

SIMULASI PENGARUH INTENSITAS HUJAN TERHADAP KETINGGIAN BANJIR MENGGUNAKAN METODE SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS (SPH)

Emha Ainun¹, Jondri², Dede Tarwidi³

^{1,2,3}Program Studi Ilmu Komputasi Telkom University, Bandung
¹emhaainun10@gmail.com, ²jondri123@gmail.com, ³dede.tarwidi@gmail.com

Abstrak

Berbagai fenomena alam seperti gunung berapi, banjir, tanah longsor, dan gempa bumi dapat dimodelkan dan disimulasikan dengan mengetahui parameter yang mempengaruhi fenomena tersebut. Salah satu fenomena yang cukup menarik untuk disimulasikan adalah banjir. Aliran fluida seperti banjir dapat dimodelkan menggunakan metode partikel. Metode partikel yang banyak digunakan dalam bidang dinamika fluida adalah *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH).

Dalam metode SPH, fluida direpresentasikan sebagai bagian diskrit yang disebut partikel. Setiap partikel SPH memiliki sifat tersendiri seperti percepatan, kecepatan, densitas dan posisi. Gerak dari setiap partikel SPH dikendalikan oleh dua persamaan utama, yaitu persamaan *Navier-Stokes* (N-S) dan persamaan kontinuitas. Dalam tugas akhir ini, telah dibangun SPH simulator yang dimanfaatkan untuk simulasi banjir. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, menaikkan jumlah celah menjadi dua kali lipat mengakibatkan kenaikan ketinggian banjir meningkat lebih dari 50%.

Kata kunci: *Smoothed Particle Hydrodynamics*, intensitas curah hujan, ketinggian banjir.

Abstract

Various natural phenomena like a volcanoes, floods, landslides, and earthquakes can be modeled and simulated by knowing the parameters that influence the phenomenon. One interesting phenomenon to be simulated are floods. Fluid flow can be modeled using the particle method. Particle methods are widely used in the field of fluid dynamics is the *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH).

In the SPH method, the fluid is represented as a discrete part of the called particle. Each particle SPH has its own characteristics such as acceleration, velocity, density and position. Motion of each SPH particle is controlled by two main equation, the *Navier-Stokes* (NS) and the continuity equation. In this final project, we have built SPH simulator is used for flood simulation. Based on the simulation results, raising the number of slits into double resulted in an increased flood heights more than 50%.

Keywords: *Smoothed Particle Hydrodynamics*, rainfall intensity, height of the flood

1. Pendahuluan

Berbagai fenomena yang terjadi di alam dapat dimodelkan dengan mengetahui berbagai parameter yang mempengaruhi fenomena tersebut. Beberapa fenomena alam yang banyak dimodelkan adalah gunung berapi, banjir, tanah longsor dan gempa bumi. Salah satu objek kajian yang cukup menarik adalah pemodelan dan simulasi banjir. Banjir merupakan fenomena alam dimana terjadi kelebihan air yang tidak tertampung oleh jaringan drainase. Penyebab terjadinya banjir adalah air sungai yang meluap ke lingkungan sekitarnya sebagai akibat intensitas hujan yang tinggi.

Untuk menyimulasikan suatu permasalahan dapat menggunakan berbagai macam metode. Beberapa penelitian yang telah dilakukan terkait dengan simulasi banjir adalah dengan metode *Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis* yaitu metode yang mampu untuk menghasilkan komponen hidrologi dengan baik [6], pemodelan *Network Flow* yang dapat divisualisasikan dengan menggunakan program berbasis GUI [10], dan

metode *Volume Hingga* yang banyak digunakan untuk menyelesaikan persamaan-persamaan *Euler Compressible* [9]. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam bidang dinamika fluida adalah *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) yang banyak dikembangkan untuk industri perfilman dan *video game* untuk menciptakan efek-efek yang diperlukan [2].

Objek berbasis fluida seperti banjir ini dapat dimodelkan menggunakan sistem partikel [5]. Fluida adalah salah satu fenomena yang sulit dimodelkan secara realistis. Menurut Monaghan (1992), SPH ditemukan pada tahun 1977, untuk menyimulasikan fenomena astrofisika. Dijelaskan pula bahwa metode ini termasuk dalam kategori metode partikel, yang berarti fluida direpresentasikan sebagai bagian diskrit yang disebut partikel. Dalam pengembangan selanjutnya, SPH dimanfaatkan secara lebih luas seperti simulasi aliran air, ombak di pantai dan lain sebagainya [11].

