

Peran Tanggul Dalam Meredam Perambatan Gelombang Air Laut Menggunakan Metode Lattice-Boltzmann

Eki Ahmad Zaki Hamidi¹, Dian Nuraiman²

¹ Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Gunung Djati Bandung
Jl. A.H. Nasution No. 105, Kota Bandung, Jawa Barat 40614

² Matematika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Gunung Djati Bandung
Jl. A.H. Nasution No. 105, Kota Bandung, Jawa Barat 40614

¹ekiahmadzaki@uinsgd.ac.id, ²dianuraiman@uinsgd.ac.id

Abstrak – Tsunami merupakan bencana alam yang sangat membahayakan kehidupan manusia di pesisir pantai. Salah satu cara untuk meminimalisir banyaknya korban jiwa akibat tsunami yaitu dengan mendirikan tanggul. Penelitian ini merupakan penelitian pendahuluan untuk simulasi tsunami. Penelitian ini membahas tentang bagaimana peran tanggul dalam meredam perambatan gelombang air laut di pesisir pantai. Metode yang akan digunakan yaitu metode lattice-Boltzmann dengan aproksimasi Bhatnagar-Gross-Krook (BGK). Untuk menangani permukaan bebas, sebuah metode khusus akan digunakan untuk melacak pergerakan permukaan fluida. Di samping itu, model turbulensi Smagorinsky akan digunakan untuk menangani aliran turbulen. Hasil penelitian menunjukkan tanggul berperan cukup efektif dalam meredam laju gelombang. Tanggul dapat mereduksi ketinggian air dan menunda waktu tempuh air di beberapa titik.

Kata kunci : perambatan tsunami, tanggul, metode lattice-Boltzmann, model turbulensi Smagorinsky

1. Pendahuluan

Tsunami merupakan fenomena alam yang sangat membahayakan kehidupan manusia di pesisir pantai. Tsunami juga termasuk salah satu isu penting dalam penelitian di bidang teknik kelautan dan pesisir pantai (*ocean and coastal engineering*). Tsunami dapat didefinisikan sebagai sekumpulan gelombang air laut yang disebabkan oleh pergeseran dasar laut, longsor, atau gunung meletus. Tsunami berasal dari bahasa Jepang yaitu "tsu" yang artinya pelabuhan dan "nami" yang artinya gelombang.

Tsunami merupakan bencana alam yang tidak diketahui kapan terjadinya. Para ilmuwan baru bisa meneliti daerah mana saja yang mempunyai potensi tsunami. Lebih jauhnya, ilmuwan dapat memprediksi berapa ketinggian gelombang tsunami di daerah yang berpotensi terjadinya tsunami. Akan tetapi, dampak dari bencana tsunami dapat diminimalisir. Dampak tsunami dapat dikurangi dengan kesigapan penduduk di sekitar pantai, peringatan dini di saat yang tepat, dan respon yang efektif. Dampak dari bencana tsunami juga dapat diminimalisir dengan cara membangun tanggul di sepanjang pesisir pantai. Tanggul ini berfungsi untuk meredam perambatan tsunami, memperlambat sampainya air, dan mengurangi genangan air di daerah pantai.

Simulasi tsunami sudah dilakukan menggunakan beberapa metode, misalnya *smoothed particle hydrodynamics* (SPH) dan *large Eddy simulation* (LES) [1]. Simulasi tsunami menggunakan metode lattice-Boltzmann juga sudah dilakukan untuk simulasi perambatan tsunami dan genangan pantai menggunakan model perairan dangkal (*shallow water model*) [2].

Metode lattice-Boltzmann atau *lattice Boltzmann method* (LBM) merupakan salah satu metode komputasi dinamika fluida yang sudah diaplikasikan dalam berbagai masalah fluida. LBM pertama kali diperkenalkan oleh McNamara and Zanetti pada tahun 1988 sebagai teknik alternatif untuk mengatasi kekurangan dari *lattice-gas automata* (LGA) [3]. LBM juga dapat dipandang sebagai bentuk diskrit dari persamaan Boltzmann. Metode ini dikenal mempunyai kelebihan dalam menangani kondisi batas yang kompleks, geometri yang kompleks, memodelkan fasa tunggal maupun multi-fasa, dan dapat diaplikasikan dalam komputasi paralel [4]. Berbeda dengan metode komputasi tradisional, LBM tidak menyelesaikan persamaan Navier-Stokes secara langsung, akan tetapi cara alternatif yang tetap memenuhi persamaan Navier-Stokes [5], [6].

Banyak aplikasi dalam dinamika fluida yang membutuhkan penanganan permukaan bebas, diantaranya dalam simulasi tsunami. Beberapa metode penanganan permukaan bebas yang diintegrasikan dengan LBM sudah dikembangkan, misalnya dengan menggabungkan LBM dengan *particle level set method* (PLSM) [7]. Metode lain yaitu metode yang mirip dengan *volume of fluid method* (VOF) [8].

Air merupakan fluida yang memiliki viskositas kecil. Pada kondisi tertentu aliran fluida memungkinkan alirannya turbulen. Aliran turbulen merupakan aliran di mana partikel fluida bergerak tidak beraturan karena mengalami percampuran dan putaran partikel antar lapisan. LBM standar tidak dapat menangani aliran turbulen. LBM membutuhkan model tambahan untuk menangani aliran turbulen, misalnya model turbulen Smagorinsky [8].

Penelitian ini akan mensimulasikan serta menganalisis sejauh mana efektivitas tanggul dalam meredam perambatan tsunami di daerah pantai. Di samping itu, akan diselidiki perubahan ketinggian air di beberapa lokasi beserta waktu tempuhnya sebagai estimasi untuk sistem peringatan dini (*early warning system*). Dalam penelitian ini, LBM akan digunakan untuk simulasi tsunami dua dimensi dengan aproksimasi Bhatnagar-Gross-Krook (BGK). Pengamat diposisikan melihat dari samping. Oleh karena itu, simulasi ini membutuhkan metode penanganan permukaan bebas. Di samping itu, model turbulen Smagorinsky juga akan digunakan untuk mengatasi aliran turbulen.

2. Dasar Teori

2.1. Komputasi Dinamika Fluida

Dinamika fluida merupakan salah satu disiplin ilmu dalam Fisika yang membahas tentang fluida bergerak. Persamaan Navier-Stokes merupakan persamaan pembangkit yang menggambarkan fluida bergerak. Teknik komputasi dinamika fluida dapat diklasifikasikan berdasarkan skala komputasinya. Skala komputasi yang dimaksud yaitu skala makroskopik dan mikroskopik.

