

SIMULASI SMOOTHED PARTICLE HYCRODYNAMICS DUA DIMENSI DENGAN METODE DETEKSI PARTIKEL PERMUKAAN

Muh.Kiki Adi Panggayuh¹, Sri Suryani P.², Dede Tarwidi³

^{1,2,3}Prodi Ilmu Komputasi Telkom University, Bandung

¹adipanggayuh@gmail.com, ² wati100175@gmail.com, ³ dede.tarwidi@gmail.com

Abstrak

Tugas akhir ini mempresentasikan simulasi *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) dua dimensi dengan metode deteksi partikel permukaan. Dinamika fluida adalah disiplin ilmu yang mempelajari perilaku dari zat cair dan gas dalam keadaan diam maupun bergerak. Permasalahan dinamika fluida diatur oleh persamaan Navier-Stokes dan kontinuitas. Dalam menyelesaikan persamaan tersebut dapat digunakan metode SPH, dimana metode ini sering digunakan untuk membuat simulasi fluida karena dapat mendiskritkan domain fluida menjadi bentuk partikel. Pada tugas akhir ini metode SPH digunakan untuk membuat simulasi *dam break* dua dimensi, kemudian dicari bentuk permukaannya menggunakan metode deteksi partikel permukaan. Hasil simulasi *dam break* dengan jumlah 5123 partikel SPH dan durasi 3 detik menunjukkan visualisasi yang cukup realistis dalam menggambarkan pergerakan fluida.

Pada pengujian deteksi partikel permukaan menunjukkan pengaruh penting dari ketetanggaan antar partikel, jika radius ketetanggaan yang dipilih tepat maka dapat diperoleh bentuk permukaan dengan kesalahan deteksi partikel interior yang lebih kecil. Pada penerapan metode deteksi partikel untuk simulasi *dam break* dengan 5123 partikel SPH, dipilih radius ketetanggaan 0,063 sebagai radius optimal. Kendala pada metode deteksi partikel permukaan adalah sulit diterapkan pada partikel yang memiliki kepadatan rendah, karena akan terjadi kesalahan dimana sebagian partikel interior akan dianggap sebagai partikel permukaan.

Kata kunci : *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), metode deteksi partikel permukaan.

Abstract

This final project presented two-dimensional Smoothed Particle Hydrodynamics simulations (SPH) with surface particle detection methods. Fluid dynamics is the scientific disciplines that studies the behavior of liquids and gases at rest or moving. Basic fundamentals of fluid dynamics problems governed by the Navier-Stokes and continuity equations. In completing these equations can be used SPH method, where this method often used to simulate the fluid dynamics because it can discretize the fluid domain into SPH particle shape. In this final, SPH simulations is used to create two-dimensional dam break, then will be searched the surface shape using surface particle detection method. Dam break simulation results with 5123 SPH particles and a duration of 3 seconds show a fairly realistic visualization to describe the movement of fluid.

On the surface particle detection test showed significant influence of neighborhoods between the particles, if the radius of the selected neighborhoods is right can be obtained surface with lower errors detection of interior particle. On the application of particle detection method for dam break simulation with 5123 SPH particle, the neighborhoods radius 0.063 selected as the optimal radius. While constraints on testing particle detection methods are difficult to apply to particles that having a low density, because there will be errors in surface particle detection where most of the interior particles will be considered as the surface particles.

Keywords: *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), surface particle detection method.

1. Pendahuluan

Dinamika fluida adalah salah satu disiplin ilmu yang mempelajari perilaku dari zat cair dan gas dalam keadaan diam dan bergerak serta interaksinya dengan benda padat. Dinamika fluida adalah kunci untuk memahami sebagian besar dari fenomena alam yang terjadi seperti gunung berapi, gempa bumi dan banjir [6]. Dasar fundamental dari hampir semua permasalahan gelombang fluida diatur oleh dua persamaan, yaitu persamaan Navier-Stokes dan persamaan Kontinuitas. Untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes dan kontinuitas ada beberapa metode yang dapat digunakan yaitu FEM

(*Finite Element Method*) dan FVM (*Finite Volume Method*). Kedua metode tersebut memiliki kelemahan yang sulit diimplementasikan pada geometri kompleks dan diskontinu, karena pada metode FEM sulit membentuk elemen dengan bentuk fluida yang dinamis sedangkan FVM membutuhkan perhitungan yang rumit untuk keseimbangan energi.

