

Penerapan *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) pada bidang *Marine Engineering*

Andi Trimulyono¹⁾, Samuel¹⁾, Ari Wibawa B. S¹⁾

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia

Email : trimul.andi85@gmail.com

Abstract – *Smoothed particle hydrodynamics* (SPH) adalah salah satu metode numerik berbasis Lagrangian yang dikembangkan oleh Monaghan untuk persoalan astrofisika. Monaghan mengembangkan SPH tidak hanya untuk kasus astrofisika namun juga untuk kasus-kasus aliran permukaan bebas (*free surface flow*). Pada studi kali ini akan dibahas mengenai penerapan SPH untuk kasus gelombang air. Pada studi ini DualSPHysics versi 4.4 digunakan untuk memodelkan gelombang air secara 2D. Dalam studi ini *open boundaries* digunakan untuk memodelkan pembangkit gelombang air. Studi ini menunjukkan bahwa penggunaan *open boundaries inlet* telah sukses untuk mereproduksi gelombang air regular. Studi terdahulu menunjukkan SPH memiliki akurasi yang cukup tinggi dibandingkan hasil eksperimen. Hasil ini menunjukkan SPH memiliki aplikasi yang lebih luas untuk permasalahan teknik baik pada umumnya maupun khususnya pada teknik kelautan. Pada studi ini *open boundaries* digunakan pada SPH untuk pembangkit gelombang air pada *open source* SPH solver DualSPHysics. Penerapan SPH untuk bidang teknik kelautan dan bidang lainnya yang berkaitan semakin terbuka lebar dengan keberhasilan penerapan *open boundaries* pada SPH

Kata kunci: *Smoothed Particle hydrodynamics, free surface flow, open boundaries, open source, DualSPHysics*

I. PENDAHULUAN

Smoothed particle hydrodynamics (SPH) adalah salah satu metode numerik berbasis Lagrangian yang dikembangkan Monaghan untuk persoalan astrofisika [1]. Monaghan mengembangkan SPH tidak hanya untuk kasus astrofisika namun juga untuk kasus-kasus permukaan bebas (*free surface flow*) [2]. Pada studi kali ini akan dibahas mengenai penerapan SPH untuk kasus gelombang air. Pada Studi ini DualSPHysics [3] ver. 4.4 digunakan untuk memodelkan gelombang air secara dua dimensi menggunakan *open boundaries*. Fitur *open boundaries* pada DualSPHysics dikembangkan oleh Tafuni et al [4]. Dengan fitur ini memudahkan para pengguna DualSPHysics untuk memodelkan *open boundaries* seperti pada metode *mesh-based*. *Inlet* dan *outlet* telah terpasang pada DualSPHysics versi 4.4.

Studi pemodelan gelombang air menggunakan SPH telah banyak dilakukan. Barreiro et al [5] memodelkan gelombang untuk kasus teknik pantai, dimana dilakukan pemodelan gelombang pantai dengan pelindung pantai. Altomare et al [6] memodelkan gelombang air menggunakan DualSPHysics dan mengembangkan fitur terbaru untuk meredam gelombang. Sehingga tidak ada gelombang pantul (*reflection*). Altomare et al [7] juga mengembangkan fitur gelombang *solitare* pada DualSPHysics yang digunakan untuk memodelkan gelombang tsunami. Verbrugge et al [8] menggunakan

SPH untuk memodelkan nonlinier gelombang untuk menghitung interaksi gelombang dengan *oscillating water column* (OWC). Trimulyono dan Hashimoto [9] menggunakan SPH untuk memodelkan gelombang 2D dan 3D serta melakukan validasi dengan eksperimen.

Berdasarkan studi yang telah dilakukan belum banyak dilakukan pemodelan gelombang menggunakan *open boundaries* pada SPH. Pada studi ini akan dilakukan sebuah studi penggunaan *open boundaries* untuk memodelkan gelombang menggunakan SPH. Pemodelan hanya dilakukan secara 2D serta tidak melakukan validasi dengan eksperimen. Pemodelan ini merupakan salah satu fitur terbaru yang dikembangkan oleh salah satu pengembang *software* DualSPHysics.