Dalam teori metode partikel SPH, setiap partikel memiliki sifat tersendiri dan dikendalikan

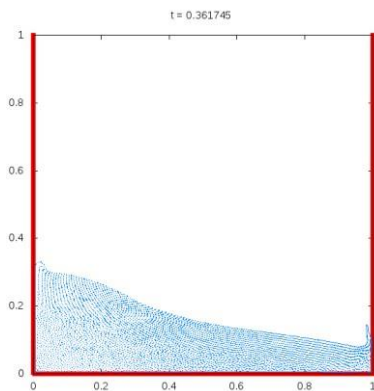
oleh persamaan differensial yang sering disebut dengan persamaan *Navier-Stokes* (N-S) [11]. Beberapa kelebihan yang dimiliki oleh metode SPH adalah terdapatnya interaksi antara satu partikel dengan partikel yang lainnya dan interaksi partikel dengan objek lain. Selain itu kelebihan lain yang dimiliki SPH adalah dapat mensimulasikan fenomena yang memiliki domain dengan geometri kompleks yang tidak dapat dimodelkan oleh metode numerik lain seperti *Finite Element*.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

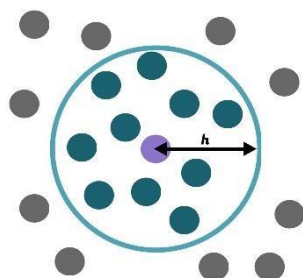
SPH merupakan salah satu metode komputasi untuk mensimulasikan aliran fluida.

Metode ini termasuk dalam kategori *meshfree particle method*, yang berarti fluida direpresentasikan sebagai bagian diskrit yang disebut partikel. Penggunaan pertama untuk metode ini sebenarnya adalah untuk simulasi di bidang fisika astronomi (simulasi gas dinamik dalam skala besar), tetapi kemudian merambah ke bidang lain, seperti simulasi aliran air, ombak di pantai, dan lain sebagainya [11].



Gambar 1. Contoh Simulasi Menggunakan SPH

Dalam penerapan metode SPH, fluida direpresentasikan sebagai sekumpulan partikel dan setiap partikel memiliki besaran fisis, seperti massa, posisi, kecepatan, rapat massa, dan tekanan.



bentuk suatu titik massa menjadi suatu bentuk yang menyebar dalam ruang. Fungsi kernel ini digunakan untuk menyebarkan massa atau properti-propertis yang lain dalam ruang dan dinormalisasikan untuk menjaga kuantitas fisis dalam sebuah sistem [5].

Pada [4], terdapat empat definisi kernel yang berbeda. Secara keseluruhan simulasi pada tugas akhir ini, menggunakan kubik spline kernel yang banyak dipakai dalam pendekatan SPH:

$$W(q) = \begin{cases} \frac{10}{7} \left(\frac{3}{2} - \frac{3}{4} q^2 \right)^2, & 0 \leq q < 1 \\ \frac{1}{4} (2 - q)^3, & 1 \leq q < 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Dimana $q = \|x_i - x_j\|/h$ dan h merupakan smoothing length.

Kemudian persamaan (2.7) di atas diturunkan terhadap q untuk mendapatkan fungsi $\nabla_i W$ yang akan digunakan pada persamaan pengatur yang akan digunakan, sehingga didapatkan

$$\nabla W(q) = \begin{cases} \frac{10}{7} \left(-\frac{3}{2} + \frac{9}{4} q \right), & 0 \leq q < 1 \\ \frac{1}{4} (2 - q)^2, & 1 \leq q < 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 Persamaan Pengatur

2.3.1 Persamaan Momentum

Persamaan momentum atau Persamaan Navier-Stokes (N-S) merupakan basis dari model-model simulasi fluida. Persamaan Navier-Stokes dapat dinyatakan dengan

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + F \quad (3)$$

Dimana, v , ρ , dan P masing-masing adalah kecepatan, massa jenis, dan tekanan pada fluida. Jika F adalah gaya eksternal per satuan massa dapat berupa percepatan gravitasi atau gaya tolak per satuan massa. Untuk tugas akhir ini, tegangan permukaan diasumsikan tidak terlalu berpengaruh, sehingga dapat diabaikan.