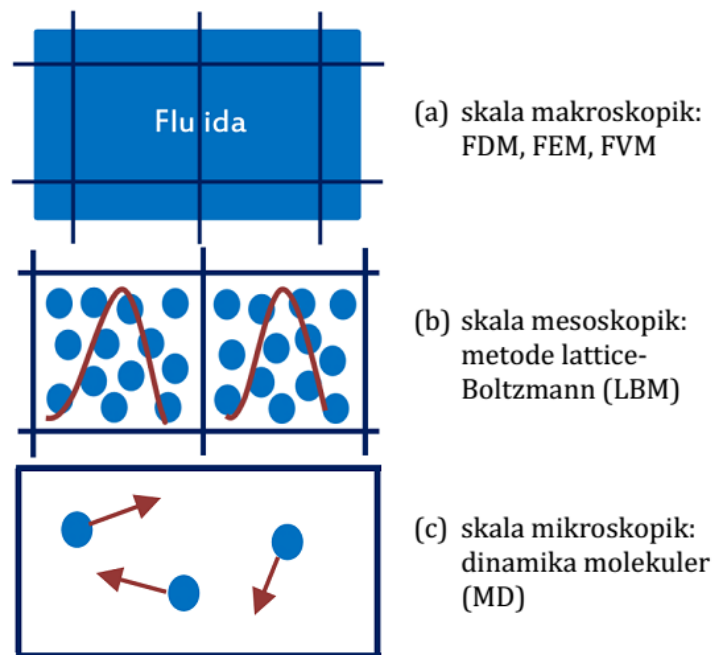
Metode komputasi pada skala makroskopik yaitu dengan mendiskritisasi persamaan Navier-Stokes ke dalam simpul, elemen, atau volume bergantung pada metodenya. Metode yang digunakan misalnya metode beda hingga atau finite difference method (FDM), metode elemen hingga atau finite element method (FEM), dan metode volume hingga atau finite volume method (FVM). Dalam pendekatan diskrit, persamaan diferensial (persamaan pembangkit) dikonversi menjadi persamaan aljabar dengan kondisi batas dan kondisi awal yang diberikan, kemudian diselesaikan secara iteratif sampai konvergen [5]. Tingkat kesulitan dalam pendekatan ini yaitu mengatasi masalah ketidaklinieran, kondisi batas yang kompleks, geometri yang kompleks, dll. Di samping itu juga, metode ini harus menyelesaikan persamaan Laplace pada setiap selang waktu.

Pendekatan lain yaitu metode komputasi pada skala mikroskopik yang biasa disebut dengan dinamika molekuler atau (*molecular dynamics*) atau biasa disingkat MD. Pendekatan ini mengamati pergerakan setiap partikel, posisi dan kecepatan setiap saat, misalnya trajektori partikel. Disamping itu, metode ini juga perlu memperhitungkan gaya antar-partikel dan menyelesaikan persamaan diferensial biasa dari hukum Newton II. Salah satu kelemahan dari MD yaitu butuh waktu komputasi yang sangat besar sekalipun domain komputasinya tidak terlalu besar.

Mekanika statistika diperlukan untuk menjembatani antara dunia mikro dan dunia makro. Ini merupakan ide utama dari metode lattice-Boltzmann (LBM) yaitu tidak perlu mengamati perilaku setiap partikel. LBM mengamati perilaku atau sifat-sifat dari sekumpulan partikel sebagai satu kesatuan [5]. Sifat-sifat sekumpulan partikel tersebut direpresentasikan oleh fungsi distribusi. Oleh karena itu, LBM juga disebut metode untuk skala mesoskopik (skala antara mikro dan makro).

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan terdapat tiga metode utama untuk simulasi, yaitu metode untuk skala makroskopik, skala mikroskopik, dan skala mesoskopik. Metode untuk skala makroskopik diantaranya metode beda hingga (FDM), metode elemen hingga (FEM), dan metode volume hingga (FVM). Metode untuk skala mikroskopik misalnya dinamika molekuler (MD), sedangkan metode untuk skala mesoskopik misalnya metode lattice-Boltzmann (LBM).

LBM mempunyai banyak kelebihan, diantaranya mampu menyelesaikan masalah dengan domain yang kompleks, fasa tunggal maupun multi-fasa, dan dapat diimplementasikan dalam komputasi paralel. LBM juga tidak perlu menyelesaikan persamaan Laplace pada setiap waktu supaya memenuhi persamaan kontinuitas dalam menyelesaikan persamaan Navier-Stokes seperti halnya metode dalam pendekatan skala makroskopik, dan dapat memperhitungkan domain komputasi yang lebih besar dibandingkan MD tanpa mempertimbangkan waktu komputasinya.



Gambar 1. Metode komputasi dinamika fluida [9]

2.2. Persamaan Transportasi Boltzmann

LBM dapat dipandang sebagai diskritisasi orde pertama dari persamaan Boltzmann dalam ruang dan waktu. Persamaan Boltzmann dapat ditulis dengan

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{e} \cdot \nabla f = \Omega(f) \tag{3.1}$$

di mana f adalah fungsi distribusi partikel, t waktu, u kecepatan, and merupakan operator tumbukan. Bentuk diskrit dari persamaan Boltzmann dapat ditulis dengan

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \mathbf{e}_i \cdot \nabla f_i = \Omega_i \tag{3.2}$$

Secara teori operator tumbukan adalah sebuah matriks yang ditentukan oleh dinamika mikroskopik [6]. Operator tersebut sangat kompleks dan rumit untuk diselesaikan. Higuera and Jimenez adalah orang yang pertama kali memperkenalkan operator tumbukan dengan melinearakan Ω_i di sekitar kondisi ekuilibriumnya. Operator tumbukan menjadi jauh lebih sederhana yang dapat ditulis dengan

$$\Omega_i(f) = \Omega_i(f^{eq}) + \frac{\partial \Omega_i(f^{eq})}{\partial f_j} (f_j - f_j^{eq}) + O\left[(f_j - f_j^{eq})^2\right] \quad (3.3)$$

di mana f^{eq} adalah fungsi distribusi ekuilibrium yang merupakan fungsi distribusi Maxwell-Boltzmann.

