

ANALISIS NUMERIK DINAMIKA FLUIDA PADA PERMUKAAN STRUKTUR KECIL

TUGAS AKHIR

**Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana dari
Institut Teknologi Bandung**

**Oleh
ALDIAN NUR AZMAR
NIM 10219098**



**PROGRAM STUDI SARJANA FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2023**

ABSTRAK

ANALISIS NUMERIK DINAMIKA FLUIDA PADA PERMUKAAN STRUKTUR KECIL

Oleh
Aldian Nur Azmar
NIM: 10219098

Interaksi fluida dengan permukaan padatan melibatkan interaksi di molekuler yang menentukan perilaku fluida tersebut ketika bergerak di permukaan padatan yang menjadi bidang kontak. Ketika ada kontak dengan sebuah permukaan padatan, fluida dapat menjadi bersifat *wetting* dan *non-wetting* yang ditandai dengan besar sudut kontak yang dihasilkan. Dengan demikian, kemudahan gerak fluida melalui sebuah struktur dipengaruhi oleh kuat interaksi fluida tersebut dengan material padatan yang menyusun struktur tersebut. Pada studi ini, dinamika fluida multikomponen melewati struktur diinvestigasi secara numerik dengan metode Kisi Boltzmann (*Lattice Boltzmann Method* atau LBM). Struktur yang digunakan berbentuk celah dan penghalang. Model *Shan – Chen* diterapkan untuk mengakomodasi interaksi kohesi dan adhesi. Untuk menilai kemudahan fluida melewati struktur, dua besaran dihitung yaitu durasi fluida melewati struktur dan fraksi volume fluida yang mampu melewati struktur. Untuk mengamati bagaimana kedua besaran ini berubah, kuat interaksi fluida–padatan serta bilangan Bond divariasikan. Tiga keadaan berbeda teramati melalui variasi sudut kontak dan bilangan Bond yaitu *droplet* melewati celah seutuhnya, *droplet* melewati celah tetapi menyisakan fraksi volumenya menempel pada struktur, dan fluida melewati celah tetapi menempel di sisi seberang dari struktur. Dari penelitian ini, diperoleh bahwa hubungan antara sudut kontak berbanding lurus dengan lama waktu fluida melewati celah, besarnya viskositas fluida juga mempengaruhi laju *droplet* untuk melewati struktur yaitu semakin besar viskositas fluida maka interval waktu yang dihasilkan akan semakin besar, tetapi besarnya perbandingan viskositas akan berbanding terbalik dengan interval waktu, serta bilangan Bond berbanding terbalik dengan laju *droplet* melewati struktur.

Kata kunci: *Lattice Boltzmann Method*, fluida multikomponen, sudut kontak, struktur

ABSTRACT

NUMERIC ANALYSIS OF FLUID DYNAMICS ON THE SURFACE OF SMALL STRUCTURES

by

Aldian Nur Azmar

NIM: 10219098

Interaction of fluid with solid surfaces involve interactions in the molecules that determine the behavior of the fluid when moving on the solid surface which is the contact area. When there is contact with a solid surface, the fluid can become wetting and non-wetting which is indicated by the large contact angle produced. Thus, the ease of fluid movement through a structure is affected by the strength of the fluid's interaction with the solid materials that compose the structure. In this study, multicomponent fluid dynamics through structures are investigated numerically using the Lattice Boltzmann Method or LBM. The structure used is in the form of gaps and barriers. The Shan–Chen model was applied to accommodate cohesion and adhesion interactions. To assess the ease with which the fluid passes through the structure, two quantities are calculated, namely the duration of the fluid passing through the structure and the volume fraction of fluid that is able to pass through the structure. To observe how these two quantities change, the fluid–solid interaction strength and Bond number are varied. Three different states are observed through variations in contact angle and Bond number, namely the droplet passes through the slit completely, the droplet passes through the slit but retains its volume fraction attached to the structure, and the fluid passes through the slit but attaches to the opposite side of the structure. From this study, it was found that the relationship between the contact angle is directly proportional to the length of time the fluid passes through the gap, the magnitude of the viscosity of the fluid also affects the rate of droplets to pass through the structure, namely the greater the viscosity of the fluid, the resulting time interval will be greater, but the magnitude of the viscosity ratio will be inversely time interval, as well as passing through the Bond equation is inversely proportional to the droplet structure of the rate.

Key words: *Lattice Boltzmann Method, multicomponent fluid, contact angle, structure.*

PENGESAHAN

ANALISIS NUMERIK DINAMIKA FLUIDA PADA PERMUKAAN STRUKTUR KECIL

Oleh
Aldian Nur Azmar
NIM 10219098

Program Studi Sarjana Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung

Dosen Pembimbing Menyetujui Substansi dari Buku Tugas Akhir

Bandung, tt bb TTTT
Dosen Pembimbing 1, Dosen Pembimbing 2,

Muhammad Rizqie Arbie, S.Si.,
M.Si., Ph.D.
NOPEG 118110009

Dr. Irfan Dwi Aditya, S.Si., M.Si.
NIP 19870424 201504 1 003

Tim Penguji:

1. Prof. Dr. rer. nat. Umar Fauzi
2. Dr. rer. nat. Sparisoma Viridi, S.Si.

PEDOMAN PENGGUNAAN BUKU TUGAS AKHIR

Buku Tugas Akhir Sarjana ini tidak dipublikasikan, namun terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Institut Teknologi Bandung. Buku ini dapat diakses umum, dengan ketentuan bahwa penulis memiliki hak cipta dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Institut Teknologi Bandung. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis, dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh buku Tugas Akhir harus atas izin Program Studi Sarjana Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung.

*Tugas akhir ini didedikasikan
untuk Alm. Papa, Mama, Azri, dan Arfi*

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT. yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia – Nya, sehingga penyusunan buku tugas akhir yang berjudul “Analisis Numerik Dinamika Fluida Pada Permukaan Struktur Kecil” ini dapat diselesaikan. Tujuan penulisan buku ini salah satunya yaitu sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Program Studi Fisika, Institut Teknologi Bandung.

Penulis memiliki harapan yang tinggi agar tugas akhir ini memiliki manfaat untuk semua pihak dan menjadi salah satu pertimbangan untuk menyelesaikan permasalahan penyaringan limbah yang mengganggu keseimbangan lingkungan.

Penulis menyadari bahwa banyak pihak yang membantu dan memberikan dukungan dalam terselesaikannya laporan tugas akhir ini. Segala bentuk dukungan baik moril dan material sangat membantu penulis dalam mengumpulkan semangat dan keinginan untuk menyelesaikan studi ini. Dengan demikian penulis ucapkan terimakasih dengan ketulusan hati kepada pihak – pihak yang telah membantu dan membimbing penulis selama menyusun tugas akhir ini, yakni kepada:

- Kedua orang tua yang paling disayangi, Alm. Bapak Admiraldi Azmar dan Ibu Fitri Adha, serta kedua adik yang dicintai, Azri Dinova Azmar dan Arfi Islami Azmar yang selalu memberikan do’a tanpa henti, serta dukungan dan motivasi yang memberikan semangat dalam menyelesaikan studi ini.
- Keluarga besar Papa dan Mama yang selalu memberikan dukungan baik moral maupun material, serta memberikan nasihat kepada penulis agar menjadi pribadi yang sholeh dan baik.
- Muhammad Rizqie Arbie, S.Si., M.Sc., Ph.D. dan Dr. Irfan Dwi Aditya, S.Si, M.Si. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan ilmu, serta semangat dan motivasi dalam menyelesaikan tugas akhir.

- Prof. Dr. rer. nat. Umar Fauzi dan Dr. rer. nat. Sparisoma Viridi, S.Si. atas ketersediannya menjadi dosen penguji dalam sidang Tugas Akhir dan memberikan saran yang membangun dan bermanfaat bagi penelitian ini untuk kedepannya.
- Seluruh dosen dan staff Program Studi Fisika yang telah memberikan ilmu dan mendidik penulis selama menempuh pendidikan di Institut Teknologi Bandung.
- Nungky Andriani Dinar Widyastuti, yang selalu memberikan dukungan, serta membantu memberikan saran dan masukan, terutama dalam hal format laporan terhadap pembuatan Tugas Akhir ini.
- Teman – teman Asas Gotong Royong, Anggia Suci Lestari, Fakhri Meinardi, Khansa Aida Dewiyanti, Rais Akbar A'lim, Ryan Dwigiantara, Sephia Yustika Wardhani, dan Zuhoi Lailatus Syarifah yang selalu memberikan dukungan dan teman bermain, serta berbagi kisah senang maupun sedih sejak awal menempuh perkuliahan di Institut Teknologi Bandung.
- Teman-teman seperbimbingan KK Fisika Instrumentasi dan Komputasi, Avima Haamesha, Muhammad Ervandy Rachmat, Kemal Rizky Fadhlurrohman, Shafira Amaliyah, dan Michael Alfarino yang selalu mendukung dan berbagi kesulitan dalam menjani perkuliahan dalam kelompok keahlian ini.
- Teman-teman dari HIMAFI ITB dan berbagai jurusan yang selalu memberikan dukungan dan menjadi penyemangat, serta teman bermain yang selalu saling mendukung.
- Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung membantu menyelesaikan tugas akhir ini, serta selalu memberikan dukungan dan motivasi.

Penulis menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun agar tugas akhir ini bisa menjadi lebih lagi dan memiliki manfaat yang luas di masa yang akan datang.

Bandung, 27 Juli 2023

Aldian Nur Azmar
NIM 10219098

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	i
PENGESAHAN	iii
PEDOMAN PENGGUNAAN BUKU TUGAS AKHIR	ii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR NOTASI	xii
DAFTAR SINGKATAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan dan Batasan Masalah	2
I.3 Tujuan	2
I.4 Metodologi	2
I.5 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1 <i>Shan – Chen type Multicomponent Multiphase LBM</i>	5
II.2 Interaksi Kohesi dan Adhesi	9
II.3 Persamaan Laplace – Young	10
II.4 Parameter Kontrol G_c	12
II.5 Tegangan Permukaan	12
II.6 Bilangan Eötvös (Bilangan Bond)	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	14
III.1 Pengambilan Data	14
III.2 Pengolahan Data	17
III.2.1 Pengukuran Interval Waktu Pada Saat Fluida Melewati Struktur	17
III.2.2 Pengukuran Sudut Kontak yang Terbentuk Antara	

Interaksi <i>Droplet</i> Dengan Permukaan Struktur.....	17
III.2.3 Perhitungan Bilangan Bond.....	18
III.2.4 Visualisasi Kondisi <i>Droplet</i> Pada Saat Melewati Struktur	18
III.3 Validasi Metode Percobaan.....	20
BAB IV HASIL DAN ANALISIS.....	26
IV.1 Pengukuran Sudut Kontak dan Interval Waktu Pada Saat <i>Droplet</i> Melewati Celah	26
IV.2 Pengukuran Interval Waktu Dengan Memvariasikan Besarnya Viskositas Pada Saat <i>Droplet</i> Melewati Penghalang	29
IV.3 Perhitungan Bilangan Bond Pada Saat <i>Droplet</i> Melewati Celah.....	31
IV.4 Perhitungan Bilangan Bond Pada Saat <i>Droplet</i> Melewati Penghalang	33
IV.5 Visualisasi <i>Droplet</i> Pada Saat Melewati Celah.....	34
IV.6 Visualisasi <i>Droplet</i> Pada Saat Melewati Penghalang.....	37
BAB V SIMPULAN	41
V.1 Simpulan	41
DAFTAR PUSTAKA	42

DAFTAR TABEL

Tabel III.1 Perbedaan tekanan untuk setiap perubahan nilai jari – jari yang diperoleh.	22
Tabel III.2 Nilai RMSE untuk masing-masing daerah pada simulasi aliran Poiseuille.....	25
Tabel IV.1 Parameter adhesi, gravitasi, interval waktu, dan sudut kontak untuk setiap kasus percobaan yang dilakukan.	28
Tabel IV.2 Variasi besarnya viskositas fluida 1 dan fluida 2 untuk setiap percobaan.	29
Tabel IV.3 Interval waktu droplet pada saat melewati celah untuk setiap percobaan.	31
Tabel IV.4 Bilangan Bond pada saat <i>droplet</i> melewati penghalang dengan celah.	32
Tabel IV.5 Bilangan Bond pada saat droplet melewati penghalang.	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1. Skema algoritma LBM dan kedudukan partikel di dalam kisi.	5
Gambar II.2. (a) Skema untuk kisi D2Q9, (b) Skema untuk kisi D3Q19.	7
Gambar II.3. Sistem antara fluida dengan solid.	10
Gambar II.4. Sudut kontak yang terbentuk antara interaksi fluida 1, fluida 2, dan permukaan padatan.	10
Gambar II.5 (a) Kondisi diam droplet pada saat menyentuh solid, (b) Pengukuran sudut kontak yang terbentuk antara droplet dengan solid.	11
Gambar III.1 Simulasi difusi molekuler pada suatu droplet, (a) Kondisi awal droplet dengan jari – jari <i>Rawal</i> , (b) Kondisi akhir droplet dengan jari – jari <i>Rakhir</i>	21
Gambar III.2 Grafik perbedaan tekanan terhadap $1/Rakhir$ pada droplet.	22
Gambar III.3 Profil kecepatan Poiseuille Flow.	24
Gambar IV.1 Grafik interval waktu pada saat droplet melewati celah untuk setiap variasi nilai potensial adhesi terhadap variasi nilai gravitasi.	26
Gambar IV.2 Grafik interval waktu pada saat droplet melewati celah untuk setiap variasi nilai gravitasi terhadap variasi nilai potensial adhesi.	27
Gambar IV.3 Grafik interval waktu pada saat droplet melewati penghalang untuk setiap percobaan dengan memvariasikan besarnya viskositas fluida.	30
Gambar IV.4 Grafik nilai bilangan Bond terhadap interval waktu pada saat droplet melewati celah.	32
Gambar IV.5 Grafik nilai bilangan Bond terhadap interval waktu pada saat droplet melewati penghalang.	34
Gambar IV.6 Bentuk celah dan kisi dengan ukuran $100 \times 100 \times 100 \text{ lu}$	35
Gambar IV.7 Posisi awal droplet sebelum jatuh melewati celah (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.	35
Gambar IV.8 Kondisi droplet melewati celah tetapi menempel pada sisi lain permukaan celah, (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.	36
Gambar IV.9 Kondisi droplet melewati celah sepenuhnya tetapi terdapat sisa yang banyak pada sisi lain permukaan celah, (a) Tampak depan, (b)	

Tampak samping.	36
Gambar IV.10 Kondisi droplet melewati celah sepenuhnya tetapi terdapat sisa yang sedikit pada sisi lain permukaan celah, (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.	37
Gambar IV.11 Kondisi droplet tidak lewat celah, (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.....	37
Gambar IV.12 Bentuk celah dan kisi dengan ukuran $100 \times 100 \times 100 \text{ lu}$	38
Gambar IV.13 Posisi awal droplet sebelum jatuh melewati celah (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.	38
Gambar IV.14 Kondisi droplet pada saat melewati penghalang dengan sudut kontak 60° (wetting), (a) Tampak depan, (b) Tampak samping. ...	39
Gambar IV.15 Kondisi droplet pada saat melewati penghalang dengan sudut kontak $89,36^\circ$ (wetting), (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.	39
Gambar IV.16 Kondisi droplet pada saat melewati penghalang dengan sudut kontak 120° (non-wetting), (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.....	40

DAFTAR NOTASI

Notasi	Arti
τ_σ	Waktu relaksasi
ν_σ	Viskositas kinematik
c_s	<i>Lattice sound speed</i>
e_a	Kecepatan diskrit
w_a	Berat jenis komponen a
ρ_σ	Komponen dari densitas σth
c	Rasio dari jarak kisi
u_σ^{eq}	Kecepatan makroskopik
u'	Kecepatan umum
F_σ	Gaya pada komponen σth
$F_{c,\sigma}$	Gaya kohesi
$F_{ads,\sigma}$	Gaya adhesi
P	Tekanan
ψ	Potensi kohesi
G	Kuat potensial kohesi
$\sigma, \bar{\sigma}$	Dua komponen fluida
$G_{ads,\sigma}$	Kuat potensial adhesi
g	Percepatan gravitasi
L	Panjang karakteristik
γ	Tegangan permukaan
Eu	Bilangan Eötvös
Bo	Bilangan Bond

DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	Arti
LBM	<i>Lattice Boltmann Method</i>
MCMP	<i>Multicomponent Multiphase Fluids</i>
CFD	<i>Computational Fluids Dynamic</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
MSE	<i>Mean Square Error</i>

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Multicomponent Multiphase (MCMP) Fluids memiliki peran yang sangat penting dalam perindustrian. Kajian fluida multikomponen dapat diterapkan pada peristiwa *filtering* misalnya untuk memisahkan fluida yang dianggap sebagai polutan dari fluida yang terpolusi. Metode numerik dapat menjadi alat prediksi untuk penentuan tindakan yang diperlukan dalam menangani hal yang berkaitan dengan persoalan fluida multikomponen, sehingga tindakan yang diambil dapat lebih efisien dan cepat. Berdasarkan analisis numerik, beberapa parameter yang berguna untuk kontrol aliran pada situasi riil dapat diperoleh.

