

SIMULASI ALIRAN DAM-BREAK MENGGUNAKAN PROGRAM DUALSPHYSICS**Teuku Muhammad Rasyif^{1,*}, Faisal Saputra¹, Widia¹, dan Akmal¹**¹⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Aceh, Banda Aceh, Indonesia*)email: tmuhammad.rasyif@unmuha.ac.id

Diterima : 06 September 2020
Direvisi : 23 September 2020
Disetujui : 06 Oktober 2020
Diterbitkan : 14 November 2020

Abstract: A flow due to a dam failure has potential to cause a disaster. Therefore, the flow is often studied by laboratory experiments and numerical simulations to understand its propagation process in detail. The study results can be applied to reduce the impact of the dam-break flow. Currently, the dam-break flow is not only used to assess the dam failure impact but also to assess the tsunami wave impact in the coastal area. This study aims to evaluate the DualSPHysics model performance in simulating the dam-break flow. The dam-break flow was generated by two ways, sudden release of water without and with using a plate by shifting it upward following the generation process that has been carried out in the laboratory. The validation process was implemented by comparing the results between the laboratory experiment data that have been published and the numerical simulation using DualSPHysics. The simulation results indicated that the model able to simulate the dam-break flow with acceptable accuracy. This model can be applied to simulate the dam-break flow for a real condition related to the dam-break problem in the large domain.

Keywords : dam-break, DualSPHysics, tsunami

Abstrak: Aliran yang disebabkan oleh kegagalan bendungan memiliki potensi untuk menyebabkan terjadinya suatu bencana. Oleh sebab itu, aliran ini sering dikaji baik secara uji di laboratorium ataupun simulasi numerik untuk mengetahui secara rinci proses terjadinya penjalaran aliran tersebut. Sehingga, hasil penelitian tersebut dapat diaplikasikan untuk mengurangi dampak yang dapat disebabkan oleh aliran tersebut. Saat ini aliran oleh kegagalan bendungan tidak hanya digunakan untuk mengkaji dampak dari kegagalan bendungan akan tetapi digunakan juga untuk mengkaji aliran tsunami. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan model DualSPHysics dalam menyimulasi aliran yang disebabkan oleh kegagalan bendungan. Aliran dibangkitkan dengan dua cara, yaitu melepaskan air secara tiba-tiba (tanpa pergerakan pintu) dan menyimulasikan pergerakan dari pintu yang digeser ke arah atas mengikuti proses pembangkitan yang telah dilakukan di laboratorium. Proses validasi dilakukan dengan membandingkan fluktuasi muka air dan kecepatan aliran antara data hasil uji laboratorium yang telah dikeluarkan dan simulasi numerik menggunakan DualSPHysics. Hasil simulasi menunjukkan bahwa program DualSPHysics dapat menyimulasikan proses penjalaran aliran oleh kegagalan bendungan dengan baik. Model ini direkomendasikan untuk dapat diaplikasikan dalam menyimulasikan aliran yang disebabkan kegagalan bendungan pada kondisi nyata dengan daerah simulasi yang lebih luas.

Kata kunci : dam-break, DualSPHysics, tsunami

1. PENDAHULUAN

Dam ialah struktur bangunan yang pada umumnya dibuat melintang pada aliran sungai. Dam dibangun dengan tujuan untuk membendung aliran sungai, pembangkit listrik, dan pengendali banjir. Akan tetapi, bahaya yang ditimbulkan oleh

kegagalan bendungan berpotensi menyebabkan banjir besar. Hal ini dikarenakan air dengan volume yang besar di reservoir terlepas dengan tidak terkendali menuju bagian hilir. Banjir tersebut memiliki energi yang dapat menghancurkan bangunan dan menyebabkan banyak korban jiwa. Untuk mengurangi

dampak ini, diperlukan suatu kajian yang dapat menghitung pergerakan aliran air bila terjadi kegagalan bendung untuk mengurangi resiko dari bencana yang dapat disebabkan oleh aliran tersebut. Saat ini aliran *dam-break* tidak banyak diaplikasikan untuk mengkaji dampak dari kegagalan bendungan. Aliran *dam-break* juga digunakan untuk mengkaji dampak yang dapat disebabkan oleh tsunami seperti yang dilakukan oleh [1], [2]. Hal ini disebabkan gelombang yang dibangkitkan oleh *dam-break* dapat dianggap menyerupai gelombang tsunami yang menjalar menuju pantai [3], [4].

Bencana tsunami yang terjadi pada tanggal 26 Desember 2004 telah menyebabkan kerusakan di Kota Banda Aceh, Indonesia. Untuk kawasan pantai sendiri, kerusakan yang terjadi adalah erosi pantai dan hilangnya sistem perlindungan pantai alami dan buatan. Akibatnya garis pantai mundursampai ratusan meter dan hilangnya lahan yang bisa ditempati [5]. Salah satu upaya untuk mengurangi dampak yang dapat ditimbulkan oleh tsunami ialah dengan melindungi kawasan pantai baik dengan menanam mangrove kembali ataupun membangun bangunan pantai seperti *sea wall* dan *elevated road*. Metode tersebut dapat digunakan di kawasan pantai untuk mereduksi dampak dari tsunami. Suatu metode yang dapat mensimulasikan aliran *dam-break*, dimana dapat diaplikasikan untuk membangkitkan gelombang tsunami [1]–[4], diperlukan agar proses penalaran aliran dapat diamati dengan detail. Sehingga, model tersebut dapat digunakan untuk mengkaji tipe dan ukuran bangunan yang efisien untuk mereduksi dampak dari gelombang tsunami.

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengkaji aliran *dam-break* seperti solusi analitis, uji laboratorium, dan simulasi numerik. Solusi analitis dikembangkan oleh Ritter [6] berdasarkan persamaan *ID de Saint-Venant* pada kondisi tanpa air pada bagian hilir. Persamaan tersebut dikembangkan oleh Stocker [7] agar dapat digunakan pada kondisi terdapat air pada bagian hilir. Akan tetapi, persamaan tersebut hanya dapat diaplikasikan pada kondisi ideal. Pengujian aliran *dam-break* juga telah banyak dilakukan di laboratorium [8], [9]. Uji laboratorium memerlukan biaya yang tinggi bila diperlukan perubahan geometri pada kondisi aliran sehingga tidak efisien. Oleh sebab itu, metode numerik telah banyak digunakan untuk

mengkaji aliran *dam-break* seperti menggunakan persamaan *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS) dan *Shallow Water Equation* (SWE) [9]. Mekanisme dari pergerakan pelat yang digerakkan ke atas tidak diaplikasikan pada penelitian terdahulu.

