringan muka air menjadi sebesar 20°15'6", sudut sebesar ini memiliki nilai S_w sebesar 0,36875. Berdasarkan nilai $S_w=0,36875$, diperoleh nilai tegangan gesek $\tau_0=164,0219$ N/m². Dengan demikian nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 9,5 l/s adalah 164,0219 N/m².

Kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20°, serta debit aliran sebesar 11,4 l/s mengakibatkan sudut kemiringan muka air menjadi sebesar 20°2'54", sudut sebesar ini memiliki nilai S_w sebesar 0,364756. Berdasarkan nilai $S_w=0,364756$, diperoleh nilai tegangan gesek $\tau_0=164,0219$ N/m². Dengan demikian nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 11,4 l/s adalah 171,8636 N/m².

Tabel 5 Tegangan gesek τ_0 pada sudut 20° debit aliran 11,4 l/s

No	z	z rerata (mm)	L (mm)	Sudut	Sudut awal	Sudut Baru	S_w	τ_0 (tegangan gesek, N/m ²)
1.	20,532	21,255						
2.	16,062	16,0112	6,024	0°2'54"	20°	20°2'54"	0,364756	171,8636

Sumber: Hasil penelitian 2011

Tabel 6 Tegangan gesek τ_0 pada sudut 20° debit aliran 20,9 l/s

No	z	z rerata (mm)	L (mm)	Sudut	Sudut awal	Sudut Baru	S_w	τ_0 (tegangan gesek, N/m ²)
1.	21,061	21,0474						
2.	30,421	30,4264	6,024	0°5'21"	20°	20°5'21"	0,365534	235,9513

Sumber: Hasil penelitian 2011

Kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20°, serta debit aliran sebesar 20,5 l/s mengakibatkan sudut kemiringan muka air menjadi sebesar 20°5'21", sudut sebesar ini memiliki nilai S_w sebesar 0,365534. Berdasarkan nilai $S_w=0,365534$, diperoleh nilai tegangan gesek $\tau_0=235,9513$ N/m². Dengan demikian nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 20,9 l/s adalah 235,9513 N/m².

Berdasarkan tabel di atas serta uraian tentang nilai tegangan gesek (τ_0) maka dapat dikatakan

“Makin besar debit aliran dan makin besar kemiringan aliran maka makin tinggi nilai tegangan geser (τ_0) di dasar saluran curam”.

Deskripsi Tekanan Di Dasar Aliran

Tabel 7. Tekanan pada debit 20,9 l/s dan kemiringan dasar aliran 13°

Jarak dari ambang pelimpah (m)	Tinggi dari dasar aliran z (mm)	Tekanan Aliran N/m ²
6,5	0	29,43
	1	-98,1
7,5	0	19,6
	1	-196,2

Sumber: hasil penelitian 2011

Tabel 8. Tekanan pada debit 11,4 l/s dan kemiringan dasar aliran 13°

Jarak dari ambang pelimpah (m)	Tinggi dari dasar aliran z (mm)	Tekanan Aliran N/m ²
6,5	0	19,62
	1	-78,48
7,5	0	9,81
	1	-127,53

Sumber: hasil penelitian 2011

Tabel 9. Tekanan pada debit 20,9 l/s dan kemiringan dasar aliran 20°

Jarak dari ambang pelimpah (m)	Tinggi dari dasar aliran z (mm)	Tekanan Aliran N/m ²
6,5	0	31,2
	1	-100,4
7,5	0	21,2
	1	-198,4

Sumber: hasil penelitian 2011

Tabel. Tekanan pada debit 11,4 l/s dan kemiringan dasar aliran 20°

Jarak dari ambang pelimpah (m)	Tinggi dari dasar aliran z (mm)	Tekanan Aliran N/m ²
6,5	0	22,4
	1	-81,6
7,5	0	12,8
	1	-130,6

Sumber: hasil penelitian 2011

Berdasarkan tabel di atas nampak bahwa di dasar aliran atau tinggi dari dasar aliran (z) 0 mm tekanan cenderung positif. Makin jauh dari ambang spillway makin rendah tekanannya. Di atas dasar aliran sedikit (z=+ 1mm) tekanan cenderung negative. Makin besar debit yang mengalir, makin tinggi tekanan negatifnya. Di samping itu, makin tinggi kemiringan dasar aliran makin besar tekanan negatifnya.

Pembahasan

Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 9,5 l/s adalah 157,2 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 11,4 l/s adalah 157,69 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 20,9 l/s adalah 158,07 N/m².

Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 9,5 l/s adalah 164,0219 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 11,4 l/s adalah 171,8636 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 20,5 l/s adalah 235,9513 N/m².

Nilai tegangan gesek maksimal saluran untuk dasar tersusun dari pasir halus adalah 2,0 N/m². Nilai tegangan gesek maksimal saluran untuk dasar tersusun dari kerikil halus adalah 3,7 N/m². Nilai tegangan gesek maksimal saluran untuk dasar tersusun dari kerikil kasar adalah 14,7 N/m². Nilai tegangan gesek maksimal saluran untuk dasar tersusun dari kerakal dan batuan bulat adalah 44 N/m² (Feather Stone dan Nalluri, 1995: 192).

Analisis data yang berkaitan dengan erosi di dasar saluran digunakan kriteria perbandingan antara tegangan gesek τ_0 dan tegangan gesek maksimal τ_{0maks} . Jika $\tau_0 > \tau_{0maks}$ maka erosi di dasar saluran diduga dapat terjadi (Chow, 1992: 150). Berdasarkan nilai tegangan gesek di atas nampak bahwa semua nilai berada di atas atau lebih besar dibandingkan dengan nilai tegangan gesek maksimal atau $\tau_0 > \tau_{0maks}$, dengan demikian erosi di dasar saluran diduga selalu terjadi.