II. TINJAUAN PUSTAKA

SPH merupakan salah satu metode *computational fluid dynamics* (CFD) yang berbasis Lagrangian dan *meshless-based*. Metode ini pertama kali dikembangkan oleh Monaghan [1]. Pada perkembangannya metode ini dikembangkan untuk masalah-masalah aliran permukaan bebas [2]. SPH merupakan metode CFD yang belum kokoh seperti metode CFD *mesh-based*. Namun perkembangan SPH menunjukkan hasil yang sangat signifikan dalam dekade ini. Sebelumnya implementasi *open boundaries* sulit untuk diimplementasikan pada SPH namun Tafuni et al

[4] berhasil mengimplimentasikannya pada SPH yang berbasis *Graphics Processing Units*(GPU).

Sebelum implementasi GPU untuk SPH, komputasi SPH menggunakan CPU memerlukan waktu yang lama dikarenakan perhitungan interpolasi pada SPH berdasarkan nilai dari properti partikel yang berdekatan (*neighbour particle*). Implementasi SPH pada GPU membuat komputasi lebih cepat dan efisien. implementasi GPU pada DualSPHysics dikembangkan oleh Crespo et al [10]. Ini membuat komputasi SPH dengan jutaan partikel menjadi bisa dilakukan.

Studi SPH untuk permasalahan gelombang telah banyak dilakukan baik menggunakan DualSPHysics maupun *software* lainnya. Pada studi ini DualSPHysics digunakan untuk memodelkan gelombang air dengan *open boundaries*. Pada pemodelan *open boundaries* terdapat *buffer zone* yang berguna untuk menciptakan partikel (*inlet*) dan menghapus partikel (*outlet*) untuk lebih jelasnya implementasi *open boundaries* dapat dilihat pada Tafuni et al [4]. Implementasi *open boundaries* juga memudahkan penerapan SPH untuk kasus-kasus yang lebih kompleks baik pada bidang teknik maupun bidang lainnya. Diharapkan metode ini mampu sejajar dengan metode CFD *mesh-based* yang telah mencapai puncak ‘kematangan’ dalam kasus-kasus aliran permukaan bebas (*free surface flow*) dan aliran dalam (*internal flow*). Studi ini akan menggunakan *inlet* sebagai pembangkit gelombang (*wavemaker*) pada sisi lainnya *outlet* digunakan sebagai sisi peredam gelombang sehingga tidak ada gelombang pantul pada domain.

III. METHODOLOGY

SPH merupakan salah satu metode CFD yang berbasis Lagrangian dan *non-grid*. Untuk lebih detail mengenai basis theory dari SPH dapat merujuk ke Liu et al[11]. Dalam SPH domain permasalahan di diskritasi dengan point/partikel. Tiap partikel membawa properti seperti massa, kecepatan atau posisi masing-masing. SPH menggunakan metode interpolasi untuk menghitung kuantitas properti fisik suatu point/partikel maka metode ini bisa disebut juga *interpolan method*. Bila suatu fungsi $F(\mathbf{r})$ dalam domain Ω dapat didekati dengan pendekatan integral seperti persamaan (1) dimana W adalah *kernel function* dan \mathbf{r} adalah vector posisi.

$$F(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} F(\mathbf{r}')W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)d\mathbf{r}' \quad (1)$$

Persamaan (1) jika dalam bentuk diskrit dapat diubah dengan mengubah bentuk integral dengan sebuah

penjumlahan partikel yang terdapat dalam suatu *kernel function* pada partikel a . Persamaan (1) berubah menjadi persamaan(2) dimana volume dari suatu partikel b adalah m_b/ρ_b .

$$F(\mathbf{r}_a) \approx \sum_b F(\mathbf{r}_b)W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \frac{m_b}{\rho_b} \quad (2)$$

Pada simulasi SPH ini kita menggunakan *Wendland kernel function* [12]. Persamaan (3) merupakan bentuk fungsi dari *Wendland kernel function* dimana α_D sama dengan $7/4\pi h^2$ dalam 2-D dan $21/164\pi h^3$ pada 3-D. q merupakan jarak tidak berdimensi antar partikel a dan b yang didefinisikan r/h dengan h adalah *smoothing length*.

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

Persamaan (4) merupakan bentuk persamaan momentum dimana untuk efek dari disipasi menggunakan artificial viscosity(Π_{ab}) yang dikembangkan oleh Monaghan[13]. Dimana $\mu_{ab} = h\mathbf{v}_{ab} \cdot \frac{\mathbf{r}_{ab}}{(r_{ab}^2 + \eta^2)}$; $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$; $\mathbf{v}_{ab} = \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$ dengan \mathbf{v} dan \mathbf{r} adalah vector kecepatan dan posisi dan $\eta^2 = 0.01h^2$, $\bar{c}_{ab} = 0.5(c_a + c_b)$ adalah rata-rata kecepatan suara antar partikel.

