



Simulasi Numerik *Large-Deformation Surface Wave* Dengan *Smoothed Particle Hydrodynamics*

Andi Trimulyono^{1*)}, Ardhana Wicaksono²⁾

¹⁾Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, Kobe 658-0022, Japan

²⁾Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka 565-087, Japan

diajukan pada : 25/12/18

direvisi pada : 13/02/19

diterima pada : 14/02/19

Abstrak

Studi mengenai gelombang permukaan (*surface wave*) telah banyak dilakukan baik secara eksperimen, teoritis maupun komputasi. Perkembangan teknologi komputer membuat komputasi dinamika fluida komputasi menjadi lebih cepat dan efisien salah teknologi untuk mempercepat komputasi *general purpose of computing Graphics processor units(GPGPU)*. Pada artikel ini komputasi numerik *large-deformation surface wave* dilakukan dengan *Graphics processor units (GPUs)*. Simulasi numerik *large-deformation surface wave* menggunakan SPH dalam 2D dan 3D. Untuk mendapatkan efek dari perubahan kedalaman secara simultan digunakan *box* pada *numerical wave tank (NWT)* fenomena ini dikenal sebagai "*bank effect*". Tujuan dari studi ini adalah untuk mereproduksi fenomena fisik dari pemodelan gelombang reguler maupun gelombang nonlinear dengan menggunakan *obstacle box* untuk mereproduksi fenomena *large-deformation surface wave*. Manfaat dari studi ini adalah fenomena *large-deformation surface wave* dapat direproduksi dengan SPH serta aplikasi SPH untuk permasalahan yang lebih kompleks dalam bidang teknik kelautan. Hasil dari studi ini menunjukkan bahwa simulasi numerik SPH untuk *large-deformation surface wave* 2D dan 3D dapat direproduksi oleh SPH. SPH memiliki akurasi yang cukup tinggi baik untuk elevasi gelombang reguler maupun nonlinear.

Copyright © 2018, **KAPAL**, 1829-8370 (p), 2301-9069(e)

Kata Kunci : *large-deformation surface wave, GPGPU, SPH, numerical wave tank*

1. PENDAHULUAN

Studi mengenai gelombang permukaan telah banyak dilakukan oleh peneliti baik menggunakan eksperimen, teoritis dan komputasi menggunakan komputer. Perkembangan teknologi komputer yang pesat membuat komputasi dinamika fluida komputasi (*CFD*) menjadi lebih cepat dan efisien. Salah satu teknologi komputasi yaitu penggunaan *Graphics processor units (GPUs)* untuk komputasi numerik atau biasa disebut *general purpose of computing graphics processor units(GPGPU)* [1].

GPUs yang awalnya dikembangkan untuk industri *video games* merupakan salah satu alat

yang murah dan efisien untuk mempercepat komputasi dinamika fluida komputasi[1]. Salah satu aplikasi dari dinamika fluida komputasi adalah pemodelan gelombang pada *numerical wave tank (NWT)*. Karena permasalahan gelombang berkaitan erat dengan aliran *free-surface* dan *large-deformation* maka *smoothed particle hydrodynamics (SPH)* sangat tepat untuk digunakan.

SPH merupakan salah satu metode dinamika fluida komputasi *non-grid* dan termasuk dalam metode Lagrangian. SPH pertama kali digunakan untuk permasalahan astrofisika [2], namun dalam perkembangannya Monaghan mengembangkannya untuk permasalahan aliran *free-surface* [3] dimana

*) Penulis Korespondensi :

Email : anditrimulyono@gmail.com

contoh permasalahan ini adalah *dam break* dan simulasi gelombang.

Simulasi gelombang pada NWT telah banyak dilakukan baik dengan metode *grid* maupun *non-grid*. Salah satu keuntungan metode *non-grid* adalah tidak perlunya algoritma khusus untuk mendeteksi *free-surface*, tidak perlunya pembuatan *grid structure* yang menyita waktu dan karena tidaknya adanya *grid* membuat metode ini cocok untuk permasalahan *free-surface flow* di bidang teknik kelautan dan pantai.

Aplikasi SPH pada bidang teknik pantai diantaranya menghitung gaya hidrodinamik untuk interaksi fluida dan struktur pada bangunan pesisir pantai [4,5]. Altomare et al. menggunakan SPH untuk memvalidasi gelombang reguler dan irreguler dengan gelombang *Stokes* order dua [6]. Pemodelan gelombang menggunakan SPH juga memiliki akurasi yang cukup tinggi dengan menggunakan NWT yang cukup besar [7].

