

Aliran Pada Lubang Gerusan: Model Fisik dan Model Numerik

Flow in The Scouring Hole: Physical and Numerical Models

Marcio Tahalele^{1*)}, Radiana Triatmadja¹, Nur Yuwono¹, Warniyati²

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura, Ambon, Indonesia.

Article info: Research Article / review

DOI:

10.21776/ub.pengairan.2022.013.02.11

Kata kunci:

Tsunami; Gerusan; Jet Air;
DualSPHysics.

Keywords:

Tsunami; Scouring; Water Jet;
DualSPHysics.

Article history:

Received: 21-07-2022

Accepted: 17-10-2022

*)Koresponden email:

marciotahalele@mail.ugm.ac.id

© 2022 Marcio Tahalele, Radiana Triatmadja, Nur Yuwono, Warniyati



Creative Commons License

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

Abstrak

Kejadian tsunami Samudra Hindia tahun 2004 dan kejadian tsunami yang melanda Jepang tahun 2011 mengakibatkan kerusakan serta kehancuran yang sangat besar dari segi sarana, prasarana, lingkungan serta memakan korban jiwa. Mekanisme gerusan yang dihasilkan oleh tsunami berbeda dari mekanisme gerusan yang terjadi pada jembatan, dermaga dan bendung. Penelitian ini menjelaskan tentang proses terjadinya gerusan dan pola aliran pada saat gerusan mencapai kondisi kesetimbangan yang diakibatkan aliran jet air. Penelitian ini membandingkan hasil model fisik (eksperimen) dan model numerik (simulasi SPH). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kedalaman gerusan (d_s) dipengaruhi oleh faktor pengaliran. Proses pembentukan lubang gerusan mengalami empat fase, yaitu fase awal, fase pengembangan, fase stabilisasi dan fase ekuilibrium. Validasi dilakukan untuk membandingkan hasil simulasi SPH dan data eksperimen di laboratorium terkait pola aliran dan debit outlet (Q_{Out}). Pola aliran pada simulasi SPH merepresentasikan pola aliran yang terjadi pada eksperimen di laboratorium. Hasil antara eksperimen dan simulasi SPH untuk Q_{Out} memberikan selisih sebesar 4,69% - 8,48%. Perbedaan hasil antara eksperimen dan simulasi SPH disebabkan oleh faktor gesekan batas, kondisi batas, dan penggambaran bentuk lubang gerusan.

Abstract

The 2004 Indian Ocean tsunami and the 2011 Japan tsunami caused massive damage and destruction to facilities, infrastructure, environment, as well as took the lives of many people. The scour mechanism caused by the tsunami differs from the scour mechanism on bridges, piers, and weirs. This study describes the scouring process and the flow pattern when the scouring reaches an equilibrium state caused by the flow of water jets. This research compares the results of the physical model (experimental) and numerical model (SPH simulation). The research showed that the flow factor influenced the scour depth (d_s). The process of forming the scour hole has four phases: the starting phase, the development phase, the stabilization phase, and the equilibrium phase. The validation was performed to compare the results of the SPH simulation and experimental data in the laboratory regarding flow pattern and outlet discharge (Q_{Out}). The flow pattern in the SPH simulation represents the flow pattern that occurs in experiments in the laboratory. The results between the experiment and the SPH simulation for Q_{Out} give a difference of 4.69% - 8.48%. The differences in the result between the experiment and the SPH simulation were due to boundary friction factors, boundary conditions, and the depiction of the shape of the scour hole.

Kutipan: Tahalele, M., Triatmadja, R., Yuwono, N., Warniyati. (2022). Aliran pada Lubang Gerusan: Model Fisik dan Model Numerik. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 13(2), 258-272. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2022.013.02.11>

1. Pendahuluan

Kerusakan pada daratan yang diakibatkan oleh tsunami terjadi pada saat *run-up* dan *run-down*. Kecepatan pada ujung depan *run-up* tsunami memiliki gaya yang dapat merusak, mengangkat serta menggeser semua hambatan yang dilalui. Setelah tsunami berakhir, daratan dipenuhi oleh puing-puing, banyak bangunan yang rusak serta banyak memakan korban jiwa. Kejadian tsunami Samudra Hindia pada tahun 2004 dan tsunami yang melanda Tohoku, Jepang pada tahun 2011 mengakibatkan kerusakan dan kehancuran yang sangat besar dari segi sarana, prasarana, lingkungan hingga memakan korban jiwa (Latief et al. 2007 ; Yeh & Li 2008 ; Mori et al. 2011 ; Supassri et al. 2012 ; Kato et al. 2012 ; Raby et al. 2015). Tsunami juga menyebabkan gerusan di pantai. Mekanisme gerusan yang dihasilkan oleh tsunami, sebagian berbeda dari mekanisme yang berkontribusi pada proses gerusan yang terjadi di jembatan ataupun dermaga, baik di lingkungan sungai maupun bangunan lepas pantai. Sebagai contoh, gerusan yang diakibatkan oleh limpasan tsunami terjadi dalam kurun waktu yang cukup singkat (Yeh et al. 1999) tetapi bisa berakibat fatal.

Triatmadja et al. (2011) menjelaskan bahwa kedalaman gerusan di belakang tembok vertikal bergantung pada tinggi limpasan gelombang. Dimana, limpasan tsunami yang lebih tinggi menghasilkan bilangan Froude yang lebih tinggi, sehingga mengakibatkan gerusan yang lebih dalam. Warniyati et al. (2019) menjelaskan bahwa kedalaman gerusan maksimum dan panjang gerusan meningkat seiring dengan bertambahnya durasi limpasan tsunami. Oleh sebab itu gerusan akibat limpasan tsunami dapat disimulasikan sebagai aliran air di atas bendung maupun aliran jet air. Salah satu bentuk aliran jet air, yaitu jet terjun. Jet terjun mengacu pada semburan air yang mengenai permukaan bebas karena pembuangan dari saluran keluar maupun limpasan air (Hoffmans & Verheij 1997). Gerusan yang diakibatkan oleh jet air yang menabrak telah lama menjadi fokus penelitian para peneliti. Sebagian besar penelitian telah mempertimbangkan kesetimbangan kedalaman gerusan pada material dasar, dimana kesetimbangan kedalaman gerusan tercapai ketika partikel sedimen yang terlepas dari dasar tidak dapat meninggalkan lubang gerusan (Rajaratnam 1981; Adduce & Sciortino 2006; Ni et al. 2014; Taştan et al. 2016; Hou et al. 2016). Gerusan dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu gerusan umum, gerusan terlokalisir dan gerusan lokal. Ketiga gerusan diatas penting dibedakan karena perubahan kedalaman gerusan terhadap waktu serta hubungan antara kedalaman gerusan dan kecepatan aliran (Raudkivi & Ettema 1983).