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_a + P_b}{\rho_a \rho_b} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} \quad (4)$$

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab}}{\rho_{ab}} & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} < 0 \\ 0 & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} > 0 \end{cases}$$

Persamaan (5) merupakan persamaan kontinuitas SPH tanpa delta-SPH. Persamaan (6) merupakan persamaan kontinuitas dengan delta-SPH berdasarkan bentuk dari Molteni and Colagrossi[14].

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \nabla_a W_{ab} \quad (5)$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} + 2\delta h c_0 \sum_b (\rho_b - \rho_a) \frac{\mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{r_{ab}^2} \frac{m_b}{\rho_b} \quad (6)$$

Karena DualSPHysics berdasarkan *weakly compressible SPH* (WCSPH), diperlukan persamaan *equation of state* untuk menghitung tekanan berdasarkan densitas. Persamaan (7) merupakan *state equation* dari SPH

berdasarkan *Tait's equation*. Dimana $b = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma}$, $c_0 = c(\rho_0)$
 $= \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}}|_{\rho_0}$ dengan c_0 , ρ_0 and γ adalah kecepatan suara, densitas acuan, dan konstanta polytrophic .

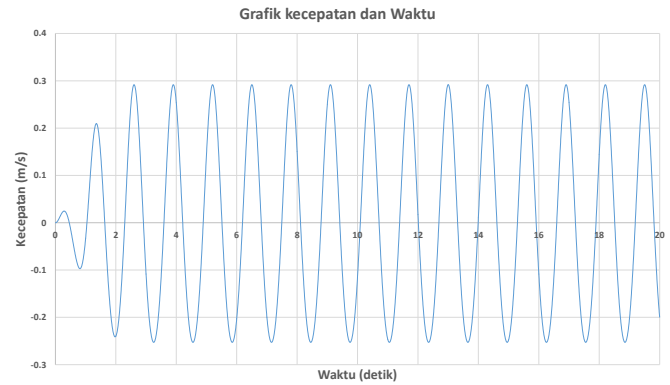
$$P = b \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \tag{7}$$

Tabel 1 menunjukkan parameter *setup* pada DualSPHysics. Untuk *time-step* waktu simulasi 0.02 s dengan waktu simulasi 10 detik. Jarak partikel awal 0.01 m sehingga total partikel dalam simulasi ini 23.765. waktu total yang diperlukan untuk simulasi ini adalah 642.58 detik. Delta-SPH yang digunakan adalah 0.0 karena pada studi ini tekanan merupakan bukan variabel utama dan untuk mengurangi ketidakstabilan partikel.

Tabel 1. Tabel parameter pada DualSPHysics

<i>Parameter pada DualSPHysics</i>	
<i>Kernel function</i>	<i>Wendland</i>
<i>Time step algorithm</i>	<i>Symplectic</i>
<i>Viscosity treatment</i>	<i>Artificial Viscosity</i>
<i>Coefsound</i>	20
<i>Particle size (m)</i>	0.01
<i>Coefh</i>	1.2
<i>CFL number</i>	0.2
<i>δ-SPH</i>	0.0
<i>Time simulation (s)</i>	10