Computational Fluids Dynamic (CFD) banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah yang berkaitan dengan sistem fluida multikomponen, tetapi terdapat tantangan dalam hal antar-muka, serta masalah geometri padatan yang kontak dengan fluida. Metode Kisi Boltzmann (*Lattice Boltzmann Method* atau LBM) dapat mengkomodasi aliran multikomponen dengan mudah, yaitu dengan menambahkan fungsi densitas probabilitas untuk mendeskripsikan fluida tambahan. Metode LBM memiliki kemudahan dalam aplikasi, algoritma yang singkat, dan kemampuan untuk menggabungkan parameter termodinamika dalam persoalan aliran fluida multikomponen (Sahu, A. dan Bhowmick, S., 2020).

Fenomena *wetting* dan penyebaran pada fasa fluida di atas padatan merupakan hal yang penting di dunia industri dan riset. Ketika sebuah *immiscible fluids* melakukan kontak dengan fasa padatan, maka akan terdapat suatu garis kontak di antara *wetting* dan *non-wetting* fluida dengan permukaan fasa padatan yang membentuk sebuah sudut kontak. Sudut kontak yang terbentuk di antara fluida dengan permukaan dapat dihitung menggunakan persamaan *Young's* yang memberikan tegangan permukaan di antara komponen fluida dan di antara masing-masing komponen dan permukaan padatan yang diketahui.

Ada banyak penelitian yang membahas mengenai fenomena *wetting* dan penyebaran pada fasa fluida di atas padatan menggunakan model multikomponen – multifasa. Pada 1996, Martys dan Chen mempelajari fluida multikomponen dalam geometri tiga dimensi yang kompleks. Pada studi mereka, gaya interaksi di

antara fluida dan tembok/padatan diperkenalkan, lalu nilai sudut kontak dapat divariasikan dengan menyesuaikan kekuatan interaksi antara setiap fluida dengan permukaan, misalnya pada kasus suatu *droplet* yang membasahi permukaan padatan.

Proyek akhir ini membahas mengenai analisis kemudahan pergerakan fluida pada permukaan penghalang kecil dengan melakukan analisis pada kuat interaksi antara fluida dengan permukaan padatan menggunakan metode numerik berbasis kisi Boltzmann multikomponen – multifasa. Variasi yang dilakukan meliputi besarnya kuat interaksi adhesi, gravitasi, dan bentuk celah yang dilalui oleh *droplet*, lalu akan diperoleh besar sudut kontak antara fluida dengan permukaan padatan. Besaran yang akan dianalisis adalah durasi fluida melewati penghalang kecil dan fraksi volume fluida yang mampu melewati celah sempit. Hasil analisis numerik akan divisualisasi, kemudian akan dilihat fenomena atau interaksi yang terjadi antara fluida dengan permukaan padatan.

I.2 Rumusan dan Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, rumusan masalah yang terdapat dalam penelitian ini adalah melakukan analisis laju fluida pada bentuk geometri celah untuk memperoleh parameter fisis yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk membangun suatu sistem filtrasi pada fluida. Studi ini terbatas pada kasus interaksi dua fluida dengan nilai massa jenis yang hampir sama.

I.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah mengukur kemudahan fluida bergerak pada permukaan struktur yang terdiri dari celah dan penghalang melalui dua besaran yaitu durasi fluida melewati struktur dan fraksi volume fluida yang mampu melewati struktur.

I.4 Metodologi

Secara umum penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengetahui mengenai dasar dari multikomponen – multifasa LBM dan mengetahui hubungan antara kuat interaksi adhesi dan kohesi terhadap besarnya sudut kontak yang

dihasilkan.

2. Melakukan Simulasi Numerik

Analisis numerik yang dilakukan menggunakan metode multikomponen – multifasa LBM untuk menentukan beberapa parameter fisis yang diperlukan dalam penelitian ini, seperti tegangan permukaan dan variasi sudut kontak yang digunakan.

3. Pengolahan Data

Berdasarkan hasil analisis numerik, dilakukan visualisasi menggunakan parameter yang diperoleh melalui analisis numerik, kemudian berdasarkan visualisasi dilakukan analisis untuk memperoleh data fisis dari simulasi tersebut dan dilakukan peninjauan kembali melalui analisis numerik untuk memperoleh hasil variasi yang sesuai dan lebih baik lagi.

I.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan proyek akhir ini meliputi:

1. Bab I Pendahuluan

Bab I memuat latar belakang, rumusan dan batasan masalah, tujuan, metodologi, dan sistematika penulisan berdasarkan penelitian yang dilakukan.

2. Bab II Tinjauan Pustaka

Bab II memuat mengenai teori dari *Shan – Chen type* multikomponen – multifasa LBM, interaksi kohesi dan adhesi, persamaan *Laplace – Young*, parameter kontrol G_c dan tegangan permukaan, dan bilangan Eötvös.

3. Bab III Metode Penelitian

Bab III memuat metode yang digunakan dalam penelitian ini yang meliputi *flowchart* mengenai pengambilan dan visualisasi data dengan analisis numerik menggunakan metode *Shan – Chen type* LBM, serta validasi data.

4. Bab IV Hasil dan Pembahasan

Bab IV memuat pembahasan mengenai hasil pengolahan data yang diperoleh, serta visualisasi dan analisis dari data yang diperoleh.

5. Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab V memuat kesimpulan hasil penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya agar diperoleh pengembangan dan hasil yang lebih baik lagi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 *Shan – Chen type Multicomponent Multiphase LBM*

Shan – Chen model dari *Lattice Boltzmann Method* (LBM) digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida dengan beberapa fasa dan komponen, dan dapat disebut sebagai model *Pseudo – Potential* yang menyatakan mengenai konsep interaksi antarmolekul dari partikel fluida.

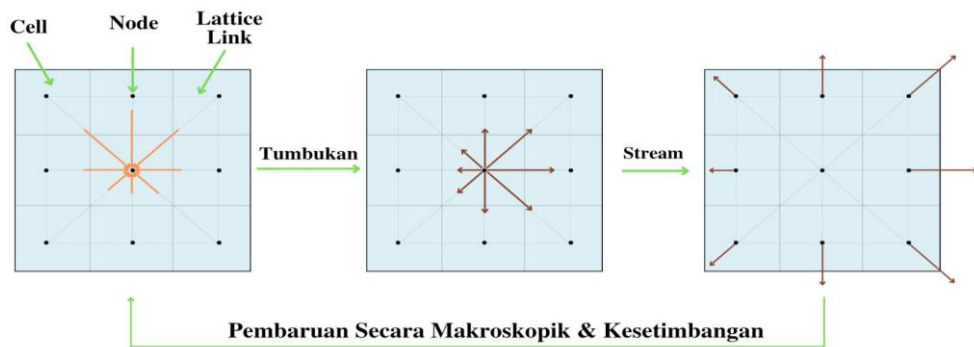
$$\underbrace{f_a^\sigma(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t, t + \Delta t)}_{\text{Aliran (Streaming)}} = \underbrace{f_a^\sigma(\mathbf{x}, t) - \frac{\Delta t}{\tau_\sigma} [f_a^\sigma(\mathbf{x}, t) - f_a^{\sigma,eq}(\mathbf{x}, t)]}_{\text{Tumbukan (Collision)}}, \quad (\text{II.1})$$

dengan $f_a^\sigma(\mathbf{x}, t)$ adalah fungsi distribusi komponen densitas σ th dalam arah kecepatan a th, dan τ_σ adalah waktu relaksasi yang berhubungan dengan viskositas kinematik yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\nu_\sigma = c_s^2(\tau_\sigma - 0.5\Delta t), \quad (\text{II.2})$$

dengan ν_σ adalah viskositas kinematik dan c_s adalah *lattice sound speed*.

Pada Gambar II.1 merupakan visualisasi dari skema algoritma LBM dan kedudukan setiap partikel pada saat terjadi tumbukan dan *streaming*:



Gambar II.1. Skema algoritma LBM dan kedudukan partikel di dalam kisi.

Collision atau tumbukan adalah setiap peristiwa yang terjadi pada dua atau lebih partikel yang saling mengerahkan gaya satu sama lain dalam waktu yang relatif singkat. Tumbukan di dalam suatu partikel fluida dianggap sebagai relaksasi untuk mencapai suatu kesetimbangan melalui tumbukan yang terjadi antar

molekul fluida (Sukop, M. dan Thorne, D., 2007).

Streaming atau aliran dalam laju fluida merupakan suatu langkah berarah pada partikel fluida yang merepresentasikan perpindahan suatu partikel fluida dari satu titik menuju titik lainnya selama interval waktu tertentu.

Fungsi distribusi kesetimbangan $f_a^{\sigma,eq}(\mathbf{x}, t)$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$f_a^{\sigma,eq}(\mathbf{x}, t) = w_a \rho_\sigma \left[1 + \frac{\mathbf{e}_a \cdot \mathbf{u}_\sigma^{eq}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_a \cdot \mathbf{u}_\sigma^{eq})^2}{2c_s^4} - \frac{\mathbf{u}_\sigma^{eq^2}}{2c_s^2} \right], \quad (\text{II.3})$$

dengan \mathbf{e}_a adalah kecepatan diskrit, w_a adalah faktor bobot komponen a , dan ρ_σ adalah komponen dari densitas σth .

Untuk model D2Q9 dapat dinyatakan dalam matriks sebagai berikut:

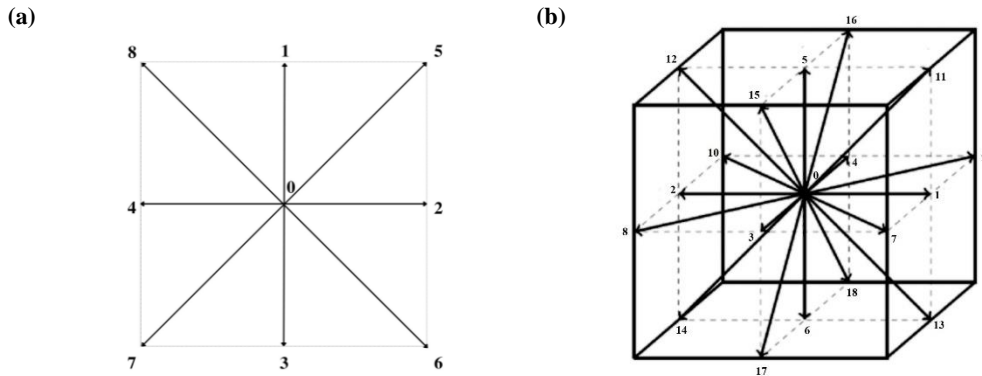
$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_0 \\ \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \\ \mathbf{e}_4 \\ \mathbf{e}_5 \\ \mathbf{e}_6 \\ \mathbf{e}_7 \\ \mathbf{e}_8 \end{bmatrix}^T = c \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ -1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & -1 \\ -1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (\text{II.4})$$

untuk model D3Q19 dapat dinyatakan dalam matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \\ e_9 \\ e_{10} \\ e_{11} \\ e_{12} \\ e_{13} \\ e_{14} \\ e_{15} \\ e_{16} \\ e_{17} \\ e_{18} \end{bmatrix}^T = c \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}^T, \quad (\text{II.5})$$

berdasarkan Persamaan (II.4) untuk model D2Q9, $w_a = 4/9$ ($a = 0$), $w_a = 1/9$ ($a = 1, 2, 3, 4$), dan $w_a = 1/36$ ($a = 5, 6, 7, 8$), lalu Persamaan (II.5) untuk model D3Q19, $w_a = 1/3$ ($a = 0$), $w_a = 1/18$ ($a = 1, 2, \dots, 6$), dan $w_a = 1/36$ ($a = 7, 8, \dots, 18$), $c_s = c/\sqrt{3}$, dengan $c = \Delta x/\Delta t$ adalah rasio dari jarak kisi (*lattice*) Δx yang dapat didefinisikan sebagai 1 *lu. (lattice unit)* dan *timestep* Δt .

Berikut merupakan visualisasi skema arah dari pergerakan suatu partikel untuk kisi D3Q19 dan D2Q9:



Gambar II.2. (a) Skema untuk kisi D2Q9, (b) Skema untuk kisi D3Q19.

Pada Gambar II.2 (a) merupakan skema untuk kisi D3Q19 yang merepresentasikan gerak partikel fluida pada ruang tiga dimensi dengan sembilan

belas arah gerak, dan (b) merupakan skema untuk kisi D2Q9 yang merepresentasikan gerak partikel fluida pada ruang dua dimensi dengan sembilan arah gerak

Jika ditinjau kembali Persamaan (II.3), dapat dilihat terdapat ρ_σ yang dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$\rho_\sigma = \sum_a f_a^\sigma, \quad (\text{II.6})$$

selanjutnya, dapat ditinjau \mathbf{F}_σ dengan persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{F}_\sigma = \mathbf{F}_{c,\sigma} + \mathbf{F}_{ads,\sigma}, \quad (\text{II.7})$$

dengan \mathbf{F}_σ adalah gaya yang bekerja pada komponen densitas σth , $\mathbf{F}_{c,\sigma}$ adalah gaya yang bekerja antar fluida atau interaksi kohesi, dan $\mathbf{F}_{ads,\sigma}$ adalah gaya yang bekerja antar fluida dan padatan (*solid*) atau interaksi adhesi.

selanjutnya, kecepatan makroskopik \mathbf{u}_σ^{eq} dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\mathbf{u}_\sigma^{eq} = \mathbf{u}' + \frac{\tau_\sigma \mathbf{F}_\sigma}{\rho_\sigma}, \quad (\text{II.7})$$

dengan \mathbf{u}' adalah kecepatan umum untuk berbagai komponen yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\mathbf{u}' = \frac{\sum_\sigma \left(\sum_a \frac{f_a^\sigma \mathbf{e}_a}{\tau_\sigma} \right)}{\left(\sum_\sigma \frac{\rho_\sigma}{\tau_\sigma} \right)}, \quad (\text{II.8})$$

Dengan memperhatikan gaya antarmolekul, perilaku fluida akan menjadi non – ideal, persamaan keadaan untuk fluida tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = c_s^2 \rho + \frac{c_s^2 G}{2} \psi^2, \quad (\text{II.10})$$

dengan P adalah tekanan yang berada di sekitar fluida, $\rho^2 = \psi^2$ adalah densitas

fluida, c_s adalah *lattice sound speed*, dan G adalah kuat potensial kohesi.