Pada penelitian ini model numerik yang digunakan adalah DualSPHysics. DualSPHysics merupakan model numerik 2 dan 3 dimensi yang menggunakan *Smoothed Particle Hydrodynamic* (SPH) yaitu berupa partikel-partikel kecil dalam menggambarkan sebuah fluida. SPH dapat diaplikasikan dalam proses penalaran gelombang, gelombang pecah, pengaruh gelombang terhadap bangunan dan *dam break* [10]. Model DualSPHysics merupakan pengembangan dari model SPHysics dengan kelebihan model DualSPHysics mampu bekerja dalam bahasa program C++ untuk memanfaatkan CUDA processor sehingga perhitungan dapat dilakukan lebih cepat [11]. Model ini tidak hanya dapat menyimulasikan air (*fluid boundary*) akan tetapi juga dapat menyimulasikan pergerakan pintu (*moving boundary*). Mekanisme pergerakan dari pelat dapat diaplikasikan sebagai pembangkit awal dari aliran *dam-break*.

Berdasarkan latar belakang masalah yang ditulis di atas, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan DualSPHysics dalam mensimulasikan aliran *dam-break*, dengan cara membandingkan hasil simulasi antara model numerik dan uji di laboratorium (model fisik). Terdapat dua mekanisme yang digunakan untuk membangkitkan aliran *dam-break* yaitu melepaskan air secara tiba-tiba (tanpa pergerakan pelat) dan melepaskan air berdasarkan pergerakan pelat yang bergerak ke atas. Akurasi dari model DualSPHysics telah dihitung dengan menggunakan rumus *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai yang dibandingkan ialah fluktuasi muka air dan kecepatan antara hasil simulasi numerik dan uji laboratorium.

2. METODE PENELITIAN

Prinsip Dasar DualSPHysics

Penelitian ini menggunakan program DualSPHysics dengan versi v4.0 di mana berdasarkan *weakly compressible* SPH (WCSPH) [12]. Fase fluida dalam DualSPHysics diatur oleh persamaan Navier-Stokes. Persamaan diferensial parsial pada Navier-Stokes direduksi menjadi persamaan diferensial

biasa dengan metode Lagrangian. Persamaan konservasi massa dan momentum yang digunakan pada model ialah sebagai berikut:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \Gamma \quad (2)$$

di mana ρ ialah massa jenis. Subskrip a dan b adalah individu suatu partikel. m ialah massa. v ialah vector kecepatan. ∇_a ialah turunan sehubungan dengan koordinat partikel a . W_{ab} ialah fungsi pembobotan atau *smoothing kernel*. p adalah tekanan. g adalah percepatan gravitasi. t ialah waktu. Γ mengacu pada istilah disipatif.

Hubungan antara tekanan dan massa jenis diberikan oleh persamaan sebagai berikut:

$$p = b \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \quad (3)$$

$$b = c_0^2 \rho_0 / \gamma \quad (4)$$

di mana $\gamma = 7$ dan $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$. c_0 ialah kecepatan suara.

Kecepatan suara (c_0) dihitung secara numerik dengan setidaknya sepuluh kali kecepatan maksimum dalam sistem. Untuk aliran dambreak, persamaan untuk menghitung kecepatan gelombang awal ialah sebagai berikut:

$$c_0 = c_s \sqrt{gh_w} \quad (5)$$

dimana c_s adalah koefisien suara dan h_w ialah kedalaman fluida.

Fluida dianggap menjadi suatu banyak partikel pada model SPH. Partikel tersebut membawa sifat-sifat seperti kepadatan, tekanan, kecepatan, dan sebagainya. Persamaan integral berdasarkan fungsi interpolasi digunakan agar dapat mengubah persamaan konservasi massa dan momentum dengan bentuk persamaan differensial partial menjadi persamaan dengan bentuk yang sesuai untuk simulasi berdasarkan partikel. Interpolasi dari persamaan integral merupakan pondasi awal suatu perhitungan numerik berdasarkan model SPH. Berikut merupakan persamaan dari suatu fungsi f pada model DualSPHysics:

$$f(r) = \int f(r') W(r - r', h) dr \quad (6)$$

dimana $f(r)$ ialah nilai rata-rata. h ialah *the smoothing length*. Jika fungsi tersebut diinterpolasi pada suatu

partikel a , maka persamaan menjadi sebagai berikut:

$$f(r_a) \approx \sum_b f(r_b) W(r_a - r_b, h) \Delta v_b \quad (7)$$

dimana Δv_b adalah volume dari partikel yang berdekatan dengan partikel b . Dikarenakan volume merupakan ratio antara massa dan berat jenis ($\Delta v_b = m_b / \rho_b$) maka persamaan menjadi:

$$f(r_a) \approx \sum_b f(r_b) W(r_a - r_b, h) \left(\frac{m_b}{\rho_b} \right) \quad (8)$$

Akurasi dari model SPH bergantung dari fungsi *kernel*. Fungsi kernel (q) adalah ratio yang tidak berdimensi antara jarak antara dua partikel (r) dan smoothing length (h). Persamaan dari fungsi kernel Quintic yang telah diaplikasikan ialah sebagai berikut [13]:

$$W(r, h) = a_D \left(1 - \frac{q}{2} \right)^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (9)$$

Dimana $a_D = 7/4 \pi h^2$ dalam 3D. Dalam teks tersebut hanya kernel dengan domain pengaruh $2h$ $q \leq 2$ yang akan dipertimbangkan.

Root mean square error (RMSE)

Keakuratan hasil pemodelan dapat dikuantifikasi dengan menggunakan variabel statistik *root-mean-square error* (RMSE), yang dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2} \quad (10)$$

dimana Y_i ialah nilai hasil observasi. Y'_i ialah nilai hasil prediksi. i ialah urutan data. N ialah jumlah data. Suatu model numerik dianggap valid untuk digunakan bila nilai RMSE antara simulasi dan uji laboratorium mendekati 0 [14].