Pada perumusan SPH, persamaan (3) dapat dituliskan menjadi

$$m \frac{Dv_i}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_j}{\rho_j} + \frac{1}{2} (\rho_j + \rho_i) \nabla W_{ij} \right) + F_i \quad (4)$$

Dengan m adalah pengaruh massa tetangga

Gambar 2. Kontribusi Partikel Tetangga

2.2 Fungsi Kernel

Smoothing kernel atau fungsi kernel digunakan untuk mentransformasikan partikel dari

dan ∇W merupakan smoothing kernel.

2.3.2 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas adalah persamaan yang menghubungkan kecepatan fluida dari satu tempat ke tempat lain. Pada kasus ini, diasumsikan bahwa fluida tersebut kompresibel lemah. Ini berarti bahwa massa jenis (*density*) tergantung waktu tetapi

perubahan massa jenis tidak terlalu berpengaruh [12]. Perubahan massa jenis dalam fluida dapat dihitung dengan

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (5)$$

Persamaan di atas dapat dibuat dalam notasi SPH seperti

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{m_i} + \frac{m_i}{m_j} \right) \cdot \nabla_j \cdot \mathbf{v}_j - \rho_i h \quad (6)$$

Dimana ρ_i dan \mathbf{v}_i masing-masing adalah massa jenis, massa dan kecepatan partikel. Sedangkan $\nabla_j \cdot \mathbf{v}_j$ merupakan *smoothing* kernel yang dipengaruhi oleh jarak antar partikel.

2. 3. 3 Persamaan Keadaan

Hubungan antara massa jenis dan tekanan dapat tulisakan dengan bentuk sederhana dari persamaan keadaan yang diberikan

$$P = c^2 (\rho - \rho_0) + P_0 \quad (7)$$

Dimana c adalah kecepatan suara, ρ_0 adalah massa jenis awal, dan P_0 adalah tekanan atmosfer.

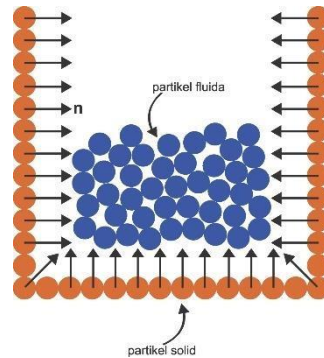
2.4 Time Stepping

Pada simulasi ini, metode yang digunakan untuk time stepping adalah metode *Leapfrog*. Ada beberapa metode yang juga dapat digunakan untuk menghitung time stepping, seperti metode *Heun*, *Euler* atau *Predictor Corrector*. Metode tersebut dapat menyelesaikan persasamaan differensial untuk mendapatkan time stepping.

$$\mathbf{v}_{i,1} = \mathbf{v}_i + h \mathbf{a}_{i,1/2} \quad (8)$$

2.5 Syarat Batas

Pada metode pendekatan SPH, sangat penting untuk mengatur partikel yang mendekati dinding batas. Dinding-dinding pembatas diasumsikan sebagai partikel padat. Dinding pada simulasi dibatasi dengan partikel padat untuk mencegah partiel air menembus dinding batas. Partikel-partikel fluida yang mendekati dinding batas akan mengalami gaya tolak yang berasal dari partikel padat.