Pada sebagian besar simulasi yang berdasar pada LBM terdapat suatu satuan yang bernama *lattice unit (lu)*, satuan tersebut merupakan ukuran dasar yang merepresentasikan panjang dalam model LBM dan setiap *time steps (ts)* menyatakan satuan yang merepresentasikan unit waktu (Sukop, M. dan Thorne, D., 2007).

II.2 Interaksi Kohesi dan Adhesi

Gaya kohesi yang bekerja pada densitas fluida ke- σ dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\mathbf{F}_{c,\sigma}(\mathbf{x}, t) = -G_{c,\sigma}\rho_{\sigma}(\mathbf{x}, t) \sum_a w_a \rho_{\bar{\sigma}}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t, t) \mathbf{e}_a, \quad (\text{II.11})$$

dengan σ dan $\bar{\sigma}$ menunjukkan dua komponen fluida yang berbeda dan G_c adalah parameter yang mengontrol kuatnya dari gaya kohesi.

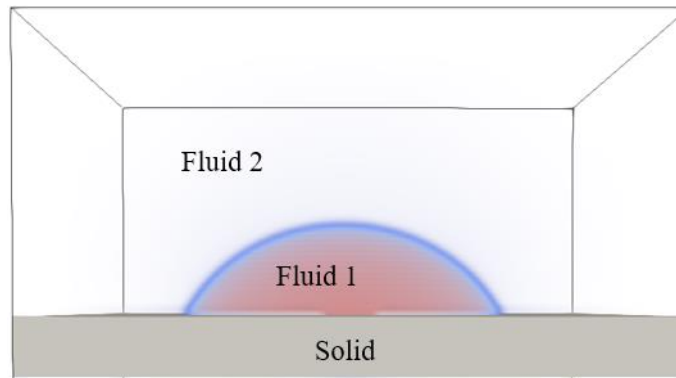
Gaya adhesi yang bekerja pada densitas fluida ke- σ dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\mathbf{F}_{ads,\sigma}(\mathbf{x}, t) = -G_{ads,\sigma}\rho_{\sigma}(\mathbf{x}, t) \sum_a w_a s(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t, t) \mathbf{e}_a, \quad (\text{II.12})$$

dengan $s(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t)$ adalah sebuah indikator fungsi yang memiliki nilai 1 atau 0 untuk *domain node* padatan atau fluida.

Kuatnya interaksi antara masing – masing fluida dan dinding (*solid*) dapat disesuaikan oleh parameter $G_{ads,\sigma}$, lalu dari beberapa literatur menyatakan bahwa $G_{ads,\sigma}$ dapat bernilai positif untuk fluida yang bersifat *nonwetting* dan bernilai negatif untuk fluida yang bersifat *wetting* (Huang, H. dkk., 2007).

Berikut merupakan visualisasi sistem antara fluida dengan solid:



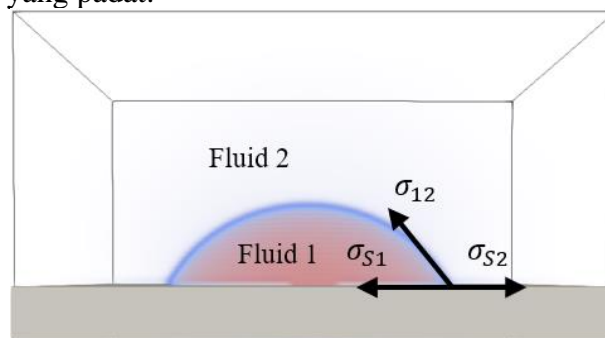
Gambar II.3. Sistem antara fluida dengan solid.

Pada Gambar II.3 merupakan visualisasi sistem yang menggambarkan bahwa semua wujud dalam fase yang berbeda memiliki interaksi, seperti cairan (*liquid*) dengan gas, cairan dengan solid, dan gas dengan solid.

II.3 Persamaan Laplace – Young

Sudut kontak merupakan sudut yang terbentuk antara fluida dengan permukaan padatan. Sudut kontak dipengaruhi oleh gaya interaksi yang terjadi antara fluida dengan permukaan padatan, gaya tersebut merupakan gaya kohesi dan adhesi.

Berikut visualisasi sudut kontak yang terbentuk antara fluida dengan bidang permukaan datar yang padat:



Gambar II.4. Sudut kontak yang terbentuk antara interaksi fluida 1, fluida 2, dan permukaan padatan.

Pada Gambar II.4 menunjukkan bahwa sudut kontak yang terbentuk merupakan hasil dari interaksi fluida 1 yaitu cairan dengan permukaan padatan, fluida 2 yaitu gas atau udara dengan permukaan padatan, dan fluida 1 dengan fluida 2.

Persamaan Young digunakan untuk menghitung besarnya sudut kontak dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\cos\theta_1 = \frac{\sigma_{s2} - \sigma_{s1}}{\sigma_{12}}, \quad (\text{II.13})$$

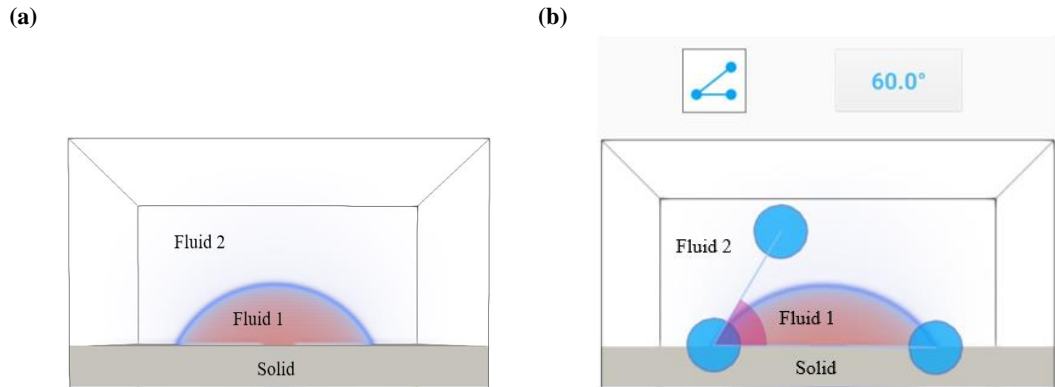
dengan σ_{12} adalah nilai tegangan antarmuka (*interfacial tension*) antara dua fluida, σ_{s1} adalah nilai tegangan antarmuka fluida satu dengan permukaan, σ_{s2} adalah nilai tegangan antarmuka fluida dua dengan permukaan, dan θ_1 adalah sudut kontak yang diukur untuk fluida satu.

Persamaan Young dapat disubstitusikan pada LBM yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Huang, H. dkk., 2007):

$$\cos\theta_1 = \frac{G_{ads,2} - G_{ads,1}}{G} = \frac{G_{ads,2} - G_{ads,1}}{\left(G_c \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{2}\right)}, \quad (\text{II.14})$$

dengan $G_{ads,2}$ adalah kuat potensial interaksi adhesi untuk fluida 2, $G_{ads,1}$ adalah kuat potensial interaksi adhesi untuk fluida 1, ρ_1 adalah kesetimbangan densitas fluida utama, ρ_2 adalah densitas fluida terlarut, dan $G = \left(G_c \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{2}\right)$ adalah faktor densitas.

Untuk ilustrasi pengukuran sudut kontak menggunakan Persamaan Laplace – Young berdasarkan Persamaan (II.14), dapat ditinjau interaksi fluida multikomponen dengan solid saat $G = 1.8$, $G_{ads,1} = -0.45$, dan $G_{ads,2} = 0.45$, maka akan diperoleh sudut kontak sebesar 60° . Berikut merupakan hasil visualisasi menggunakan parameter yang telah ditetapkan sebelumnya:



Gambar II.5 (a) Kondisi diam droplet pada saat menyentuh solid, (b) Pengukuran sudut kontak yang terbentuk antara droplet dengan solid.

Pada Gambar II.5 merupakan pengukuran sudut kontak berdasarkan visualisasi yang diperoleh yaitu saat *droplet* sudah mencapai kondisi statis dengan sudut kontak yang dihasilkan berdasarkan visualisasi yang diperoleh yaitu 60°.

II.4 Parameter Kontrol G_c

Dalam *Shan – Chen Model* (SC), parameter G_c mengontrol tegangan permukaan untuk interaksi kohesi (fluida – fluida). Parameter G_c memiliki nilai *threshold* yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Huang, H. dkk., 2007):

$$G_{c,crit} = \frac{1}{\rho_1 + \rho_2}, \quad (II.15)$$

dengan $G_{c,crit} = 1.0$ yang mengakibatkan $\rho_1 + \rho_2 = 1$, ρ_1 adalah kesetimbangan densitas fluida utama, dan ρ_2 adalah densitas fluida terlarut.

II.5 Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan merupakan kecenderungan permukaan zat cair yang diam untuk mengecil hingga mencapai luas permukaan semiminal mungkin, dalam hal ini penyebab terjadinya penyusutan zat cair yang diam adalah karena adanya peristiwa difusi molekuler.

Difusi molekuler merupakan pergerakan suatu molekul dari daerah yang berkonsentrasi tinggi menuju daerah dengan konsentrasi yang lebih rendah. Difusi molekuler juga mengakibatkan terjadinya transfer massa yang disebabkan oleh gerakan acak molekul dalam suatu zat cair yang diam, gerakan acak molekul tersebut diakibatkan karena adanya gradien atau perbedaan konsentrasi. Perpindahan molekul tersebut akan berlangsung secara terus – menerus hingga seluruh partikel tersebar secara merata.

II.6 Bilangan Eötvös (Bilangan Bond)

Dalam dinamika fluida, bilangan Eötvös (Eo) juga disebut dengan *bond number* atau bilangan Bond (Bo), adalah bilangan yang tidak memiliki dimensi dan mengukur pentingnya gaya gravitasi dibandingkan dengan gaya tegangan permukaan untuk pergerakan suatu *liquid*. Bilangan Bond berguna untuk mempelajari pergerakan fluida dalam media yang memiliki celah atau berpori. Bilangan Eötvös (Eo) atau bilangan Bond (Bo) dapat dinyatakan oleh persamaan

berikut (Sukop, M. dan Thorne, D., 2007):

$$E_o = B_o = \frac{\rho g L^2}{\gamma}, \quad (\text{II.16})$$

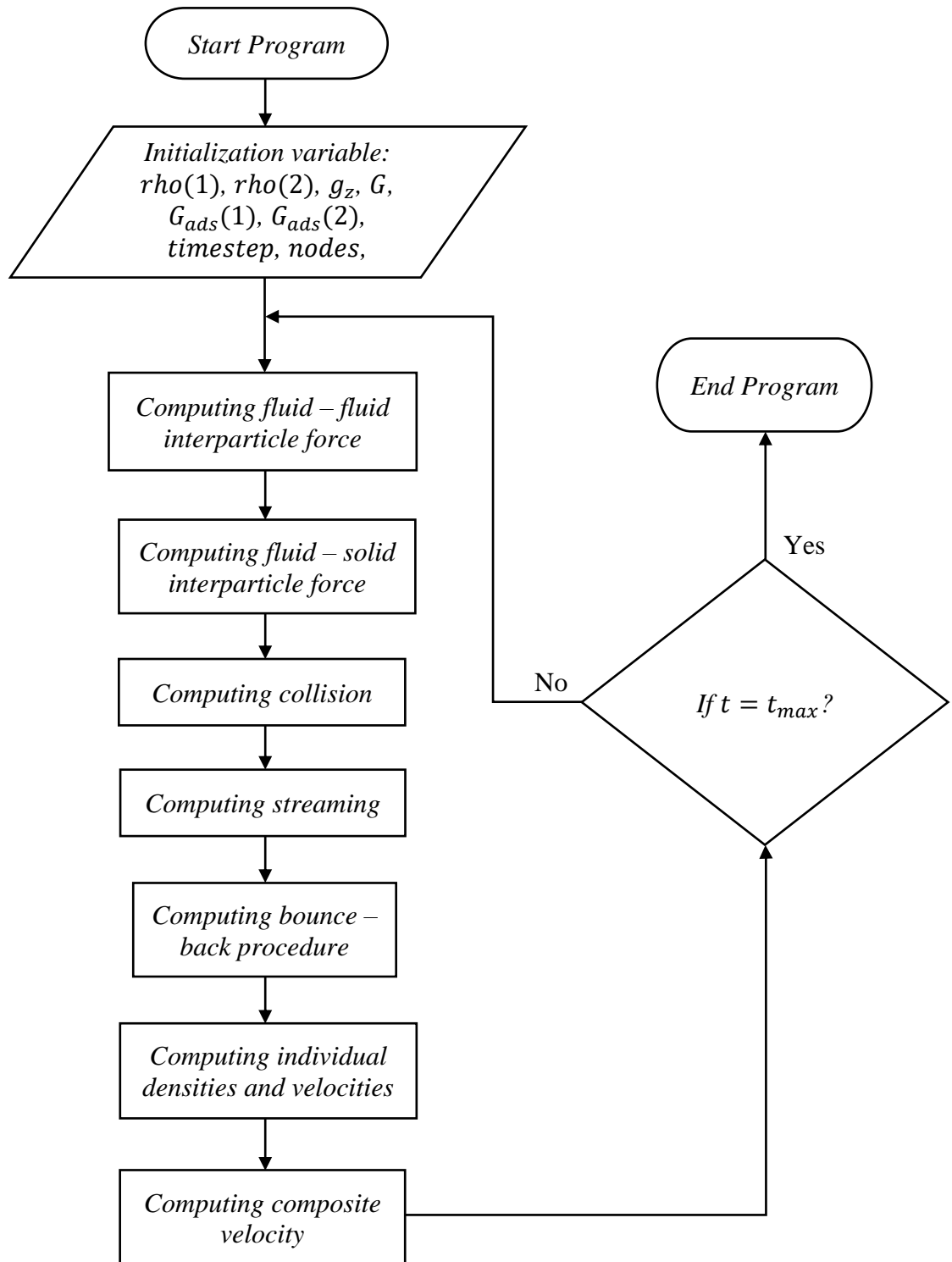
dengan ρ adalah densitas dari fluida (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), L adalah panjang karakteristik atau jari – jari kelengkungan (m), dan γ adalah tegangan permukaan (*surface tension*) (N/m).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada percobaan dalam tugas akhir ini, digunakan tiga tahap metodologi penelitian yaitu tahap Pengambilan Data mengenai alur proses pengambilan data yang dilakukan, tahap Pengolahan Data mengenai proses pengolahan dalam bentuk perhitungan dan visualisasi berdasarkan data yang diperoleh untuk memperoleh suatu parameter atau hubungan antar variabel, dan tahap Validasi Metode Percobaan untuk menunjukkan mengenai metode yang digunakan memiliki validasi yang sesuai terhadap teori yang digunakan.

