

Simulasi 2-D Aliran Darah pada Kasus Penyempitan Pembuluh Darah Arteri Menggunakan Metode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Reza Harun¹ Jondri² Dede Trawidi³

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

¹reharun@gmail.com ²dede.tarwidi@gmail.com ³jondri123@gmail.com

Abstrak

Jantung dan pembuluh darah merupakan bagian organ tubuh manusia yang paling penting dan saling berkaitan. Jantung bertugas memompa darah sedangkan pembuluh darah bertugas untuk menghantarkannya ke seluruh tubuh manusia. Terdapat beberapa penyakit pada jantung dan pembuluh darah salah satunya penyempitan pembuluh darah pada arteri. Penelitian tentang penyakit penyempitan pembuluh darah banyak dilakukan, salah satunya dengan melakukan pada arteri yang mengalami penyempitan. Tujuan dari simulasi aliran darah adalah untuk melihat laju aliran darah pada arteri yang mengalami penyempitan. Dalam tugas akhir ini simulasi aliran darah pada arteri yang mengalami penyempitan menggunakan metode Smooth Particle Hydrodynamic (SPH). Metode SPH adalah teknik numerik untuk melakukan simulasi partikel dengan persamaan differensial, dimana fluida di representasikan sebagai bagian diskrit yang disebut dengan partikel. Dalam metode SPH gerak setiap partikel dikendalikan oleh persamaan Navier-Stokes (N-S) dan persamaan kontinuitas. Untuk melakukan simulasi ini akan dibangun dengan SPH simulator yang dapat menyimulasikan gerak fluida darah. Dari hasil SPH simulator yang telah di bangun akan dibuat simulasi 2 dimensi penyempitan aliran darah pada arteri.

Kata kunci : Smooth Particle Hydrodynamic (SPH), fluida, arteri

Abstract

Heart and blood vessels form part of human organs are most important and interrelated. Tasked heart pumps blood while the blood vessels tasked to deliver them to the entire human body. There are several diseases of the heart and blood vessels one constriction of blood vessels in arteri. Research about the disease narrowing of blood vessels is mostly done, one of them with the experience penyempitan. Tujuan of arterial blood flow simulation is to look at the rate of blood flow in an artery experience constriction. In this final simulation of blood flow in the arteries that are narrowed using the Smooth Particle Hydrodynamic (SPH). SPH method is a numerical technique to simulate particles with the differential equation, where the fluid is represented as part of the so-called discrete particles. In the SPH method of motion of each particle is controlled by the Navier-Stokes equation (N-S) and the continuity equation. To do this simulation will be built with SPH simulator that can simulate fluid motion of blood. From the results of SPH simulator that has been built will be made simulating two-dimensional constriction of blood flow in the artery.

Keywords: Smooth Particle Hydrodynamic (SPH), fluid, arterial

1. Pendahuluan

Jantung dan pembuluh darah adalah bagian tubuh manusia yang sangat penting, karena jantung memompa darah keseluruh bagian tubuh manusia, sedangkan pembuluh darah akan mengalirkan darah yang di pompa oleh jantung ke seluruh bagian tubuh manusia. Penyakit jantung dan pembuluh darah merupakan penyebab kematian nomor satu pada negara maju dan berkembang [6]. Salah satu resiko penyakit pembuluh darah adalah penyempitan yang terjadi pada pembuluh darah arteri. Arteri adalah pembuluh darah yang membawa darah dari jantung, arteri membawa darah yang mengandung makanan dan oksigen untuk disebarkan ke seluruh bagian tubuh manusia tetapi apabila makanan yang di bawa oleh darah adalah makanan yang mengandung gizi buruk maka akan terjadi endapan di arteri yang mengakibatkan penyempitan pada pembuluh darah arteri, endapan ini akan menjadi ancaman kesehatan bagi manusia sehingga mengganggu aliran darah pada tubuh manusia.

Simulasi penyempitan aliran darah pada arteri telah banyak di lakukan penelitian dengan menggunakan berbagai macam metode, antara lain Numerical Simulation of Blood Flow in Flexible Arteries Using Fluid-Structure Interaction [12] yaitu menjelaskan menggunakan simulasi numerik aliran darah dengan interaksi fluida-struktur (FSI) yang merupakan interaksi struktur elastis bergerak sesuai dengan bentuk aliran fluida di sekitarnya, A Particle Method for Blood Flow Simulation yaitu menggunakan metode partikel untuk aliran darah dengan partikel sel darah merah, sel darah putih serta plasma darah [10].