Gambar 3. Batas Partikel Padat Dengan Normal Vektor

Gaya normal yang dialami oleh partikel air i terhadap batas partikel padat j , dapat diketahui dengan

$$f_{ij} = \rho_j \mathbf{n}_{ij} \quad (9)$$

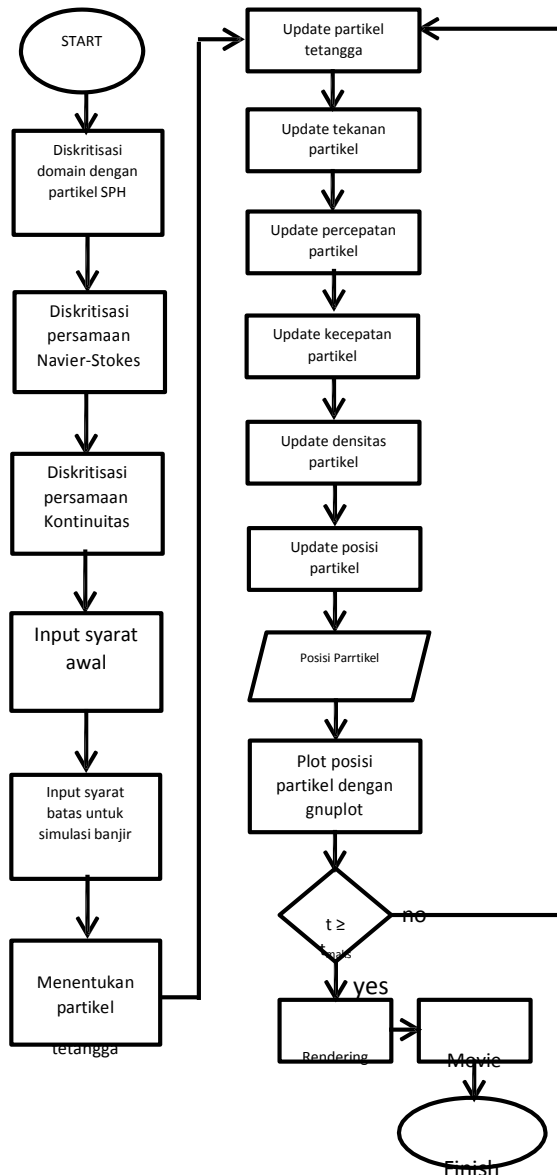
Dimana vektor normal dari batas padat adalah

$$\mathbf{n}_{ij} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{y}{2\Delta} \right)^2}} \begin{pmatrix} 1 - \frac{y}{2\Delta} \\ 1 + \frac{y}{2\Delta} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Dimana R merupakan nilai R pada sumbu y dan nilai $y = y/(2\Delta)$, sedangkan P merupakan nilai P pada sumbu x . Variabel \mathbf{n}_{ij} merupakan vektor normal partikel solid i dan j adalah jarak proyeksi partikel air i pada tangen vektor batas partikel padat j sedangkan Δ adalah jarak tegak lurus partikel air i dari batas partikel padat j dan Δ adalah jarak awal partikel air.

3. Rancangan Sistem

Pada tugas akhir ini, akan dirancang sebuah sistem untuk membuat simulasi banjir dengan menggunakan bahasa pemrograman C/C++ dan gnuplot. Proses simulasi banjir dibagi menjadi dua tahap yang saling berhubungan, yaitu inialisasi dan update partikel. Tahap inialisasi merupakan tahap yang mengatur setiap variabel yang mempengaruhi kondisi awal partikel, seperti diskritisasi domain dan diskritisasi persamaan-persamaan yang mempengaruhi partikel serta penentuan syarat atau kondisi awal partikel. Tahap kedua, tahap update partikel, adalah tahap pada saat proses simulasi mulai berjalan. Pada tahap ini, seiring berjalannya simulasi akan dilakukan update partikel, mulai dari update tetangga, tekanan, percepatan, kecepatan, densitas, posisi partikel hingga akhirnya melakukan plot posisi partikel pada selang waktu tertentu. Proses update partikel akan terus berlanjut hingga waktu maksimum simulasi selesai.

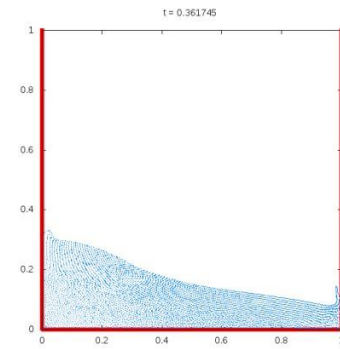


Gambar 4. Flowchart Perancangan Sistem

4. Analisis Hasil Pengujian

4.1 SPH Simulator

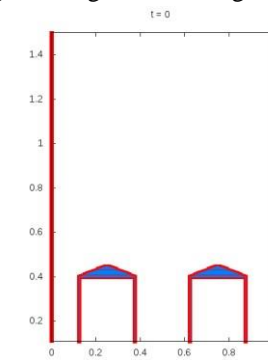
Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) simulator merupakan program dasar yang dibuat menggunakan bahasa pemrograman C/C++ dan kemudian dilakukan plot posisi partikel dengan menggunakan gnuplot sebagai visualisasi. SPH simulator ini akan digunakan sebagai program dasar yang digunakan untuk membuat simulasi banjir sesuai dengan inti dari tugas akhir ini.