Operator tumbukan dengan aproksimasi Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) yang berfungsi mengatur kecepatan perubahan fungsi distribusi f_i selama proses tumbukan dapat ditulis

$$\Omega_i(f) = -\frac{1}{\tau} (f_i - f_i^{eq}) \quad (3.4)$$

Persamaan diskrit Boltzmann dengan operator tumbukan BGK dapat ditulis dengan

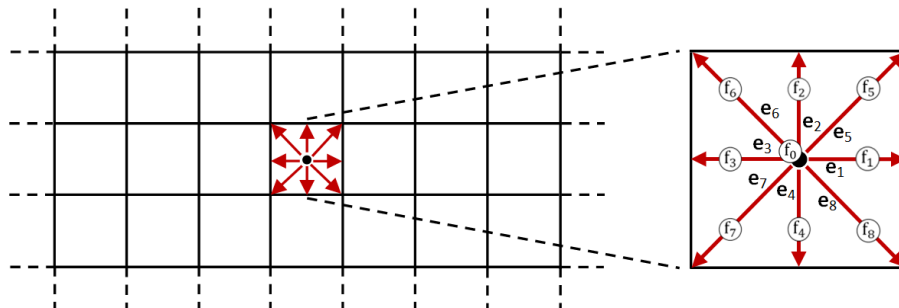
$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \mathbf{e}_i \cdot \nabla f_i = -\frac{1}{\tau} (f_i - f_i^{eq}) \quad (3.5)$$

Persamaan di atas dapat diturunkan untuk mendapatkan skema numerik berikut

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau} (f_i - f_i^{eq}) \quad (3.6)$$

2.3. Metode Lattice-Boltzmann

LBM merupakan metode berbasis kisi di mana domain komputasi dibagi ke dalam sejumlah kisi dan menghasilkan sejumlah sel. Seperti yang sudah dijelaskan pada subbab sebelumnya, LBM mengamati perilaku sekumpulan partikel sebagai satu kesatuan yang direpresentasikan dengan fungsi distribusi. Setiap sel berisi sekumpulan partikel yang dapat bergerak ke sel tetangga dengan arah pergerakan bergantung pada pola kisinya. Contoh pembagian domain komputasi untuk masalah dua dimensi dapat dilihat dalam Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi domain komputasi dengan pola kisi D2Q9 [10]

LBM dapat digunakan untuk masalah satu, dua, maupun tiga dimensi. Setiap dimensi mempunyai pola kisi masing-masing. Pola kisi LBM dinotasikan dengan pola DXQY di mana X menunjukkan bilangan dimensi dan Y menunjukkan jumlah arah kisinya. Misalnya pola kisi D2Q9 menunjukkan pola kisi 2 dimensi dengan 9 arah kisi. Pola kisi satu dimensi yaitu D1Q3 dan D1Q5, pola kisi dua dimensi yaitu D2Q5 dan D2Q9, dan pola kisi tiga dimensi yaitu D3Q15, D3Q19, dan D3Q27.

Pola kisi dua dimensi yang banyak digunakan yaitu pola kisi D2Q9 yang mempunyai 9 arah kisi. Sembilan arah tersebut yaitu arah timur, utara, barat, selatan, timur laut, barat laut, barat daya, tenggara, dan titik pusat pada keadaan partikel diam. Pola kisi D2Q9 diilustrasikan dalam Gambar 2.

Sekumpulan partikel yang berada dalam sel mempunyai fungsi distribusi sebanyak arah kisinya. Itu artinya untuk pola kisi D2Q9, terdapat 9 fungsi distribusi untuk setiap sel. Fungsi distribusi tersebut dinotasikan dengan f_i untuk $i = 0, \dots, 8$. Pola kisi D2Q9 juga mempunyai vektor kecepatan kisi yang dinotasikan dengan \mathbf{e}_i . Vektor kecepatan tersebut mempunyai dua

komponen yaitu kecepatan arah horizontal e_{ix} dan arah vertikal e_{iy} . Sembilan vektor kecepatan kisi tersebut dituliskan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kecepatan kisi untuk pola kisi D2Q9

i								
e_{ix}			1			1	1	
e_{iy}				1			1	1

Pola kisi D2Q9 juga mempunyai bobot yang akan digunakan pada saat menghitung fungsi distribusi ekuilibrium. Untuk pola kisi D2Q9, terdapat 9 bobot sesuai dengan arah kisinya. Bobot-bobot tersebut didefinisikan dengan

$$w_i = \begin{cases} 4/9 & i = 0 \\ 1/9 & i = 1, 2, 3, 4 \\ 1/36 & i = 5, 6, 7, 8 \end{cases}$$

Di samping fungsi distribusi, setiap sel juga mempunyai dua informasi besaran makroskopik yaitu densitas dan kecepatan. Densitas ρ dapat dihitung dengan jumlah semua fungsi distribusi pada sel tersebut atau dapat ditulis dengan

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=0}^8 f_i(\mathbf{x}, t)$$

Sedangkan kecepatan \mathbf{u} didefinisikan dengan jumlah dari perkalian antara kecepatan kisi dengan fungsi distribusi ke semua arah. Kecepatan dapat dihitung dengan

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=0}^8 \mathbf{e}_i f_i(\mathbf{x}, t)$$

Fungsi distribusi ekuilibrium lokal f_i^{eq} dapat diturunkan dengan ekspansi deret Taylor orde dari fungsi distribusi ekuilibrium Maxwell-Boltzmann sebagai dalam kecepatan makroskopik [4]. Fungsi distribusi ekuilibrium yang memenuhi persamaan Navier-Stokes dapat ditulis dengan

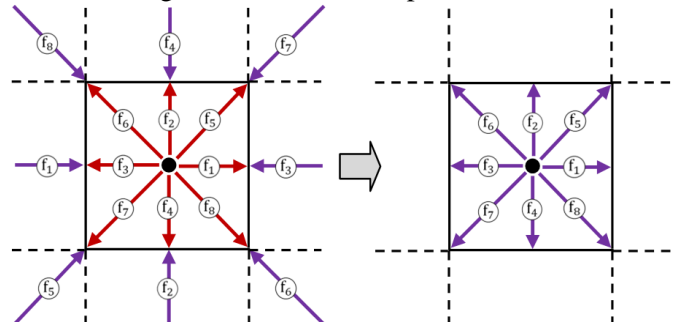
$$f_i^{eq} = w_i \left[\rho + 3\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u} - \frac{3}{2} \mathbf{u}^2 + \frac{9}{2} (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2 \right]$$

dengan $i = 0, \dots, 8$.

Terdapat dua proses utama dalam LBM, yaitu aliran (*streaming*) dan tumbukan (*collision*). Aliran merupakan proses di mana partikel bergerak ke sel tetangga sesuai dengan arah kecepatan kisinya. Pergerakan partikel ditandai dengan aliran fungsi distribusi dari sebuah sel ke sel tetangganya sesuai arah kecepatan kisinya. Ilustrasi proses aliran dapat dilihat dalam Gambar 3. Proses aliran dapat diformulasikan dengan

$$f_i^*(\mathbf{x}, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta t, t)$$

di mana f_i^* menotasikan fungsi distribusi setelah proses aliran.