Konfigurasi Simulasi Numerik

Kemampuan model DualSPHysics telah divalidasi dengan membandingkan antara hasil simulasi dan percobaan di laboratorium. Area simulasi yang diterapkan untuk model numerik mengikuti desain experiment dari [8, 9]. Data penelitian yang dilakukan oleh [9] digunakan untuk memvalidasi model pada kondisi awal. Sedangkan data uji laboratorium berdasarkan [8], diaplikasikan untuk memvalidasi model pada tahap akhir dengan ($t \geq 9,899$ detik). Kedua studi memiliki kondisi percobaan yang

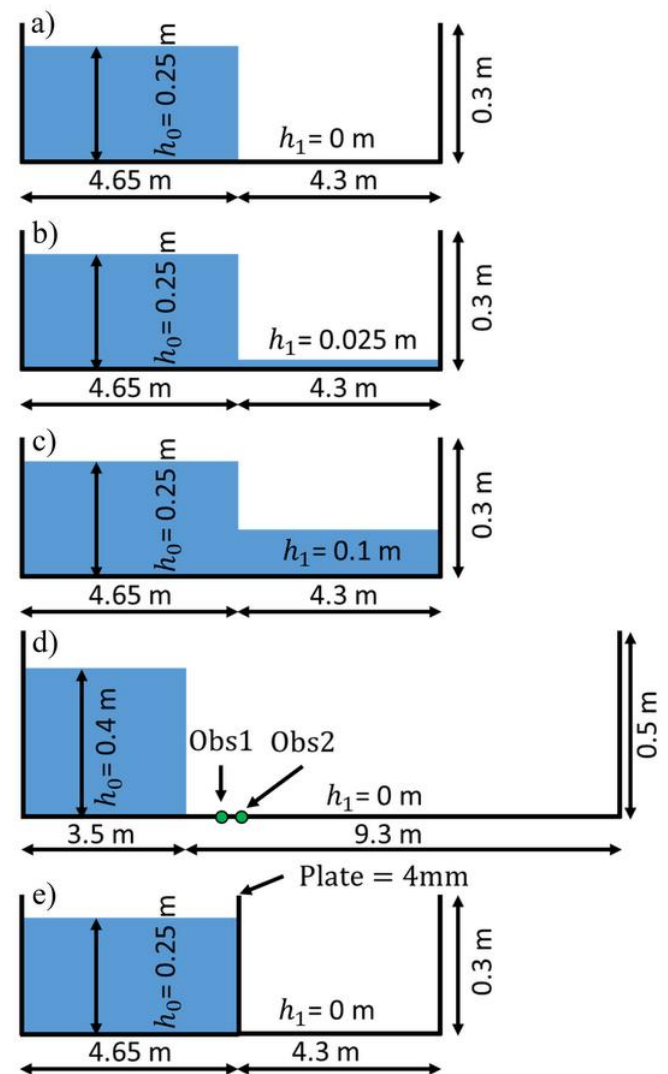
sama dimana flume dengan saluran persegi panjang dipisahkan oleh pelat (bendungan) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Flume memiliki panjang dan tinggi masing-masing sekitar 9 dan 0,35 m dan 12,8 dan 0,5 m untuk kondisi horizontal dan vertikal. Pelat, yang digunakan untuk menahan air di sisi kiri sebagai reservoir, terletak di 4,65 dan 3,5 m untuk kasus tahap awal dan akhir. Mekanisme pelat telah diaplikasikan untuk melihat pengaruh pergerakan pelat pada proses simulasi. Tebal pelat yang digunakan ialah sebesar 4 mm dan 10 mm masing-masing untuk tahap awal dan akhir. Waktu yang diperlukan untuk pelat terbuka seluruhnya ialah 0,08 dan 0,14 detik masing-masing untuk tahap awal dan akhir. Kondisi awal dengan menggunakan pelat ukuran 4 mm dapat dilihat pada **Gambar 1e**.

Tabel 1. Parameter yang digunakan pada simulasi

<i>Artificial viscosity</i>	0.02
<i>Courant coefficient</i>	0.2
<i>Coefficient sound</i>	20
<i>Distance of the particles</i>	0.002 m
<i>Kernel</i>	Wendland
<i>Step algorithm</i>	Verlet

Empat kondisi awal telah diaplikasikan untuk mengkaji kemampuan model. Terdapat tiga dan satu kondisi yang diadopsi untuk memvalidasi aliran *dam-break* pada tahap awal dan akhir. Setiap wadah dibagi berdasarkan rasio ketinggian air antara sisi kiri dan kanan pelat (bendungan). Sisi kiri pelat diaplikasikan sebagai reservoir dengan nilai kedalaman air tetap. Sedangkan pada sisi kanan atau hilir memiliki ketinggian muka air yang berbeda. Kondisi hilir dirancang dengan kondisi awal yang berbeda untuk menyelidiki kinerja model untuk mensimulasikan aliran dengan kondisi kering dan basah. Reservoir memiliki ketinggian tetap sekitar 0,25 dan 0,4 m pada kasus tahap awal dan akhir. Permukaan air awal hilir untuk kondisi dasar kering adalah 0 m untuk setiap tahap awal dan akhir. Untuk kondisi basah pada bagian hilir, ketinggian air pada awal simulasi masing-masing memiliki nilai 0,025 dan 0,1 m. Secara total, ada lima kasus

yang telah disimulasikan dengan rasio ($\alpha = h_1/h_0$) sebesar 0, 0,01, dan 0,4 untuk tahap awal dan 0 untuk tahap akhir. Kondisi awal yang telah diaplikasikan dapat dilihat pada **Gambar 1**. Dengan kondisi awal berdasarkan pergerakan tanpa dan dengan pelat, maka jumlah kasus yang digunakan ialah 8 kasus. Beberapa parameter yang telah digunakan untuk menjalankan simulasi pada program DualSPHysics dapat dilihat pada **Tabel 1**.



Gambar 1. Area simulasi, kondisi awal, dan titik observasi.

Beberapa titik observasi telah digunakan sebagai suatu *virtual gauge* untuk mengumpulkan data profil muka air dan kecepatan dari proses simulasi numerik. Pada kasus tahap awal telah digunakan titik observasi dengan interval 0,05 m sebanyak 179 buah yang

diletakkan sepanjang flume dengan jarak 8,9 m. Sedangkan pada kasus tahap akhir, telah diletakkan 259 buah titik observasi dengan interval 0,05 m dengan panjang flume 12,8 m. Titik observasi diletakkan sepanjang flume dengan tujuan untuk mendapatkan data ketinggian air sepanjang flume sehingga dapat diperoleh nilai profil muka air. Nilai kecepatan diperoleh dengan meletakkan dua buah titik observasi yaitu Obs1 dan Obs2 dengan jarak sebesar 4,3 dan 4,7 m. Posisi titik observasi dapat dilihat pada **Gambar 1d**. Data hasil uji laboratorium seperti fluktuasi muka air dan kecepatan didapat dengan mendigitasi hasil pada jurnal yang telah diterbitkan dengan menggunakan fungsi georeferencer yang terdapat pada aplikasi QGIS [15]. Hal tersebut dilakukan untuk mengubah informasi pada suatu gambar menjadi data yang memiliki suatu nilai.