Salah satu metode yang sering digunakan untuk membuat simulasi gelombang fluida adalah metode SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*). Kelebihan dari metode SPH adalah dapat melakukan simulasi untuk geometri kompleks dan diskontinu, yang sulit dilakukan oleh FEM dan FVM. Metode SPH memiliki kelebihan dalam mendapatkan solusi

numerik pada persamaan dinamika fluida dengan mendiskritisasi bentuk fluida menjadi bentuk partikel SPH yang lebih kecil [5].

Dalam pengembangannya SPH telah banyak digunakan untuk membuat simulasi dengan berbagai

macam kasus. Banyak informasi yang dapat diambil dari hasil simulasi tersebut. Salah satunya adalah informasi tentang bentuk permukaan gelombang

fluida yang dapat dicari menggunakan metode deteksi partikel permukaan.

pada tugas akhir ini metode deteksi partikel permukaan akan dibahas dan diimplementasikan pada simulasi SPH dua dimensi, karena pada SPH penentuan batasan permukaan masih belum begitu jelas.

2. Persamaan Navier-Stokes dan Kontinuitas

Momentum adalah sebuah nilai perkalian dari materi yang memiliki massa dengan kecepatan.

Ketika suatu benda dalam keadaan diam maka nilai momentumnya adalah nol. Persamaan momentum

(Persamaan Navier-Stokes) didefinisikan sebagai [4]:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dx} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{F} \quad (1)$$

Dengan ρ , $\mathbf{v}$, dan P masing-masing adalah densitas, vektor kecepatan dan tekanan. Sedangkan pada kasus ini gaya luar yang bekerja adalah gravitasi sehingga $\mathbf{F}$ bisa diganti dengan g .

Densitas dapat diartikan sebagai kepadatan suatu material dalam ukuran tertentu, pada kasus ini densitas bergantung pada waktu, namun perubahan densitas tidak terlalu signifikan dengan begitu untuk perubahan densitas dapat ditulis:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}, \quad (2)$$

dengan $\nabla \cdot \mathbf{v}$ adalah notasi divergensi.

Sedangkan pada formulasi SPH, persamaan (1) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_j}{\rho_j^2} - \frac{P_i}{\rho_i^2} \right) \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|} \nabla W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i, h) + \mathbf{F}_i \quad (3)$$

Dengan $\frac{d\mathbf{v}_i}{dt}$ adalah perubahan kecepatan partikel ke i terhadap waktu t yang dipengaruhi oleh

Sama seperti persamaan Navier-stokes, pada persamaan kontinuitas akan diubah untuk formulasi SPH yang dapat dituliskan:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N m_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \nabla W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h). \quad (4)$$

Dimana $\frac{d\rho_i}{dt}$ adalah perubahan densitas pada partikel ke i yang dipengaruhi oleh massa dan kecepatan dari partikel tetangga.

Sedangkan untuk menghitung hubungan antara densitas dan tekanan digunakan *equation of state* yang dapat dituliskan sebagai berikut [2]:

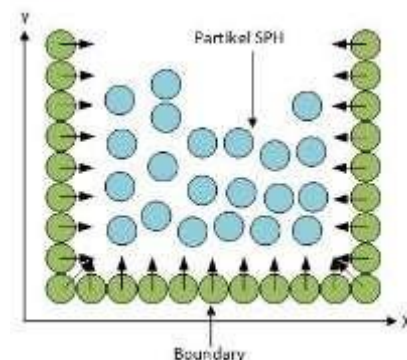
$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (5)$$

Dimana $\gamma = 7$ dan $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$, dengan

$\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ adalah densitas air dan C_0 adalah kecepatan suara.

3. Boundary

Digunakan untuk memberi batasan pada ruang gerak partikel. Batasan yang sering dibuat biasanya berupa dinding-dinding agar terlihat seperti ruangan. Gaya yang berpengaruh adalah Gaya Tolak partikel padat terhadap partikel fluida yang bekerja ketika partikel mendekati dinding akan terpental [7]. Ilustrasi boundary dapat dilihat pada Gambar 1:



massa m_i dan percepatan dari partikel tetangganya.