Gambar 3. Ilustrasi kondisi sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) aliran [11]

Dalam Gambar 3, terdapat dua gambar yaitu kondisi sebelum dan sesudah proses aliran dari sebuah sel. Pada gambar kondisi sebelum aliran, panah warna merah menunjukkan fungsi distribusi partikel yang akan mengalir dari suatu sel ke sel tetangganya. Sedangkan panah warna ungu menunjukkan fungsi distribusi partikel yang akan mengalir dari sel tetangga ke sel tersebut. Pada gambar kondisi setelah aliran, fungsi distribusi sel tersebut sudah tergantikan oleh fungsi distribusi yang mengalir dari sel tetangganya.

Proses yang kedua dari LBM yaitu proses tumbukan di mana partikel yang bergerak ke sel tetangganya bertumbukkan dengan partikel lainnya. Proses ini akan mengubah fungsi distribusi setiap partikel pada langkah waktu selanjutnya. Proses tumbukan dengan aproksimasi BGK dapat diformulasikan dengan

$$f_i(x, t + \Delta t) = f_i^*(x, t + \Delta t) - \frac{1}{\tau} (f_i^* - f_i^{eq})$$

di mana τ adalah waktu relaksasi yang merepresentasikan viskositas fluida $\tau = 3\nu + \frac{1}{2}$. Parameter relaksasi dapat juga dinotasikan dengan $\omega = 1/\tau$. Nilai ω berkisar antara (0..2]. Nilai ω yang mendekati 0 menghasilkan fluida yang sangat kental, sedangkan nilai ω yang mendekati 2 menghasilkan aliran fluida yang sangat turbulen [8].

2.4. Kondisi Batas

Kondisi batas mempunyai peran penting untuk mendapatkan hasil yang akurat. Pada subbab ini akan dibahas kondisi batas yang digunakan dalam simulai. Ada dua jenis kondisi batas yang digunakan yaitu kondisi batas *no-slip* (tidak licin), kondisi batas aliran masuk (*inflow*) dan keluar (*outflow*). Penanganan kondisi batas ini dilakukan pada saat proses aliran di mana pada proses ini fungsi distribusi partikel mengalir dari satu sel ke sel yang lain.

2.5. Model Turbulen Smagorinsky

Penjelasan LBM di atas merupakan penjelasan dari LBM standar. Kestabilan LBM dibatasi pada saat waktu relaksasi τ mendekati 1/2, karena akan menyebabkan aliran turbulen. Aliran turbulen ini akan terjadi ketika viskositas fluida yang diberikan kecil mendekati nol sehingga akan menghasilkan waktu relaksasi $\tau \approx 1/2$.

LBM standar tidak dapat menangani aliran turbulen, sehingga perlu menambahkan model lain yaitu model turbulen Smagorinsky [8], [12]. Ide utamanya yaitu menghitung tensor tegangan lokal (*local stress tensor*) dan memodifikasi waktu relaksasi secara lokal. Waktu relaksasi yang dimodifikasi dihitung setelah proses aliran dan akan digunakan pada proses tumbukan.

Setiap sel sudah mempunyai informasi turunan variabel hidrodinamika dalam fungsi distribusinya. Sehingga tensor dapat dihitung secara lokal pada setiap sel. Tensor $\Pi_{\alpha,\beta}$ dapat dihitung dari moment kedua bagian non-ekuilibrium fungsi distribusi [14] yang didefinisikan dengan

$$\Pi_{\alpha,\beta} = \sum_{i=0}^8 e_{i\alpha} e_{i\beta} (f_i - f_i^{eq})$$

di mana α dan β berjalan terhadap ruang, i adalah indeks vektor kecepatan kisi dan fungsi distribusi untuk pola kisi D2Q9.

Kemudian tensor tegangan lokal dapat dihitung menggunakan besar tensornya [12] atau dapat ditulis dengan

$$S = \frac{1}{6C^2} \left(\sqrt{\nu^2 + 18C^2 \sqrt{\Pi_{\alpha,\beta} \Pi_{\alpha,\beta}}} - \nu \right)$$

di mana C adalah konstanta Smagorinsky. Kemudian waktu relaksasi dimodifikasi untuk setiap sel secara lokal dengan formula

$$\tau_s = 3(\nu + C^2 S) + \frac{1}{2}$$

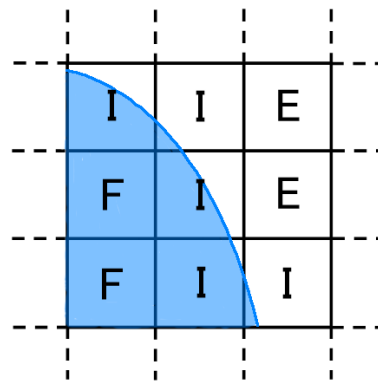
Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa S selalu positif sehingga viskositas lokal akan bertambah bergantung pada besarnya tensor tegangan yang dihitung dari bagian fungsi distribusi non-ekuilibrium yang akan direlaksasi. Model ini membantu untuk mengatasi ketidakstabilan yang disebabkan oleh nilai τ yang kecil.

2.6. Metode Penanganan Permukaan Bebas

Permukaan bebas atau free surface memisahkan antara dua fluida dalam hal ini air dan udara. LBM standar tidak dapat menangani permukaan bebas, sehingga diperlukan metode tambahan untuk menanganinya. Metode penanganan permukaan bebas yang dibahas di sini yaitu metode yang dikembangkan oleh Thurey [8] yang mirip dengan metode *volume of fluid* (VOF).

Gas merupakan salah satu fluida, akan tetapi metode ini tidak memandang gas sebagai fluida yang harus ditangani dengan asumsi perbedaan viskositas antara air dan gas cukup tinggi sehingga kecepatan gas di dekat permukaan air dapat diaproksimasi menggunakan kecepatan air di permukaan [8]. Daerah gas terhindar dari berbagai perhitungan sehingga metode ini cocok untuk simulasi dengan daerah gas yang cukup luas. Istilah fluida dalam tesis ini dimaksudkan untuk air.

Pertama, setiap sel harus dibedakan antara sel yang terisi penuh dengan air (*fluid cell*), sel yang terisi oleh air dan gas (*interface cell*), dan sel yang hanya terisi gas (*empty cell*). Ini dapat diselesaikan dengan menggunakan metode penandaan sel (*marking cell*). Ilustrasi penandaan sel dapat dilihat dalam Gambar 4..