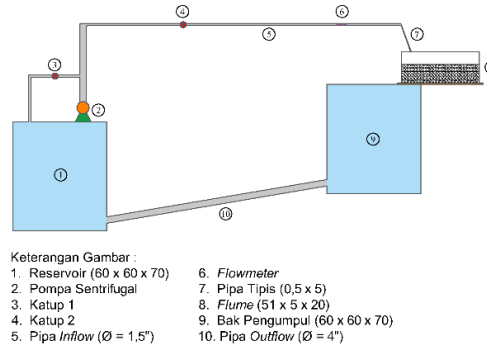
Penelitian ini menjelaskan tentang proses terjadinya gerusan dan pola aliran pada saat gerusan mencapai kesetimbangan yang diakibatkan aliran jet air, baik melalui eksperimen maupun simulasi numerik menggunakan metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) dengan bantuan aplikasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis kode *DualSPHysics*. Penelitian ini juga membandingkan hasil model fisik (eksperimen) dan model numerik (simulasi SPH).

2. Bahan dan Metode

2.1 Model Fisik

Model fisik gerusan akibat limpasan tsunami yang dimodelkan menggunakan jet air didasarkan pada penelitian pengujian awal gerak material (Warniyati 2021). Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Hidraulika, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Penelitian ini menggunakan alat yang dirangkai oleh Warniyati 2021 dengan elemen seperti pada Gambar 1. Saluran terbuka (*flume*) dengan panjang 0,51 m; lebar 0,05 m, dan tinggi 0,2 m. *Flume* memiliki reservoir dengan panjang 0,6 m; lebar 0,6 m, dan tinggi 0,7 m. *Flume* juga dilengkapi dengan pompa sentrifugal dengan kapasitas 4 l/s. Selain itu, *flume* juga dilengkapi dengan *flowmeter* untuk mengukur debit air di instalasi *flume*. *Flume* dilengkapi dengan pipa tipis yang dibuat sebagai *inlet* jet air dengan ketebalan (*b*) 0,005 m dan lebar 0,05 m dengan kemiringan *inlet* 70° terhadap bidang horizontal *flume*. Sudut *inlet* merupakan hasil penelitian sudut limpasan tsunami pada *seawall* (Warniyati 2021).

Bahan gerusan menggunakan agregat dengan diameter rata-rata 0,02 m dengan berat jenis 2.500 kg/m³. Ketebalan komposisi bahan gerusan yang digunakan dalam pengujian adalah 0,12 m. Di sisi hilir, *flume* dibuat terbuka dan dipasang kawat *strimin* agar air bisa mengalir ke hilir, tetapi material tidak keluar dari *flume*. Di sisi hilir *flume* terdapat tangki pengumpul dengan ukuran panjang 0,6 m; lebar 0,6 m dan tinggi 0,7 m.



Gambar 1. Model Fisik Penelitian Gerusan Akibat Jet Air (Warniyati 2021)

2.2 Model Numerik

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) ditemukan untuk mensimulasikan fenomena *non-axisymmetric* dalam bidang astrofisika (Lucy 1977; Gingold & Monaghan 1977). Selain itu, metode ini banyak digunakan dalam banyak bidang terutama dalam bidang dinamika fluida. Penggunaan SPH dapat diaplikasikan dalam berbagai permasalahan, yaitu dinamika gas, medan magnet (gaya dan arus), masalah dan dampak pembentukan bulan, fragmentasi dan tabrakan awan, relativitas umum dan khusus, aliran yang hampir tak terkompresi, dll.

Monaghan, 1992 menjelaskan bahwa dasar dari SPH, yaitu menggunakan metode interpolasi yang disebut dengan *integral interpolant* dengan persamaan sebagai berikut:

$$A(r) = \int_{\Omega} A(r') W(r - r', h) dr' \quad (1)$$

dimana, h adalah panjang penghalusan, r adalah posisi vektor, dan $W(r - r', h)$ adalah fungsi kernel atau fungsi pembobotan. Persamaan 1 dapat diubah ke dalam bentuk diskrit, yaitu persamaan fungsi pada partikel a .

$$A(r) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W_{ab} \quad (2)$$

dimana, m_b dan ρ_b adalah massa dan massa jenis; volume partikel dapat dirumuskan $V_b = \frac{m_b}{\rho_b}$ dan posisi vektor $r = r_a$, $W_{ab} = W(r_a - r_b, h)$ adalah fungsi pemberat atau kernel antara dua partikel a dan b .

2.2.1 Fungsi Pemberat (Kernel Function)

Liu & Liu (2003) menjelaskan kinerja model SPH bergantung pada fungsi pembobotan yang harus memenuhi beberapa kondisi seperti kepositifan (*positivity*), dukungan kompak (*compact support*) dan normalisasi (*normalization*). Kernel dinyatakan sebagai fungsi dari jarak non-dimensi antar partikel $q = \frac{r}{h}$, dengan r adalah jarak antar partikel a dan b . Parameter h mengontrol ukuran area di sekitar partikel a dimana kontribusi dari partikel lain tidak dapat diabaikan. *Kernel function* yang digunakan adalah *Quintic* yang dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$W(r, h) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (3)$$

2.2.2 Persamaan Momentum

Persamaan konservasi momentum dalam SPH dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \Gamma \quad (4)$$

dimana, Γ mengacu pada istilah disipatif; v adalah kecepatan; P adalah tekanan; ρ adalah massa jenis dan $g = (0;0;-9,81)$ adalah percepatan gravitasi. Istilah disipatif yang digunakan adalah Viskositas Artifisial (*Artificial Viscosity*) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (5)$$

dimana, Π_{ab} merupakan istilah viskositas yang dirumuskan sebagai berikut,

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab}}{\rho_{ab}} & v_{ab} \cdot r_{ab} < 0 \\ 0 & v_{ab} \cdot r_{ab} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

dimana, $\bar{\rho}_{ab} = \frac{\rho_a + \rho_b}{2}$; $r_{ab} = r_a - r_b$; $\mu_{ab} = \frac{h v_{ab} \cdot r_{ab}}{r_{ab}^2 + \eta^2}$; $v_{ab} = v_a - v_b$; $\bar{c}_{ab} = 0,5(c_a + c_b)$ yang berarti kecepatan suara; $\eta^2 = 0,01h^2$ dan α adalah parameter bebas.

2.2.3 Persamaan Kontinuitas

Perubahan massa jenis fluida dalam SPH dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (7)$$

2.2.4 Equation of State

Monaghan (1994) menjelaskan fluida dalam formula SPH diperlakukan sebagai kompresibel lemah dan persamaan keadaan digunakan untuk menentukan tekanan fluida. Kompresibilitas disesuaikan untuk memperlambat kecepatan suara sehingga langkah waktu dalam model (menggunakan kondisi *Courant* berdasarkan kecepatan suara) masuk akal. Batasan lain pada kompresibilitas adalah membatasi kecepatan suara setidaknya sepuluh kali lebih cepat dari kecepatan fluida maksimum, dengan menjaga variasi massa jenis kurang dari 1%.

Monaghan et al. (1999); Batchelor (1974) menjelaskan hubungan antara tekanan dan massa jenis mengikuti persamaan sebagai berikut:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (8)$$

dimana, $\gamma = 7$, $B = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma}$, $\rho_0 = 1000 \frac{kg}{m^3}$ merupakan massa jenis referensi dan $c_0 = c(\rho_0) = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}} \Big|_{\rho_0}$

kecepatan suara pada referensi massa jenis.