Berdasarkan hasil penelitian mengenai tekanan di dasar saluran curam diketahui bahwa hanya posisi di dasar atau 0 mm nilai tekanan p_h adalah positif, yaitu antara nilai +9,81 sampai dengan +31,2 N/m²; sementara itu, pada posisi di atas dasar yaitu antara +1 mm sampai nilai tekanan adalah negatif, yaitu antara nilai -78,48 sampai dengan -4198,4 N/m². Menurut Munson, Young dan Okiishi (2004: 527) bahwa nilai tekanan uap air atau p_v pada suhu 5°C adalah 1177,2 N/m², sedangkan pada suhu 10°C adalah 2452,5 N/m². Dengan demikian semua nilai tekanan di dasar aliran lebih kecil dibandingkan tekanan uap air atau $p_h < p_v$. Sementara itu, analisis data yang berkaitan dengan erosi di dasar saluran digunakan kriteria perbandingan antara p_h dan p_v . Jika $p_h < p_v$ maka erosi di dasar saluran diduga dapat terjadi (Chanson, 1988: 5). Oleh karena itu dapat dikatakan, erosi di dasar saluran diduga selalu terjadi.

Berdasarkan dua kondisi yaitu tegangan gesek τ_0 dan tekanan p_h , dapat dikatakan bahwa erosi di dasar saluran yang mempunyai kemiringan dasar antara 13° sampai dengan 20° , serta debit antara 9,5 l/s sampai dengan 20,9 l/s diduga selalu terjadi.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Pertama, nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 9,5 l/s adalah 157,2 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 11,4 l/s adalah 157,69 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 13° serta debit aliran sebesar 20,9 l/s adalah 158,07 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 9,5 l/s adalah 164,0219 N/m². Nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 11,4 l/s adalah 171,8636 N/m². nilai tegangan gesek τ_0 pada sudut kemiringan dasar flum atau talang sebesar 20° serta debit aliran sebesar 20,9 l/s adalah 235,9513 N/m². Nilai tegangan gesek maksimal saluran untuk dasar tersusun dari pasir halus adalah 2,0 N/m². Nilai tegangan gesek maksimal saluran untuk dasar tersusun dari kerikil halus adalah 3,7 N/m². Nilai tegangan gesek maksimal saluran untuk dasar tersusun dari kerikil kasar adalah 14,7 N/m². Nilai tegangan gesek maksimal saluran untuk dasar tersusun dari kerakal dan batuan bulat adalah 44 N/m². Berdasarkan nilai tegangan gesek di atas nampak bahwa semua nilai berada di atas atau lebih besar dibandingkan dengan nilai tegangan gesek maksimal atau $\tau_0 > \tau_{0maks}$, dengan demikian erosi di dasar saluran diduga selalu terjadi.

Kedua, nilai tekanan p_h di dasar saluran curam atau 0 mm adalah positif, yaitu antara nilai +9,81 sampai dengan =31,2 N/m²; sementara itu, pada posisi di atas dasar yaitu antara +1 mm nilai tekanan adalah negatif, yaitu antara nilai -78,48 sampai dengan -198,4 N/m². Nilai tekanan uap air atau p_v pada suhu 5°C adalah 1177,2 N/m², sedangkan pada suhu 10°C adalah 2452,5 N/m². Dengan demikian semua nilai tekanan di dasar aliran lebih kecil dibandingkan tekanan uap air atau $p_h > p_v$. Oleh karena itu, erosi di dasar saluran diduga selalu terjadi.

Saran

Berdasarkan simpulan penelitian diketahui bahwa nilai tegangan gesek τ_0 sudah lebih besar dibandingkan dengan tegangan gesek maksimal τ_{0maks} yang mempunyai makna bahwa di saluran itu akan terjadi erosi dasar yang membahayakan stabilitas saluran. Di samping itu, diketahui juga bahwa telah terjadi tekanan negatif di dasar saluran, yang mana sudah jauh lebih besar dibandingkan tekanan uap air $p_h > p_v$, sehingga di saluran itu juga akan terjadi erosi dasar yang membahayakan stabilitas saluran. Oleh karena itu, jika di saluran terjadi seperti kondisi

di atas maka saluran harus di lining atau dibuat pasangan yang solid atau sebaiknya saluran dikonstruksi dengan beton bertulang agar stabilitasnya terjaga sehingga aman.

DAFTAR PUSTAKA

- Chanson, H., 1988, "Study of air entrainment and aeration devices on spillway model", *Thesis Doctor of Philosophy in Civil Engineering*, University of Canterbury Christchurch, New Zealand.
- Chow, V. T., 1992, *Hidrolika Saluran Terbuka*, Terjemahan, Nensi Rosalina, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Falvey, H. T., 1980, *Air Water Flow Hydraulic Structure*, United States Departement of Interior, Water and Power Resources Service.
- Kironoto, A., B., 2007, "Penggunaan metode Clauser untuk penentuan kecepatan gesek u_* , pada saluran Mataram tampang segi segi empat", *Media Teknik No. 4, Th. XXIX Edisi November*, pp. 253-260.
- Munson, B. R., Young, D. F., dan Okiishi, T. H., 2004, *Mekanika Fluida*, Terjemahan Harinaldi dan Budiarto, UI, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Wood, R. I., 1983, "Uniform region of self aerated flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 193, No. 3, Maret. Pp. 447-461.