Gambar 4.. Ilustrasi *marking cell* [11]

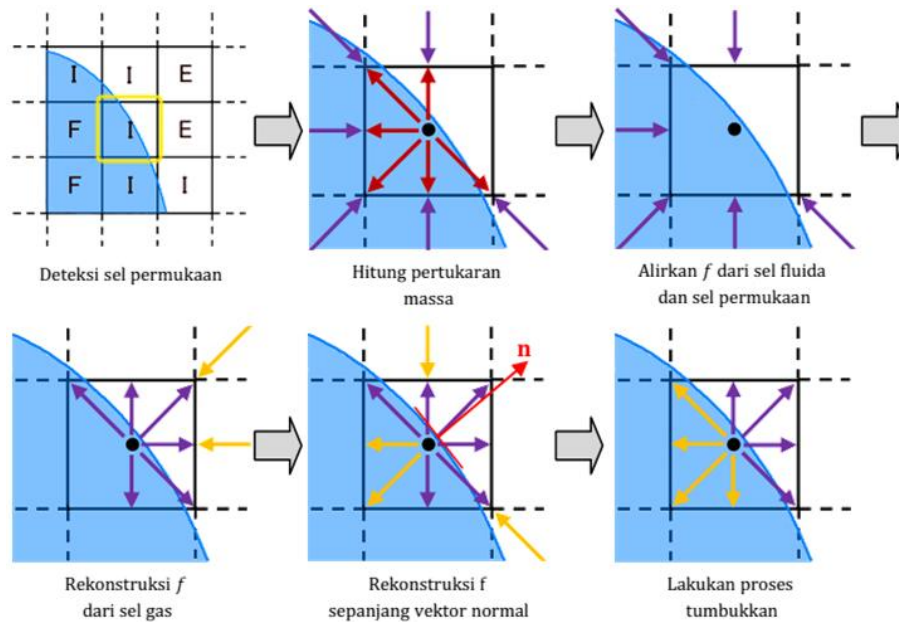
Dalam Gambar 4, sel F menunjukkan sel fluida (*fluid cell*), sel I menunjukkan sel permukaan (*interface cell*), dan sel E menunjukkan sel gas (*empty cell*). Satu jenis sel lain yang perlu ditandai yaitu sel padat (*solid cell*). Penandaan sel padat dapat membantu dalam penanganan kondisi batas.

Metode ini membutuhkan dua informasi tambahan yang disimpan dalam setiap sel, yaitu massa m dan seberapa banyak bagian fluida dalam sel (*fluid fraction*) yang dinotasikan dengan ϵ [8]. Hubungan antara densitas ρ , massa m , dan bagian fluida ϵ dapat ditulis dengan

$$\epsilon(x, t) = \frac{m(x, t)}{\rho(x, t)} \tag{3}$$

Sel gas ditandai dengan massa dari sel tersebut $m = 0$ sehingga bagian fluidanya $\epsilon = 0$. Sel fluida ditandai dengan massa dari sel tersebut $m = \rho$ sehingga bagian fluidanya $\epsilon = 1$. Sel permukaan ditandai dengan massa tidak lebih besar dari densitasnya $m < \rho$ sehingga bagian fluidanya $0 < \epsilon < 1$. Pergerakan permukaan fluida dideteksi dengan perubahan massa sel permukaan samapi suatu kondisi di mana sel tersebut dikonversi menjadi sel fluida atau sel gas. Permukaan fluida bergerak ketika massa sel permukaan $m < 0$ atau $m > \rho$.

Metode penanganan permukaan bebas terdiri dari beberapa langkah, yaitu menghitung pertukaran massa, rekonstruksi fungsi distribusi, konversi sel, distribusi eksese massa, dan menghilangkan sel permukaan artefak. Prosedur penanganan permukaan bebas dijelaskan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Alur Penanganan Permukaan Bebas [11]

3. Metodologi Penelitian

3.1. Desain Simulasi

Penelitian ini akan mengamati perilaku gelombang air laut dalam skala kecil yaitu 14 meter. Pada kenyataannya, tsunami bisa datang dengan pusat gempa beberapa km di lepas pantai. Penelitian ini merupakan studi pendahuluan untuk simulasi tsunami yang sesungguhnya.

Domain komputasi pada penelitian ini yaitu tinggi 2 meter dan panjang 14 meter yang terdiri dari 11 meter lautan dan 3 meter daratan. Kedalaman laut normal yaitu 0.85 meter dan tinggi daratan 0.93 meter, jadi terdapat selisih 0.08 meter antara kedalaman laut normal dengan tinggi daratan. Ini sesuai dengan kondisi di pantai, di mana air laut lebih rendah atau tidak sejajar dengan daratan (garis pantai).

Simulasi yang dihasilkan yaitu simulasi dua dimensi dengan memposisikan pengamat dari samping. Pengamatan dari samping memungkinkan untuk mengamati profil kecepatan gelombang saat merambat. Namun, simulasi dua dimensi mempunyai kekurangan yaitu air laut hanya bisa melewati hambatan (*obstacle*) dari atas, padahal pada kenyataannya air dapat melewati hambatan dari samping. Simulasi seperti fenomena nyata dapat dilakukan dengan pengamatan tiga dimensi.

Tsunami merambat dari kiri ke kanan domain. Gelombang air laut dibangkitkan dengan mengangkat air laut di sebelah kiri domain kemudian melepaskannya. Fungsi pembangkitnya yaitu fungsi eksponensial yang mempunyai parameter amplitudo dan kedalaman air laut normal yang ditulis dengan

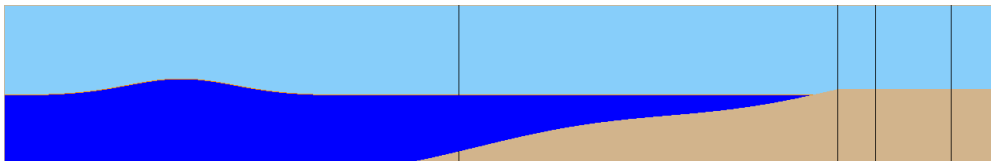
$$h(x) = Ae^{-x^2} + D \tag{3}$$

di mana A menunjukkan amplitudo dan D menunjukkan kedalaman laut. Cara ini hanya digunakan untuk membangkitkan gelombang. Semakin tinggi amplitudonya maka gelombang yang dihasilkan akan semakin besar. Gelombang besar tersebut yang disebut dengan tsunami. Namun, cara ini tidak sesuai dengan kenyataannya. Tsunami biasanya disebabkan oleh gempa tektonik atau terjadinya pergeseran lempeng bumi di dasar laut, atau bisa juga disebabkan oleh gunung meletus.