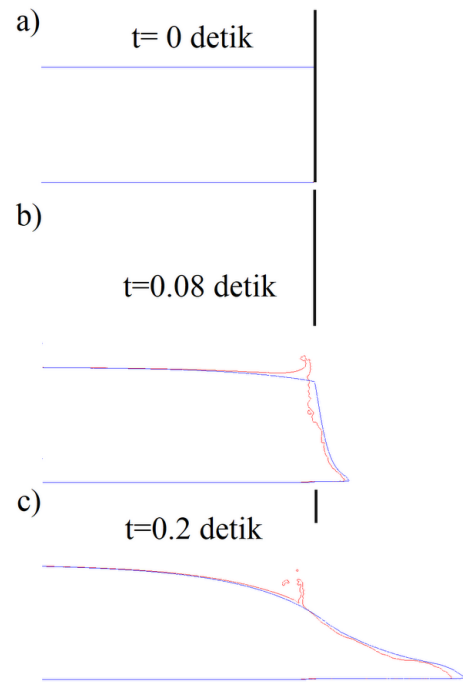
3. HASIL PEMBAHASAN

Proses Penjalaran

Proses penjalaran dari hasil simulasi dengan menggunakan program DualSPHysics dapat dilihat pada **Gambar 2-4**. Pada kondisi awal terdapat 3 kondisi dengan ketinggian air di hulu (h_0) ialah 0,25 m dan ketinggian air di hilir (h_1) ialah 0,025, dan 0,1 m. Ketiga kondisi tersebut dibangkitkan secara tiba-tiba (tanpa pintu) dan berdasarkan pergerakan pintu. Sehingga, total kasus yang digunakan pada tahap awal ialah 6. Pelat ditandai dengan warna hitam. Profil muka air yang dibangkitkan secara tiba-tiba dan mekanisme pintu masing-masing ditandai dengan warna biru dan merah.

Gambar 2 menunjukkan simulasi dengan kondisi aliran tanpa air (*dry*) di bagian hilir $h_1 = 0$. Aliran air yang mengalir di sepanjang flume tidak mengalami loncatan dengan waktu simulasi selama 2 detik. **Gambar 3** menunjukkan hasil simulasi selama 2 detik. Bagian hilir flume telah terisi oleh air dengan ketinggian $h_1 = 0,025$ m. Aliran air yang mengalir mengalami loncatan pada $t = 0,2$ detik. **Gambar 4** menunjukkan proses penjalaran gelombang selama 2 detik dengan kondisi bagian hilir flume telah

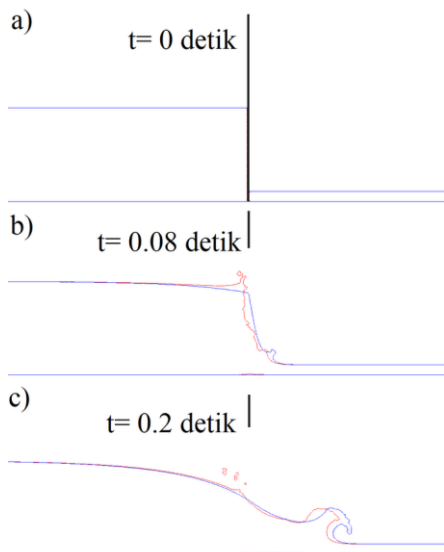
terisi oleh air dengan ketinggian $h_1 = 0,1$ m. Aliran air yang mengalir mengalami loncatan pada $t = 0,2$ detik.



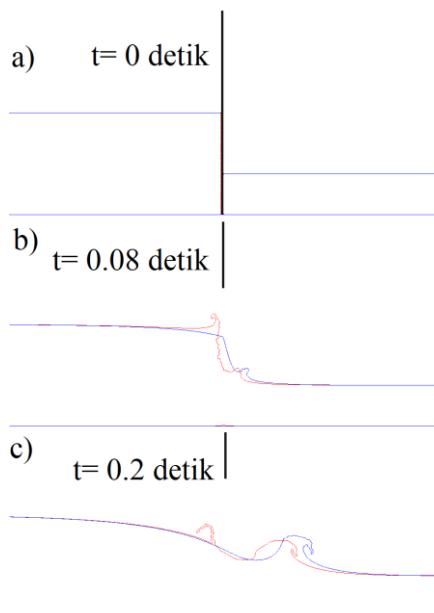
Gambar 2. Proses penjalaran aliran *dam-break* dengan kondisi $h_0 = 0,25$ m dan $h_1 = 0$ m untuk waktu: a) 0 detik, b) 0.08 detik, dan c) 0,2 detik.

Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat terdapat perbedaan dari hasil penjalaran dengan pembangkit secara tiba-tiba dan mekanisme pelat. Pada saat pelat terbuka yaitu dengan waktu 0,08 detik. Profil muka air dengan menggunakan gerakan pintu terjadi loncatan dikarenakan efek dari pergerakan pintu yang ditandai dengan garis berwarna merah. Sedangkan dengan secara tiba-tiba, aliran air menjalar tanpa hambatan yang disebabkan oleh pelat yang ditandai dengan warna biru. Kondisi aliran ketika pintu terbuka dapat dilihat pada **Gambar 2b, 3b, dan 4b**. Setelah menjalar selama 0,2 detik, pembangkitan secara tiba-tiba menjalar lebih jauh dibandingkan dengan menggunakan mekanisme pelat dimana garis berwarna biru berada lebih depan dibandingkan garis yang berwarna merah seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2c, 3c, dan 4c**. Loncatan air terjadi setelah 0,2 detik seperti diperlihatkan pada **Gambar 3c dan 4c**. Hal tersebut diakibatkan karena adanya air pada bagian hilir (h_1) yang dapat menyebabkan terjadinya loncatan. Sedangkan pada

kondisi kering tidak terjadi loncatan air seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 2c**.