Simulasi aliran darah pada arteri jika terjadi penyempitan menggunakan Metode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Metode SPH adalah teknik numerik untuk melakukan simulasi partikel dengan persamaan diferensial, dimana fluida di representasikan sebagai bagian diskrit yang di sebut dengan partikel [8]. Dalam metode SPH ini setiap partikel dikendalikan oleh persamaan differensial yang sering disebut dengan persamaan Navier-

Stokes(N-S) [7]. Metode SPH banyak di manfaatkan terutama dalam simulasi suatu model seperti simulasi damn break, simulasi jatuh pesawat ke laut, simulasi banjir, dan lain sebagainya. Banyak masalah yang bisa di buat dengan menggunakan metode SPH. Kelebihan yang dimiliki oleh SPH adalah menyimulasikan fenomena yang memiliki domain dengan geometri kompleks yang tidak bisa di modelkan oleh metode lain seperti finite diferens.

2. Landasan Teori

2.1 Tekanan

Tekanan pada pembuluh darah setiap waktu akan berubah dikarenakan pompa dari jantung. Tetapi bisa disebabkan juga karena adanya penyempitan dari pembuluh darah tersebut yang menyebabkan perubahan. Pembuluh darah arteri yang mempunyai diameter rata-rata pembuluh yaitu lebih dari 10 mm [13] , Pembuluh darah arteri memiliki batas tekanan yaitu 250 mmHg [14] dan tekanan normal antara 120-130 mmHg. Untuk mencari perbedaan tekanan yang didapat maka dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$\Delta p = \frac{8 \mu Q}{r^4}$$

Pada persamaan di atas Δp adalah perbedaan tekanan (mmHg), μ adalah viskositas kinetik darah(Pa.s), l adalah panjang dari pembuluh darah (mm), Q adalah nilai dari kecepatan aliran darah(cm/s), r adalah radius dari pembuluh darah (mm) [14].

2.2 Metode SPH

Banyak metode komputasi yang di gunakan untuk simulasi cairan salah satunya adalah metode SPH, dimana SPH merupakan partikel-partikel yang saling berinteraksi dengan tetangganya sehingga akan bergerak secara dinamis apabila di beri gaya, terdapat pengertian pada SPH yaitu smoothed yang mengacu

pada fungsi bobot yang di gunnakan untuk memperhitungkan pengaruh partikel terhadap tetangganya, particle adalah bagian dari sistem agar

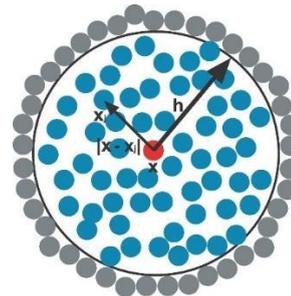
dapat berinteraksi untuk membentuk simulasi,

hydrodynamics cara agar metode SPH dapat diterapkan. Maka dapat di simpulkan metode SPH adalah metode yang menggunakan satu set partikel yang berinteraksi satu sama lain dengan intensitas yang berbeda sesuai dengan jarak antara partikel [3]. Rumus pendekatan SPH di dapat dari rumus integral dari persamaan kontinuitas $f(x)$:

$$\rho(x) = \int_{\Omega} \rho(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

Rumus pendekatan SPH

Metode SPH menggunakan satu set partikel diskrit yang di distribusikan ke dalam suatu ruang atau wadah maka partikel akan saling berinteraksi. Hal ini di sebut dengan pendekatan partikel. Pendekatan partikel mempengaruhi nilai-nilai partikel yang terdekat [5].



Gambar 2.1 pendekatan partikel dalam wilayah jangkauan partikel i

2.3 Fungsi Kernel

Seperti penjelasan pada metode SPH sebelumnya yang menjelaskan adanya pendekatan partikel sehingga mengakibatkan perubahan nilai-nilai partikel tetangga, untuk melihat nilai atau bobot dari setiap partikel yang bertetangga maka di butuhkan fungsi kernel, untuk melakukan fungsi kernel harus memenuhi beberapa kondisi di bawah ini :

- Kondisi normal : $\int_{\Omega} W(x-x', h) dx' = 1$

- Nilai fungsi Delta :

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(x-x', h) = \delta(x-x')$$

- Compact support:

$$W(x-x', h) = 0 \text{ Di luar domain}$$

Rumus fungsi kernel

Spline kubik termasuk ke dalam bagian fungsi kernel, spline kubik banyak di gunakan dalam permasalahan SPH dengan pendekatan :

$$\begin{cases} \frac{3}{2} - \left(\frac{x}{h}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{h}\right)^3 & 0 \leq \frac{x}{h} \leq 1 \\ \frac{1}{6} \left(1 - \frac{x}{h}\right)^3 & 1 \leq \frac{x}{h} < 2 \\ 0 & \frac{x}{h} \geq 2 \end{cases}$$

2.3. Persamaan pengatur

Pada sistem persamaan pengatur terdapat 2 benda yang di atur yaitu cair dan padat dan untuk mengatur

persamaan dinamika fluida terdapat 3 persamaan

yaitu persamaan momentum (persamaan Navier-Stokes), persamaan kontinuitas dan persamaan keadaan [9].