Profil dasar laut dibuat mendatar di tengah laut dan berangsur menaik di dekat pantai. Profil dasar laut di dekat pantai dibuat melengkung. Contoh visualisasi kondisi awal sistem dapat dilihat dalam Gambar 6.

p_1

$p_2 \quad p_3 \quad p_4 \quad p_5$



Gambar 7. Visualisasi kondisi awal gelombang

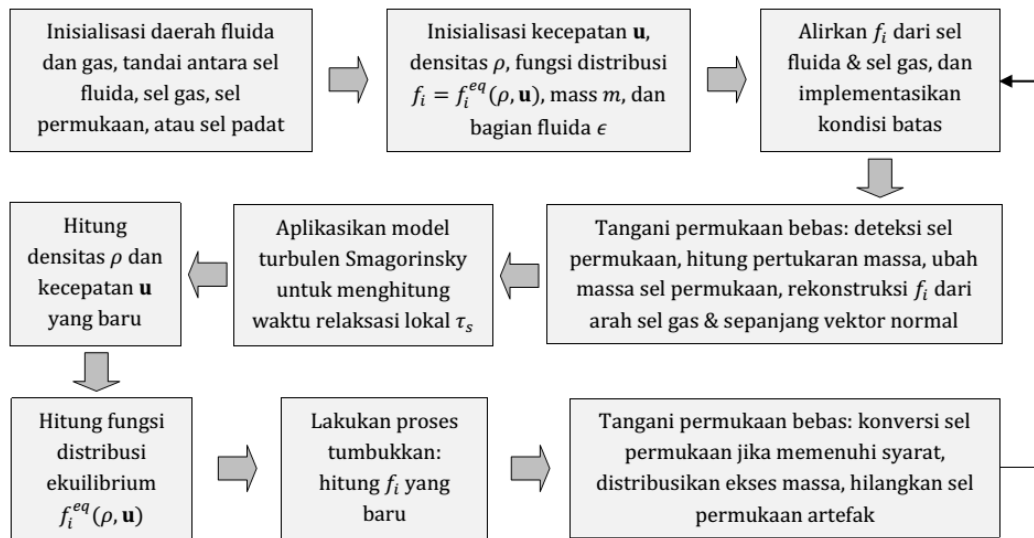
Pada Gambar 7. warna biru tua menunjukkan air laut, warna biru muda menunjukkan udara, dan warna jingga menunjukkan permukaan bebas. Ada dua warna lain yang menunjukkan sel padat yaitu warna coklat sebagai pasir dan warna hijau untuk tanggul. Dengan menggunakan fungsi pembangkit tsunami di atas, air laut didefinisikan sebagai sel-sel yang berada di bawah fungsi tersebut. Sel-sel yang berada di atas fungsi ditandai sebagai sel gas. Sedangkan sel-sel yang terletak tepat pada fungsi tersebut ditandai sebagai sel permukaan. Kemudian sel-sel tersebut diinisialisasi berdasarkan jenis selnya.

Tsunami dibangkitkan dengan mengangkat air laut menggunakan fungsi pembangkit di atas dengan kecepatan awal nol, maka seiring berjalannya waktu air akan bergerak turun karena pengaruh percepatan gravitasi, sehingga dihasilkan dua gelombang yaitu gelombang yang merambat ke kiri dan ke kanan. Gelombang utama tsunami yaitu gelombang yang pertama kali merambat ke kanan, namun dalam selang waktu kemudian akan diikuti oleh gelombang sekunder.

3.2. Algoritma

Prosedur berikut terdiri dari langkah-langkah (algoritma) simulasi menggunakan LBM standar dengan menambahkan model turbulen Smagorinsky, kondisi batas dan penanganan permukaan bebas. Prosedur simulasinya adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi daerah fluida dan gas, kemudian tandai setiap sel dengan sel fluida, sel gas, sel permukaan, atau sel padat.
2. Inisialisasi kecepatan \mathbf{u} , densitas ρ , massa m , bagian fluida ϵ , dan fungsi distribusi f_i . Fungsi distribusi dapat diinisialisasi dengan fungsi distribusi ekuilibrium $f_i = f^{eq}(\rho, \mathbf{u})$. Densitas setiap sel adalah $\rho = 1$. Massa sel fluida adalah 1, massa sel gas adalah 0, dan massa sel permukaan dapat diinisialisasi dengan 0.5. Sedangkan bagian fluida ϵ dapat dihitung dengan massa dibagi densitas.
3. Lakukan proses aliran: alirkan fungsi distribusi f_i menggunakan dan aplikasikan kondisi batas. Kondisi batas yang digunakan yaitu kondisi batas tidak-licin dengan skema pantul-balik dan kondisi batas aliran masuk/keluar.
4. Lakukan penanganan permukaan bebas selama proses aliran: deteksi sel permukaan, hitung pertukaran massa pada sel permukaan, hitung massa sel permukaan yang baru, dan rekonstruksi fungsi distribusi yang datang dari sel gas dan sepanjang vektor normal.
5. Hitung waktu relaksasi yang dimodifikasi τ_s berdasarkan model turbulen Smagorinsky.
6. Hitung densitas ρ dan kecepatan \mathbf{u} yang sudah menambahkan percepatan gravitasi.
7. Hitung fungsi distribusi ekuilibrium f^{eq} dengan densitas dan kecepatan baru yang dihasilkan pada langkah 6.
8. Lakukan proses tumbukkan: hitung fungsi distribusi f_i yang baru dengan waktu relaksasi lokal τ_s yang diperoleh pada langkah 5.
9. Lakukan penanganan permukaan bebas setelah proses tumbukkan: hitung bagian fluida ϵ yang baru pada sel permukaan dan cek apakah sel tersebut harus dikonversi menjadi sel fluida atau sel gas. Jika ada sel permukaan yang dikonversi maka distribusikan eksese massa ke sel tetangganya. Kemudian hilangkan sel permukaan artefak.
10. Ulangi langkah 3 sampai 9 sebanyak t_{max} kali. Diagram blok dari prosedur simulasi di atas terdapat dalam Gambar 8.



Gambar 8. Diagram blok algoritma simulasi [9]

3.3. Parametrisasi

Panjang domain komputasi yaitu 14 meter dengan tinggi 2 meter. Dalam metode komputasi yang berbasis diskritisasi, pemilihan ukuran sel yang kecil sangat penting dalam menentukan akurasi hasil. Akan tetapi, pemilihan ukuran sel yang kecil berbanding terbalik dengan waktu komputasinya. Semakin kecil ukuran sel maka waktu komputasinya akan semakin mahal. Ukuran sel yang dipilih yaitu $\Delta x' = 0.01$ meter. Dalam LBM ukuran sel berbentuk persegi untuk kemudahan.

Setelah menentukan ukuran sel, langkah selanjutnya yaitu menentukan selang waktu $\Delta t'$. Pemilihan $\Delta t'$ ini ditentukan oleh konstanta kompresibilitas, ukuran sel, dan percepatan gravitasi. Thuerey memilih konstanta kompresibilitas $g_c = 0.005$ untuk simulasi bendungan runtuh (*dam break*) [12]. Percepatan gravitasi yang diberikan yaitu $\mathbf{g}' = (0, 9.81)$ m/s. Selang waktu yang dipilih $\Delta t' = 0.0002$ s.