Gambar 5. Simulasi Dambreak

4.2 Simulasi Banjir

Implementasi sistem partikel untuk simulasi banjir dibuat dari SPH simulator. Mengubah beberapa bagian pada simulator agar sesuai dengan simulasi banjir yang akan dibuat dengan memperhatikan error yang mungkin akan terjadi. Berikut gambaran area simulasi yang akan dilakukan. Berikut gambaran kondisi awal simulasi banjir yang akan digunakan sebagai simulasi.



Gambar 6. Kondisi Awal Simulasi

Untuk simulasi banjir ini memiliki variabel-variabel yang mempengaruhi, tetapi tidak mengalami perubahan pada tiap skenario yang akan dijalankan.

Parameter	Nilai	Satuan
Massa Jenis Fluida	1000	Kg/m ³
Percepatan Gravitasi	9.8	m/s ²
Tekanan Atmosfir	0	Atm
Jumlah Partikel Air	1817	Partikel
Jumlah Rumah	2	Buah
Jarak Antar Partikel Air	0.0125	m
Jarak Antar Partikel Padat	0,0015625	m
Lebar Partikel	0,00625	m
Lebar Celah Turunnya Hujan	0,021875	m
Lebar Celah Saluran Bawah	0.03125	m
Tinggi Area Simulasi	1.75	m
Lebar Area Simulasi	1	m
Variabel Konstan Pada Program		

Tabel 1. Parameter Area Simulasi

Pada simulasi banjir yang dibangun, digunakan dua jenis fluida yaitu fluida sebagai air hujan pada simulasi dan fluida sebagai *wall* atau *boundary*. Untuk pengujian beberapa skenario yang akan dibahas, jumlah partikel tersebut dapat berubah sesuai dengan pengaturan pada lebar dan jumlah celah yang digunakan untuk setiap skenarionya.

4.3 Skenario Pengujian

Proses *running* program simulasi banjir dua-dimensi ini dilakukan pada komputer dengan spesifikasi sebagai berikut.

- Processor : Intel(R) Core(TM) i5-3330 CPU @ 3.00GHz 3.20 GHz
- RAM : 4.00 GB
- System : 64-bit Operating System

Jumlah skenario pengujian simulasi banjir dua-dimensi sebanyak 10 skenario yaitu dengan membedakan jumlah celah yang digunakan serta lebar celah yang akan menjadi penampang air hujan pada simulasi yang akan dibuat. Penggunaan skenario ini karena ingin melihat berapa tinggi banjir yang akan ditimbulkan oleh skenario-skenario yang akan dipakai dengan batasan waktu yang ditentukan.

Ketika proses simulasi dijalankan, air yang berada pada bagian atas area simulasi akan jatuh bebas ke permukaan melalui celah-celah yang telah dibuat sehingga menyerupai hujan. Intensitas turunnya hujan diatur berdasarkan jumlah celah dan lebar yang digunakan untuk setiap skenarionya. Hujan yang turun ke permukaan area simulasi sebagian akan masuk ke dalam saluran yang berada di bawah rumah dan sebagian lagi akan menggenang sehingga menimbulkan banjir. Banjir yang di dapatkan dari setiap skenario akan diukur dengan cara menarik garis lurus searah sumbu x sesuai dengan ketinggian banjir yang di dapat.

4.4 Hasil dan Analisis

Pada simulasi banjir dua-dimensi ini akan dilakukan percobaan sebanyak 3 skenario, dimana tiap-tiap kondisi akan dibedakan jumlah celah yang digunakan sebagai pengatur intensitas turunnya hujan.