2.3.1. Persamaan Momentum

Persamaan Navier-Stokes kontinum dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{D}{D} = \frac{-1}{D} + F$$

v = kecepatan
 ρ = kepadatan
 P = Tekanan fluida

Dalam tugas akhir ini tegangan pada permukaan dapat dia asumsikan tidak signifikan atau dapat di abaikan. Pada formula SPH, persamaan diatas dapat di tulis sebagai berikut :

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\sum_{i=1}^N \rho_i \left(\frac{v_i}{2} + \frac{v_j}{2} \right) \left(\frac{v_i - v_j}{h_{ij}} - \frac{v_i + v_j}{2} \right) + F_{\rho}$$

2.3.2. Persamaan Kontinuitas

Pada tugas akhir ini asumsi cairan dianggap lemah atau mudah di tekan (compressible). Berarti kepadatan tergantung kepada waktu tetapi perubahan kepadatan tidak terjadi terlalu signifikan, perubahan cairan dapat di hitung dengan persamaan berikut :

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot v$$

Persamaan di atas dapat di tulis dengan persamaan SPH sebagai berikut :

$$\frac{D\rho}{Dt} = \sum_{i=1}^N \rho_i \left(\frac{v_i}{2} + \frac{v_j}{2} \right) \left(\frac{v_i - v_j}{h_{ij}} - \frac{v_i + v_j}{2} \right)$$

2.4. Persamaan Keadaan

Pada persamaan keadaan terdapat hubungan antara kepadatan dan tekanan dapat di lihat dari persamaan, dimana penyerdehanaan dari persamaan itu adalah

$$P = c^2 (\rho - \rho_0) + P_{atm}$$

c = kecepatan suara
 ρ0 = nilai awal kepadatan
 P_atm = tekanan atmosfer

Pada persamaan di atas dapat di lihat bahwa tekanan sebanding dengan kuadrat dari kecepatan suara dan kepadatan. Karena itu,perubahan kecil dari kepadatan bisa menghasilkan variasi besar di tekanan tergantung pada nilai kecepatan suara.Sesuai dengan persamaan (2.3.1) dan (2.3.3), itu hasil variasi kepadatan besar. Oleh karena itu, pemilihan kecepatan suara sangat penting dalam simulasi ini karena mempengaruhi variasi kepadatan. Untuk menjaga fluktuasi kepadatan kurang dari 1%, $c = \sqrt{gh}$ di pilih dimana g adalah percepatan gravitasi dan H adalah level ketinggian air [9].

2.5. Time Stepping

Time stepping yang digunakan pada simulasi yang akan dilakukan adalah menggunakan metode

Leapfrog. Metode ini menggunakan rumus umum

$$x_{i,j/2} = x_{i,j} + h v_{i,j/2}$$

Dengan mengasumsikannya dapat dihitung $v_{i,j/2}$ dengan beberapa cara. Kemudian kita dapat mengaplikasikan aturan midpoint untuk menghitung nilai v untuk step selanjutnya.

$$v_{i,j/2} = v_{i,j} + h a_{i,j/2}$$

Telah diketahui nilai x_1 dan untuk mendapatkan step x selanjutnya dengan $x_{i,j} = x_{i,j-1} + h v_{i,j-1/2}$ dan

seterusnya. Demikian kita dapat memulai dengan x_0 dan $v_{1/2}$ kita dapat melanjutkan x dan v dengan menggunakan metode Leapfrog dan berhubungan

satu sama lain.

$$x_{i,1} = x_{i,0} + h v_{i,1/2}$$

$$x_{i,3/2} = x_{i,1/2} + h v_{i,1}$$

2.6. Syarat Batas

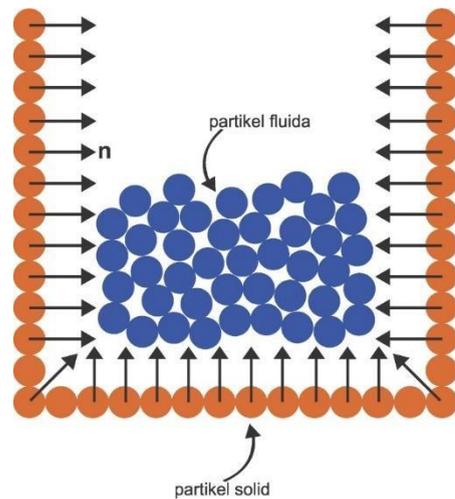
Pada pendekatan SPH,sangat penting untuk menghilangkan partikel yang mendekati batas dinding. Dalam Simulasi ini,batas-batas dinding di

asumsikan sebagai partikel padat. Di perlukan partikel padat untuk mencegah partikel cairan menembus batas dinding (lihat Gambar 2.2). Partikel-

partikel fluida mendekati batas dinding akan mengalami gaya tolak yang berasal dari partikel padat.Gaya yang di alami oleh partikel cairan j normal ke batas partikel padat i di nyatakan sebagai

berikut [9] :

$$f_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{h_{ij}^2} - \frac{1}{h_{ij}^3} \right) \left(\frac{v_i - v_j}{h_{ij}} - \frac{v_i + v_j}{2} \right)$$