$\mathbf{F}_{ij} = \frac{G m_i m_j}{r_{ij}^2} \mathbf{h}$ sebagai pembobotan partikel dan $\mathbf{F}_i$ adalah gaya luar yang bekerja pada partikel i , sedangkan untuk i dan j dinotasikan sebagai indeks partikel.

Gambar 1 *Boundary*

Dengan anak panah menunjukkan vektor normal dari dinding pembatas (*Boundary*) yang memberikan gaya tolak pada partikel terdekat. Pemilihan jarak partikel pada pembatas dipengaruhi oleh inisialisasi partikel air. Jika jarak terlalu kecil maka partikel air akan terpental sebelum mendekati batas dinding. Jika terlalu besar maka akan terjadi kebocoran.

4. Alur simulasi SPH

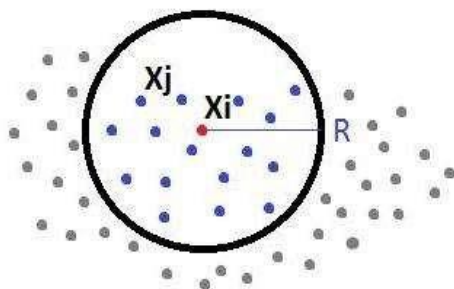
Berikut adalah langkah umum simulasi SPH yang digunakan [1]:

1. Inisialisasi, set inisial kondisi atribut untuk semua partikel SPH.
2. Ikuti langkah-langkah berikut hingga mencapai batas waktu yang telah ditentukan :
 - a. Hitung tekanan aktual untuk semua partikel menggunakan persamaan (5).
 - b. Untuk setiap partikel, masukkan pada link-list grid dan masukkan partikel yang menjadi tetangga terdekat.
 - c. Untuk setiap partikel, hitung tingkat perubahan momentum (persamaan 3) dengan menggunakan perhitungan tekanan yang baru, kemudian hitung kecepatan dan posisi yang baru.
 - d. Untuk setiap partikel, hitung tingkat perubahan densitas (persamaan 4) dengan menggunakan perhitungan kecepatan yang baru, kemudian hitung densitas yang baru.

5. Deteksi partikel permukaan

Pada pengimplementasian SPH, bentuk dari fluida terus mengalami perubahan dimana seluruh partikel bergerak saling mempengaruhi dan membentuk sebuah pola. Deteksi partikel permukaan ditujukan untuk mendapatkan bentuk dari permukaan gelombang. Salah satu metode yang digunakan yaitu dengan metode *Scan Cone*. Tahap awal dalam implementasi metode *Scan Cone* adalah menemukan partikel tetangga [1].

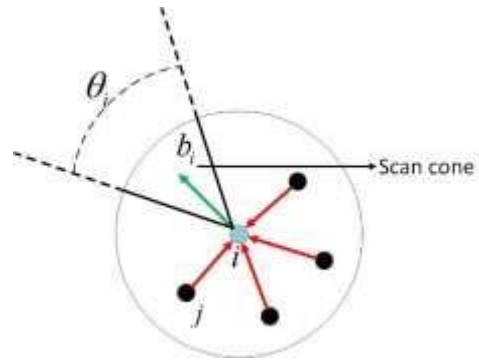
Sebagai ilustrasi setiap partikel memiliki sebuah wilayah berbentuk sebuah lingkaran dengan partikel tersebut sebagai pusatnya. Lingkaran tersebut memiliki radius R dengan nilai yang ditentukan.



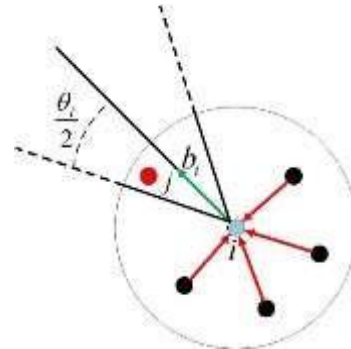
Gambar 2 deteksi partikel tetangga

Dengan i adalah partikel pusat dan j adalah partikel tetangga. Setiap partikel yang berada dalam

area lingkaran dengan radius R dianggap sebagai partikel tetangga.