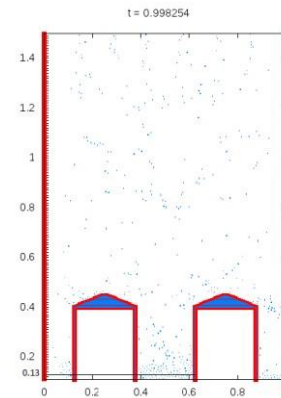
Skenario	Jumlah Celah	Lebar Celah
1	6	0,021875 m
2	7	0,021875 m
3	8	0,021875 m
4	9	0,021875 m
5	10	0,021875 m
6	11	0,021875 m
7	12	0,021875 m
8	13	0,021875 m
9	14	0,021875 m
10	15	0,021875 m

Tabel 2. Perbandingan Skenario Simulasi

4.4.1 Hasil

1. Skenario 1

Pada skenario pertama ini dilakukan hingga waktu berhentinya kurang dari 1 detik, dan menghasilkan 500 frame. Pengukuran ketinggian banjir dilakukan pada frame terakhir atau kondisi terakhir dari simulasi. Berikut tampilan akhir simulasi banjir dan ketinggian yang di dapatkan.

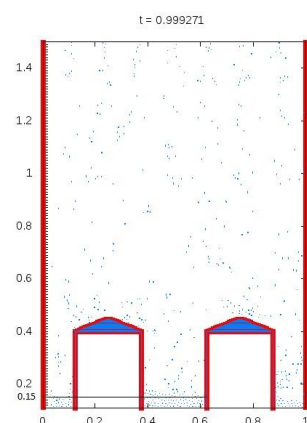


Gambar 7. Kondisi Akhir Simulasi Skenario 1

Berdasarkan gambar di atas, dengan menggunakan jumlah celah 6 didapatkan ketinggian banjir yaitu 0,13 meter dari permukaan rumah dengan waktu eksekusi 0.998254 detik. Ketinggian banjir yang didapatkan berdasarkan tinggi genangan air yang berada diantara rumah (genangan bagian tengah) dengan menarik garis lurus sejajar dengan ketinggian genangan air.

2. Skenario 2

Pada skenario pertama ini dilakukan hingga waktu berhentinya kurang dari 1 detik, dan menghasilkan 500 frame. Pengukuran ketinggian banjir dilakukan pada frame terakhir atau kondisi terakhir dari simulasi. Berikut tampilan akhir simulasi banjir dan ketinggian yang di dapatkan.



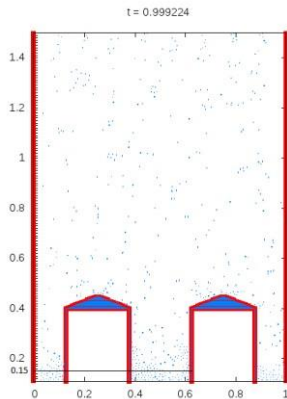
Gambar 8. Kondisi Akhir Simulasi Skenario 2

Berdasarkan gambar di atas, dengan menggunakan jumlah celah 7 didapatkan ketinggian banjir yaitu 0,15 meter dari permukaan rumah dengan waktu eksekusi 0.999271 detik. Ketinggian

banjir yang didapatkan berdasarkan tinggi genangan air yang berada diantara rumah (genangan bagian tengah) dengan menarik garis lurus sejajar dengan ketinggian genangan air.

3. Skenario 3

Pada skenario pertama ini dilakukan hingga waktu berhentinya kurang dari 1 detik, dan menghasilkan 500 frame. Pengukuran ketinggian banjir dilakukan pada frame terakhir atau kondisi terakhir dari simulasi. Berikut tampilan akhir simulasi banjir dan ketinggian yang di dapatkan.



Gambar 9. Kondisi Akhir Simulasi Skenario 3

Berdasarkan gambar di atas, dengan menggunakan jumlah celah 8 didapatkan ketinggian banjir yaitu 0,15 meter dari permukaan rumah dengan waktu eksekusi 0.999224 detik. Ketinggian banjir yang didapatkan berdasarkan tinggi genangan air yang berada diantara rumah (genangan bagian tengah) dengan menarik garis lurus sejajar dengan ketinggian genangan air.