Studi ini mengkaji mengenai pengaruh kedalaman air terhadap gelombang permukaan atau sering disebut juga "*bank effect*". Dimana pergantian kedalaman air terjadi secara simultan dengan menggunakan *box* pada 2D dan 3D NWT. Simulasi gelombang permukaan dilakukan dengan menggunakan *open source SPH-solver DualSPHysics* versi 4.0 [8]. Penelitian terdahulu menunjukkan SPH memiliki akurasi yang cukup tinggi untuk analisa 2D "*bank effect*" dengan menggunakan NWT yang besar [9].

Studi ini bertujuan untuk mereproduksi simulasi numerik *large-deformation surface wave* atau dikenal juga "*bank effects*" dengan SPH baik dengan simulasi 2D maupun 3D dengan dimensi NWT berukuran sedang. Adapun manfaat dari studi ini adalah fenomena *large-deformation surface wave* dapat direproduksi dengan SPH serta peluang penggunaan SPH untuk permasalahan yang lebih kompleks dalam bidang teknik kelautan maupun teknik pada umumnya.

2. METODE

2.1. Metode SPH

SPH merupakan salah satu metode dinamika fluida komputasi yang berbasis Lagrangian dan *non-grid* yang dikembangkan pertama kali oleh Monaghan untuk masalah astrofisika [2]. Namun dalam perkembangannya metode ini dikembangkan untuk aliran-aliran *free-surface* [3]. Untuk lebih detail mengenai basis theory dari SPH dapat merujuk ke Liu et al. [10]. Dalam SPH domain permasalahan di diskritisasi dengan titik/partikel. Tiap partikel membawa properti seperti massa, kecepatan atau posisi masing-

masing. SPH menggunakan metode interpolasi untuk menghitung kuantitas properti fisik suatu titik/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* [11]. Persamaan (3) merupakan bentuk fungsi dari *Wendland kernel function* dimana α_D sama dengan $7/4\pi h^2$ dalam 2D dan $21/164\pi h^3$ pada 3D. 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 [12]. 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{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.

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

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

Persamaan (5) merupakan persamaan kontinuitas SPH tanpa delta-SPH. Persamaan (6) merupakan persamaan kontinuitas dengan delta-SPH berdasarkan bentuk dari Molteni and Colagrossi[13].

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

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

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

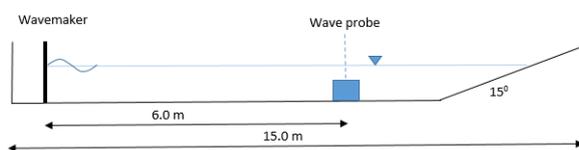
$$P = b \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (7)$$

2.2. Permodelan Numerik di NWT

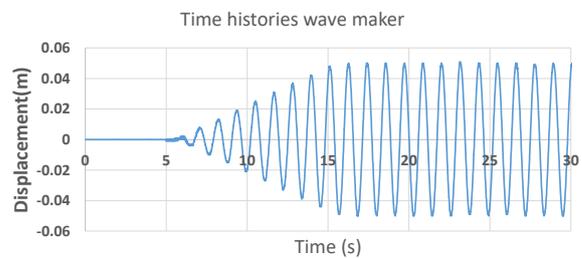
Sebelum melakukan simulasi numerik dengan SPH, beberapa eksperimen telah dilakukan di towing tank Kobe University. Towing tank memiliki panjang 60,0 m, lebar 6,0 m dan kedalaman air yang biasa diatur hingga maksimum 1,5 m. Data eksperimen pada artikel ini merupakan hasil dari penelitian sebelumnya[9]. Wave probe diletakkan 6,0 m didepan pembangkit gelombang. Pembangkit gelombang menggunakan periode 1,15 s dan kedalaman air 0,4 m.

Untuk mendapatkan efek pergantian kedalaman air secara simultan diletakkan *box* di NWT dengan jarak 6,0 m didepan pembangkit gelombang. Dimensi *box* dengan tinggi 0,25 m, lebar 0,3 dan panjang 0,5 m. *Wave probe* diletakkan ditengah *box* yang jaraknya 6,0 dari pembangkit gelombang, untuk lebih jelasnya lihat Gambar 1.

Time histories dari pembangkit gelombang ditunjukkan pada Gambar 2. Grafik ini merupakan hasil dari eksperimen untuk gerakan *wave-making board* / piston pada *wavemaker*. Dimana gerakan pembangkit gelombang didapatkan dengan menggunakan sensor laser yang diletakkan didepan pembangkit gelombang. Untuk lebih detail mengenai eksperimen yang telah dilakukan dapat dilihat pada referensi [9].



Gambar 1. Sketsa pemodelan numerik 2D and 3D di NWT.



Gambar 2. Time histories gerakan pembangkit gelombang di NWT.