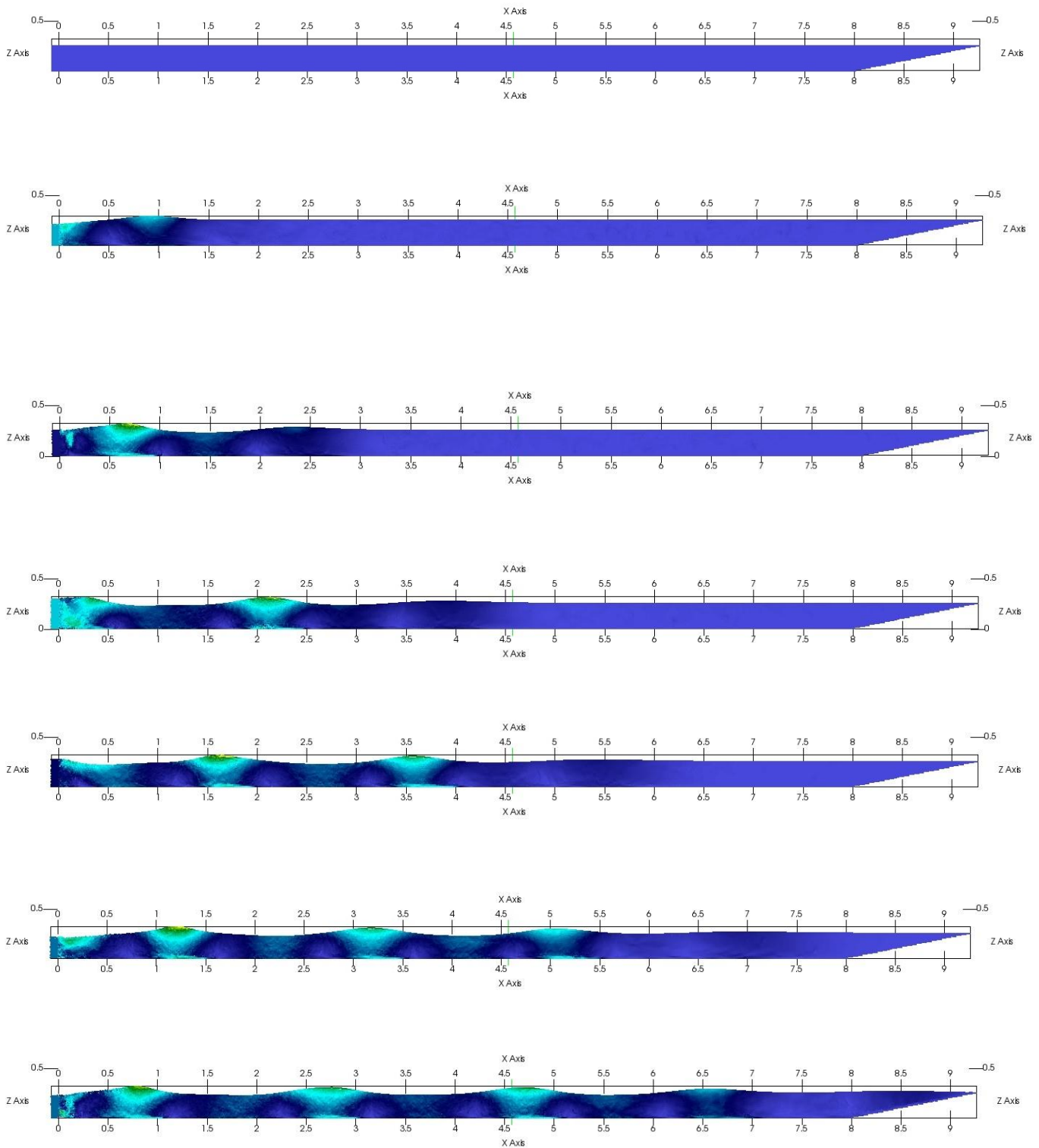
Gambar 1. adalah grafik hubungan antara kecepatan dan waktu untuk partikel didaerah *inlet*. Pada *open boundaries*, partikel dapat diciptakan menggunakan beberapa teknik diantaranya interpolasi dengan partikel terdekat atau mendefinisikan properties partikel. Pada simulasi ini pada inlet digunakan 8 lapis partikel untuk *inlet*.