2.2.5 Konservasi Energi

Energi total dari sebuah sistem dapat dihitung dengan menjumlahkan energi kinetik, energi potensial dan energi panas. Energi termal yang terkait dengan setiap partikel menggunakan viskositas buatan (*Artificial Viscosity*) dihitung menggunakan persamaan berikut yang diberikan oleh Monaghan (1992).

$$\frac{de_a}{dt} = \frac{1}{2} \sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (9)$$

dimana, Π_{ab} merupakan istilah viskositas, yang dapat dihitung dengan menggunakan metode pendekatan berbeda.

Simulasi model numerik gerusan akibat limpasan tsunami yang dimodelkan dengan jet air dilakukan untuk mensimulasikan pola aliran pada lubang gerusan. Simulasi model numerik mensimulasikan gerusan yang terjadi pada saat $t = 300$ s. Simulasi model numerik akan menghasilkan data elevasi muka air dan kecepatan aliran, baik pada lubang gerusan maupun pada setiap titik pengujian. Data di atas dapat menghitung debit *overflow* (Q_o) dan debit porus (Q_p).

Model numerik gerusan akibat *water jet* disimulasikan dengan menggunakan metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* dengan bantuan *software open source computational fluid dynamics* (CFD) berbasis kode *DualSPHysics*. *DualSPHysics* sendiri menggunakan bahasa program yang lebih mudah (C++) dan hardware untuk komputasi dilengkapi dengan *Graphics Processing Units* (GPU) yang telah didukung dengan *Compute Unified Device Architecture* (CUDA), (Crespo et al. 2013).

Selain aplikasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis kode *DualSPHysics*, beberapa *software open source* seperti *SketchUp*, *Notepad++*, *ParaView* dan *Blender* digunakan untuk menjalankan simulasi dalam penelitian ini.

3. Hasil dan Pembahasan

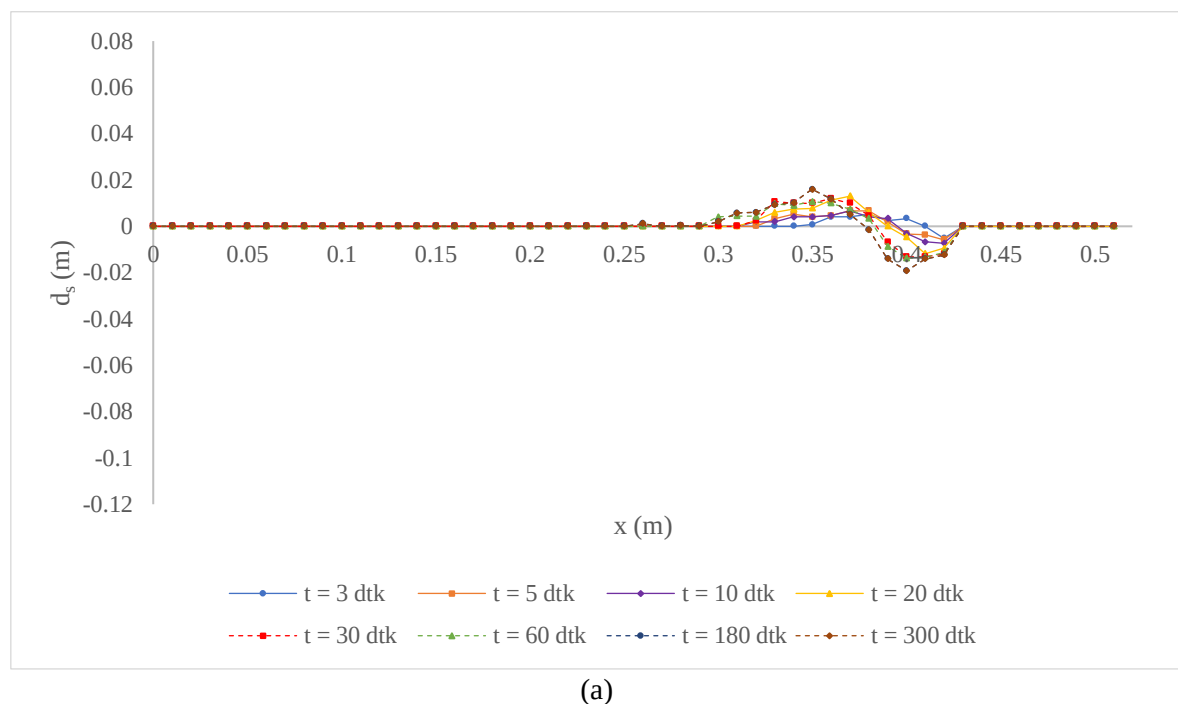
3.1. Data Eksperimen

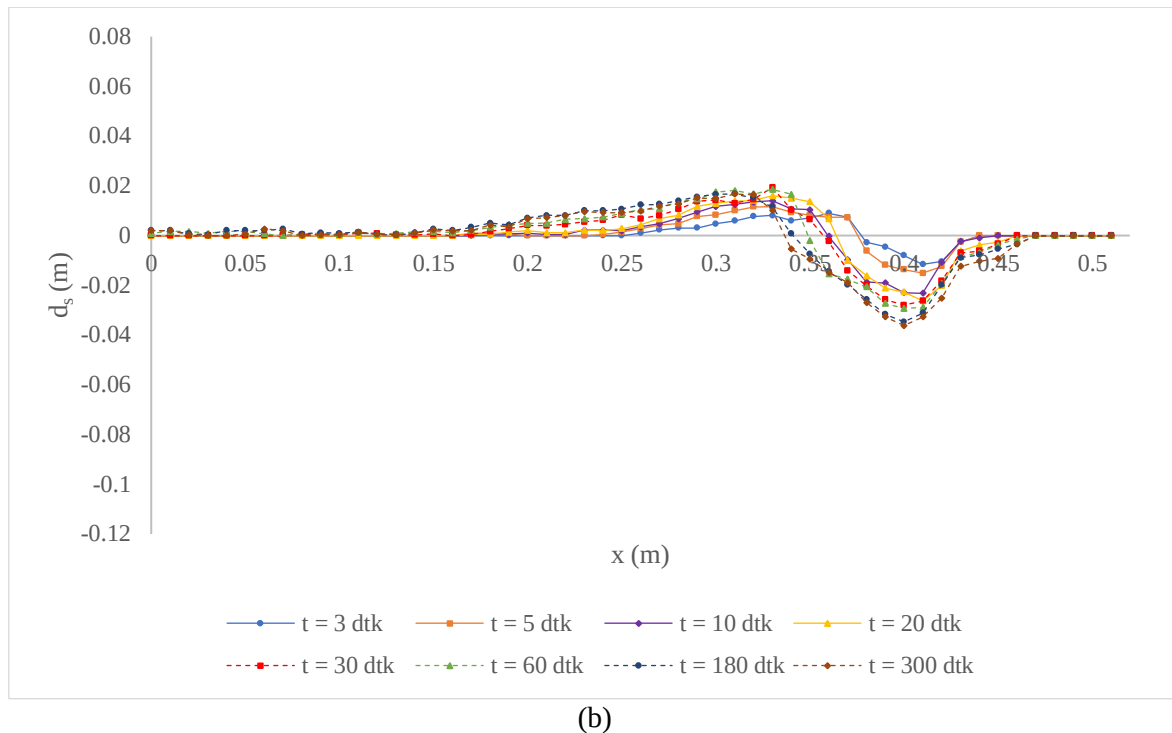
Rincian model fisik (eksperimen) di laboratorium telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Debit *inlet* jet air yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0,5 l/s dan 0,6 l/s. Eksperimen dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap debitnya. Eksperimen yang dilakukan menghasilkan data kedalaman gerusan (d_s), elevasi muka air (El. MA) dan debit *outlet* (Q_{Out}). Debit *outlet* (Q_{Out}) dibagi menjadi debit *overflow* (Q_O) dan debit porus (Q_P).