Gambar 3 Ilustrasi cover vector dan scan cone



Gambar 4 Scan Cone mendeteksi adanya partikel yang masuk dalam radius.

Setelah dilakukan deteksi tetangga, partikel sebanyak n akan menjadi atribut dari partikel i . Kemudian akan dicari Cover vector b_i yang merupakan resultan dari semua partikel tetangga terhadap partikel pusat. b_i dapat didefinisikan sebagai berikut (lihat Gambar 3):

$$b_i = \sum_{j=0}^n \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|} \quad (6)$$

Arah dari b_i berfungsi memberikan perkiraan kasar arah permukaan. *Scan cone* digunakan untuk memeriksa apakah terdapat partikel yang berada di dekat i . Sudut dari cone yaitu θ_i menjadi sudut threshold untuk semua partikel di dekat i . Perhitungan *scan cone* yang digunakan untuk memeriksa partikel i diberikan sebagai berikut [1] :

$$\text{Jika } \arccos \left(\frac{(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \cdot \mathbf{b}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i| |\mathbf{b}_i|} \right) \geq \frac{\theta_i}{2} \text{ maka partikel } i \text{ adalah partikel permukaan.} \quad (7)$$

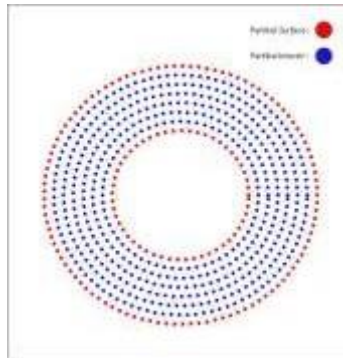
Persamaan di atas menjelaskan jika sudut yang

dibentuk antara $\mathbf{x}_j$ dan $\mathbf{b}_i$ lebih besar dari $\frac{\theta_i}{2}$ maka

partikel i dianggap sebagai partikel permukaan.

6. Validasi

Validasi metode *scan cone* dilakukan dengan menggunakan bentuk sederhana.

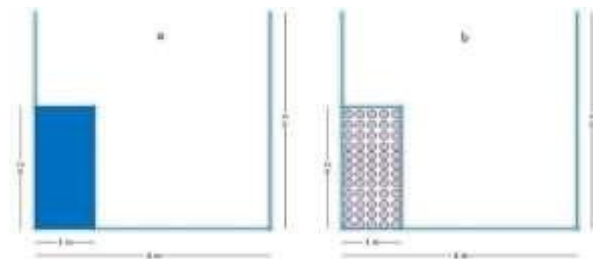


Gambar 5 Validasi.

Dari pengujian yang dilakukan pada kasus dengan bentuk sederhana dan partikel yang teratur diperoleh akurasi hingga 100%. Validasi dilakukan menggunakan bentuk sederhana karena masih dimungkinkan untuk mencari partikel permukaan secara eksak sebagai pembandingan dari hasil yang diperoleh dengan metode deteksi partikel permukaan [3]. Dalam pengujian pada kasus yang sebenarnya, tidak dimungkinkan untuk mencari partikel permukaan secara eksak karena sebaran partikel yang tidak teratur.