Gambar 2.5 Batas partikel padat dan vector normal Dimana normal vektor pada batas padat. ialah ,

$$f_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{h_{ij}^2} - \frac{1}{h_{ij}^3} \right) \left(\frac{v_i - v_j}{h_{ij}} - \frac{v_i + v_j}{2} \right)$$

pada metode *Euler*, yaitu sebagai berikut

$$x_{i+1} = x_i + h v_i$$

Dimana h sebagai interval *time stepping* yang digunakan. Sesuai dengan *numerical integration (midpoint method)* yang digunakan pada metode *Leapfrog* ini [11], kita dapat mengganti v dengan nilai tengah dari interval, sebagai berikut.

Dimana $\Delta x = \frac{y}{(2.4)}$, Δx adalah jarak proyeksi partikel cair j pada tangen vektor batas partikel padat i , y adalah garis tegak lurus jarak partikel cair j dari batas partikel padat i , Δx adalah jarak partikel pertama. Pemilihan jarak pada batas partikel padat tergantung pada jarak awal partikel cair, jika Δx terlalu kecil, maka partikel air akan mengalami gaya

tolak sebelum mendekati dinding batas. Sedangkan jika terlalu besar, beberapa partikel air dapat menembus batas dinding sebelum mengalami gaya tolak.

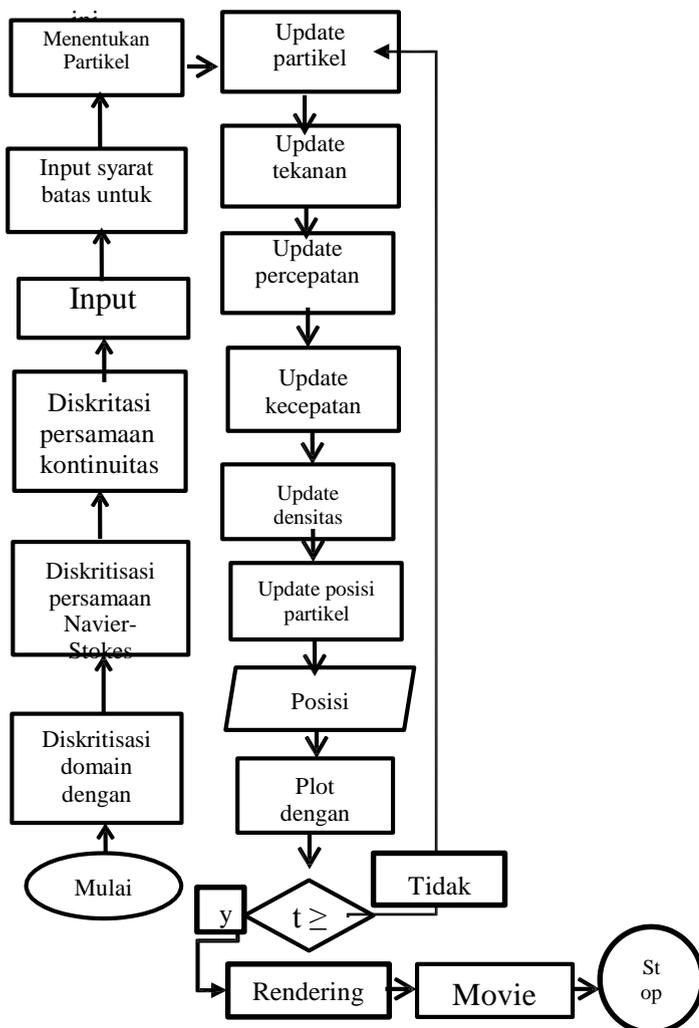
3. Perancangan Sistem

3.1. Deskripsi Sistem

Pada tugas akhir ini, akan di rancang sebuah simulasi dari aliran darah pada arteri jika terjadi penyempitan dengan menggunakan metode SPH, untuk membuat simulasi permasalahan tersebut menggunakan bahasa pemrograman C dan C++ dan visualisasi menggunakan gnuplot. Dimana gambaran 2 dimensi dari program adalah darah berbentuk partikel-partikel fluida akan mengalir untuk melalui pipa silinder yang merupakan representasi dari arteri lalu akan di berikan endapan sehingga dapat di ketahui pengaruh kecepatan aliran darah dalam arteri. Keluaran yang di harapkan dari simulasi ini adalah mengetahui simulasi aliran darah pada arteri jika terjadi penyempitan.