Pengumpulan data kedalaman gerusan (d_s) dilakukan pada kondisi $t = 3$ detik; $t = 5$ detik; $t = 10$ detik; $t = 20$ detik; $t = 30$ detik; $t = 60$ detik; $t = 180$ detik dan $t = 180$ detik. Data profil gerusan diambil dengan melihat sumbu x dan sumbu y dengan asumsi bahwa perubahan sumbu z terhadap sumbu y mengalami perubahan sebesar 0,004 m. Hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Profil Gerusan Kondisi $t = 300s$ (a) $Q = 0,5$ l/s (b) $Q = 0,6$ l/s





Gambar 3. Perkembangan Kedalaman Gerusan (a) $Q = 0,5 \text{ l/s}$ (b) $Q = 0,6 \text{ l/s}$

Pengukuran volume dan waktu pengaliran untuk perhitungan debit outlet (Q_{Out}) dibagi menjadi tiga jarak pelat dari hilir flume: 0,04 m, 0,07 m dan 0,1 m dari hilir saluran. Hasil perhitungan debit outlet (Q_{Out}) dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Debit Outlet (Q_{Out})

$Q_{\text{In}} (\text{l/s})$	$Q_{\text{O}} (\text{l/s})$	$Q_{\text{P}} (\text{l/s})$
0,5	0,2141	0,2747
0,6	0,2928	0,2848

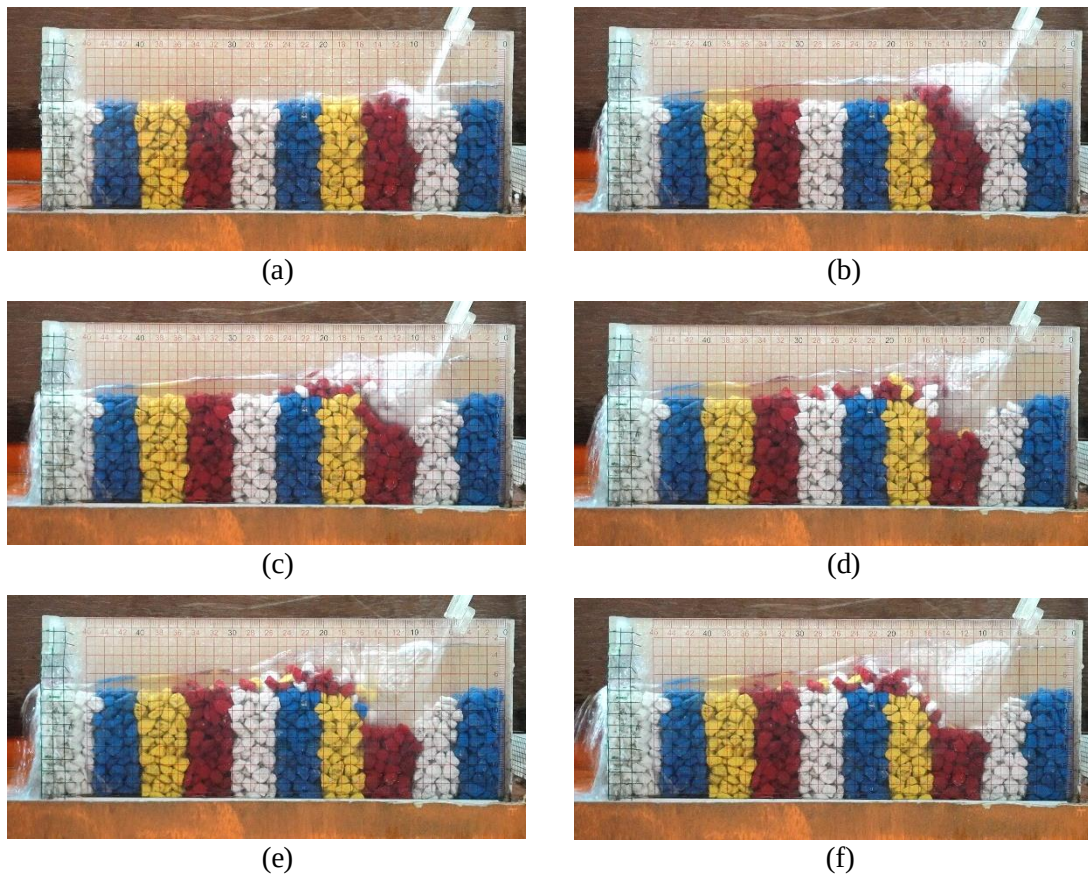
Hasil eksperimen di laboratorium memperlihatkan bahwa faktor penting dalam proses pembentukan lubang gerusan adalah faktor pengaliran. Faktor pengaliran erat kaitannya dengan bilangan Froude (Fr) dan waktu pengaliran (t). Bilangan Froude (Fr) berhubungan dengan kecepatan aliran yang dihasilkan oleh *inlet* jet air. Nilai bilangan Froude (Fr) pada penelitian ini untuk $Q_{\text{In}} 0,5 \text{ l/s}$ dan $Q_{\text{In}} 0,6 \text{ l/s}$ yaitu 9,0305 dan 10,8366. Pada kondisi kecepatan aliran yang kecil, kedalaman gerusan (d_s) membutuhkan waktu lebih cepat untuk mencapai tahap kesetimbangan. Sedangkan, pada kecepatan aliran yang tinggi kedalaman gerusan (d_s) mencapai kondisi setimbang dalam waktu yang cukup lama.

Dari hasil eksperimen dapat dilihat bahwa pembentukan lubang gerusan mengalami empat fase, yaitu fase awal, fase pengembangan, fase stabilisasi dan fase kesetimbangan.

- Fase awal digambarkan bahwa aliran pada lubang gerusan hampir seragam dalam arah membujur. Aliran dalam lubang gerusan mulai mengisi media porus batuan.
- Fase pengembangan digambarkan bahwa kedalaman gerusan meningkat secara signifikan, tetapi bentuk lubang gerusan tetap sama. Pada fase ini terdapat gaya angkat (*Lift Force*) dan gaya seret (*Drag Force*) yang diakibatkan oleh kecepatan aliran. Dimana gaya angkat (F_L) dan gaya geser (F_D) lebih besar dari berat butiran (W_{In}) atau ($F_L > W_{\text{In}}$ dan $F_D > W_{\text{In}}$). Oleh sebab itu butiran lebih mudah terangkat dan tergeser sehingga mengakibatkan kedalaman gerusan meningkat secara signifikan.
- Fase stabilisasi digambarkan bahwa laju perkembangan kedalaman lubang gerusan maksimum menurun secara signifikan.