Kemudian dilakukan sebanyak 10 skenario dan memberikan hasil sebagai berikut.

Skenario	Jumlah Celah	Tinggi Banjir
1	6	0,13 m
2	7	0,15 m
3	8	0,15 m
4	9	0,16 m
5	10	0,16 m
6	11	0,2 m
7	12	0,2 m
8	13	0,23 m
9	14	0,24 m
10	15	0,26 m

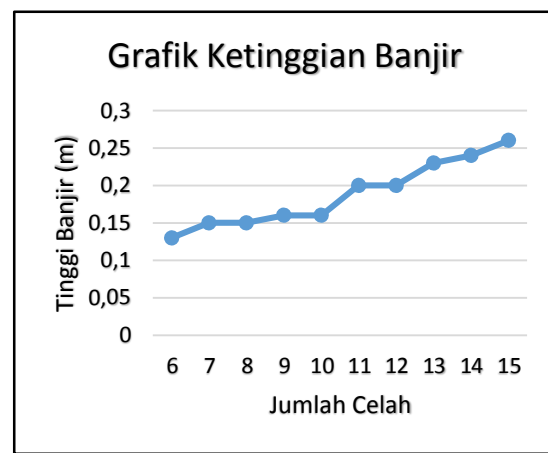
Tabel 3. Perbandingan Hasil Simulasi

4.4.2 Analisis

Pada simulasi yang telah dilakukan dengan berbagai skenario di atas, waktu yang digunakan adalah 1 detik. Setiap skenario diambil frame yang paling akhir mendekati 1 detik kemudian dilakukan pengukuran ketinggian banjir sehingga menghasilkan ketinggian yang berbeda-beda dengan batasan waktu yang sama.

Berdasarkan hasil percobaan yang telah dilakukan, ketinggian banjir terendah terjadi pada saat jumlah celah 6 yaitu setinggi 0,13 m. Sedangkan tinggi banjir yang paling besar didapatkan ketika jumlah celah terbanyak yaitu 15 dengan ketinggian banjir 0,26 m. Rata-rata kenaikan ketinggian banjir yang didapatkan pada simulasi ini adalah sebesar 0,013 m.

Ketinggian banjir yang didapatkan berbeda-beda sesuai dengan jumlah celah yang digunakan. Perbandingan jumlah celah yang digunakan berbanding lurus dengan ketinggian banjir yang terjadi. Semakin banyak jumlah celah yang digunakan maka semakin tinggi ketinggian banjir yang didapatkan



Gambar 10. Grafik Ketinggian Banjir

Pada percobaan yang dilakukan, jumlah celah mempengaruhi intensitas turunnya hujan. Bentuk miniatur rumah yang digunakan memiliki bentuk atap segitiga sehingga partikel hujan yang mengenai sisi miring pada atap kebanyakan akan jatuh ke bagian tengah. Hal ini mengakibatkan sisi tengah memiliki ketinggian banjir lebih besar dibandingkan dengan kedua sisi kiri dan kanan area simulasi.

Untuk percobaan dengan jumlah celah 6 menghasilkan ketinggian banjir 0,13 m, sedangkan untuk jumlah celah 12 menghasilkan ketinggian banjir 0,2 m. Untuk percobaan dengan jumlah celah 7 menghasilkan ketinggian banjir 0,15 m, sedangkan untuk jumlah celah 14 menghasilkan ketinggian banjir 0,24 m. Dengan melihat perbedaan ketinggian banjir ketika jumlah celah yang digunakan dua kali lipat, didapatkan kenaikan ketinggian banjir sebesar 53,846 % untuk jumlah celah 6 menjadi 12. Sedangkan untuk jumlah celah 7 menjadi 14 dihasilkan ketinggian banjir sebesar 60 %.

Beberapa skenario didapatkan hasil ketinggian banjir yang sama dengan jumlah celah yang berbeda, seperti jumlah celah 7 dan 8 dengan ketinggian banjir yang sama yaitu 0,15 m, jumlah celah 9 dan 10 dengan ketinggian banjir 0,16 m, serta jumlah celah 11 dan 12 dengan ketinggian

banjir 0,2 m. Hal itu dipengaruhi oleh posisi celah turunnya hujan serta lebar penampang yang mengakibatkan hujan yang turun tidak merata.