7. Hasil dan pembahasan

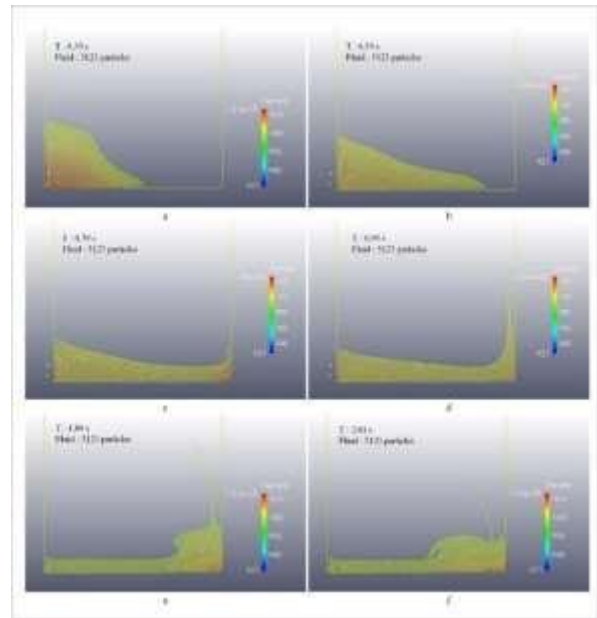
Implementasi simulasi fluida menggunakan SPH dilakukan pada kasus *dam break* dua dimensi. Tahap pertama yang dilakukan adalah inisialisasi *dam break* yang akan dibuat. Bentuk awal *dam break* adalah persegi panjang dengan tinggi 2 meter dan panjang 1 meter. Dinding pembatas yang digunakan memiliki ukuran tinggi 4 meter dan panjang 4 meter.



Gambar 6 Ilustrasi a) inisialisasi awal, b) bentuk diskrit.

Ilustrasi a adalah inisialisasi awal yang kemudian dijadikan bentuk diskrit dengan menggunakan persamaan (3) dan (4). Ilustrasi b menunjukkan bentuk diskrit yang dihasilkan. Pada simulasi ini, fluida didiskritisasi menjadi partikel-partikel SPH dengan jarak antar partikel 0,03 m dan menghasilkan

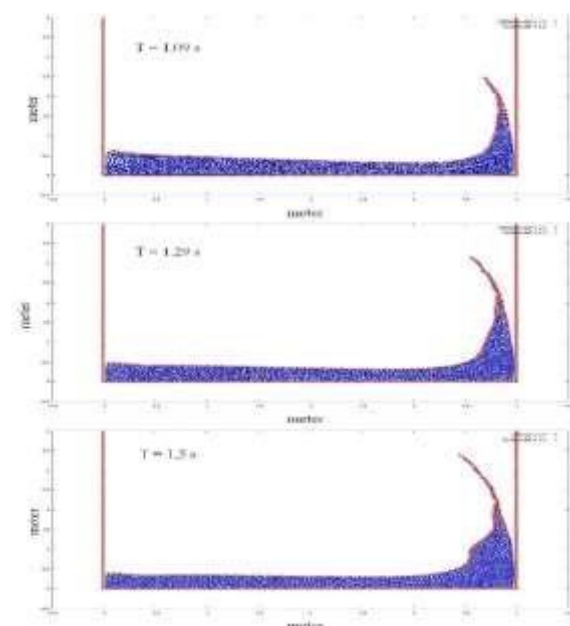
5123 partikel. Dengan inisialisasi waktu $T=3$ detik, diperoleh data set sebanyak 149 frame.



Gambar 7 Simulasi *dam break* berdasarkan densitas pada a) $T=0,39$ s, b) $T=0,59$ s, c) $T=0,79$ s, d) $T=0,99$ s, e) $T=1,80$ s, f) $T=2,01$ s.

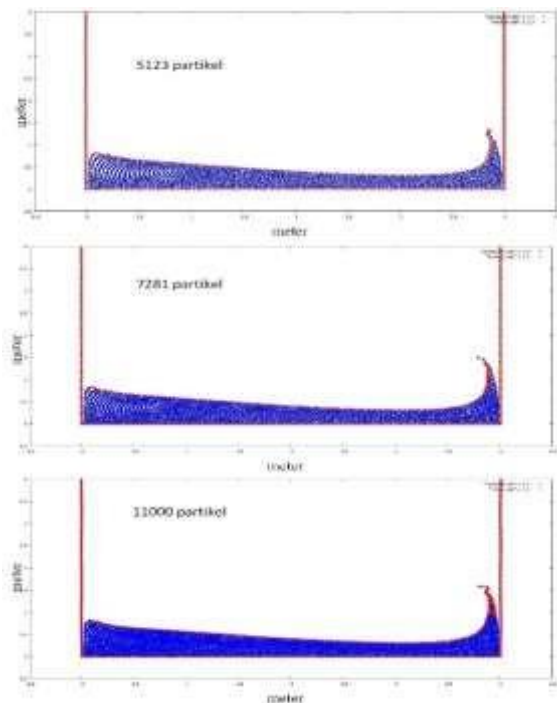
Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi berdasarkan densitas. Dari simulasi didapatkan nilai densitas rata-rata adalah 1000 kg/m^3 . Dapat dilihat pada saat $T=0,79$ s, perubahan terjadi ketika aliran fluida menabrak dinding dengan densitas mencapai lebih dari 1020 kg/m^3 .