Gambar 3. Proses penjalaran aliran *dam-break* dengan kondisi $h_0=0,25$ m dan $h_1=0,025$ m untuk waktu: a) 0 detik, b) 0.08 detik, dan c) 0.2 detik

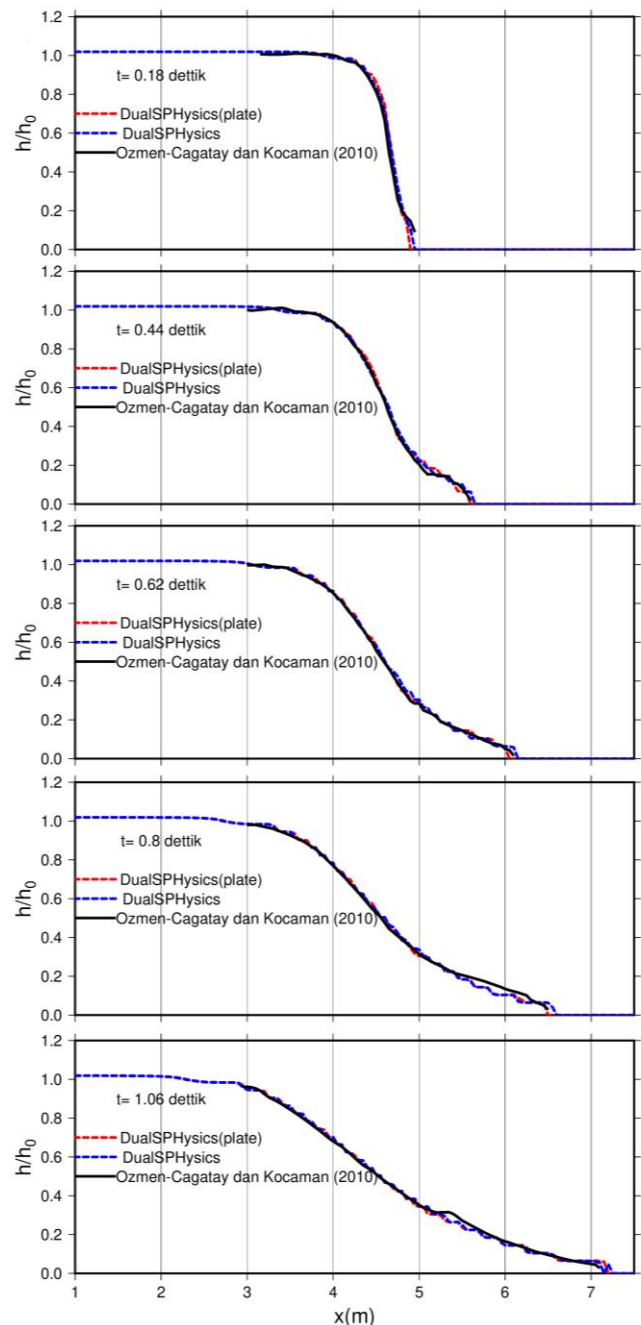


Gambar 4. Proses penjalaran aliran *dam-break* dengan kondisi $h_0=0,25$ m dan $h_1=0,1$ m untuk waktu: a) 0 detik, b) 0.08 detik, dan c) 0.2 detik.

Fluktuasi Muka Air pada Tahap Awal

Fluktuasi muka air pada tahap awal untuk aliran dam-brak dapat diamati dengan detail pada saat waktu simulasi (t) < 1,5 detik. **Gambar 3-5** menunjukkan perbandingan fluktuasi muka air pada tahap awal antara

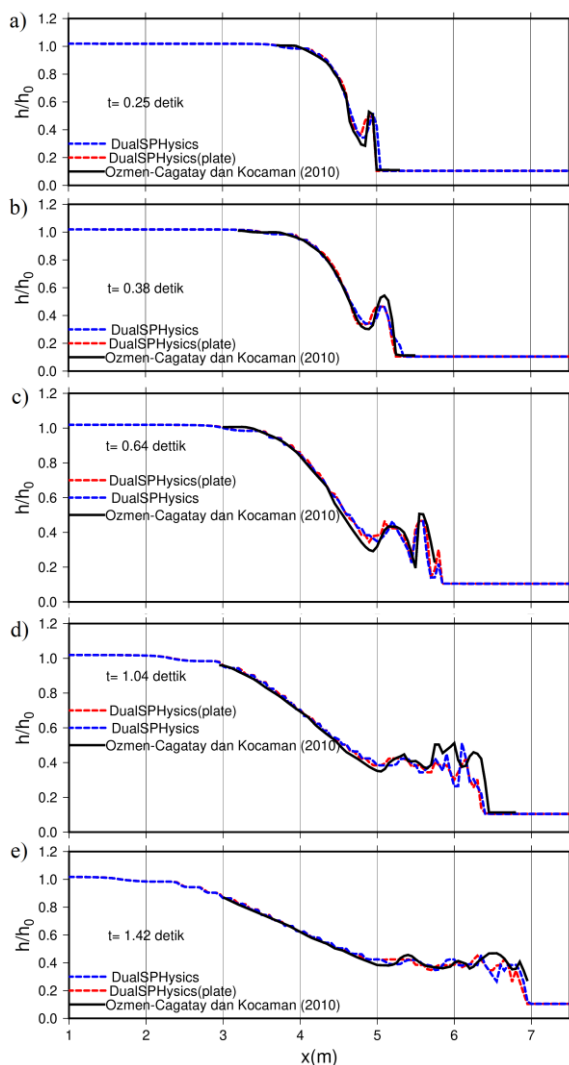
hasil simulasi menggunakan program DualSPHysics dan data eksperimen [9]. Pada gambar tersebut, nilai pada sumbu (y) diubah ke bentuk tidak berdimensi dengan cara membagi nilai ketinggian air (h) dengan ketinggian awal (h_0).



Gambar 5. Fluktuasi muka akhir antara simulasi dan eksperimen kedalaman air ($h_1=0$).