Pada pemodelan numerik gelombang dengan SPH, piston pembangkit gelombang diberikan waktu 5 s untuk kondisi statik kemudian piston bergerak sesuai dengan *time histories* sesuai dari input motion yang diberikan. Tabel 1. Menunjukkan parameter yang di gunakan di DualSPHysics. Jarak partikel adalah 4.5 mm sehingga total partikel untuk 2D adalah 151.014 dan untuk 3D adalah 11.779.752. Simulasi SPH dilakukan menggunakan GPU GeForce GTX 1080 8 GB DDR5 total simulasi untuk 30 s adalah 11.3 jam.

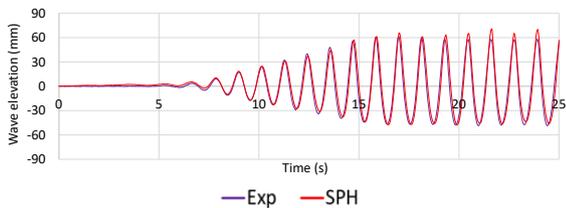
Tabel 1. Parameter *setup* di DualSPHysics

Jenis Parameter	Nilai
<i>Kernel Function</i>	Wendland
<i>Time step algorithm</i>	Symplectic
<i>Artificial viscosity coeff. a</i>	0,01
<i>Coefsound</i>	20,0
<i>Particle spacing(mm)</i>	4,5
<i>Coefh</i>	1,2
<i>CFL number</i>	0,3
<i>Delta-SPH</i>	0,1
<i>Simulation time</i>	30,0

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi numerik SPH untuk tanpa adanya *box* ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan hasil simulasi SPH dengan eksperimen untuk *wave probe* 6,0 m menunjukkan SPH memiliki akurasi yang tinggi untuk elevasi gelombang *reguler* tanpa adanya *box*. Simulasi ini merupakan simulasi SPH 2D dan simulasi 3D dilakukan setelah simulasi 2D tervalidasi dengan eksperimen.

Gambar 3. memperlihatkan bahwa SPH memiliki akurasi yang cukup tinggi. Ini diperlihatkan kecepatan gelombang antara SPH dengan eksperimen memiliki hasil yang sama, dimana tidak terjadinya beda phase pada grafik elevasi gelombang. Gelombang pertama yang sampai pada *wave probe* juga memiliki hasil yang sama dengan eksperimen. Elevasi gelombang antara SPH dengan eksperimen pun memiliki akurasi yang cukup tinggi berdasarkan Gambar 3.



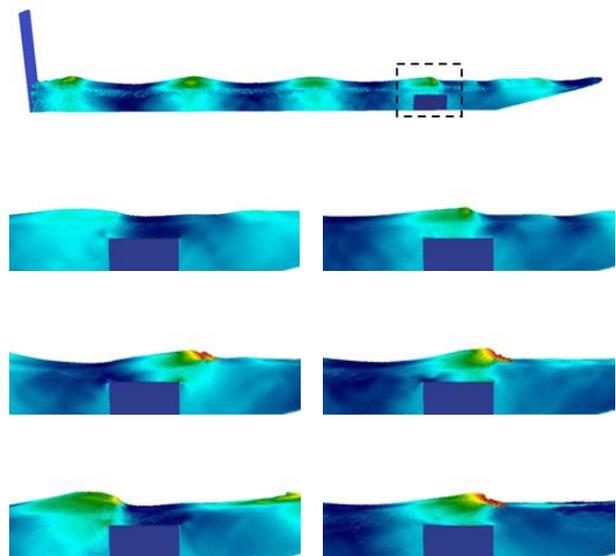
Gambar 3. Perbandingan hasil tinggi elevasi gelombang antara SPH dan eksperimen.

Gambar 4. memperlihatkan hasil simulasi SPH untuk *large-deformation surface wave* dengan menggunakan *box*. Dengan menggunakan periode 1,15 s maka panjang gelombang adalah 2,0 m sehingga diperlukan 3 gelombang untuk mencapai *wave probe*.

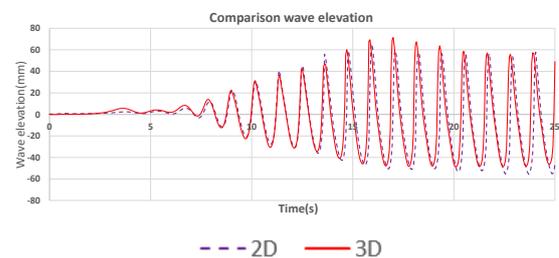
Gambar 4. menunjukkan gelombang sebelum melewati *box* berbentuk reguler namun saat gelombang mulai melewati *box* berubah menjadi nonlinear. Ini dikarenakan saat gelombang melewati *box* gelombang mulai pecah (*plunging*) kemudian gelombang berubah pada fase menggulung (*collapsing*). Ini terjadi karena perubahan kedalaman air yang simultan dikarenakan *box*. Pada saat gelombang berada diantara *box* maka tinggi gelombang berubah menjadi lebih tinggi dibandingkan sebelum gelombang melewati *box* hal ini menyebabkan kecepatan gelombang setelah melewati *box* juga lebih cepat.