Viskositas kinematik fluida yang diberikan yaitu viskositas kinematik real air pada suhu kamar $\nu' = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Maka diperoleh viskositas kisi $\nu = 4 \times 10^{-9}$. Dengan nilai viskositas yang mendekati 0 tersebut akan menghasilkan waktu relaksasi yang mendekati 0.5 dan menyebabkan aliran turbulen. Oleh karena itu, simulasi ini membutuhkan model turbulen Smagorinsky untuk mengatasi masalah tersebut.

Dalam mengaplikasikan model turbulen, perlu menentukan konstanta Smagorinsky. Dalam simulasinya Thuerey menentukan nilai $C = 0.03$, karena nilai C di sekitar nilai tersebut sudah banyak digunakan dalam simulasi LBM dan sudah menunjukkan hasil yang bagus [8]. Dari uraian di atas, dapat disimpulkan parameter-parameter yang akan digunakan dalam simulasi tertulis dalam Tabel 2.

Tabel 2. Parameter simulasi

Parameter	Real	Simulasi
Panjang domain	$L = 14 \text{ m}$	$N = 14000$
Tinggi domain	$H = 2 \text{ m}$	$M = 200$
Ukuran sel	$\Delta x' = 0.01$	$\Delta x = 1$
Selang waktu	$\Delta t' = 0.0002$	$\Delta t = 1$

4. Pembahasan

4.1. Analisis Hasil Simulasi Tanpa Tanggul

Hasil pengamatan ketinggian air di beberapa titik p_1, p_2, p_3, p_4 , dan p_5 dengan h ketinggian air (dalam meter), t waktu tempuh gelombang ke titik p_1, p_2, p_3, p_4 , dan p_5 (dalam

detik), dan v kecepatan gelombang dari titik p_1 ke p_2 (dalam meter/detik) dengan kondisi batas *inflow/outflow* disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Ketinggian gelombang, waktu tempuh, dan kecepatan rambat gelombang untuk simulasi tanpa tanggul

		p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
Perc. 1	h [m]	0.23	0.16	0.13	0.07	0.03
	t [s]	1.31	3.16	3.45	4.24	5.31
	v [m/s]	2.70				
Perc. 2	h [m]	0.18	0.1	0.09	0.05	0.02
	t [s]	1.37	3.39	3.75	4.62	6.69
	v [m/s]	2.48				
Perc. 3	h [m]	0.14	0.08	0.05	0.02	-
	t [s]	1.37	3.61	4.04	5.83	-
	v [m/s]	2.23				
Perc. 4	h [m]	0.09	0.05	0.02	-	-
	t [s]	1.42	3.81	4.5	-	-
	v [m/s]	2.09				

Tabel di atas menunjukkan, percobaan 1 dengan tinggi gelombang 0.23 m di titik p_1 dapat mencapai titik p_2 dengan tinggi gelombang 0.16 m dan kecepatan rambat gelombangnya 2.7 m/s. Pada percobaan 2, tinggi gelombang di titik p_1 0.18 m dapat mencapai titik p_2 dengan tinggi gelombang 0.1 m dan kecepatan rambat gelombangnya 2.48 m/s. Pada percobaan 3, tinggi gelombang di titik p_1 0.14 m dapat mencapai titik p_2 dengan tinggi gelombang 0.08 m dan kecepatan rambat gelombang 2.23 m/s. Pada percobaan terakhir, tinggi gelombang di titik p_1 0.09 m dapat mencapai titik p_2 dengan tinggi gelombang 0.05 m dan kecepatan rambat gelombangnya 2.09 m/s.

Ketinggian air di titik p_2 lebih kecil dari ketinggian gelombang di titik p_1 . Hal ini disebabkan karena terjadinya pengurangan energi pada saat gelombang merambat dari titik p_1 ke p_2 . Ketinggian air di titik p_2 bervariasi ditentukan oleh ketinggian gelombang di titik p_1 . Semakin tinggi gelombang di titik p_1 , maka semakin tinggi pula ketinggian air di titik p_2 dan semakin besar pula kecepatan rambat gelombangnya. Hal ini mengakibatkan waktu tempuh gelombang di titik p_2, p_3, p_4 , dan p_5 setiap percobaan menjadi berbeda. Semakin cepat rambat gelombang, maka semakin cepat pula waktunya.

Hasil di atas juga menunjukkan bahwa pada percobaan 1 dan 2, gelombang dapat mencapai titik p_5 . Pada percobaan 3, gelombang hanya mencapai titik p_4 . Sedangkan pada percobaan 4, gelombang hanya mencapai titik p_5 . Hasil simulasi tanpa tanggul juga disajikan dalam grafik berikut.

Ketinggian air di garis pantai paling tinggi yaitu 0.16 m yaitu pada percobaan 1. Selanjutnya akan dilakukan percobaan bagaimana jika di garis pantai dibangun tanggul yang bertujuan untuk meredam laju gelombang. Tinggi tanggul yang dipilih yaitu 0.1 m, tidak lebih tinggi dari ketinggian air tertinggi di garis pantai, juga tidak lebih rendah dari ketinggian air terendah. Tujuannya untuk melihat sejauh mana efektifitas tanggul dalam meredam laju gelombang. Hasil percobaan simulasi dengan tanggul akan dibahas pada subbab selanjutnya.

4.2. Analisis Hasil Simulasi Dengan Tanggul

Hasil pengamatan ketinggian air di titik p_3, p_4 , dan p_5 dengan h ketinggian air (dalam meter), t waktu tempuh gelombang ke titik p_1, p_2, p_3, p_4 , dan p_5 (dalam detik), dan v kecepatan gelombang dari titik p_1 ke p_2 (dalam meter/detik) dengan kondisi batas *inflow/outflow* disajikan

dalam Tabel 4.. Pengamatan tidak dilakukan di titik p_2 karena di titik tersebut akan dibangun tanggul. Pengamatan dilakukan di titik p_3, p_4 , dan p_5 untuk melihat bagaimana efektifitas tanggul.