3.2. Rancangan Sistem

Pada perancangan system ini terdiri dari beberapa tahap untuk membuat simulasi dari system ini:



Gambar 3.2. flowchart perancangan system

3.3. Penjelasan Rancangan Sistem

1. Mulai

Tahap pemulaian awal

2. Diskritisasi domain dengan partikel sph

Pada tahap ini mendiskritisasi domain yaitu membuat dari bentuk domain yang ada ke dalam bentuk diskrit pada aliran darah arteri jika terjadi penyempitan maka bentuknya di bagi 2 yaitu cair dan padat, cair adalah darah dan padat adalah arteri.

3. Diskritisasi persamaan navier-stokes (N-R)

Diskritisasi menggunakan persamaan navier-stokes (N-R) untuk mencari percepatan aliran darah dan selanjutnya akan di dapat kecepatan aliran darah pada saat normal dan penyempitan.

4. Diskritisasi persamaan kontinuitas

Persamaan kontinuitas digunakan untuk mencari kepadatan dari perubahan partikel cair yang tergantung dari waktu.

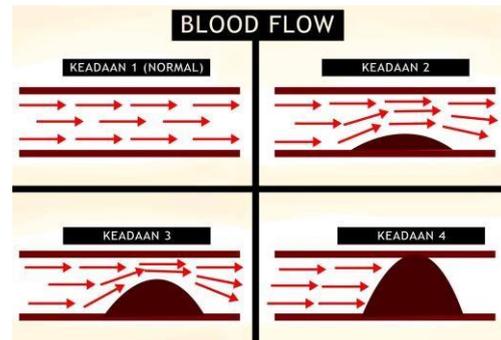
5. Input Syarat Awal

Syarat awal yang pertama dimasukan adalah waktu, waktu maksimal harus di masukan terlebih dahulu sehingga terdapat batasan pada saat looping.

6. Input syarat batas awal

Dalam input syarat batas awal pada aliran darah pada arteri jika terjadi penyempitan ini di asumsikan dengan batas dinding-dinding partikel padat agar

partikel cair tidak keluar serta saat partikel cair mendekati partikel padat akan mendapati gaya tolak.



Gambar 3.3 Keadaan aliran darah

Pada gambar (3.3) terdapat 4 keadaan berbeda dari aliran darah dalam arteri. Pada keadaan 1 gambar (3.3), dimana keadaan darah dalam keadaan normal dan aliran darah mengalir normal tanpa adanya halangan atau penyempitan. Pada keadaan 2 gambar (3.3), didapati keadaan aliran darah yang mempunyai gangguan yaitu adanya endapan sehingga mengganggu kecepatan dari aliran darah. Pada keadaan 3 gambar (3.3), keadaan aliran darah mengalami gangguan dan besar endapan mendekati kronis sehingga dapat mulai menyebabkan penyakit seperti stroke, nyeri dada dan sebagainya. Dan terakhir keadaan 4 gambar (3.3), keadaan aliran darah sudah tidak bisa dialiri mengakibatkan kronis sehingga mengakibatkan kematian manusia karena tidak adanya penyuplaian darah ke seluruh tubuh.

7. Menentukan partikel tetangga

Menentukan partikel tetangga dapat diambil sesuai dengan daerah partikel-partikel berada dapat dilihat pada (gambar 2.1).

8. Update partikel tetangga

Update partikel tetangga maka melakukan pendekatan partikel untuk membuat perubahan nilai-nilai dari partikel tetangga, oleh sebab itu dapat dilakukan dengan fungsi kernel.

9.Update tekanan partikel

Update tekanan partikel berfungsi memberi nilai baru pada tekanan untuk melihat hubungan antara kepadatan dan tekanan.

10.Update percepatan partikel

Update percepatan partikel dapat dilakukan dengan persamaan momentum sehingga percepatan dari masing-masing partikel dapat berubah-ubah sesuai dengan keadaannya, seperti pada saat sesusah dan sebelum bertabrakan.

11.Update kecepatan partikel

Update kecepatan partikel di dapat dari fungsi percepatan dan diintegrasikan sehingga menghasilkan nilai kecepatan partikel.

12.Update densitas partikel

Update densitas (kepadatan) partikel di sesuaikan dengan persamaan kontinuitas dan akan di bentuk ke persamaan SPH

13.Update posisi partikel

Update posisi partikel simulasi aliran darah pada arteri jika terjadi penyempitan dapat dilihat dari partikel-partikel cair yang menabrak endapan(partikel padat) mengakibatkan posisi partikel cair berubah karena adanya gaya tolak dari endapan (partikel padat).

14.Posisi partikel

Posisi partikel didapat dari update terbaru posisi partikel, sehingga menghasilkan masing masing posisi terbaru dari partikel-partikel

15.Plot dengan gnuplot

Plot dengan gnuplot adalah menampilkan posisi partikel dengan gnuplot.