III.1 Pengambilan Data

Data yang diperoleh merupakan hasil numerik yang diperoleh melalui komputasi, dalam hal ini bahasa pemrograman yang digunakan yaitu *Fortran* yang merupakan bahasa pemrograman yang berorientasi pada formulasi untuk menyelesaikan suatu permasalahan teknik secara numerik. Metode pengambilan data yang digunakan pada percobaan ini menggunakan algoritma pemrograman *Shan – Chen type Multicomponent LBM*. Berikut merupakan alur *flowchart* yang menggambarkan proses komputasi dan perhitungan dalam melakukan pengambilan data:



Berdasarkan alur program yang digunakan, akan didefinisikan terlebih dahulu beberapa parameter yang menjadi dasar perhitungan di dalam program tersebut. Parameter yang digunakan di antaranya densitas fluida utama atau $\rho(1)$, dalam

hal ini fluida utama adalah *droplet* dan densitas fluida terlarut atau $\rho(2)$ adalah fluida yang berada di sekitar fluida utama, lalu dua parameter penting yang mempengaruhi laju *droplet* untuk melewati celah yaitu gravitasi arah sumbu $-z$ atau g_z yang menjadi arah gerak laju fluida menuju celah, kuat potensial adhesi antara fluida utama dengan padatan atau $G_{ads}(1)$, kuat potensial adhesi antara fluida terlarut dengan padatan atau $G_{ads}(2)$, dan kuat potensial kohesi antara fluida utama dengan fluida terlarut atau G . Kemudian, *timestep* menentukan lama waktu program bekerja dan melakukan perulangan, lalu *droplet* yang akan melewati suatu celah yang didefinisikan dengan *nodes* pada saat proses visualisasi.

Pada saat *droplet* melewati celah akan terjadi interaksi antara fluida dengan permukaan celah, serta interaksi fluida utama dengan fluida yang terlarut. Oleh karena itu, akan diperhitungkan gaya yang bekerja antara fluida dengan padatan menggunakan Persamaan (II.12), lalu gaya yang bekerja antara fluida dengan fluida akan diperhitungkan dengan menggunakan Persamaan (II.11).

Untuk melakukan perhitungan kondisi *collision* atau tumbukan dapat menggunakan Persamaan (III.1) sebagai berikut,

$$f_a^{\sigma*}(\mathbf{x}, t) = \frac{\Delta t}{\tau_\sigma} [f_a^\sigma(\mathbf{x}, t) - f_a^{\sigma,eq}(\mathbf{x}, t)], \quad (III.1)$$

dengan fungsi distribusi $f_a^{\sigma*}(\mathbf{x}, t)$ yang terdapat pada Persamaan (III.1), akan diperoleh probabilitas posisi setiap partikel untuk berpindah menuju tetangga selanjutnya setelah terjadinya tumbukan, lalu dengan Persamaan (III.2) yang menjadi dasar perhitungan kondisi *streaming*, partikel tersebut akan diteruskan menuju tetangga selanjutnya berdasarkan setiap probabilitas yang telah diperoleh sebelumnya.

$$f_a^\sigma(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t, t + \Delta t) = f_a^{\sigma*}(\mathbf{x}, t), \quad (III.2)$$

Selanjutnya, digunakan syarat batas *bounce-back procedure* untuk untuk penerapan *no – slip condition*.

Parameter yang akan diperbaharui setiap program selesai melakukan perulangan yaitu densitas, kecepatan, dan posisi partikel fluida di setiap titik dan waktu.

Program akan berhenti melakukan perhitungan pada saat waktu perulangan sudah mencapai waktu maksimum, hal tersebut ditandai dengan melihat visualisasi ketika *droplet* sudah melewati celah. Jika *droplet* belum melewati celah, maka program akan melanjutkan perhitungan dan perulangan dengan memperbaharui nilai parameter seperti densitas, kecepatan, dan posisi partikel fluida di setiap titik dan waktu hingga *droplet* melewati celah berdasarkan visualisasi yang dilakukan.

III.2 Pengolahan Data

Pada percobaan dalam tugas akhir ini akan dilakukan beberapa tahap pengolahan data berdasarkan data yang diperoleh yaitu pengukuran interval waktu pada saat fluida melewati celah, pengukuran sudut kontak yang terbentuk antara interaksi *droplet* dengan permukaan celah, perhitungan bilangan Bond, dan visualisasi kondisi *droplet* pada saat melewati celah.

III.2.1 Pengukuran Interval Waktu Pada Saat Fluida Melewati Struktur

Pengukuran interval waktu pada saat *droplet* melewati struktur dilakukan dengan merekam dan menyimpan data perubahan densitas yang berada pada arah jatuhnya *droplet* pada saat melewati struktur, dalam hal ini densitas yang berada pada arah jatuhnya *droplet* yaitu densitas fluida terlarut, kemudian saat *droplet* melewati struktur, maka densitas yang terdapat di arah jatuhnya *droplet* adalah densitas dari *droplet* tersebut, lalu data yang direkam selama proses tersebut akan divisualisasi dalam bentuk grafik. Berdasarkan visualisasi grafik yang diperoleh akan diketahui waktu awal pada saat *droplet* mulai melewati struktur dan waktu akhir pada saat *droplet* mulai meninggalkan struktur, lalu interval waktu pada *droplet* saat melewati struktur dapat dihitung dari selisih antara waktu akhir dengan waktu awal saat *droplet* melewati struktur.

III.2.2 Pengukuran Sudut Kontak yang Terbentuk Antara Interaksi *Droplet* Dengan Permukaan Struktur

Pengukuran sudut kontak yang terbentuk antara interaksi *droplet* dengan permukaan struktur dapat dihitung dengan Persamaan *Laplace – Young* yang terdapat pada Persamaan (II.14). Sudut kontak yang terbentuk bergantung pada nilai kuat potensial adhesi antara fluida utama dengan permukaan padatan $G_{ads,1}$, kuat potensial adhesi antara fluida terlarut dengan permukaan padatan $G_{ads,2}$, dan kuat potensial kohesi antara fluida utama dengan fluida terlarut G . Pada perhitungan ini dapat didefinisikan bahwa nilai $G_{ads,1} = -G_{ads,2}$.

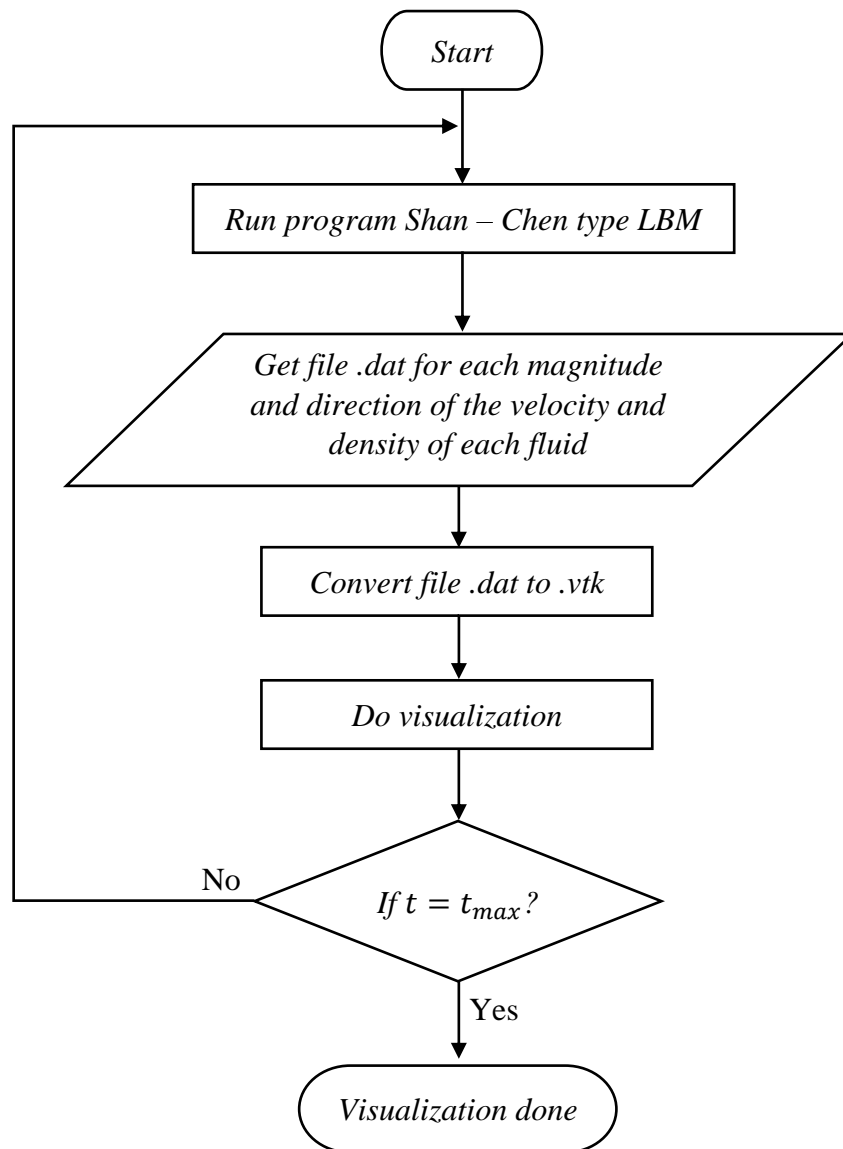
III.2.3 Perhitungan Bilangan Bond

Bilangan Bond dapat diperoleh menggunakan Persamaan (II.16) dengan densitas yang digunakan merupakan densitas dari *droplet*, nilai gravitasi yang digunakan merupakan gravitasi yang mempengaruhi laju *droplet* saat melewati struktur, panjang karakteristik yang digunakan adalah panjang jari – jari dari *droplet*, lalu besarnya tegangan permukaan merupakan gradien yang diperoleh melalui visualisasi grafik perubahan tekanan yang terdapat di dalam dan luar *droplet* terhadap inversi perubahan nilai jari – jari *droplet*.

III.2.4 Visualisasi Kondisi *Droplet* Pada Saat Melewati Struktur

Kondisi dan proses *droplet* pada saat melewati struktur dapat diketahui dengan melakukan simulasi terhadap fenomena tersebut. Simulasi yang dilakukan dapat memvisualisasikan kondisi *droplet* pada saat melewati struktur baik apakah *droplet* melewati struktur seutuhnya, *droplet* melewati struktur tetapi menyisakan fluida pada dinding struktur, atau *droplet* tidak melewati struktur sama sekali.

Berikut merupakan alur *flowchart* dalam melakukan visualisasi untuk melihat simulasi pada saat *droplet* melewati struktur:



Dalam melakukan visualisasi, maka dibutuhkan data untuk melakukan hal tersebut. Langkah pertama yang dilakukan adalah menjalankan program *Shan – Chen type LBM* untuk melakukan pengambilan data. Berdasarkan program tersebut, akan diperoleh file dalam format *.dat* yang berisi data mengenai besar dan arah kecepatan dari setiap partikel fluida, dan besar densitas untuk masing – masing fluida. Kemudian, setelah diperoleh beberapa data, maka selanjutnya dilakukan konversi dari format file *.dat* menjadi file dengan format *.vtk* melalui program yang dijalankan menggunakan *Octave version 7.2.0*, format tersebut merupakan format file yang biasa digunakan untuk menampilkan visualisasi *scientific*, dalam hal ini file yang telah dikonversi menjadi file *.vtk* akan berisi data

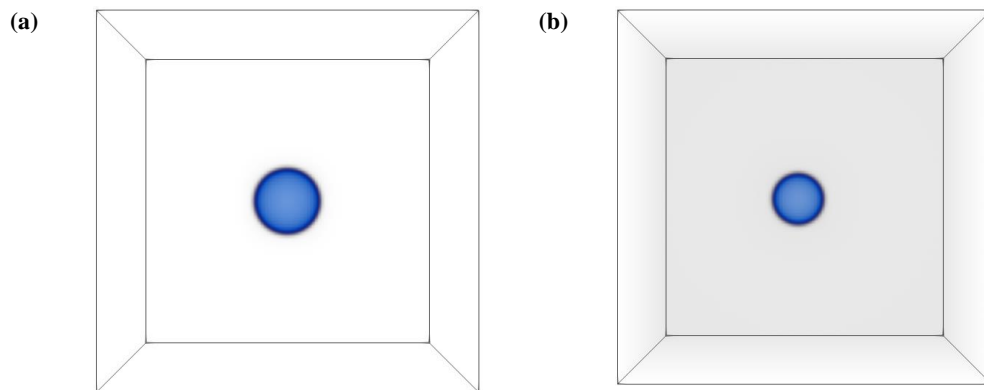
mengenai besar dan arah kecepatan untuk setiap partikel fluida dan densitas untuk masing – masing fluida. Selanjutnya, setelah diperoleh beberapa file *.vtk*, maka dilakukan visualisasi menggunakan *software Paraview version 5.10.1*. Berdasarkan hasil visualisasi yang diperoleh, dapat dilihat kondisi apakah *droplet* sudah atau belum melewati struktur. Jika *droplet* belum melewati struktur, maka pengambilan data akan dilanjutkan hingga mencapai waktu maksimal yang ditandai dengan lewatnya *droplet* dari struktur.

III.3 Validasi Metode Percobaan

Dalam melakukan suatu percobaan, maka diperlukan suatu validasi untuk memastikan apakah metode percobaan yang digunakan sesuai dengan teori yang ada. Pada percobaan ini digunakan algoritma *Shan – Chen type Multicomponent Multiphase* LBM, lalu berdasarkan metode tersebut dapat diketahui bahwa dalam LBM terdapat suatu fenomena yang terjadi pada *interface* dari permukaan zat cair yang diam untuk mengecil hingga mencapai luas permukaan semiminal mungkin. Parameter yang terkait dengan hal tersebut yaitu tegangan permukaan.

Berdasarkan *Multicomponent-Multiphase* LBM dapat diketahui bahwa tegangan permukaan adalah kemiringan atau gradien dari perbedaan tekanan di dalam dan di luar *droplet* terhadap inversi dari jari – jari akhir *droplet* setelah mencapai luas permukaan semiminal mungkin, lalu dapat diketahui bahwa hubungan perbedaan tekanan akan berbanding terbalik terhadap perubahan jari – jari kelengkungan *droplet* setelah mencapai luas permukaan semiminal mungkin.

Pada percobaan ini bertujuan untuk menguji kesesuaian hasil yang diperoleh berdasarkan algoritma pemrograman yang dibuat terhadap teori yang ada. Oleh karena itu, akan ditentukan nilai tegangan permukaan menggunakan algoritma pemrograman yang telah dibuat. Dalam menentukan tegangan permukaan perlu dilakukan simulasi seperti yang terlihat pada Gambar III.1 di bawah ini:



Gambar III.1 Simulasi difusi molekuler pada suatu *droplet*, (a) Kondisi awal *droplet* dengan jari – jari R_{awal} , (b) Kondisi akhir *droplet* dengan jari – jari R_{akhir} .