Gambar 5 menunjukkan fluktuasi muka air pada tahap awal dengan kondisi aliran di hilir kering tanpa air (*dry*) $h_1=0$. Waktu simulasi yang digunakan yaitu $t=0,18$, $0,44$, $0,62$, $0,80$ dan $1,06$ detik. Simulasi menggunakan

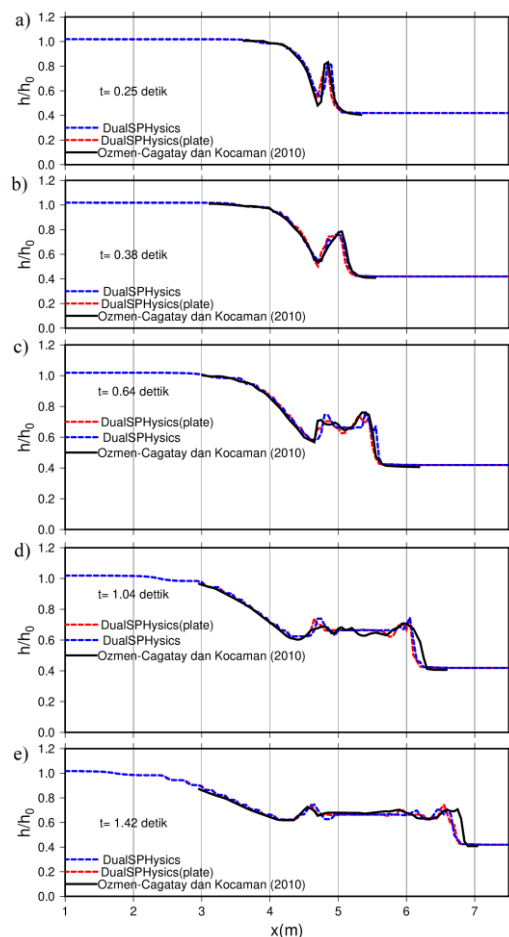
program DualSPHysics baik dibangkitkan secara tiba-tiba dan dengan mekanisme pelat dapat menghasilkan fluktuasi muka air seperti pada data experiment, seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 5a-5c**. Pada **Gambar 5d** dan **5e**, hasil simulasi hanya dapat menyerupai data experiment sampai jarak $x = 5$ m. Selanjutnya, hasil simulasi numerik menjadi sedikit berbeda bila dibandingkan dengan hasil experiment.



Gambar 6. Fluktuasi muka akhir antara simulasi dan experiment kedalaman air ($h_1 = 0,025$).

Gambar 6 menunjukkan fluktuasi muka air dengan dengan ketinggian $h_1 = 0,025$ m, waktu simulasi yang digunakan yaitu $t = 0,25, 0,38, 0,64, 1,04$ dan $1,42$. Hasil simulasi menggunakan program DualSPHysics pada tahap awal dapat memprediksi perubahan tinggi air

sampai sebelum terjadi loncatan, seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 6a**. Pada saat terjadi loncatan hasil simulasi lebih rendah bila dibandingkan dengan hasil experiment pada bagian lembah sebelum loncatan air. Akan tetapi, model dapat dengan baik memprediksi tinggi loncatan air. Hasil simulasi kembali dapat menyerupai data experiment. Pada **Gambar 6b-6e**, hasil simulasi tidak dapat dengan baik untuk memprediksi loncatan air yang terjadi pada flume. Model numerik hanya dapat memprediksi fluktuasi dengan baik hingga jarak $x = 4,8$ m, dimana tidak terjadi loncatan air. Setelah loncatan air dan gelombang pecah, hasil simulasi tidak dapat menyamai hasil experiment.



Gambar 7. fluktuasi muka air antara simulasi dan experiment kedalaman air ($h_1 = 0,1$).

Gambar 7 menunjukkan fluktuasi muka air dengan dengan ketinggian $h_1 = 0,1$ m, waktu simulasi yang digunakan yaitu $t = 0,25, 0,38, 0,64, 1,04$ dan $1,42$. Pada **Gambar 7a** dan **7b** hasil simulasi menggunakan program DualSPHysics dapat memprediksi fluktuasi air dan

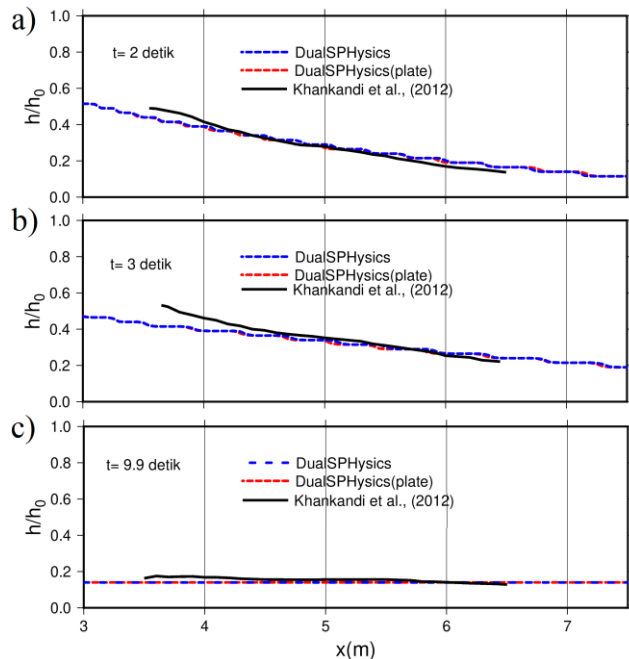
loncatan air pada bagian lembah dan puncak dengan baik seperti pada data eksperimen. Akan tetapi, kemampuan model menurun untuk memprediksi ketika gelombang pecah yaitu pada jarak $x=4,5$. Model tidak dapat memprediksi fluktuasi muka air dengan baik dibandingkan dengan hasil eksperimen, seperti ditunjukkan pada **Gambar 7c-7d**.

Tabel 2. Nilai RMSE untuk fluktuasi pada tahap awal antara hasil simulasi, solusi analitis dengan data eksperimen

h_1	Waktu (t) detik	RMSE DualSPHysics	
		Tiba-tiba	Plate
0	0,18	0,030	0,039
	0,44	0,016	0,017
	0,62	0,040	0,040
	0,8	0,020	0,019
	1,06	0,014	0,016
0,025	0,25	0,064	0,038
	0,38	0,032	0,038
	0,64	0,056	0,052
	1,04	0,066	0,064
	1,42	0,045	0,045
0,1	0,25	0,046	0,040
	0,38	0,017	0,034
	0,64	0,038	0,024
	1,04	0,033	0,040
	1,42	0,047	0,046

Tabel 2 menunjukkan hasil *RMSE* antara hasil simulasi DualSPHysics dengan pembangkit secara tiba-tiba dan mekanisme pelat dan uji laboratorium. Berdasarkan hasil *RMSE*, model dapat dengan baik mensimulasikan aliran *dam-break* pada kondisi kering tanpa air, dimana ketinggian air dihilir $h_1=0$. Pada kondisi basah dimana ketinggian air dihilir $h_1=0,1$ memiliki hasil *RMSE* yang lebih baik dibandingkan dengan $h_1=0,025$. Hal ini dapat disebabkan karena ketinggian air pada kondisi $h_1=0,025$ terlalu rendah. Sehingga, model tidak dapat memprediksi fluktuasi air dengan lebih baik. Jarak partikel yang digunakan juga dapat mempengaruhi hasil simulasi. Tidak ada perbedaan yang signifikan antara pembangkit awal

secara tiba-tiba dan menggunakan mekanisme pelat. Hal tersebut dikarenakan, waktu yang dibutuhkan untuk pelat terbuka lebih rendah dari $1.25(h_0/g)^{1/2}$. Sehingga, mekanisme gerakan pelat dapat dihilangkan dengan membangkitkan air secara tiba-tiba [16].