16. $t \geq t_{maks}$

$t \geq t_{maks}$ berfungsi memeriksa waktu, jika waktu sudah mencapai maksimum maka dilanjutkan dengan proses rendering tetapi apabila belum maka kembali update partikel tetangga dan dilanjutkan ke tahapan berikutnya.

17.Rendering

Rendering adalah proses penggabungan beberapa gambar menjadi satu

18.Movie

Movie berfungsi sebagai interface untuk penampilan dari hasil akhir

4. Pengujian dan Analisis

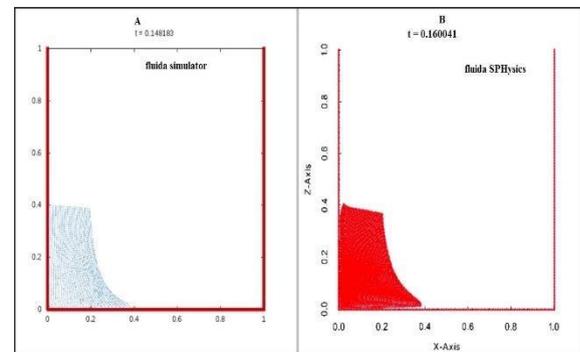
4.1. Implementasi Sitem

Pada bab ini menjelaskan simulasi dengan menggunakan metode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic) terhadap pembuluh darah arteri dimana pembuluh darah arteri dibangun dengan menggunakan bahasa C dan software GNUplot digunakan untuk membantu proses visualisasi dan plotting. Pembuluh darah arteri dipilih karena mempunyai fungsi utama sebagai pembawa darah dari jantung. Dalam simulasi 2-D ini, akan

menganalisis dimana pembuluh darah arteri normal dan abnormal berdasarkan bentuk dan kecepatan aliran pembuluh darah. Parameter yang digunakan pada simulasi ini di tampilkan pada Tabel 2 dibawah ini:

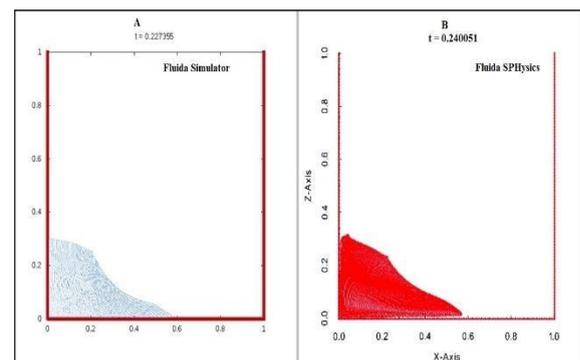
Parameter	Nilai	Satuan
Densitas darah	1060	Kg/m ³
Percepatan gravitasi	9,8	m/s
Jarak antar partikel padat	0,0015625	M
Jarak antar partikel fluida	0,00625	M
Viskositas kinetik darah	1000	Pa.s
Ukuran partikel	0.04140625	m ²
Jumlah partikel	3912	-

4.2. Pengujian sistem



Gambar 4.2.1. Pengujian 1

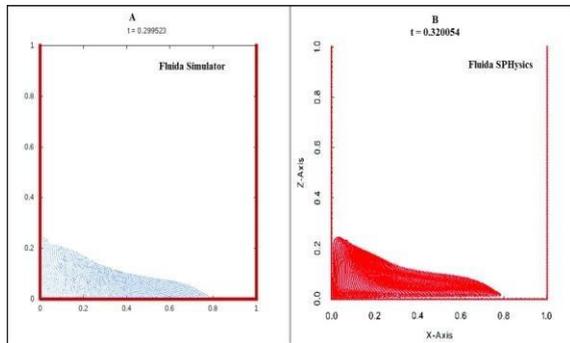
Pada pengujian 1 dapat dilihat pada Gambar 4.2.1, untuk perbandingan 2 simulasi yang dilakukan dengan Gambar A adalah simulasi yang digunakan (SPH Simulator) dan Gambar B simulasi yang telah dilakukan penelitian (Fluida SPHysics), disini dapat dilihat pada Gambar A diambil pada saat $t = 0,14$ detik sedangkan Gambar B diambil pada saat $t = 0,16$ detik didapatkan 2 hasil gambar simulasi yang tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.2.2. Pengujian 2