Gambar III.1 merupakan salah satu visualisasi untuk simulasi dalam menentukan tegangan permukaan, dalam hal ini kondisi (a) pada gambar tersebut merupakan kondisi awal *droplet* dengan jari – jari awal R_{awal} dan densitas di dalam dan di luar *droplet* yang belum mencapai kesetimbangan, sedangkan kondisi (b) pada gambar tersebut merupakan kondisi akhir *droplet* dengan jari – jari akhir R_{akhir} setelah mencapai kondisi kesetimbangan, dalam hal ini ukuran dari *droplet* akan mengalami penyusutan terhadap ukuran semula dengan $R_{awal} > R_{akhir}$. Penyusutan yang terjadi pada *droplet* merupakan akibat dari transfer massa yang disebabkan oleh gerakan molekuler secara acak pada *droplet*. Gerakan molekul yang terjadi disebabkan karena adanya gradien atau perbedaan konsentrasi di antara *droplet* dengan fluida terlarut. Hal tersebut akan terus terjadi hingga seluruh partikel tersebar luas secara merata atau mencapai kondisi kesetimbangan dengan perpindahan molekul tetap terjadi walaupun tidak terdapat perbedaan konsentrasi, dalam hal ini perpindahan jumlah molekul yang terjadi sudah mencapai nilai yang sangat kecil.

Dalam melakukan simulasi seperti yang terlihat pada Gambar III.1 dilakukan variasi besar jari – jari awal dari *droplet*, lalu berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh dilakukan visualisasi menggunakan *software Paraview version 5.10.1* untuk menampilkan gradien atau perbedaan konsentrasi di dalam dan di luar *droplet* dalam bentuk grafik densitas *droplet* terhadap panjang karakteristik yang diambil dari titik pusat *droplet* menuju suatu titik di luar *droplet*. Kemudian, panjang jari – jari akhir *droplet* diambil saat densitas *droplet* sebesar 50% dari densitas maksimal *droplet*. Data hasil simulasi yang telah diperoleh dapat dilihat pada Tabel III.1 di bawah ini:

Tabel III.1 Perbedaan tekanan untuk setiap perubahan nilai jari – jari yang diperoleh.

R_{awal}^a	G^b	ρ_1^c	ρ_2^d	Tekanan di dalam (P_1)	Tekanan di luar (P_2)	ΔP^e	R_{akhir}^f	$1/R_{akhir}$
10	1,8	2,385	2,048	2,501	1,941	0,560	6,08	0,164
15	1,8	2,231	2,049	2,237	1,942	0,295	11,92	0,084
20	1,8	2,182	2,050	2,156	1,944	0,212	17,93	0,056
25	1,8	2,158	2,053	2,116	1,948	0,168	21,20	0,047
30	1,8	2,144	2,056	2,093	1,954	0,139	25,23	0,040
35	1,8	2,136	2,061	2,081	1,962	0,119	28,45	0,035

^a Jari-jari awal.

^b Kuat potensial interaksi kohesi.

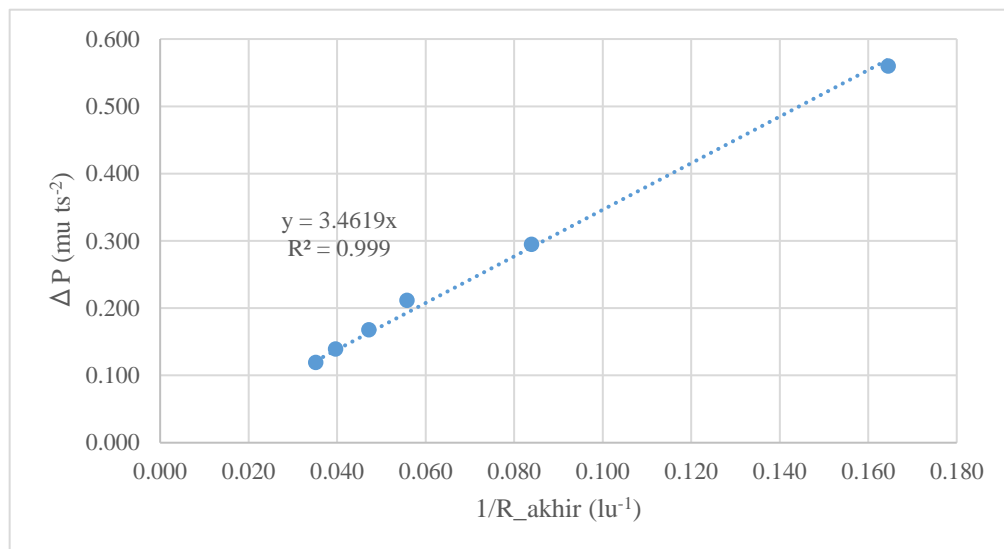
^c Densitas fluida utama.

^d Densitas fluida terlarut.

^e Perbedaan tekanan.

^f Jari-Jari akhir.

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel III.1 dapat dilihat bahwa jari – jari dari *droplet* mengalami penyusutan, untuk perbedaan tekanan yang terdapat di dalam dan di luar *droplet* dapat ditentukan menggunakan persamaan keadaan yang terdapat pada Persamaan (II.10), lalu dapat ditentukan perbedaan tekanan di antara keduanya. Selanjutnya, dilakukan visualisasi grafik perbedaan tekanan ΔP terhadap inversi dari jari – jari akhir $1/R_{akhir}$ dari *droplet* yang dapat dilihat pada Gambar III.2 sebagai berikut:



Gambar III.2 Grafik perbedaan tekanan terhadap $1/R_{akhir}$ pada *droplet*.

Gradien m yang menjadi nilai tegangan permukaan dapat dilihat pada Gambar III.2 yaitu sebesar 3,461, maka tegangan permukaan γ yang diperoleh sebesar 1,7309 melalui persamaan berikut:

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (\text{III.3})$$

dengan ΔP adalah perbedaan tekanan, γ adalah tegangan permukaan, R_1 adalah jari-jari kurvatur 1, dan R_2 adalah jari-jari kurvatur 2. Dalam percobaan ini, *droplet* berbentuk bola, maka jari-jari kurvatur 1 dan kurvatur 2 akan sama ($R_1 = R_2 = R$). Oleh karena itu, Persamaan (III.3) dapat disederhanakan menjadi,

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} \right) \rightarrow \Delta P = \gamma \left(\frac{2}{R} \right) \rightarrow \gamma = \frac{m}{2}, \quad (\text{III.4})$$

dengan m adalah gradien untuk memperoleh tegangan permukaan $\left(\frac{\Delta P}{\frac{1}{R}} \right)$.

Selanjutnya, berdasarkan tabulasi data dan visualisasi grafik yang diperoleh dapat dilihat bahwa nilai perbedaan tekanan antara kondisi di dalam dan di luar *droplet* berbanding terbalik terhadap jari-jari akhir pada *droplet*. Hubungan yang diperoleh berdasarkan eksperimen tersebut, dapat diketahui bahwa algoritma pemrograman yang digunakan memiliki validasi yang sesuai dengan teori yang ada.

Validasi selanjutnya dengan algoritma *Shan – Chen type Multicomponent Multiphase LBM* dengan melakukan simulasi untuk melihat profil kecepatan Poiseuille. Kecepatan Poiseuille merupakan kecepatan aliran fluida dalam pipa yang memiliki profil kecepatan parabola. Dalam simulasi yang dilakukan, digunakan nilai densitas awal untuk kedua fluida sebesar 1 dan 0, kecepatan gravitasi g sebesar 10^{-6} , potensial adhesi G sebesar 1,8, lalu waktu relaksasi untuk fluida 1 τ_1 adalah 1,2 dan fluida 2 τ_2 adalah 1,1. Berdasarkan waktu relaksasi yang telah ditentukan, maka dapat diperoleh viskositas kinematik untuk masing-masing fluida menggunakan Persamaan (III.5),

$$\nu = c_s^2 \left(\tau - \frac{1}{2} \right), \quad (\text{III.5})$$

Kemudian, dapat diperoleh viskositas kinematik untuk fluida 1 ν_1 sebesar 0,23 (*high viscosity*) dan fluida 2 ν_2 sebesar 0,2 (*low viscosity*).

Pada simulasi ini digunakan aproksimasi dua dimensi, dengan syarat batas *non-slip* pada $x = \pm L$, lalu fluida dengan viskositas rendah ν_2 akan terisi pada daerah

$0 < |x| < a$ dan fluida dengan viskositas tinggi ν_1 akan terisi pada daerah $a < |x| < L$. Dengan sumbu pusat pada titik nol, maka digunakan jarak dari pusat ke dinding L sebesar 50, dan jarak dari pusat ke *interface* antara fluida 1 dan fluida 2 a sebesar 20. Kemudian, dengan menggunakan Persamaan Navier-Stokes di bawah ini dapat ditentukan kecepatan arah sumbu-y untuk profil kecepatan aliran Poiseuille.

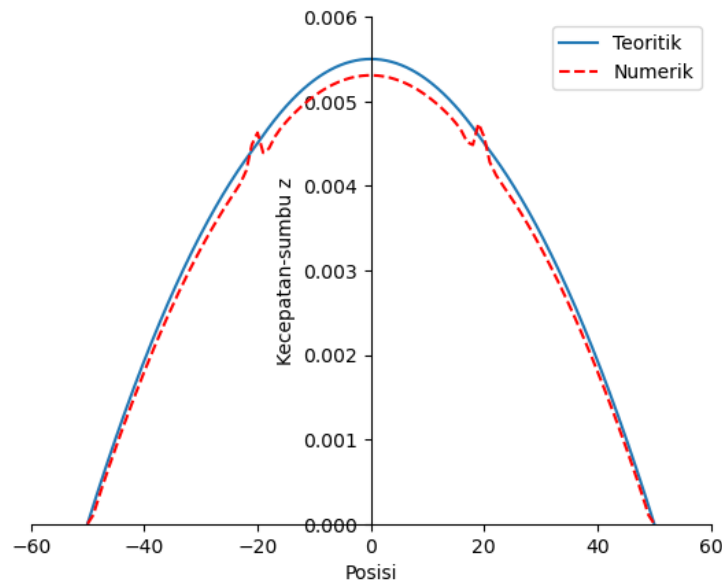
Untuk $a < |x| < L$,

$$u(x) = \frac{G}{2\nu_1} (L^2 - x^2), \quad (\text{III.6})$$

Untuk $0 < |x| < a$,

$$u(x) = \frac{G}{2\nu_1} (L^2 - x^2) + \frac{G}{2\nu_2} (a^2 - x^2), \quad (\text{III.7})$$

Berikut merupakan hasil simulasi untuk profil kecepatan aliran Poiseuille dengan algoritma *Shan – Chen type Multicomponent Multiphase LBM* menggunakan konfigurasi yang telah ditetapkan sebelumnya dengan sumbu- x merupakan koordinat posisi untuk aliran fluida dan sumbu-y merupakan besarnya kecepatan terhadap sumbu- x ,



Gambar III.3 Profil kecepatan *Poiseuille Flow*.

Pada Gambar III.3 terdapat garis lurus biru yang mendeskripsikan nilai yang diperoleh melalui perhitungan analitik atau nilai teori, lalu untuk garis putus-putus berwarna merah mendeskripsikan nilai yang diperoleh melalui simulasi atau nilai numerik. Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh, dapat diketahui bahwa dalam kecepatan aliran Poiseuille, kecepatan maksimum aliran fluida akan terjadi di pusat pipa yaitu sebesar 0,00531, sedangkan kecepatan minimum terjadi di permukaan dinding yang bernilai nol. Kemudian, berdasarkan hasil simulasi akan dilakukan perbandingan dengan nilai teori untuk melihat galat yang diperoleh. Sebagai acuan, digunakan nilai maksimum berdasarkan hasil yang diperoleh melalui simulasi dan perhitungan analitik, lalu diperoleh galat sebesar 3% dengan nilai maksimum melalui hasil simulasi sebesar 0,00531 dan perhitungan analitik sebesar 0,00550. Selanjutnya, dilakukan pemetaan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk masing-masing daerah untuk mengukur tingkat akurasi hasil perkiraan dari model yang digunakan, dalam hal nilai RMSE merupakan nilai rata-rata kuadrat dari jumlah kesalahan pada model prediksi. Berikut merupakan nilai RMSE untuk masing-masing daerah aliran fluida,

Tabel III.2 Nilai RMSE untuk masing-masing daerah pada simulasi aliran Poiseuille.

Daerah Aliran Fluida	MSE ^a	RMSE ^b
$-50 \leq x \leq -20$	$2,11 \times 10^{-8}$	0,00014536
$-20 < x \leq 20$	$3,64 \times 10^{-8}$	0,00019083
$20 < x \leq 50$	$2,02 \times 10^{-8}$	0,00014222

^a Mean Square Error.

^b Root Mean Square Error.

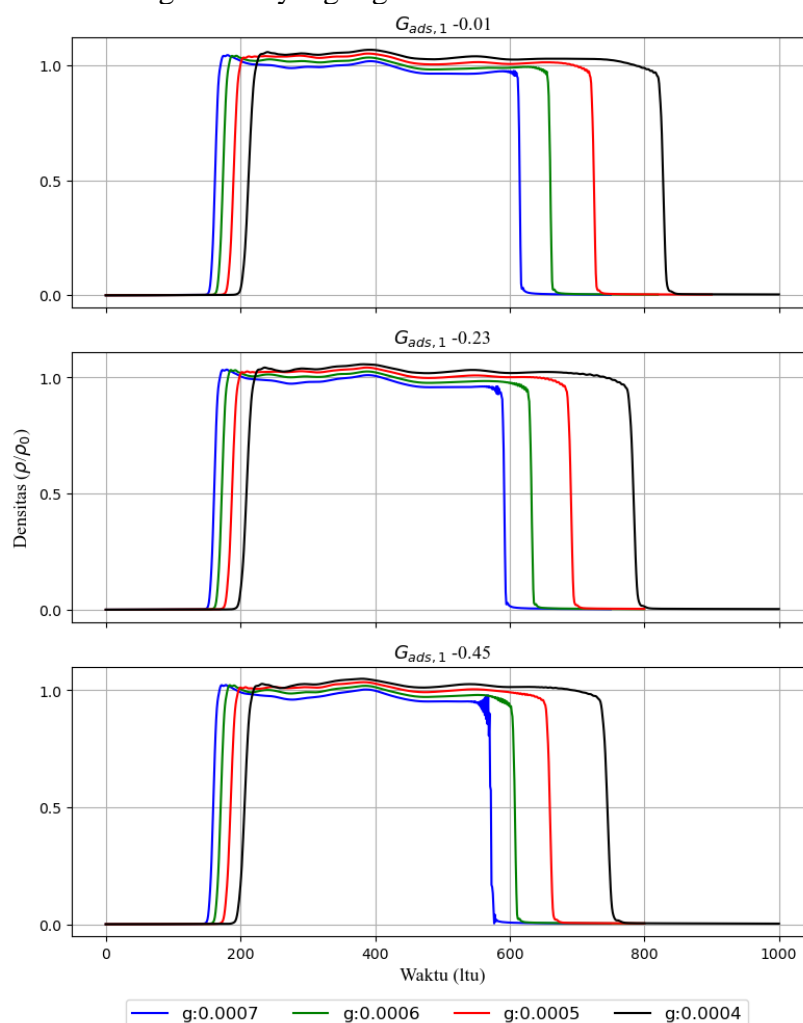
Berdasarkan nilai RMSE yang diperoleh, dapat dilihat bahwa untuk ketiga daerah aliran fluida yang terdapat pada simulasi memiliki nilai RMSE yang kecil atau mendekati nol. Hal tersebut menjelaskan bahwa algoritma yang digunakan dalam simulasi merupakan model yang akurat untuk digunakan dalam pemodelan aliran fluida.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

IV.1 Pengukuran Sudut Kontak dan Interval Waktu Pada Saat *Droplet* Melewati Celah

Pengukuran interval waktu pada saat *droplet* melewati celah dilakukan dengan beberapa variasi nilai potensial adhesi $G_{ads,1}$ dan gravitasi. Variasi nilai potensial adhesi $G_{ads,1}$ yang digunakan yaitu $-0,01$, $-0,23$, dan $-0,45$ dengan $G_{ads,1} = -G_{ads,2}$ dan kuat potensial kohesi $G = 1,8$, lalu untuk variasi nilai gravitasi yang digunakan yaitu berada pada rentang $0,0004 \leq g \leq 0,0007$.