Pemodelan gelombang dengan SPH memiliki akurasi yang cukup tinggi untuk menangkap fenomena *large-deformation surface wave*. Ini terlihat juga dari hasil pemodelan dengan menggunakan NWT yang besar [9].

Gambar 5. merupakan grafik perbandingan elevasi tinggi gelombang *large-deformation surface wave* 2D dan 3D. berdasarkan perbandingan hasil nilai elevasi tinggi gelombang terdapat sedikit perbedaan pada hasil 3D. Ini dikarenakan pada domain 3D, partikel lebih kompleks dan bergerak tidak beraturan ke segala arah dibandingkan dengan domain 2D. Berdasarkan hasil tersebut SPH dapat memprediksi efek dari perubahan kedalaman air secara simultan baik dengan analisa 2D maupun 3D. Hasil ini menunjukkan SPH memiliki akurasi cukup tinggi dan SPH sangat dimungkinkan untuk digunakan pada fenomena gelombang yang lebih kompleks seperti *solitary wave*, gelombang *tsunami* maupun interaksi gelombang dengan struktur (FSI).



Gambar 4. Snapshot dari *large deformation of waves surface* pada $t = 16 \text{ s}, 17.5 \text{ s}, 20 \text{ s}, 21 \text{ s}, 27.5 \text{ s}, 29 \text{ s}$.



Gambar 5. Perbandingan hasil tinggi elevasi gelombang *large-deformation* dengan *box* untuk 2D dan 3D.

4. KESIMPULAN

SPH merupakan salah satu metode dinamika fluida komputasi yang cukup baru yang berbasis Lagrangian dan *non-grid* menunjukkan hasil akurasi yang cukup tinggi untuk pemodelan numerik gelombang. Baik gelombang reguler tanpa adanya perubahan kedalaman air maupun adanya perubahan kedalaman air secara simultan dengan *box*. SPH dapat memprediksi fenomena "*bank effects*" karena terjadinya perubahan kedalaman air secara simultan dengan menggunakan *obstacle box*.

Berdasarkan hasil simulasi numerik SPH elevasi tinggi gelombang dapat tervalidasi dengan hasil eksperimen untuk gelombang reguler. Elevasi gelombang dapat diprediksi dengan akurat oleh SPH baik untuk gelombang reguler maupun untuk gelombang *nonlinear* dengan menggunakan *box* untuk mendapatkan efek *large-deformation surface wave*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis pertama mengucapkan terima kasih kepada kemenristekdikti untuk beasiswa BPP-LN No. 181.47/E4.4/2014.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. C. Crespo, D. Benedict, J. M. Dominguez, A. Barreiro, and M. Go, "GPUs , a New Tool of Acceleration in CFD: Efficiency and Reliability on Smoothed Particle Hydrodynamics Methods," *PLoS One*, vol. 6, no. 6, 2011.
- [2] J. J. Gingold, Monaghan, "Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-Spherical Stars," *Mon.Not.R.ast.Soc*, vol. 181, pp. 375–389, 1977.
- [3] J. J. Monaghan, "Simulating Free Surface Flows with SPH," *J. Comput. Phys.*, vol. 110, no. 2, pp. 399–406, 1994.
- [4] 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.
- [5] C. Altomare, A. J. C. Crespo, B. D. Rogers, J. M. Dominguez, X. Gironella, and M. Gómez-Gesteira, "Numerical modelling of armour block sea breakwater with smoothed particle hydrodynamics," *Comput. Struct.*, vol. 130, pp. 34–45, Jan. 2014.
- [6] C. Altomare *et al.*, "Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model," *Coast. Eng.*, vol. 127, no. June, pp. 37–54, 2017.
- [7] M. Antuono, A. Colagrossi, S. Marrone, and C. Lugni, "Propagation of gravity waves through an SPH scheme with numerical diffusive terms," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 182, no. 4, pp. 866–877, 2011.
- [8] 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.
- [9] A. Trimulyono, H. Hashimoto, and K. Kawamura, "Experimental Validation of SPH for Wave Generation and Propagation in Large Wave Tank," in *Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference San Francisco, CA, USA, June 25-30, 2017*, pp. 584–590.
- [10] G.-R. Liu and M. B. Liu, *Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method*. World Scientific, 2003.
- [11] 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.
- [12] J. J. Monaghan, "Smoothed Particle Hydrodynamics," *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 30, pp. 543–74, 1992.
- [13] 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.