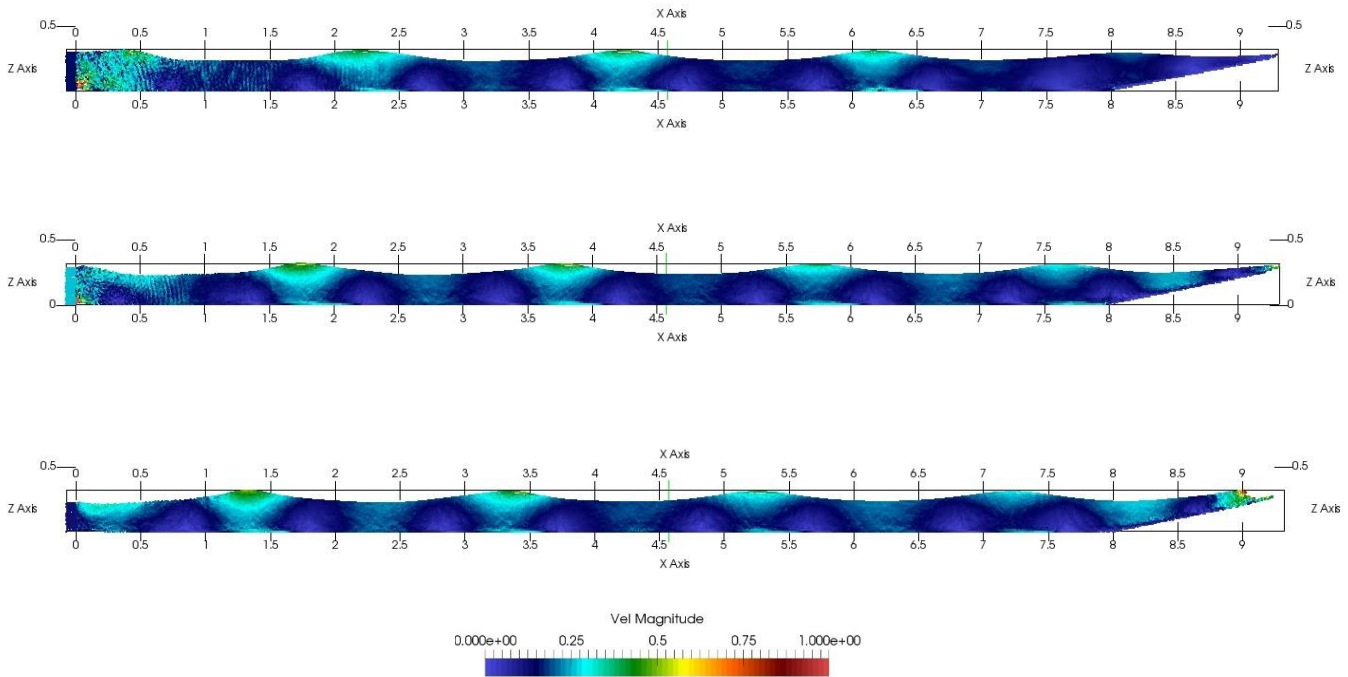


Gambar 1. Grafik kecepatan dan waktu untuk membuat gelombang

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 merupakan hasil simulasi gelombang menggunakan *open boundaries* di SPH. Teknik penggunaan *open boundaries* tergolong relatif baru di SPH dan yang perlu dicatat simulasi ini juga dilakukan menggunakan teknologi *general purpose of computing in graphics processing units* (GPGPU). Seperti diketahui dengan simulasi SPH waktu simulasi menjadi lama dikarenakan diperlukan perhitungan properti suatu partikel berdasarkan interaksi dengan partikel terdekatnya. Semakin banyak partikel yang digunakan maka waktu simulasi juga akan semakin lama. Teknologi GPGPU membuat komputasi SPH menjadi lebih cepat dan efisien. Teknologi ini juga membuat aplikasi SPH dengan jutaan partikel menjadi mungkin dilakukan. Sehingga aplikasi SPH untuk permasalahan teknik dan permasalahan umum lainnya dapat dilakukan dengan teknik ini.

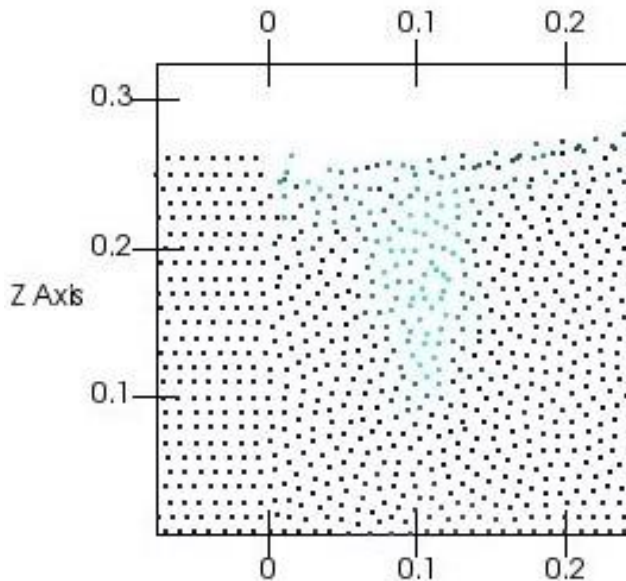




Gambar 2. Simulasi gelombang air dengan open boundaries untuk $t = 0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10$ detik.