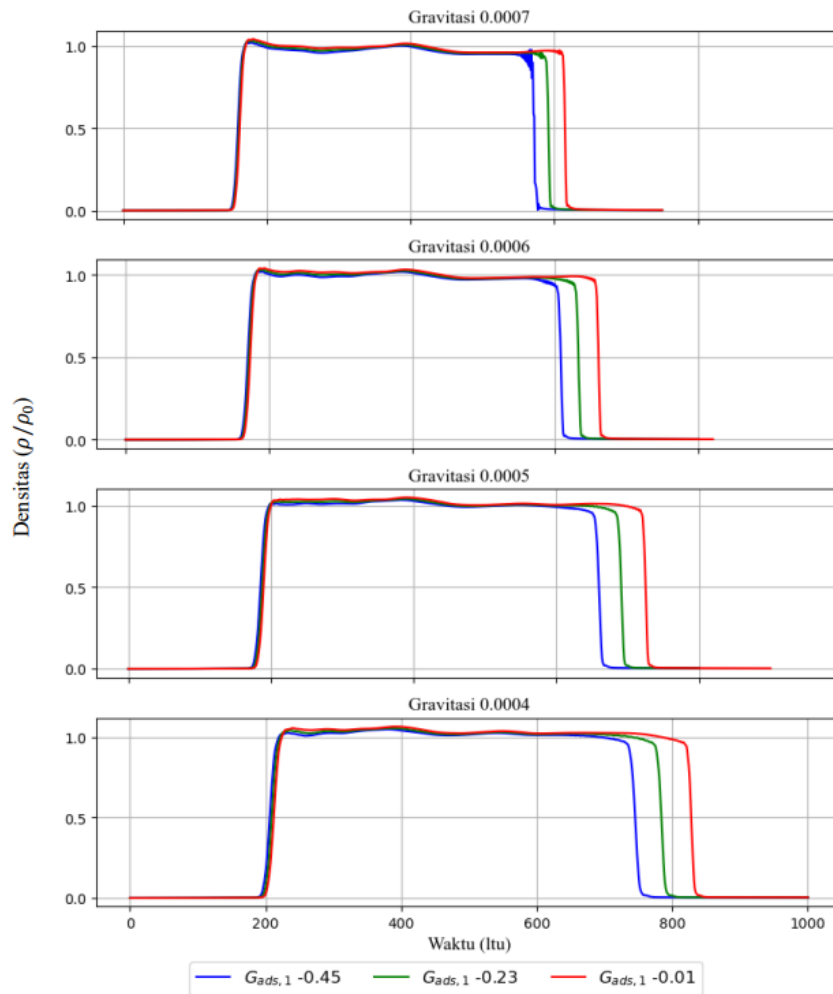
Berikut ini merupakan visualisasi grafik yang merepresentasikan interval waktu pada saat *droplet* melewati celah untuk setiap variasi nilai potensial adhesi $G_{ads,1}$ terhadap variasi nilai gravitasi yang digunakan:



Gambar IV.1 Grafik interval waktu pada saat *droplet* melewati celah untuk setiap variasi nilai potensial adhesi terhadap variasi nilai gravitasi.

Pada Gambar IV.1 dapat dilihat bahwa semakin besar nilai potensial adhesi antara *droplet* dengan permukaan celah, maka grafik akan semakin bergeser ke arah kanan terhadap sumbu-x yang menandakan bahwa interval waktu yang dibutuhkan *droplet* untuk melewati permukaan celah akan semakin besar.

Berikut ini merupakan visualisasi grafik interval waktu pada saat *droplet* melewati celah untuk setiap variasi nilai gravitasi terhadap variasi nilai potensial adhesi yang digunakan:



Gambar IV.2 Grafik interval waktu pada saat *droplet* melewati celah untuk setiap variasi nilai gravitasi terhadap variasi nilai potensial adhesi.

Pada Gambar IV.2 dapat dilihat bahwa semakin kecil nilai percepatan gravitasi yang mempengaruhi laju *droplet* dalam melewati celah, maka grafik akan semakin bergeser ke arah kanan terhadap sumbu-x yang menandakan bahwa interval waktu yang dibutuhkan *droplet* untuk melewati permukaan celah akan semakin besar.

Pada percobaan ini, dapat dinyatakan nilai densitas awal ρ_0 pada *droplet* adalah 2,05, tetapi akan terjadi penyesuaian selama program berjalan untuk mencapai kesetimbangan molekular. Oleh karena itu, densitas awal pada *droplet* tidak akan tepat bersesuaian dengan nilai densitas awal yang telah didefinisikan, nilai densitas yang diperoleh selama program berjalan dapat dinyatakan sebagai densitas numerik ρ . Kemudian, dapat diketahui bahwa algoritma LBM yang digunakan bersifat *dimensionless*, maka nilai densitas numerikal yang diperoleh berdasarkan simulasi dapat dinormalisasi (ρ/ρ_0) seperti yang terlihat pada Gambar IV.1 dan IV.2.

Berikut merupakan hasil pengukuran yang telah ditabulasikan dalam tabel untuk pengukuran sudut kontak dan interval waktu pada saat *droplet* melewati celah untuk setiap kasus sebagai berikut:

Tabel IV.1 Parameter adhesi, gravitasi, interval waktu, dan sudut kontak untuk setiap kasus percobaan yang dilakukan.

Kasus	Gravitasi	$G_{ads,1}^a$	t_{awal}^b	t_{akhir}^c	Δt^d	Sudut Kontak
1a	0,0004	-0,01	203	834	631	89,36
1b	0,0005	-0,01	182	729	547	89,36
1c	0,0006	-0,01	168	664	496	89,36
1d	0,0007	-0,01	157	618	461	89,36
2a	0,0004	-0,23	199	799	600	75,19
2b	0,0005	-0,23	180	696	516	75,19
2c	0,0006	-0,23	166	636	470	75,19
2d	0,0007	-0,23	155	595	440	75,19
3a	0,0004	-0,45	197	754	557	60
3b	0,0005	-0,45	178	665	487	60
3c	0,0006	-0,45	164	611	447	60
3d	0,0007	-0,45	154	577	423	60

^a Kuat potensial interaksi adhesi untuk *droplet*.

^b Waktu awal.

^c Waktu akhir.

^d Interval waktu.

Berdasarkan Tabel IV.1 dapat dilihat bahwa interval waktu pada saat *droplet* melewati celah memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan besarnya variasi gravitasi yang digunakan, lalu dapat dilihat bahwa semakin besar sudut kontak yang dihasilkan, maka interval waktu yang dibutuhkan oleh *droplet* untuk melewati celah akan semakin besar. Kuat potensial adhesi antara *droplet* dengan permukaan celah yang semakin besar menandakan bahwa *droplet* akan semakin kuat menempel pada permukaan celah, hal tersebut ditandai dengan sudut kontak

yang dihasilkan semakin besar dan berada pada rentang sudut kontak yang dikategorikan sebagai fluida *wetting* ($\theta < 90^\circ$).

Pengukuran interval waktu dilakukan untuk mengetahui mengenai seberapa lama suatu penghalang untuk melewati fluida yang ditinjau berdasarkan sudut kontak yang dihasilkan, hal tersebut bergantung pada nilai potensial adhesi yang mempengaruhi interaksi antara *droplet* dengan permukaan celah.

IV.2 Pengukuran Interval Waktu Dengan Memvariasikan Besarnya Viskositas Pada Saat *Droplet* Melewati Penghalang

Pengukuran interval waktu pada saat *droplet* melewati penghalang dilakukan dengan beberapa variasi viskositas fluida 1 ν_1 , fluida 2 ν_2 , dan sudut kontak. Variasi sudut kontak yang digunakan yaitu 60° , $89,36^\circ$, dan 120° , lalu untuk variasi nilai gravitasi yang digunakan yaitu 0,0004.

Berikut merupakan tabel percobaan dengan variasi viskositas fluida 1 ν_1 dan fluida 2 ν_2 :

Tabel IV.2 Variasi besarnya viskositas fluida 1 dan fluida 2 untuk setiap percobaan.

Percobaan	τ_1^a	τ_2^b	ν_1^c	ν_2^d	τ_1/τ_2	ν_1/ν_2
1	1	1	0,167	0,167	1	1
2	1,2	1,1	0,233	0,2	1,09	1,167
3	1,1	1	0,2	0,167	1,1	1,2
4	1,23	1,1	0,243	0,2	1,118	1,217
5	1,2	1	0,233	0,167	1,2	1,4

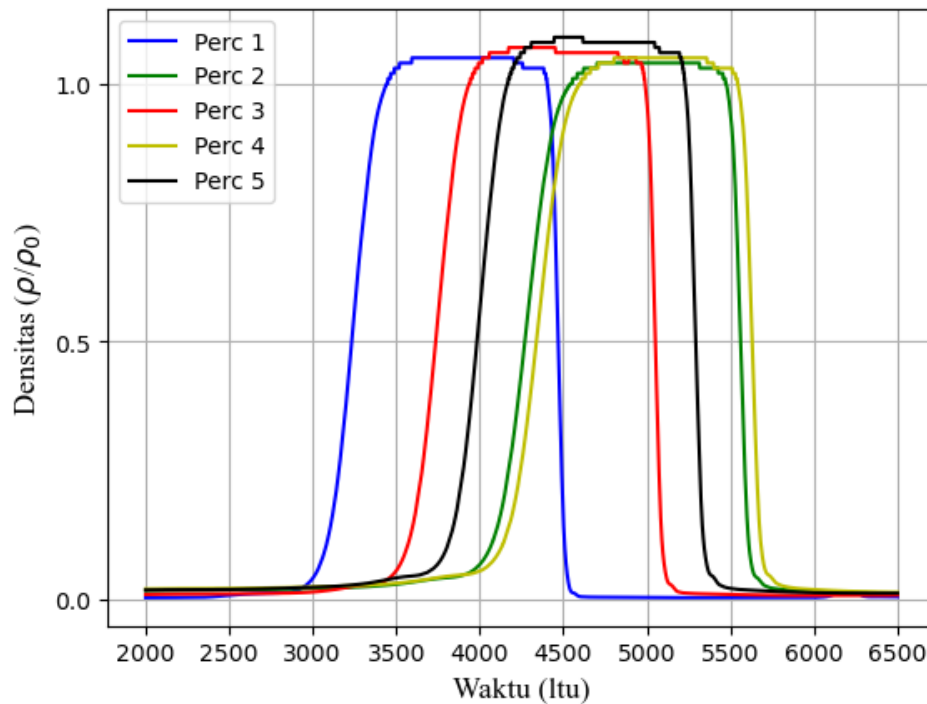
^a Relaxation time fluida 1.

^b Relaxation time fluida 2.

^c Viskositas fluida 1.

^d Viskositas fluida 2.

Berikut ini merupakan visualisasi grafik yang merepresentasikan interval waktu pada saat *droplet* melewati penghalang dengan sudut kontak 120° untuk setiap percobaan:



Gambar IV.3 Grafik interval waktu pada saat *droplet* melewati penghalang untuk setiap percobaan dengan memvariasikan besarnya viskositas fluida.

Pada Gambar IV.3 dapat dilihat untuk setiap percobaan bahwa variasi besarnya viskositas dan perbandingan antara viskositas fluida 1 dan fluida 2 memberikan pengaruh yang berbeda-beda terhadap laju *droplet* pada saat melewati penghalang.

Pada percobaan ini juga dilakukan normalisasi terhadap nilai densitas numerik yang diperoleh seperti yang terlihat pada Gambar IV.3.

Berikut merupakan hasil pengukuran yang telah ditabulasikan dalam tabel untuk pengukuran interval waktu pada saat *droplet* melewati penghalang untuk setiap percobaan dengan memvariasikan besarnya viskositas:

Tabel IV.3 Interval waktu *droplet* pada saat melewati celah untuk setiap percobaan.

Percobaan	t_{awal}^a	t_{akhir}^b	Δt^c
1	3019	4522	1503
2	3926	5640	1714
3	3487	5112	1625
4	3948	5719	1771
5	3669	5375	1706

^a Waktu awal.

^b Waktu akhir.

^c Interval waktu.

Berdasarkan data interval waktu yang diperoleh pada Tabel IV.3 dapat dilihat bahwa semakin besar viskositas pada fluida 1, maka interval waktu yang dihasilkan akan semakin besar pada saat *droplet* melewati penghalang, hal tersebut dapat dilihat pada percobaan 4 dengan besarnya viskositas pada fluida 1 sebesar 1,23 yang memiliki interval waktu terlama yaitu 1771, sedangkan pada percobaan 1 dengan besarnya viskositas pada fluida 1 sebesar 1 yang memiliki interval waktu paling kecil yaitu 1503. Kemudian, dapat dilihat pada percobaan 2 dan 5 yang memiliki besar viskositas fluida 1 yang sama sebesar 1,2, tetapi memiliki perbandingan antara viskositas fluida 1 dan fluida 2 yang berbeda yaitu percobaan 5 yang memiliki perbandingan antara viskositas fluida 1 dan fluida 2 yang lebih besar dibandingkan percobaan 2 memiliki interval waktu yang lebih kecil dibandingkan dengan percobaan 2. Hal tersebut dapat dinyatakan bahwa perbandingan antara viskositas fluida 1 dan fluida 2 akan berbanding terbalik dengan interval waktu suatu *droplet* pada saat melewati penghalang dengan besar viskositas fluida 1 bernilai sama.