Dari simulasi *dam break* didapatkan data posisi partikel, kemudian dilakukan deteksi partikel permukaan dengan metode *scan cone*.



Gambar 8 Pengujian berdasarkan waktu.

Pada Gambar 8 data set diambil dari simulasi *dam break* pada waktu yang berbeda. Hasil simulasi yang diuji memiliki 5123 partikel SPH, inisialisasi jarak rata-rata antar partikel 0,03 dan digunakan nilai radius optimal ketetanggaan 0,063. Nilai 0,063 diperoleh setelah dilakukan pengujian terhadap nilai radius ketetanggaan yang digunakan. Pemilihan radius ketetanggaan yang terlalu besar atau terlalu kecil dapat menyebabkan eror pada deteksi partikel permukaan.



Gambar 9 Pengujian berdasarkan jumlah partikel.

Pada Gambar 9 digunakan data set pada waktu yang sama yaitu ketika $T=0,89s$, namun memiliki jumlah partikel yang berbeda. Pada skenario berdasarkan jumlah partikel digunakan nilai radius yang berbeda-beda dengan seperti pada tabel berikut:

Tabel 1 Pengujian berdasarkan jumlah partikel.

Jumlah (partikel)	Inisialisasi awal jarak partikel (meter)	Waktu ke (detik)	Nilai radius ketetanggaan (meter)
5123	0,03	0,89	0,063
7281	0,025	0,89	0,054
11000	0,02	0,89	0,04

Dari pengujian diatas, semakin banyak partikel artinya jarak antar partikel semakin pendek dan membuat fluida semakin padat. Semakin padat fluida, jumlah partikel tetangga yang mempengaruhi berubah sehingga penentuan radius ketetanggaan akan berubah.

8. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian diatas maka didapat kesimpulan:

- Metode SPH dapat digunakan untuk mensimulasikan baik dalam bentuk padat maupun cair. Simulasi *dam break* dengan jumlah 5123 partikel SPH dan durasi 3 detik menghasilkan visualisasi yang cukup realistis dalam menggambarkan pergerakan fluida. Pembuatan Simulasi dengan jumlah partikel yang lebih banyak membutuhkan waktu yang lebih lama karena melakukan perhitungan yang lebih banyak saat penentuan partikel tetangga. Dibutuhkan waktu 611,492 detik untuk simulasi dengan 5123 partikel SPH dan 2209,484 detik untuk simulasi dengan 11000 partikel SPH.
- Implementasi metode deteksi partikel permukaan dapat digunakan pada simulasi SPH dua dimensi. Dengan menggunakan nilai radius ketetanggaan yang tepat, maka diperoleh bentuk permukaan dengan kesalahan deteksi partikel interior yang kecil. Radius ketetanggaan optimal yang digunakan untuk deteksi permukaan pada simulasi *dam break* dengan 5123 partikel SPH adalah 0,063. Sedangkan kelemahan metode ini adalah saat digunakan untuk mendeteksi partikel dengan tingkat kepadatan yang rendah, dimana terdapat banyak partikel interior yang ikut terdeteksi sebagai partikel permukaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Barecasco A, H. T. (2013). Simple free-surface detection in two and three-dimensional SPH solver.
- [5] Gesteira, M. D. (2010). *User Guide for the SPHysics Code*.
- [8] Marrone, S. D. (2009). Enhanced Boundary Treatment in 2D Smoothed Particle Hydrodynamics Models.
- [10] Morghan, J. (2005). Smoothed particle hydrodynamics.
- [11] M. Liu and G. Liu (2010). Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments.
- [15] Tanasescu, M. (2004). Fluid Dynamics.
- [16] Tarwidi, D. (2012). The Smoothed Particle Hydrodynamics Method.