- d. Fase ekuilibrium digambarkan sebagai fase dimana dimensi lubang gerusan tidak lagi berubah secara signifikan, dimana kondisi gerusan sudah mencapai tahap kesetimbangan. Selain itu kedalaman gerusan (d_s) dikatakan mencapai kondisi setimbang, ketika agregat tidak dapat meninggalkan lubang gerusan. Dengan kata lain agregat di dalam lubang gerusan hanya bergerak di dalam lubang gerusan mengikuti pola aliran air yang berada di dalam lubang gerusan.

Empat fase pembentukan lubang gerusan diatas dapat dilihat pada Gambar 4 dan kondisi gerusan mencapai kesetimbangan yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 5 untuk debit pengaliran (Q_{in}) 0,6 l/s .



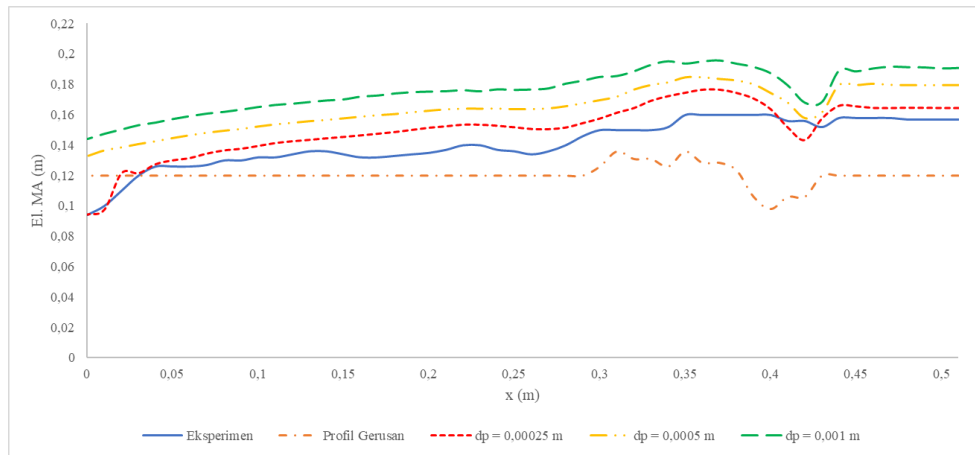
Gambar 4. Fase Pembentukan Lubang Gerusan (a) Fase Awal, (b) (c) (d) Fase Pengembangan, (e) Fase Stabilisasi, (f) Fase Ekuilibrium



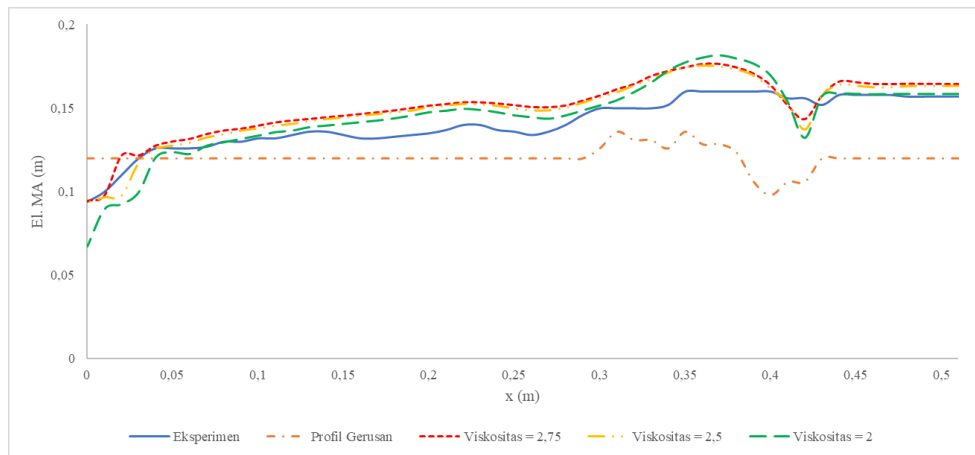
Gambar 5. Kondisi Gerusan dalam Keadaan Setimbang

Dari hasil eksperimen diamati bahwa terjadi olakan atau pusaran di dalam lubang gerusan. Pola aliran didalam lubang gerusan mengikuti bentuk lubang gerusan. Kecepatan aliran di dalam lubang gerusan menghasilkan kecepatan arah vertikal dan kecepatan arah horizontal.

Parameter yang digunakan dalam simulasi SPH dapat ditunjukkan pada Tabel 3. Simulasi ini cukup mahal dalam hal waktu perhitungan karena jumlah partikel yang tinggi. Dibutuhkan waktu 4,5 jam – 10 jam untuk menjalankan perhitungan simulasi 5 detik. Hasil simulasi SPH dapat dilihat pada Gambar 8 dan pola aliran yang dihasilkan dalam simulasi SPH dapat dilihat pada Gambar 9.



(a)

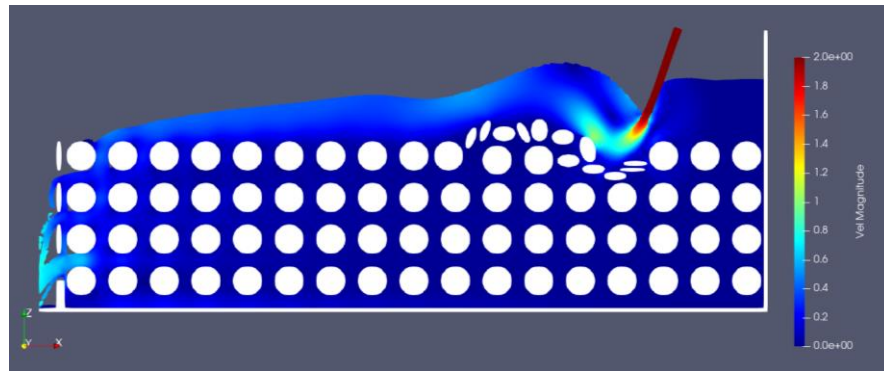


(b)

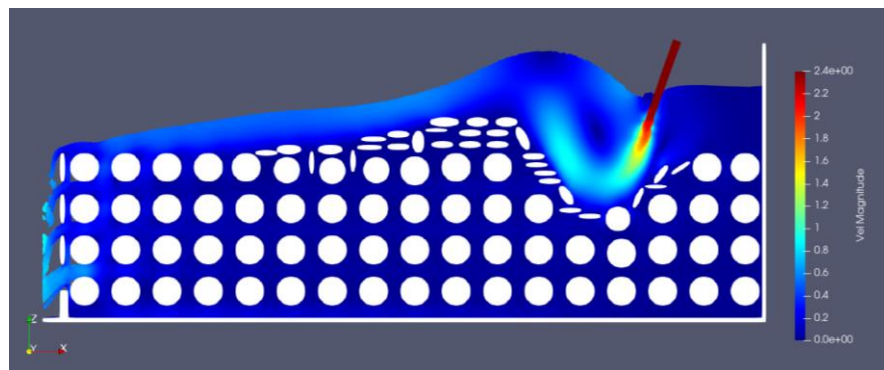
Gambar 7. Trial and Error Simulasi SPH dengan $Q = 0,5 \text{ l/s}$ (a) Ukuran Partikel (dp) (b) Viskositas