Gambar 8. Fluktuasi muka air antara simulasi dan eksperimen kedalaman air ($h_1=0$). Data eksperimen diambil dari [8].

Fluktuasi Muka Air pada Tahap Akhir

Fluktuasi muka air pada tahap akhir terjadi pada waktu simulasi $t > 1,5$ detik. Pada keadaan ini air yang mengalir pada flume sudah pada tahap akhir perubahan fluktuasi ketika bendung sudah pecah dan tidak terjadi loncatan. **Gambar 6** menunjukkan perbandingan fluktuasi muka air pada tahap akhir antara hasil simulasi menggunakan program DualSPHysics ketika menggunakan pelat dan secara tiba-tiba, data eksperimen yang didapat pada [8]. Nilai pada sumbu y diubah ke bentuk tidak berdimensi dengan membagi tinggi muka air (h) dengan kedalaman air awal (h_0).

Pada **Gambar 8** menunjukkan fluktuasi muka air pada tahap akhir dengan kondisi aliran di hilir kering tanpa air (dry) $h_1=0$. Waktu simulasi yang digunakan yaitu $t=2, 3$ dan $9,99$ detik. Pada **Gambar 8a** hasil

simulasi menggunakan program DualSPHysics menggunakan plate dan secara tiba-tiba tidak mampu mengikuti bentuk aliran eksperimen pada jarak $x = 3,5$, dimana hasil simulasi lebih tinggi dibandingkan data eksperimen. Pada **Gambar 8b** hasil simulasi di awal berbentuk cembung namun data eksperimen berbentuk cekung, setelah itu simulasi dapat menyerupai data eksperimen pada jarak $x = 5,4$ sampai $x = 5,2$ namun setelah itu hasil simulasi lebih tinggi dari eksperimen. Pada **Gambar 8c** hasil simulasi tidak dapat menyerupai eksperimen pada nilai $x = 3,5$ sampai $x = 5,70$ dan menyerupai pada nilai $x = 5,80$.

Tabel 3 menunjukkan hasil perbandingan antara hasil simulasi program DualSPHysics dengan pembangkit secara tiba-tiba dan menggunakan plate dan hasil dari uji laboratorium. Pada kondisi kering tanpa air (dry) $h1 = 0$, hasil simulasi DualSPHysics secara menggunakan pelat dan tiba-tiba memiliki rata-rata nilai *RMSE* yang sama. Hal tersebut menunjukkan tidak ada pengaruh yang signifikan dari penggunaan pembangkit secara tiba-tiba dan mekanisme pelat. Kondisi tanpa air di hilir antara tahap awal dan akhir memiliki nilai *RMSE* mendekati angka 0 yang berarti model ini dapat diaplikasikan untuk kondisi waktu yang cukup lama.

Tabel 3. Nilai *RMSE* Untuk Fluktuasi Muka Air Tahap Akhir yang diamati oleh Khankandi et al. [8].

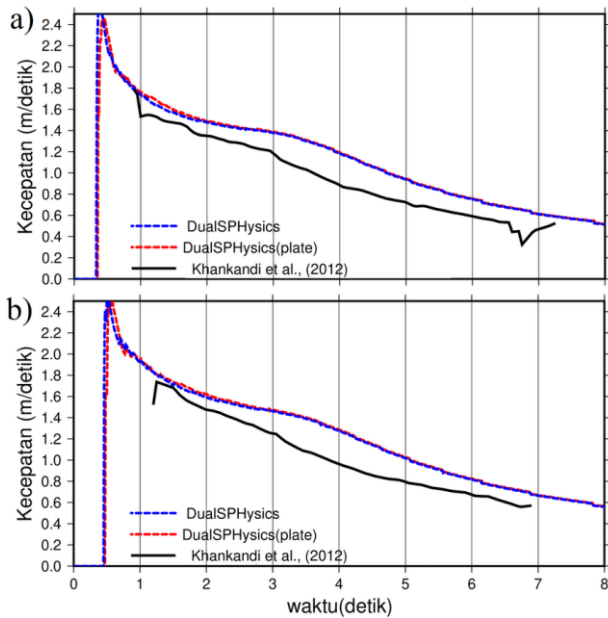
$h1$	Waktu (t)	<i>RMSE</i> DualSPHysics	
	detik	Tiba-tiba	Plate
0	2	0,028	0,028
	3	0,040	0,041
	9,9	0,019	0,019

Kecepatan Aliran *Dam-break*

Nilai kecepatan didapat dengan meletakkan titik observasi yaitu obs1 dan obs2 masing-masing pada jarak 4,3 dan 4,7 m pada kondisi kering dengan nilai ketinggian di hulu ($h1$) = 0,4 m dan di hilir ($h0$) = 0 m. **Gambar 9** menunjukkan perbandingan kecepatan aliran *dam-break* antara hasil simulasi menggunakan DualSPHysics dan data eksperimen. Nilai kecepatan dari hasil uji laboratorium

ditandai dengan garis berwarna hitam. Hasil simulasi numerik ditandai dengan garis putus-putus berwarna biru dan merah masing-masing untuk mekanisme tiba-tiba dan pelat. Pada waktu $t = 0-0,35$ detik, nilai kecepatan pada simulasi ialah 0 dikarenakan aliran air belum sampai pada titik obs1 seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 9a**. Kecepatan aliran mulai terjadi pada waktu 0,36 detik dengan nilai kecepatan sebesar 1,57 m/s dimana air telah sampai pada titik observasi. Sedangkan untuk eksperimen nilai kecepatan terjadi pada waktu 0,9 detik dengan nilai kecepatan 1,8 m/s. **Gambar 9b** pada waktu $t = 0 - 0,47$ merupakan waktu awal simulasi untuk titik obs2 namun pada saat tersebut tidak memiliki nilai kecepatan dikarenakan belum ada air yang mengalir. Kecepatan aliran mulai terjadi pada detik 0,48 dengan nilai kecepatan yaitu 1,63 m/s dimana air telah sampai pada titik observasi. Pada kedua titik observasi yaitu obs1 dan obs2, model DualSPHysics tidak dapat memprediksi nilai kecepatan dengan baik. Garis kecepatan hasil simulasi cenderung berbentuk cembung sedangkan hasil eksperimen cenderung berbentuk cekung. Perhitungan melebihi dari nilai kecepatan hasil eksperimen di sepanjang waktu simulasi.