Tabel 4. Ketinggian gelombang dan waktu tempuh gelombang untuk simulasi dengan tanggul

		p_3	p_4	p_5
Perc. 1	h [m]	0.1	0.05	0.02
	t [s]	3.69	4.44	6.39
Perc. 2	h [m]	0.06	0.02	-
	t [s]	3.84	5.45	-
Perc. 3	h [m]	0.02	-	-
	t [s]	4.85	-	-
Perc. 4	h [m]	-	-	-
	t [s]	-	-	-

Dengan membandingkan Tabel 4.2 dan Tabel 4.1, dapat dilihat bagaimana peran tanggul dalam meredam laju gelombang. Sebagai contoh, pada percobaan 1 tanggul dapat mereduksi ketinggian air di titik p_3 dari 0.13 m menjadi 0.1 m, di titik p_4 dari 0.07 m menjadi 0.05 m, dan di titik p_5 dari 0.03 m menjadi 0.02 m. Di samping itu, tanggul juga dapat mereduksi waktu tempuh gelombang. Sebagai contoh, pada percobaan 1 tanggul dapat mereduksi waktu tempuh di titik p_3 dari 3.45 s menjadi 3.69 s, di titik p_4 dari 4.24 s menjadi 4.44 s, dan di titik p_5 dari 5.31 s menjadi 6.39 s.

Peran tanggul lebih terlihat pada percobaan 2 sampai 4. Pada percobaan 2, dengan adanya tanggul, gelombang tidak mencapai titik p_5 . Pada percobaan 3, tanggul dapat meredam gelombang sehingga tidak mencapai titik p_4 . Sedangkan pada percobaan 4, gelombang sama sekali tidak sampai di titik p_3 .

Pada percobaan 1, hasil simulasi tanpa tanggul memperkirakan ketinggian air di titik p_2 yaitu 0.16 m. Gelombang dapat melewati tanggul karena ketinggian air di titik p_2 pada simulasi tanpa tanggul lebih besar dari tinggi tanggul 0.1 m. Pada percobaan 2, tinggi tanggul sama dengan tinggi air di titik p_2 , namun air tetap dapat melewati tanggul karena ada dorongan dari gelombang yang lain namun dalam jumlah yang lebih sedikit. Pada percobaan 3, air dapat melewati tanggul dalam jumlah yang lebih sedikit dibandingkan tanpa tanggul karena tertahan tanggul. Pada percobaan 4, air sama sekali tidak melewati tanggul.

4.3. Analisis Hasil Simulasi dengan Pemukiman Penduduk Pesisir Pantai

Hasil simulasi dengan pemukiman penduduk pesisir pantai yang sudah dituliskan pada bab sebelumnya menunjukkan bahwa ke dua bangunan terendam pada percobaan 1 dan pada percobaan 2 hanya 1 bangunan yang terendam. Ini merupakan studi pendahuluan untuk mengamati perambatan gelombang air laut terhadap genangan air di pesisir pantai akibat gelombang besar misalnya tsunami.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Perubahan ketinggian air di pesisir pantai ditentukan oleh ketinggian gelombang yang datang menuju pantai dan ketinggian gelombang pada saat *runup* (ketinggian air di garis pantai). Hasil penelitian menunjukkan untuk gelombang tertinggi 0.23 m pada jarak 5 m dari garis pantai mencapai garis pantai dengan tinggi 0.16 m dan kecepatan rambat gelombangnya 2.7 m/s.

2. Tanggul berperan cukup efektif dalam meredam laju gelombang. Tanggul dapat mereduksi ketinggian air dan menunda waktu tempuh air di beberapa titik. Hasil penelitian menunjukkan untuk gelombang tertinggi dapat mereduksi ketinggian air di titik p_3 dari 0.13 m menjadi 0.1 m, di titik p_4 dari 0.07 m menjadi 0.05 m, dan di titik p_5 dari 0.03 m menjadi 0.02 m, serta waktu tempuhnya.

2.1. Saran

Ada beberapa saran penulis untuk penelitian selanjutnya:

1. Untuk membuat simulasi perambatan tsunami yang lebih nyata, perlu kajian lebih lanjut tentang bagaimana gelombang tsunami dibangkitkan, misalnya disebabkan oleh pergeseran lempeng tektonik bawah laut, gunung meletus, longsor, meteor jatuh, dan lain-lain.
2. Penelitian selanjutnya perlu mempertimbangkan domain pengamatan yang lebih luas, karena tsunami biasanya mempunyai pusat gempa yang cukup jauh dari daratan.
3. Ketika mempertimbangkan domain yang lebih luas, maka perlu dipertimbangkan juga lama komputasinya. Semakin luas domainnya, maka semakin lama juga komputasi yang dibutuhkan. Oleh karena itu, komputasi paralel merupakan solusi terbaik karena dapat melakukan komputasi yang jauh lebih cepat dibandingkan komputasi serial.
4. Untuk mendapatkan simulasi yang lebih nyata, perlu dilakukan simulasi tiga dimensi karena pada simulasi dua dimensi air hanya bisa melewati tanggul atau bangunan di atasnya sedangkan pada kenyataannya air bisa saja melewati tanggul atau bangunan dari samping.
5. Sistem yang diusulkan dalam penelitian perlu diuji dengan hasil analitik atau hasil eksperimen.

Daftar Pustaka

- [1] G. Pedersen, *Advanced numerical models for simulating tsunami waves and runup, Chapter 1*, vol. 10. 2008.
- [2] S. Koshimura and K. Murakami, "Applicability of the Lattice Boltzmann Method for Tsunami Modeling," no. 1, pp. 2–6, 2009.
- [3] G. R. McNamara and G. Zanetti, "Use of the boltzmann equation to simulate lattice-gas automata," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, no. 20, pp. 2332–2335, 1988.
- [4] S. C. G. D. Doolen, "Lattice Boltzmann Method," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 30, no. Kadanoff 1986, pp. 329–364, 1998.
- [5] A. A. Mohamad, *Lattice Boltzmann Method: Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes*. Springer-Verlag London, 2011.
- [6] J. G. Zhou, *Lattice Boltzmann Methods for Shallow Water Flows*. 2004.
- [7] Y. Kwak and A. Nakano, "Hybrid Lattice-Boltzmann/Level-set Method for Liquid Simulation and Visualization," *Int. J. Comput. Sci.*, vol. 6669, pp. 1–14, 2009.
- [8] N. Thuerey, "Physically based Animation of Free Surface Flows with the Lattice Boltzmann Method," *Science (80-.)*, 2007.
- [9] D. Nuraiman, *Aplikasi Metode Lattice-Boltzmann untuk Analisis Dinamika Vortex Bawah Laut (Studi Kasus Perambatan Tsunami)*. Institut Teknologi Bandung, 2014.
- [10] D. Nuraiman, S. Viridi, and A. Purqon, "Application of lattice Boltzmann method for analysis of underwater vortex dynamics," in *AIP Conf. Proc.*, 2015, no. 2, p. 80001.
- [11] D. Nuraiman, *Lattice Boltzmann Method for Ocean Wave Propagation*, no. July. Kanazawa University, 2014.
- [12] N. Thürey and U. Rüdè, "Stable free surface flows with the lattice Boltzmann method on adaptively coarsened grids," *Comput. Vis. Sci.*, vol. 12, no. 5, pp. 247–263, 2009.