Tabel 3. Parameter Simulasi SPH

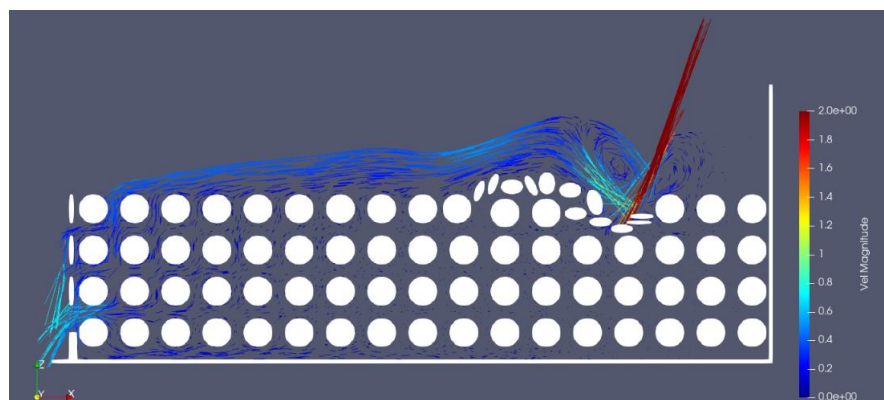
Parameter	Pilihan
Ukuran Domain (m)	0,9 x 0,002 x 0,302
CFL Number	0,2
Speed of Sound	0
Kernel	Wendland
Time Step	Symplectic
Viskositas	Viskositas Artifisial ($\alpha = 2,75$)
Smoothing Length (m)	0,00035
Ukuran Partikel, dp (m)	0,00025
Visco Bound Factor	0
DDT	Fourtakas (Full)
DDT Value	0,1
Time Min (s)	0,05
Time Max (s)	5



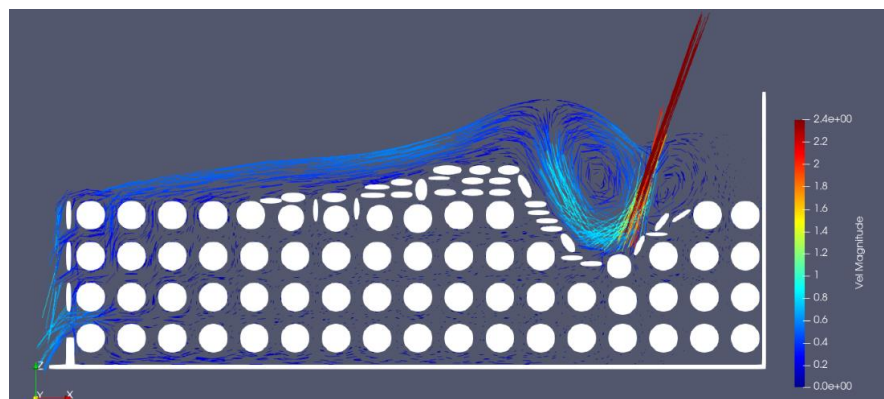
(a)



(b)

Gambar 8. Hasil Simulasi SPH (a) $Q = 0,5 \text{ l/s}$ (b) $Q = 0,6 \text{ l/s}$ 

(a)



(b)

Gambar 9. Pola Aliran Simulasi SPH (a) $Q = 0,5 \text{ l/s}$ (b) $Q = 0,6 \text{ l/s}$

Pola aliran yang dihasilkan pada simulasi SPH (Gambar 7 dan Gambar 8) sudah menyerupai dengan pola aliran yang dihasilkan di laboratorium (Gambar 2). Pola aliran di dalam lubang gerusan pada simulasi SPH merepresentasikan pola aliran yang terjadi pada eksperimen di laboratorium. Gambar 10 memperlihatkan hasil digitasi atau representasi pola aliran yang terjadi pada simulasi SPH ke hasil eksperimen di laboratorium. Namun terdapat perbedaan pola aliran di dalam lubang gerusan pada simulasi SPH. Dimana, pola aliran pada lubang gerusan memiliki kecenderungan untuk menaikkan elevasi muka air. Kecenderungan naiknya elevasi muka air dikarenakan kecepatan aliran yang dihasilkan di dalam lubang gerusan pada simulasi SPH sebagian besar menghasilkan kecepatan arah vertikal. Sedangkan, kecepatan aliran yang dihasilkan pada arah horizontal sangat kecil. Hal ini tidak sesuai dengan kenyataan di laboratorium. Warna yang ditampilkan dalam hasil simulasi SPH merupakan *velocity magnitude*. Kecepatan aliran dalam lubang gerusan dapat dilihat pada Tabel 4.



(a)



(b)

Gambar 10. Representasi atau Digitasi Pola Aliran pada Simulasi SPH ke Hasil Eksperimen (a) $Q = 0,5 \text{ l/s}$ (b) $Q = 0,6 \text{ l/s}$

Tabel 4. Kecepatan Aliran pada Lubang Gerusan

$Q_{in} \text{ (l/s)}$	$U_{sh} \text{ (l/s)}$
0,5	0,0187 – 0,9617
0,6	0,0302 – 1,4839

3.2.2. Debit Outlet (Q_{Out})

Uji validasi juga membandingkan debit *outlet* (Q_{Out}) yang terdiri dari debit *overflow* (Q_O) dan debit porus (Q_P) pada eksperimen di laboratorium dan simulasi SPH. Hasil perbandingan debit *outlet* (Q_{Out}) antara eksperimen dan simulasi SPH dapat dilihat pada Tabel 5.

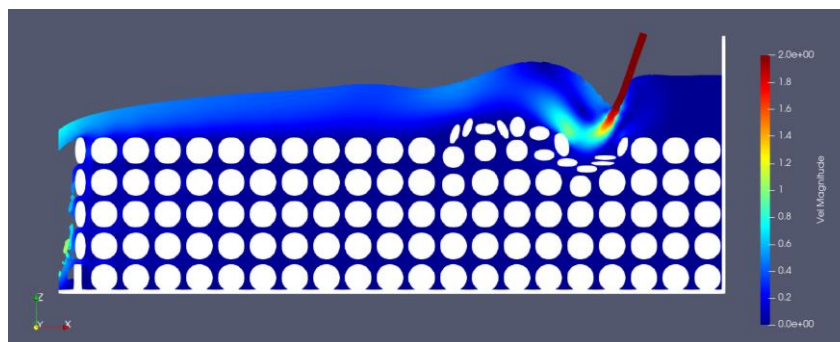
Tabel 5. Perbandingan Debit *Outlet* (Q_{Out}) Eksperimen dan Simulasi SPH