Tabel 4 menunjukkan perbandingan nilai *RMSE* untuk kecepatan aliran antara hasil simulasi dan data eksperimen. Pada titik obs1 dan obs2 nilai *RMSE* yang didapat ialah 0,21 dan 0,2. Tidak ada perbedaan antara nilai *RMSE* untuk data kecepatan dengan menggunakan pembangkit antara secara tiba-tiba dan mekanisme pelat. Nilai *RMSE* untuk kecepatan memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan data fluktuasi. Hal ini dapat disebabkan oleh penggunaan interval yang besar untuk mendapatkan nilai kecepatan ketika mensimulasikan menggunakan model DualSPHysics. Sehingga, nilai kecepatan yang didapat tidak dapat mewakili tinggi kecepatan rata-rata dari aliran *dam-break* pada titik pengamatan di obs1 dan obs2.



Gambar 9. Perbandingan hasil kecepatan antara DualSPHysics dengan data experiment.

Tabel 4. Nilai RMSE untuk kecepatan antara hasil simulasi dengan data eksperimen

h_1	Titik	RMSE	
	Observasi	Gate	Nogate
0	obs1	0.21	0.20
	obs2	0.21	0.20

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari perbandingan yang telah dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Nilai kecepatan yang didapat dari hasil simulasi melebihi dari nilai experiment. Hal tersebut disebabkan oleh penggunaan interval yang besar untuk mendapatkan informasi kecepatan pada titik observasi ketika simulasi.
2. Tidak ada perbedaan yang signifikan antara mekanisme secara tiba-tiba dan gerakan pelat untuk membangkitkan aliran *dam-break* dengan syarat waktu bukaan pelat kurang dari $1.25(h_0/g)^{1/2}$.
3. Secara keseluruhan program DualSPHysics memiliki nilai RMSE mendekati nilai 0 sehingga model ini dapat digunakan untuk menyimulasikan kasus aliran *dam-break*.

Saran

Berdasarkan hasil perbandingan dan kesimpulan yang didapat, maka beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk penelitian selanjutnya ialah sebagai berikut:

1. Melakukan validasi dan aplikasi pada kondisi nyata. Sehingga performa model tersebut dapat dibuktikan berdasarkan data sesungguhnya di lapangan dengan area yang lebih luas.
2. Nilai tinggi gelombang yang didapat dari metode partikel merupakan bukan ketinggian air yang sebenarnya. Terdapat jarak antara partikel dan titik pengamatan. Dianjurkan untuk mencoba menggunakan jarak partikel yang lebih kecil agar selisih tinggi air dengan titik observasi dapat dikurangi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. L. Li, Y. Ma, R. Deng, D. P. Jiang, dan Z. Hu, "Research on dam-break induced tsunami bore acting on the triangular breakwater based on high order 3D CLSVOF-THINC / WLIC-IBM approaching," vol. 182, no. May, pp. 645–659, 2019.
- [2] Benazir, R. Triatmadja, A. P. Rahardjo, N. Yuwono, dkk, "The Behavior Of A Tsunami-Like Wave Produced By Dam Break And Its Run-Up On 1: 20 Slope,," *Sci. Tsunami Hazards*, vol. 38, no. 2, 2019.
- [3] D. L. Vischer and W. H. Hager, "Dam Hydraulics," *John Willey Sons Ltd., Engl.*, 1998.
- [4] H. Chanson, S. Aoki, dan M. Maruyama, "Experimental Investigations of Wave Runup Downstream of Nappe Impact: Applications to Flood Wave Resulting from Dam Overtopping and Tsunami Wave Runup," *Coastal/Ocean Eng. Rep. No. COE00-2. Dept. Archit. Civ. Eng., Toyohashi Univ. Technol. Japan*, 2000.
- [5] Syamsidik, R. S. Oktari, K. Munadi, S. Arief, I. Z. Fajri, dkk, "Changes in coastal land use and the reasons for selecting places to live in Banda Aceh 10 years after the 2004 Indian Ocean tsunami,"

- Nat. Hazards*, vol. 88, no. 3, pp. 1503–1521, 2017.
- [6] A. Ritter, “Die fortpflanzung der wasserwellen,” *Zeitschrift des Vereines Dtsch. Ingenieure*, vol. 36, no. 33, pp. 947–954, 1892.
- [7] J. J. Stoker, “Water Waves. The Mathematical Theory with Applications, Interscience Publ,” *Inc., New York*, 1957.
- [8] A. Feizi Khankandi, A. Tahershamsi, dan S. Soares-Frazão, “Experimental investigation of reservoir geometry effect on dam-break flow,” *J. Hydraul. Res.*, vol. 50, no. 4, pp. 376–387, 2012.
- [9] H. Ozmen-Cagatay and S. Kocaman, “Dam-break flows during initial stage using SWE and RANS approaches,” *J. Hydraul. Res.*, vol. 48, no. 5, pp. 603–611, 2010.
- [10] C. Altomare, Y. Oshima, X. Chen, A. J. C. Crespo, dan T. Suzuki, “Study of the overtopping flow impacts on multifunctional sea dikes in shallow foreshores with an hybrid numerical model,” in *36th IAHR World Congress*, 2015, pp. 1–11.
- [11] A. J. C. Crespo *et al.*, “DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH),” *Comput. Phys. Commun.*, vol. 187, pp. 204–216, 2015.
- [12] J. J. Monaghan dan J. C. Lattanzio, “A refined particle method for astrophysical problems,” *Astron. Astrophys.*, vol. 149, pp. 135–143, 1985.
- [13] H. Wendland, “Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree,” *Adv. Comput. Math.*, vol. 4, no. 1, pp. 389–396, 1995.
- [14] H. Hu, J. Zhang, dan T. Li, “Dam-Break Flows: Comparison between Flow-3D, MIKE 3 FM, dan Analytical Solutions with Experimental Data,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, p. 2456, 2018.
- [15] “QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation.” 2018.
- [16] G. Lauber dan W. H. Hager, “Experiments to dambreak wave: Horizontal channel,” *J. Hydraul. Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 291–307, 1998.