IV.3 Perhitungan Bilangan Bond Pada Saat *Droplet* Melewati Celah

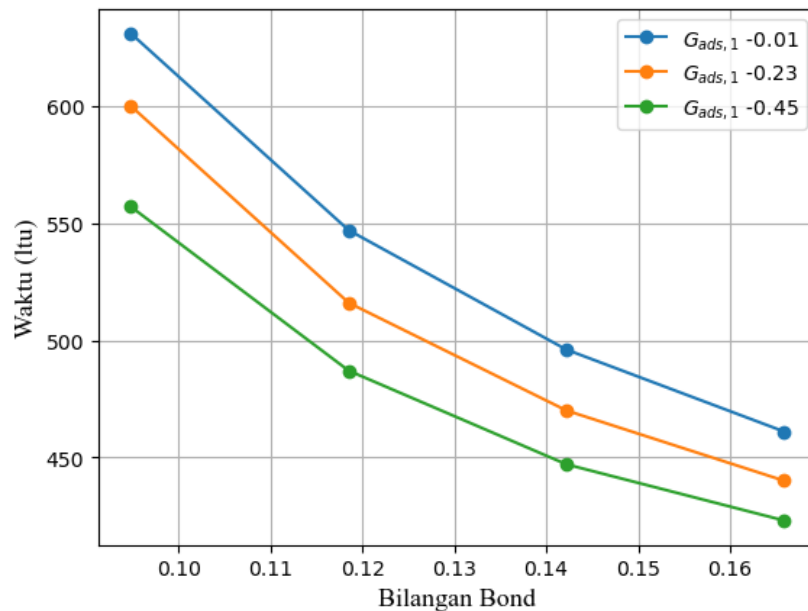
Perhitungan untuk menentukan bilangan Bond menggunakan nilai tegangan permukaan γ yang diperoleh berdasarkan regresi linear antara perubahan tekanan terhadap inversi jari – jari akhir *droplet* yang terdapat pada Gambar III.2 yaitu 1,73095, dengan panjang karakteristik L sebesar 20, dan densitas ρ_0 dari *droplet* yaitu 2,05. Selanjutnya, nilai gravitasi divariasikan dalam rentang $0,0004 \leq g \leq 0,0007$ untuk setiap variasi nilai potensial adhesi. Berikut merupakan hasil perhitungan bilangan Bond pada saat *droplet* melewati celah yang ditabulasikan pada Tabel IV.4 di bawah ini:

Tabel IV.4 Bilangan Bond pada saat *droplet* melewati penghalang dengan celah.

Gravitasi	Bo^a	Interval waktu		
		$G_{ads} = 0,01$	$G_{ads} = 0,23$	$G_{ads} = 0,45$
0,0004	0,1896	631	600	557
0,0005	0,2370	547	516	487
0,0006	0,2844	496	470	447
0,0007	0,3318	461	440	423

^a Bilangan Bond.

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel IV.4 dilakukan visualisasi grafik interval waktu pada saat *droplet* melewati celah terhadap nilai bilangan Bond yang dapat dilihat pada Gambar IV.4 di bawah ini:



Gambar IV.4 Grafik nilai bilangan Bond terhadap interval waktu pada saat *droplet* melewati celah.

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel IV.4 dapat dilihat bahwa nilai gravitasi berbanding terbalik dengan interval waktu yang diperoleh dari *droplet* pada saat melewati celah untuk setiap variasi nilai potensial adhesi. Dapat diketahui bahwa nilai percepatan gravitasi yang digunakan tidak bersesuaian dengan percepatan gravitasi yang berada di bumi. Oleh karena itu, dilakukan konversi untuk setiap nilai percepatan gravitasi menjadi bilangan Bond yang merupakan bilangan tidak berdimensi yang berkaitan dengan pentingnya pengukuran gaya gravitasi dalam dinamika fluida. Selanjutnya, pada Gambar IV.4 dapat diketahui hubungan antara bilangan Bond dengan *interval* waktu pada saat *droplet* melewati celah memiliki hubungan yang berbanding terbalik, hal tersebut

menunjukkan bahwa hubungan antara interval waktu terhadap percepatan gravitasi sebanding dengan interval waktu terhadap bilangan Bond.

IV.4 Perhitungan Bilangan Bond Pada Saat *Droplet* Melewati Penghalang

Perhitungan untuk menentukan bilangan Bond menggunakan nilai tegangan permukaan γ yang diperoleh berdasarkan regresi linear antara perubahan tekanan terhadap inversi jari – jari akhir *droplet* yang terdapat pada Gambar III.2 yaitu 1,73095, dengan panjang karakteristik L sebesar 20, dan densitas ρ_0 dari *droplet* yaitu 2,05 . Pada percobaan *droplet* melewati penghalang, akan dilakukan perhitungan bilangan Bond dengan memvariasikan nilai gravitasi dengan rentang $0,00002 \leq g \leq 0,00008$, lalu besar sudut kontak yang digunakan adalah 120° , *relaxation time* untuk fluida 1 τ_1 dan fluida 2 τ_2 adalah 1. Berikut merupakan hasil perhitungan bilangan Bond untuk percobaan *droplet* melewati penghalang yang ditabulasikan pada Tabel IV.5 di bawah ini:

Tabel IV.5 Bilangan Bond pada saat *droplet* melewati penghalang.

Gravitasi	t_{awal}^a	t_{akhir}^b	Δt^c	Bo^d
0,00002	5863	8186	2323	0,0095
0,00003	3962	5694	1732	0,0142
0,00004	3019	4522	1503	0,0190
0,00005	2368	3851	1483	0,0237
0,00006	2076	3527	1451	0,0284
0,00007	1880	3375	1495	0,0332
0,00008	1673	3177	1504	0,0379

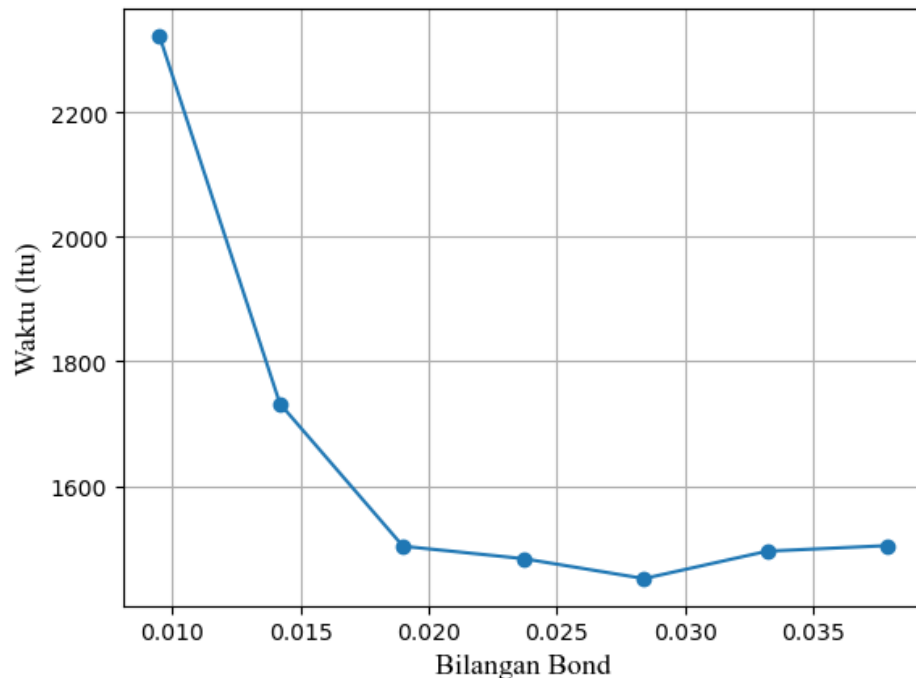
^a Waktu awal.

^b Waktu akhir.

^c Interval waktu.

^d Bilangan bond.

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel IV.5 dilakukan visualisasi grafik interval waktu pada saat *droplet* melewati celah terhadap nilai bilangan Bond yang dapat dilihat pada Gambar IV.5 di bawah ini:

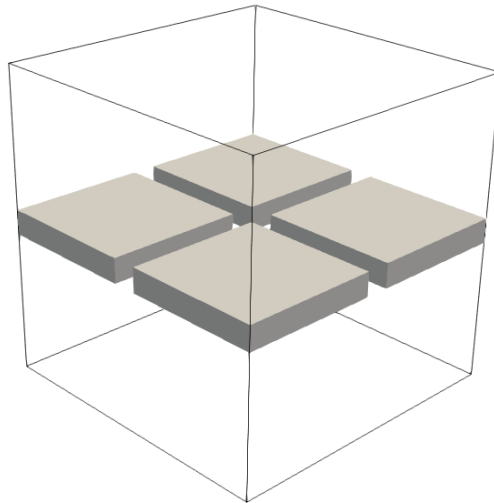


Gambar IV.5 Grafik nilai bilangan Bond terhadap interval waktu pada saat *droplet* melewati penghalang.

Pada Gambar IV.5 dapat diketahui hubungan antara bilangan Bond dengan *interval* waktu pada saat *droplet* melewati celah memiliki hubungan yang berbanding terbalik, hal tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara interval waktu terhadap percepatan gravitasi sebanding dengan interval waktu terhadap bilangan Bond, tetapi pada kasus ini dapat dilihat untuk nilai gravitasi 0,00007 dan 0,00008 memiliki interval waktu yang semakin besar. Hal tersebut disebabkan karena gravitasi yang semakin besar memberikan tekanan yang besar pada saat *droplet* melakukan kontak dengan permukaan celah, sehingga membuat *droplet* memiliki tekanan atau gaya kontak yang kuat dengan permukaan celah yang membuat *droplet* melambat pada saat akan melewati celah.

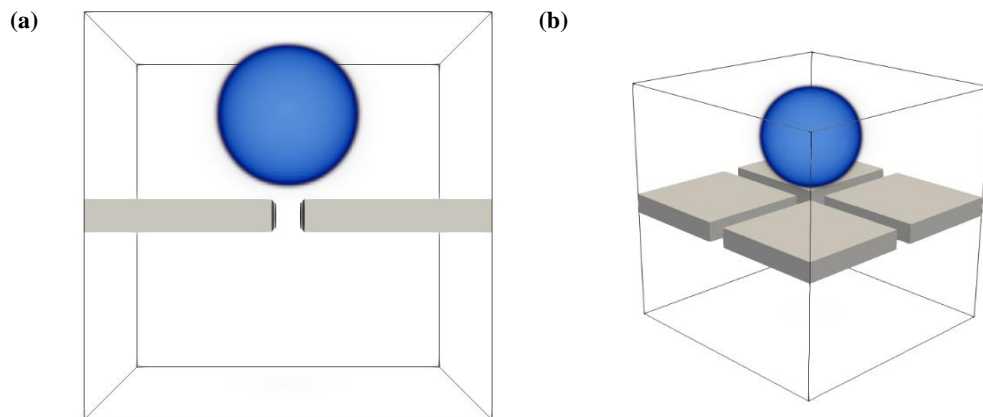
IV.5 Visualisasi Droplet Pada Saat Melewati Celah

Visualisasi yang digunakan untuk melihat kondisi *droplet* merupakan visualisasi 3D di dalam suatu kisi $100 \times 100 \times 100 \text{ lu}$, bentuk celah dan kisi yang digunakan untuk percobaan *droplet* melewati celah dapat dilihat pada Gambar IV.6 di bawah ini:



Gambar IV.6 Bentuk celah dan kisi dengan ukuran $100 \times 100 \times 100 \text{ lu}$.

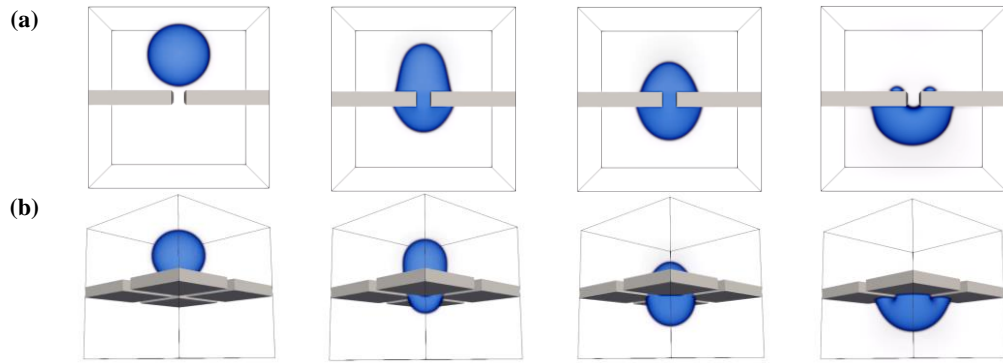
Untuk orientasi posisi dan arah jatuhnya *droplet* dapat dilihat pada Gambar IV.7 di bawah ini:



Gambar IV.7 Posisi awal droplet sebelum jatuh melewati celah (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.

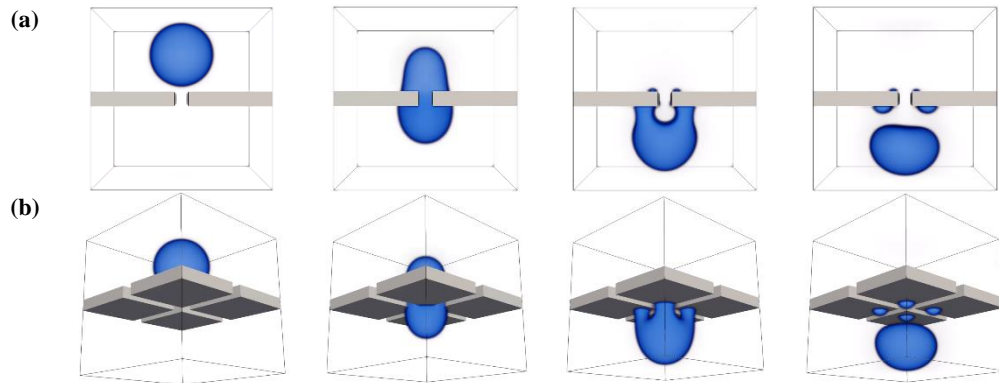
Pada Gambar IV.7 (a) dan (b) menunjukkan posisi awal *droplet* sebelum simulasi dijalankan yaitu *droplet* berada tepat di atas pusat celah.

Berdasarkan hasil visualisasi yang dilakukan, dapat diketahui bahwa terdapat tiga kondisi yang dialami *droplet* saat melewati celah. Berikut merupakan visualisasi *droplet* untuk masing – masing kondisi:



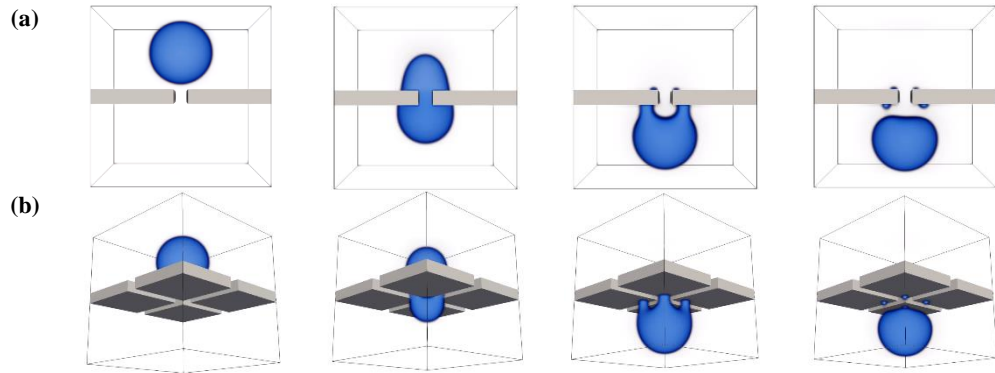
Gambar IV.8 Kondisi *droplet* melewati celah tetapi menempel pada sisi lain permukaan celah, (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.