Perbedaan hasil ketinggian banjir yang diperoleh tidak terlalu jauh dengan rata-rata 0,013 m, karena jumlah partikel fluida yang digunakan pada simulasi ini tidak terlalu banyak, sehingga tekanan total yang dihasilkan berdasarkan volume fluida tidak terlalu besar. Namun pada percobaan ini tidak dilakukan perhitungan tekanan total pada simulasi.

Selain dari tekanan total pada fluida, jarak antar partikel yang masih kurang rapat berpengaruh pada jumlah partikel yang dapat melewati celah sehingga ketinggian banjir yang dihasilkan tidak terlalu besar. Adanya saluran pada bagian bawah area simulasi mengakibatkan sebagian air hujan mengalir dan mengurangi ketinggian banjir yang terjadi.

5. Kesimpulan Dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil SPH simulator yang telah dibuat dapat diimplementasikan untuk berbagai macam simulasi berbasis fluida lain, seperti aliran air terjun, aliran darah, aliran lava dengan memperhatikan variabel seperti massa jenis fluida yang digunakan sesuai dengan simulasinya. Sedangkan untuk visualisasi dengan menggunakan gnuplot cocok untuk simulasi fluida, tetapi untuk eksperimen selanjutnya dapat mencoba aplikasi visualisasi yang lain.
2. Metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) yang digunakan pada simulasi banjir dua-dimensi ini mampu menghasilkan simulasi yang cukup baik.
3. Intensitas turunnya hujan dipengaruhi oleh jumlah celah yang digunakan. Rata-rata kenaikan ketinggian banjir yang didapatkan dari simulasi adalah sebesar 0,013 m. Berdasarkan hasil simulasi banjir yang telah dilakukan, menaikkan jumlah celah menjadi dua kali lipat mengakibatkan kenaikan ketinggian banjir meningkat lebih dari 50%. Pada simulasi Tugas Akhir ini, dengan jumlah celah 6 menjadi 12 didapatkan kenaikan ketinggian banjir sebesar 53,846%. Sedangkan untuk jumlah celah 7 menjadi 14 dihasilkan kenaikan ketinggian banjir sebesar 60%.

5.2. Saran

Setelah proses pembuatan program ini, penulis menemukan beberapa saran yaitu:

1. Sebaiknya menggunakan jumlah partikel yang lebih banyak dan durasi simulasi yang lebih lama agar hasil yang didapat bisa lebih terlihat.
2. Pada penelitian selanjutnya dapat membandingkan dengan intensitas curah hujan yang real.
3. Menggunakan simulasi dengan time periodik agar simulasi lebih terlihat realistis dan lebih lama.
4. Untuk melakukan *running* program sebaiknya pada spesifikasi komputer yang lebih bagus dari komputer yang penulis gunakan, sebaiknya menggunakan HPC bila perlu.

Daftar Pustaka

- [2]. Chladek, M. dan Durikovic, R., 2010, *Smoothed Particle Hydrodynamics in Flood Simulations*, Comenius University: Bratislava.
- [4]. Gesteira, M.G., dkk, 2010, *User Guide for the SPHysics code – SPHysics*.
- [5]. Hamdi, K., 2008, *Implementasi Sistem Partikel Menggunakan Metoda Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Untuk Simulasi Aliran Lava*, Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- [6]. Haryani, N.S., dkk, 2012, *Model Simulasi Banjir Menggunakan Data Penginderaan Jauh, Studi Kasus Kabupaten Sampang dengan Menggunakan Metode Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis*.
- [9]. Natakusumah, D.K., dkk, 2014, *Simulasi Numerik Perambatan Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan dengan Metode Volume Hingga-Cell Center*.
- [10]. Pane, E.S. dan Eddy, Ketut, 2012, *Pengembangan Simulasi Aliran Air Pada Saluran Drainase Kota Menggunakan Pemodelan Network Flow*.
- [11]. Putra, A.T., 2012, *Model dan Simulasi Dam Break 3D Berbasis Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)*, Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- [12]. Tarwidi, D., 2012, *The Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Two-Dimensional Stefan Problem*.