Q_{In} (l/s)	Q_O Lab (l/s)	Q_P Lab (l/s)	Q_O SPH (l/s)	Q_P SPH (l/s)	Q_O Lab (%)	Q_P Lab (%)	Q_O SPH (%)	Q_P SPH (%)
0,5	0,2141	0,2747	0,1766	0,3234	43,8011	56,1989	35,3208	64,6792
0,6	0,2928	0,2848	0,2760	0,3240	50,6926	49,3074	46,0026	53,9974

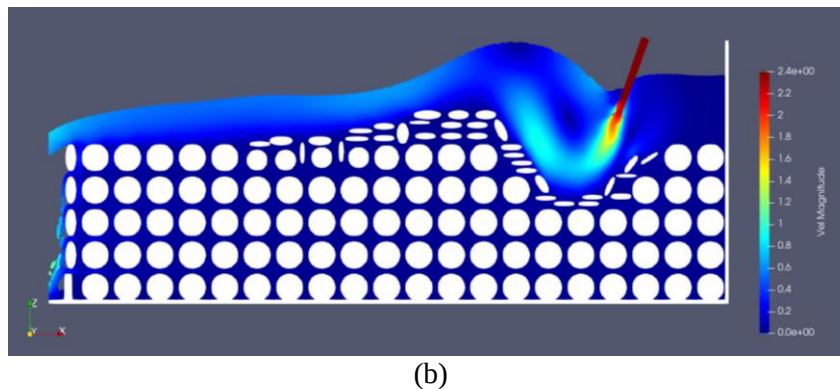
Dari hasil perbandingan debit *outlet* (Q_{Out}) eksperimen dan simulasi SPH memperlihatkan bahwa nilai Q_O untuk simulasi SPH menghasilkan nilai debit yang rendah dan nilai Q_P untuk simulasi SPH menghasilkan nilai debit yang tinggi. Hal ini terjadi karena faktor penggambaran model fisik untuk simulasi SPH. Kerapatan antar butiran pada simulasi SPH mempengaruhi hasil debit *outlet* (Q_{Out}). Pengaruh kerapatan antar butiran terhadap hasil debit *outlet* (Q_{Out}) dibuktikan dengan *trial and error*. Dari hasil *trial and error* pengaruh kerapatan antar butiran memperlihatkan bahwa semakin rapat jarak antar butiran, maka nilai Q_O untuk simulasi SPH semakin besar dan nilai Q_P semakin kecil. Selain itu, hasil *trial and error* pengaruh kerapatan antar butiran memperlihatkan bahwa kerapatan ideal untuk mendapatkan nilai Q_{Out} simulasi SPH yang mendekati nilai Q_{Out} eksperimen di laboratorium berkisar antara 0,5 cm – 1 cm. Pengaruh kerapatan antar butiran terhadap nilai Q_{Out} dapat dilihat pada Tabel 6. Gambar 11 memperlihatkan hasil simulasi SPH dengan kerapatan antar butiran 0,5 cm. Dengan melihat hasil *trial and error*, maka diambil jarak ideal atau jarak optimum antar butiran untuk simulasi SPH yaitu 1 cm. Pertimbangan ini dengan melihat perubahan elevasi muka air di sepanjang *flume* pada simulasi SPH, dimana semakin rapat jarak antar butiran maka terjadi kenaikan elevasi muka air di hilir *flume*. Selain pengaruh kerapatan antar butiran, perbedaan nilai viskositas sangat mempengaruhi nilai debit *outlet* (Q_{Out}) antara eksperimen dan simulasi SPH, dimana viskositas yang digunakan dalam simulasi SPH merupakan viskositas buatan atau viskositas artifisial yang dapat disesuaikan dengan kondisi pada model fisik. Nilai viskositas bernilai kecil akan berdampak pada penurunan elevasi muka air dapat dilihat pada Gambar 6.b, sehingga berdampak pada nilai debit *outlet* (Q_{Out}).

Tabel 6. Perbandingan Debit *Outlet* (Q_{Out}) Eksperimen dan Simulasi SPH

Kerapatan	Q_{In} (l/s)	Q_O Lab (l/s)	Q_P Lab (l/s)	Q_O SPH (l/s)	Q_P SPH (l/s)	Q_O Lab (%)	Q_P Lab (%)	Q_O SPH (%)	Q_P SPH (%)
1 cm	0,5	0,2141	0,2747	0,1766	0,3234	43,8011	56,1989	35,3208	64,6792
	0,6	0,2928	0,2848	0,2760	0,3240	50,6926	49,3074	46,0026	53,9974
0,5 cm	0,5	0,2141	0,2747	0,3210	0,1790	43,8011	56,1989	64,2014	35,7986
	0,6	0,2928	0,2848	0,4679	0,1321	50,6926	49,3074	77,9915	22,0085



(a)



Gambar 11. Hasil Simulasi SPH dengan Kerapatan Antar Butiran 0,5 cm (a) $Q = 0,5$ l/s (b) $Q = 0,6$ l/s

4. Kesimpulan

Penelitian yang dilakukan di laboratorium memberikan hasil bahwa kedalaman gerusan (d_s) dipengaruhi oleh faktor pengaliran, yaitu bilangan Froude (Fr) dan waktu pengaliran (t). Proses pembentukan gerusan melalui empat fase, yaitu fase awal, fase pengembangan, fase stabilisasi dan fase ekuilibrium. Kedalaman gerusan (d_s) mencapai kondisi kesetimbangan ketika agregat tidak dapat meninggalkan lubang gerusan. Dimana, agregat hanya bergerak di dalam lubang gerusan mengikuti pola aliran.

Penelitian ini juga melakukan uji validasi dengan menguji pola aliran dan debit *outlet* (Q_{Out}) antara eksperimen dan simulasi SPH. Hasil validasi memberikan hasil yang cukup memuaskan pada pola aliran dan Q_{Out} . Pola aliran pada simulasi SPH sudah menyerupai pola aliran di laboratorium. Pola aliran di dalam lubang gerusan pada simulasi SPH merepresentasikan pola aliran pada eksperimen di laboratorium. Namun terdapat perbedaan pola aliran di dalam lubang gerusan pada simulasi SPH. Pola aliran di dalam lubang gerusan memiliki kecenderungan untuk menaikkan elevasi muka air. Kecenderungan naiknya elevasi muka air dikarenakan kecepatan aliran di dalam lubang gerusan pada simulasi SPH sebagian besar menghasilkan kecepatan arah vertikal. Sedangkan, kecepatan aliran arah horizontal sangat kecil. Perbandingan hasil Q_{Out} antara eksperimen dan simulasi SPH sebesar 4,69% - 8,48%. Dari hasil Q_{Out} simulasi SPH diamati bahwa nilai Q_O untuk simulasi SPH menghasilkan nilai debit yang rendah dan nilai Q_P untuk simulasi SPH menghasilkan nilai debit yang tinggi.