Pada Gambar IV.8 dapat dilihat bahwa *droplet* berhasil melewati celah, tetapi saat melewati celah tersebut, *droplet* menempel pada sisi lain permukaan celah dan tidak jatuh meninggalkan celah. Hal tersebut dikarenakan kuat potensial adhesi masih lebih kuat dibandingkan dengan gaya gravitasi yang mempengaruhi jatuhnya *droplet* ($G_{ads} \gg g$) dengan parameter yang berada pada rentang $-0,01 < G_{ads,1} < -0,45$, $G_{ads,1} = -G_{ads,2}$, dan $10^{-6} < g < 0,0004$.



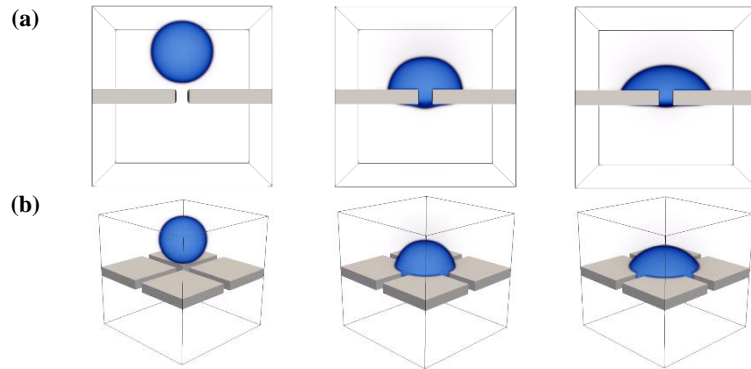
Gambar IV.9 Kondisi *droplet* melewati celah sepenuhnya tetapi terdapat sisa yang banyak pada sisi lain permukaan celah, (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.

Pada Gambar IV.9 dapat dilihat bahwa *droplet* berhasil melewati dan meninggalkan dinding celah, tetapi saat meninggalkan dinding celah, *droplet* meninggalkan fraksi yang banyak pada dinding celah. Hal tersebut dikarenakan kuat potensial adhesi lebih kecil dibandingkan dengan gaya gravitasi yang mempengaruhi jatuhnya *droplet* ($G_{ads} < g$) dengan parameter yang berada pada rentang $-0,23 < G_{ads,1} < -0,45$, $G_{ads,1} = -G_{ads,2}$, dan $0,0004 < g < 0,0007$.



Gambar IV.10 Kondisi droplet melewati celah sepenuhnya tetapi terdapat sisa yang sedikit pada sisi lain permukaan celah, (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.

Pada Gambar IV.10 dapat dilihat bahwa *droplet* berhasil melewati dan meninggalkan dinding celah, tetapi saat meninggalkan dinding celah, *droplet* meninggalkan fraksi yang sedikit pada dinding celah. Hal tersebut dikarenakan kuat potensial adhesi sangat kecil dibandingkan dengan gaya gravitasi yang mempengaruhi jatuhnya *droplet*, sehingga fluida sukar untuk menempel pada dinding celah ($G_{ads} \ll g$) dengan parameter yang berada pada rentang $-0,23 < G_{ads,1} < -0,01$, $G_{ads,1} = -G_{ads,2}$, dan $0,0004 < g < 0,0007$.

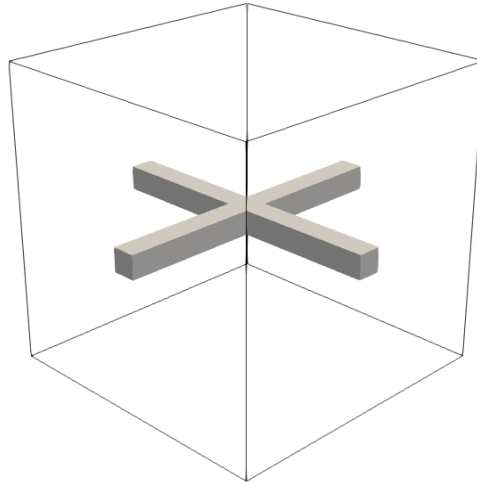


Gambar IV.11 Kondisi *droplet* tidak lewat celah, (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.

Pada Gambar IV.11 dapat dilihat bahwa *droplet* tidak melewati celah. Hal tersebut dikarenakan kuat potensial adhesi sangat besar dibandingkan dengan gaya gravitasi yang mempengaruhi jatuhnya *droplet*, sehingga fluida menempel, serta tidak melewati celah ($G_{ads} \gg g$) dengan parameter yang berada pada rentang $-0,01 < G_{ads,1} < -0,45$, $G_{ads,1} = -G_{ads,2}$, dan $g \leq 10^{-6}$.

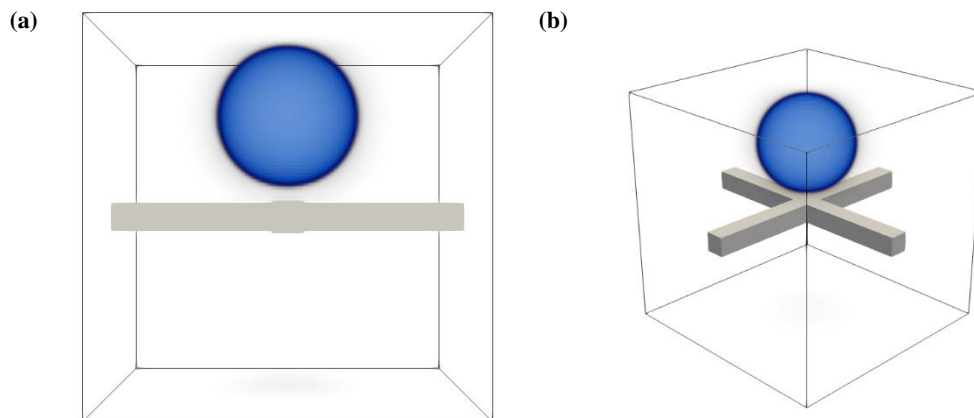
IV.6 Visualisasi Droplet Pada Saat Melewati Penghalang

Visualisasi yang digunakan untuk melihat kondisi *droplet* merupakan visualisasi 3D di dalam suatu kisi $100 \times 100 \times 100 \text{ lu}$, bentuk penghalang dan kisi yang digunakan untuk percobaan *droplet* melewati penghalang dapat dilihat pada Gambar IV.12 di bawah ini:



Gambar IV.12 Bentuk celah dan kisi dengan ukuran $100 \times 100 \times 100 \text{ lu}$.

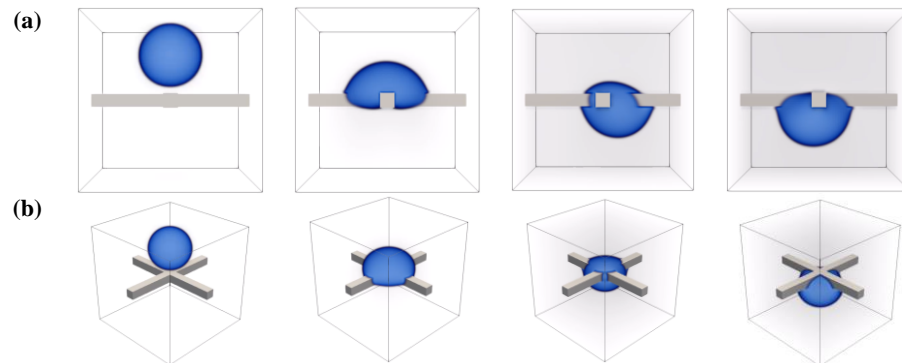
Untuk orientasi posisi dan arah jatuhnya *droplet* dapat dilihat pada Gambar IV.13 di bawah ini:



Gambar IV.13 Posisi awal *droplet* sebelum jatuh melewati celah (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.

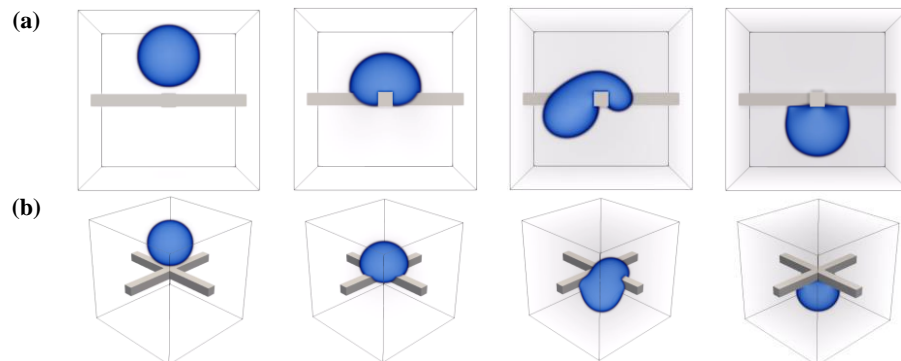
Pada Gambar IV.13 (a) dan (b) menunjukkan posisi awal *droplet* sebelum simulasi dijalankan yaitu *droplet* berada tepat di atas pusat penghalang.

Berikut merupakan hasil visualisasi *droplet* pada saat melewati penghalang untuk masing – masing kondisi:



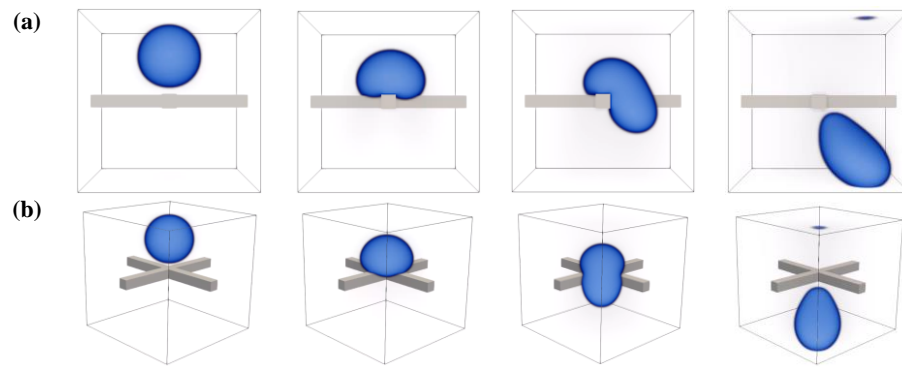
Gambar IV.14 Kondisi droplet pada saat melewati penghalang dengan sudut kontak 60° (wetting), (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.

Pada Gambar IV.14 dapat dilihat dengan sudut kontak 60° , *droplet* berhasil melewati celah, tetapi saat melewati celah tersebut, *droplet* menempel pada sisi lain permukaan celah dan tidak jatuh meninggalkan celah. Hal tersebut dikarenakan kuat potensial adhesi masih lebih kuat dibandingkan dengan gaya gravitasi yang mempengaruhi jatuhnya *droplet* ($G_{ads} \gg g$).



Gambar IV.15 Kondisi droplet pada saat melewati penghalang dengan sudut kontak $89,36^\circ$ (wetting), (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.

Pada Gambar IV.15 dapat dilihat dengan sudut kontak $89,36^\circ$, *droplet* memiliki kondisi yang sama dengan simulasi menggunakan sudut kontak 60° yaitu berhasil melewati celah, tetapi saat melewati celah tersebut, *droplet* menempel pada sisi lain permukaan celah dan tidak jatuh meninggalkan celah. Hal tersebut dikarenakan kuat potensial adhesi masih lebih kuat dibandingkan dengan gaya gravitasi yang mempengaruhi jatuhnya *droplet* ($G_{ads} \gg g$).



Gambar IV.16 Kondisi droplet pada saat melewati penghalang dengan sudut kontak 120° (non-wetting), (a) Tampak depan, (b) Tampak samping.

Pada Gambar IV.16 dapat dilihat bahwa *droplet* berhasil melewati penghalang. Hal tersebut dikarenakan gaya gravitasi masih lebih kuat dibandingkan dengan kuat potensial adhesi yang mempengaruhi jatuhnya *droplet* ($G_{ads} \ll g$).

BAB V SIMPULAN

V.1 Simpulan

Pada studi ini, kemudahan fluida untuk bergerak pada permukaan struktur kecil dikarakterisasi oleh dua besaran yaitu waktu tempuh fluida saat bergerak pada permukaan padatan dan fraksi volume yang tersisa pada permukaan padatan. Dua besaran tersebut bergantung pada beberapa parameter diantaranya kuat potensial adhesi yang mempengaruhi interaksi antara *droplet* dengan permukaan celah, hal tersebut dapat dilihat pada besar sudut kontak yang terbentuk, semakin besar sudut kontak yang terbentuk, maka semakin sukar fluida untuk melewati celah. Kemudian, besarnya viskositas fluida juga mempengaruhi laju *droplet* untuk melewati penghalang yaitu semakin besar viskositas fluida maka interval waktu yang dihasilkan akan semakin besar, tetapi besarnya perbandingan viskositas akan berbanding terbalik dengan interval waktu pada saat *droplet* melewati penghalang. Pada percobaan ini, variasi percepatan gravitasi berpengaruh terhadap laju *droplet* dalam melewati celah, serta memiliki hubungan yang berbanding terbalik terhadap interval waktu, lalu dilakukan konversi dari percepatan gravitasi menjadi bilangan Bond, dalam hal ini hubungan bilangan Bond terhadap interval waktu sebanding dengan hubungan besarnya percepatan gravitasi terhadap interval waktu pada saat *droplet* melewati penghalang.

DAFTAR PUSTAKA

- Butt, H. dkk. 2003. Physics and Chemistry Of Interfaces. Weinheim: WILEY – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Chen, J. dkk. 2014. Lattice Boltzmann Method For Filtering And Contour Detection Of Natural Images. *Computers and Mathematics with Applications*. **68**. hlm. 257 – 268.
- Huang, H. dkk. 2007. Proposed Approximation For Contact Angle In Shan – And – Chen – Type Multicomponent Multiphase Lattice Boltzmann Models. *The American Physical Society*. **47**. hlm. 1 – 5.
- Neyrand, V. dkk. 2022. Numerical Simulation Of Wetting On a Chemically Textured Surface With a Large Intrinsic Contact Angle Ratio By The Lattice Boltzmann Method. *Experimental and Computational Multiphase Flow*. **4**. hlm. 165 – 174.
- Sahu, A. dan Bhowmick, S. 2020. Applications Of Lattice Boltzmann In Method In Multi – Component And Multi – Phase Flow: A Review. *AIP Conference Proceedings*. **030007**. hlm, 1 – 6.
- Shiri, Y. dkk. 2018. Water Flooding And Viscous Fingering In Fracture And Porous Media By Lattice Boltzmann Method. *Original Scientific Paper*. **32**. hlm. 103 – 115.
- Sukop, M. dan Thorne, D. 2007. Lattice Boltzmann Modeling: An Introduction For Geoscientists And Engineers. New York: Springer – Verlag Berlin Heidelberg.
- Wang, M. dkk. 2017. Numerical Modelling Of Fluid – Induced Soil Erosion In Granular Filters Using A Coupled Bonded Particle Lattice Boltzmann Method. *Computers and Geotechnics*. **82**. hlm. 134 – 143.
- Xu, R. dkk. 2020. Pore Scale Study Of Gas Sorption Hysteresis In Shale Nanopores Using Lattice Boltzmann Method. *International Journal Of Coal Geology*. **229**. hlm. 1 – 10.
- Zhao, X. dkk. 2021. Method Of Determining The Cohesion And Adhesion Parameters In The Shan – Chen Multicomponent Multiphase Lattice Boltzmann Models. *Computers and Fluids*. **222**. hlm. 2 – 16.