Gambar 2 warna merah menunjukkan kecepatan maksimum dan warna biru menunjukkan kecepatan minimum pada domain. Gambar 2 menunjukkan bahwa kecepatan di daerah permukaan memiliki kecepatan yang lebih besar dibandingkan dasar tangki. fenomena ini disebabkan kecepatan akan semakin berkurang dengan kedalaman air dan fenomena ini berhasil direproduksi SPH. Fenomena ini sesuai dari hasil simulasi numerik sebelumnya [9]. Pada studi ini ujung dari domain dibuat slope sebagai peredam gelombang agar tidak ada gelombang pantul (*reflection wave*). Teknik ini juga digunakan untuk mengurangi waktu komputasi dibandingkan menggunakan fitur *active wave absorption system* (AWAS) yang juga tersedia di fitur DualSPHysics

Gambar 3 merupakan detail partikel di daerah *inlet*. Terlihat pada gambar tersebut terdapat 8 lapis partikel di *inlet* sebelum kordinat nol (0,0). Dikarenakan gelombang air yang direproduksi adalah gelombang regular maka simulasi gelombang 2D dapat digunakan. Hal lainnya adalah gelombang yang reproduksi hanya satu arah (sumbu x). Namun untuk menghasilkan studi yang komprehensif perlunya simulasi numerik 3D dan simulasi 3D dengan multi-arah *inlet* seperti contoh simulasi yang terdapat pada DualSPHysics. Penerapan open boundaries terhadap bidang teknik perkapalan seperti menghitung hambatan kapal menjadi mungkin untuk dilakukan dengan teknik ini



Gambar 3. Tampak detail *inlet* untuk $t = 3.0$ detik.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Studi berkaitan gelombang air dengan SPH telah banyak dilakukan dalam studi terdahulu. Pada studi ini gelombang air direproduksi menggunakan teknik *open boundaries inlet* pada SPH dengan menggunakan DualSPHysics versi 4.4. Teknik ini berhasil digunakan untuk pembangkit gelombang air regular 2D. Diharapkan studi lanjutan dengan teknik yang sama dalam 3D perlu dikerjakan agar didapatkan hasil yang komprehensif mengenai penerapan open boundaries untuk bidang teknik kelautan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. . Gingold and J. . Monaghan, "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars," *Mon. Not. R. astr. Soc.*, vol. 181, no. 3, pp. 375–389, 1977.
- [2] J. J. Monaghan, "Simulating Free Surface Flows with SPH," *J. Comput. Phys.*, vol. 110, no. 2, pp. 399–406, 1994.
- [3] 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.
- [4] A. Tafuni, J. M. Domínguez, R. Vacondio, and A. J. C. Crespo, "A versatile algorithm for the treatment of open boundary conditions in Smoothed particle hydrodynamics GPU models," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 342, pp. 604–624, 2018.
- [5] A. Barreiro, A. J. C. Crespo, J. M. Domínguez, and M. Gómez-Gesteira, "Smoothed Particle Hydrodynamics for coastal engineering problems," *Comput. Struct.*, vol. 120, pp. 96–106, 2013.
- [6] C. Altomare *et al.*, "Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model," *Coast. Eng.*, vol. 127, pp. 37–54, 2017.
- [7] C. Altomare, J. González-Cao, J. M. Domínguez, A. J. C. Crespo, M. Gómez-Gesteira, and P. Lomonaco, "Generation of trains of tsunami-like solitary waves in DualSPHysics model," *Proc. 12th Int. SPHERIC Work. Ourense, 13-15 June 2017, Univ. Vigo, Spain*, pp. 83–89, 2017.
- [8] T. Verbrugghe *et al.*, "Coupling methodology for smoothed particle hydrodynamics modelling of non-linear wave-structure interactions," *Coast. Eng.*, vol. 138, pp. 184–198, Aug. 2018.
- [9] A. Trimulyono and H. Hashimoto, "Experimental Validation of Smoothed Particle Hydrodynamics on Generation and Propagation of Water Waves," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 1, p. 17, 2019.
- [10] A. C. Crespo, J. M. Dominguez, A. Barreiro, M. Gómez-Gesteira, and B. D. Rogers, "GPUs, a New Tool of Acceleration in CFD: Efficiency and Reliability on Smoothed Particle Hydrodynamics Methods," *PLoS One*, vol. 6, no. 6, 2011.
- [11] G.-R. Liu and M. B. Liu, *Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method*. World Scientific, 2003.
- [12] 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.
- [13] J. J. Monaghan, "Smoothed Particle Hydrodynamics," *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 30, pp. 543–74, 1992.

- [14] D. Molteni and A. Colagrossi, "A simple procedure to improve the pressure evaluation in hydrodynamic context using the SPH," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 180, no. 6, pp. 861–872, 2009.