Hasil penelitian sudah sesuai dengan tujuan penelitian dan sejalan dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian ini membuktikan beberapa hal, yaitu faktor yang mempengaruhi pembentukan lubang gerusan, proses pembentukan lubang gerusan serta pola aliran yang terjadi di dalam lubang gerusan. Namun, terdapat perbedaan hasil antara model fisik (eksperimen) dan model numerik (simulasi SPH) untuk pola aliran di dalam lubang gerusan dan debit *outlet* (Q_{Out}). Perbedaan tersebut disebabkan oleh faktor gesekan batas (*boundary friction*), kondisi batas (*boundary condition*), dan penggambaran bentuk model fisik pada simulasi SPH. Selain ketiga faktor di atas, faktor viskositas pada simulasi SPH mempengaruhi hasil simulasi SPH terkait elevasi muka air dan kecepatan aliran.

Harapan untuk penelitian selanjutnya dengan menguji beberapa jenis ukuran agregat/butiran sebagai bahan dasar gerusan. Selain itu perlu dilakukan pengujian untuk melihat faktor kemiringan *inlet* jet air terhadap pembentukan gerusan dan faktor jarak jet air terhadap proses pembentukan gerusan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada kepala dan staf Laboratorium Hidraulika, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada yang sudah mengizinkan melakukan penelitian model fisik. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dr. Kuswandi, S.T., M.T dan Muhammad Hafiz Aslami, S.T., M.Eng., Ph.D yang telah membantu dalam pemahaman pemodelan dengan *Software Computational Fluid Dynamics* berbasis kode *DualSPHysics*.

Daftar Pustaka

- Adduce, Claudia, and Giampiero Sciortino. 2006. "Scour Due to a Horizontal Turbulent Jet: Numerical and Experimental Investigation." *Journal of Hydraulic Research* 663-673.
- Aderibigbe, O.O, and N. Rajaratnam. 1996. "Erosion of Loose Beds by Submerged Circular Impinging." *Journal of Hydraulic Research* 19-33.
- Barreiro, A., A.J.C. Crespo, J.M. Dominguez, and M. Gomez-Gesteira. 2013. "Smoothed Particle Hydrodynamics for Coastal Engineering Problems." *Computers and Structures* 96-106.
- Batchelor, G.K. 1974. *Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, UK.
- Bormann, Noel E., and Pierre Y. Julien. 1991. "Scour Downstream of Grade-Control Structures." *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Gingold, R.A., and J.J Monaghan. 1977. "Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-spherical Stars." *Mon. Not. R. Astr. Soc* 375-389.
- Gomez-Gesteira, M., B.D. Rogers, A.J.C. Crespo, R.A. Dalrymple, M.Narayanaswamy, and J.M. Dominguez. 2012. "SPHysics-Development of a Free-Surface Fluid Solver - Part 1: Theory and Formulations." *Computers & Geosciences* 289-299.
- Gomez-Gesteira, M., B.D. Rogers, A.J.C. Crespo, R.A. Dalrymple, M.Narayanaswamy, and J.M. Dominguez. 2012. "SPHysics-Development of a Free-Surface Fluid Solver - Part 2: Efficiency and Test Cases." *Computers & Geosciences* 300-307.
- Hoffmans, G.J.C.M, and H.J Verheij. 1997. *Scour Manual*. Rotterdam: A.A Balkema Publishers.
- Hou, Jiaoyi, Lishan Zhang, Youngji Gong, Dangyong Ning, and Zengmeng Zhang. 2016. "Theoretical and Experimental Study of Scour Depth by Submerged Water Jet." *Advances in Mechanical Engineering* 1-9.
- Kato, Fuminori, Yoshio Suwa, Kunihiro Watanabe, and Satoshi Hatogai. 2012. "Mechanisms of Coastal Dike Failure Induced by The Great East Japan Earthquake Tsunami." *Coastal Engineering*.
- Latief, Hamzah, Haris Sunendar, Aditya R. Gusman, and Panca Y. 2007. "Current Tsunami Research Activities in Indonesia." *South China Sea Tsunami Workshop*. Taiwan: Academica Sinica.
- Liu, G.R., and M.B. Liu. 2003. "Smoothed Particle Hydrodynamics: a Meshfree Particle Method." *World Scientific Publishing* (World Scientific Publishing).
- Lucy, L. 1977. "A Numerical Approach to Testing the Fission Hypothesis." *Journal Astronomical* 1013-1024.
- Monaghan, J.J. 1994. "Simulating Free Surface Flows with SPH." *Journal of Computational Physics* 399-406.
- Monaghan, J.J. 2005. "Smoothed Particle Hydrodynamics. Reports on Progress in Physics." 1703-1759.
- Monaghan, J.J. 1992. "Smoothed Particle Hydrodynamics." *Annual Rev. Astron. Appl* 543-574.
- Mori, Nobuhito, Tomoyuki Takahashi, Tomohiro Yasuda, and Hideaki Yanagisawa. 2011. "Survey of 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Inundation and Run-Up." *Geophysical Research Letters* 1-6.
- Ni, Fusheng, Deyi Zhang, Hui Wang, and Lei Gu. 2014. "Numerical Simulation of High Speed Water Jet Erosion of Sand Bed ." *Applied Mechanics and Materials* 304-308.
- Raby, Alison, Joshua Macabuag, Antonios Pomonis, and Sean Wilkinson. 2015. "Implications of The 2011 Great East Japan Tsunami on Sea Defence Design." *International Journal of Disaster Risk Reduction* 1-15.
- Rajaratnam, N. 1981. "Erosion by Plane Turbulent Jets." *Journal of Hydraulic Research* 339-358.
- Raudkivi, Arved J., and Robert Ettema. 1983. "Clear-Water Scour at Cylindrical Piers." *Journal of Hydraulic Engineering* 338-350.

- Suppasri, Anawat, Abdul Muhari, Prasanthi Ranasinghe, Nobuo Shuto, Fumihiko Imamura, and Shunichi Koshimura. 2012. "Damage and Reconstruction After The 2004 Indian Ocean Tsunami and The 2011 Great East Japan Tsunami." *Journal of Natural Disaster Science* 19-39.
- Tastan, Karem, Pelin Pinar Kocak, and Nevzat Yildirim. 2016. "Effect of the Bed-Sediment Layer on the Scour Caused by a Jet."
- Triatmadja, Radiana, Siti Nurul Hijah, and Any Nurhasanah. 2011. "Scouring Around Coastal Structures Due to Tsunami Surge ." *6th Annual International Workshop & Expo on Sumatra Tsunami Disaster & Recovery 2011*.
- Warniyati. 2021. "Hidrodinamika Limpasan Tsunami pada Seawall, Gerusan yang diakibatkan dan Mitigasinya." Disertasi, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Warniyati, Radiana Triatmadja, and Nur Yuwono. 2020. "Scouring On Boulder Bed Behind A Seawall Due to Tsunami." *Journal of Tsunami Society International* 124-136.
- Wendland, Holger. 1995. "Piecewise Polynomial, Positive Definite and Compactly Supported Radial Functions of Minimal Degree." *Advances in Computational Mathematics* 4: 389-396.
- Yeh, Harry, and Wenwen Li. 2008. "Tsunami Scour and Sedimentation." *Fourth International Conference on Scour and Erosion*. 95-106.
- Yeh, Harry, Susan Tonkin, Eric Heller, Pedro Arduino, Fuminori Kato, and Shinji Sato. 1999. "Mechanisms of Scour Induced by Tsunami Runup."