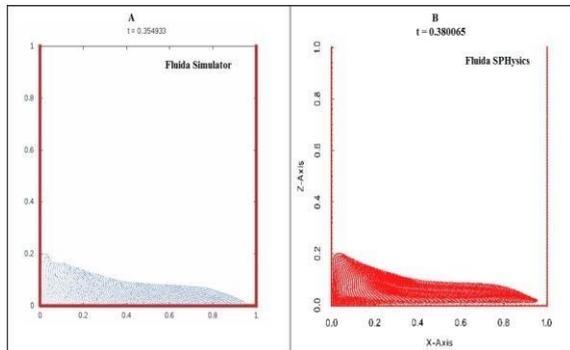
Pada pengujian 2 dapat dilihat pada Gambar 4.2.2, disini dapat dilihat pada Gambar A diambil pada saat $t = 0,22$ detik sedangkan Gambar B diambil pada saat

t = 0,24 detik didapatkan 2 hasil gambar simulasi yang tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.2.3. Pengujian 3

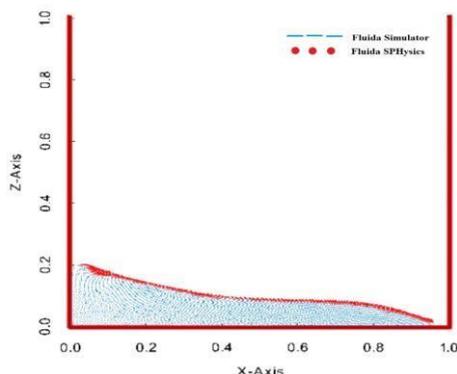
Pada pengujian 3 dapat dilihat pada Gambar 4.2.3, disini dapat dilihat pada Gambar A diambil pada saat t = 0,29 detik sedangkan Gambar B diambil pada saat t = 0,32 detik didapatkan 2 hasil gambar simulasi yang tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.2.4. Pengujian 4

Pada pengujian 4 dapat dilihat pada Gambar 4.2.4, disini dapat dilihat pada Gambar A diambil pada saat t = 0,35 detik sedangkan Gambar B diambil pada saat t = 0,37 detik didapatkan 2 hasil gambar simulasi yang tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi yang dilakukan.

Untuk melakukan pengujian maka dilakukan perbandingan antara Simulasi yang digunakan (fluida simulator) dan simulasi penelitian (Fluida SPHysics). Hasilnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.2.5. Perbandingan Surface Simulasi

Pada Gambar 4.2.5 dapat dilihat perbandingan surface atau permukaan simulasi.

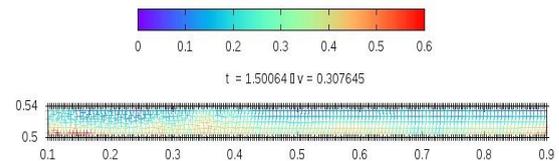
Pada fluida simulator dan fluida SPHysics, hasil gambar simulasi yang digunakan tidak jauh berbeda dengan simulasi penelitian.

4.3. Hasil Pengujian

Pada simulasi pembuluh darah arteri 2 dimensi dengan menggunakan metode SPH terdapat 3 hasil yang berbeda yaitu sebagai berikut.

4.2.1 Pembuluh Darah Normal

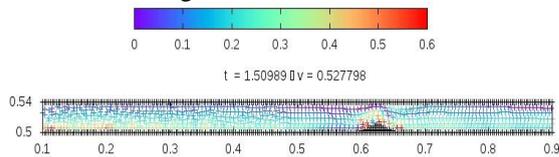
Pada pembuluh darah normal menunjukkan bahwa pembuluh darah arteri tanpa adanya penyempitan atau hambatan darah, aliran darah akan mengalir secara normal dan dinding pembuluh darah berdiameter 40 mm serta untuk panjang pembuluh darah 1000 mm, maka didapatkan hasil t=1,50 detik dengan kecepatan aliran darah 0,3076 m/s atau 30,76 cm/s yang dapat dilihat pada Gambar 6 darah normal sebagai berikut:



Gambar 4.2.1. Darah abnormal

4.2.2. Pembuluh Darah Abnormal 1

Pada pembuluh darah abnormal 1 dengan luas daerah penyempitan adalah 128,125 mm², maka pembuluh darah tersebut akan mengalami perubahan arah aliran darah yang terlihat pada gambar 7 pada saat aliran darah mendekati daerah penyempitan, arah peredaran aliran darah berubah, mengakibatkan darah akan menumpuk pada daerah penyempitan atau benjolan dan mengubah kecepatan dari aliran darah, tetapi setelah melewati daerah penyempitan atau benjolan arahnya kembali normal tetapi mengalami kecepatan yang berbeda dapat dibandingkan dengan gambar 6 pada saat darah normal dengan gambar 7 pada saat darah abnormal 1, terlihat pada waktu yang sama yaitu t=1,50 detik didapat perbedaan kecepatan yaitu 0,3076 m/s dan 0,5189 m/s atau 30,76 cm/s dan 51,89 cm/s yang dapat dilihat pada Gambar 7 darah Abnormal 1 sebagai berikut:

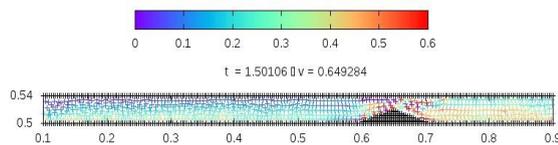


Gambar 4.2.2. darah abnormal 1

4.2.3. Pembuluh Darah Abnormal 2

Pada simulasi pembuluh darah abnormal 2 menunjukkan bahwa aliran darah yang mengalami penyempitan dengan luas sebesar 453.125 mm², sehingga arah aliran darah pada pembuluh arteri mengalami perubahan yang signifikan dari keadaan sebelumnya yakni abnormal 1 dengan luas penyempitan 128,125 mm², hal ini disebabkan karena tinggi dari penyempitan sehingga membuat darah semakin menumpuk ke atas daerah

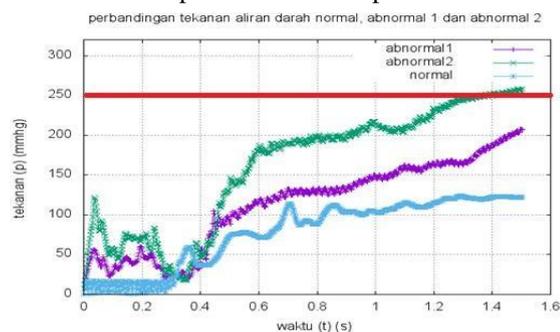
penyempitan atau benjolan dan setelah melewati daerah penyempitan, kecepatan aliran darah akan bertambah, hal ini dapat dilihat dan dibandingkan pada gambar 6,7 dan 8. Sehingga terdapat perubahan kecepatan yang berbeda antara aliran pada saat normal dengan abnormal 2 dan abnormal 1 dengan abnormal 2. Pada saat normal dengan abnormal 2 dengan $t=1,50$ detik didapatkan perbedaan kecepatan yaitu $0,30$ m/s dan $0,6498$ m/s atau $30,76$ cm/s dan $64,92$ cm/s. Pada saat abnormal 1 dan abnormal 2 dengan waktu yang hampir sama yaitu $t = 1,50$ detik didapatkan perbedaan kecepatan yaitu $0,5189$ m/s dan $0,6492$ m/s atau $51,89$ cm/s dan $64,92$ cm/s yang dapat dilihat pada Gambar 8 darah abnormal 2 sebagai berikut:



Gambar 4.2.3. darah abnormal 2

4.3. Analisis

Analisis pada simulasi ini yaitu mengamati kecepatan dan tekanan aliran darah saat darah normal, abnormal 1 dan abnormal 2. Grafik pada Gambar 9 memperlihatkan perbandingan antara tekanan aliran darah terhadap waktu di pembuluh darah:

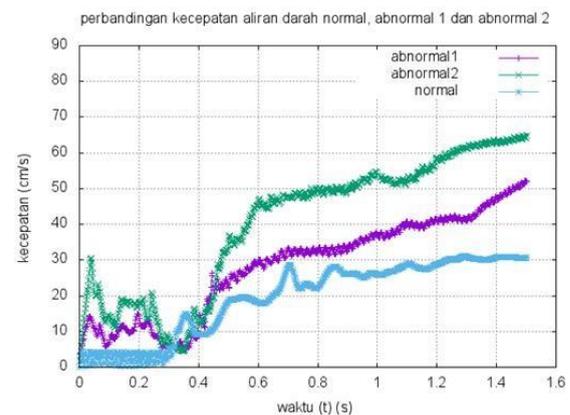


Gambar 4.3. grafik perbandingan tekanan darah

Berdasarkan Gambar 4.3 menunjukkan tekanan darah normal dengan radius pembuluh darah 40 mm dan $t = 1,50$ detik didapatkan tekanan sebesar 122.64 mmHg, hasil tersebut menunjukkan bahwa tekanan aliran darah masih berada dalam keadaan normal. Pada tekanan darah abnormal 1, radius 40 mm, dengan luas penyempitan $128,125$ mm² berbentuk segitiga sama kaki, $t=1,50$ detik tekanan yang didapat adalah 217.82 mmHg, tekanan tersebut melewati batas dari tekanan darah normal, hal ini dikarenakan adanya penyempitan pembuluh darah sehingga tekanan aliran darah lebih tinggi dari keadaan normal. Pada tekanan darah abnormal 2, radius 40 mm, luas daerah penyempitan 453.125 mm² berbentuk segitiga sama kaki, $t = 1,50$ detik, tekanan yang didapat sebesar 258.01 mmHg, hasil yang diperoleh melewati batas maksimal dari tekanan aliran darah manusia normal seperti yang terlihat pada Gambar 4.3 bahwa batas maksimal tekanan aliran darah adalah 250 mmHg. Keadaan tersebut mengakibatkan kinerja jantung menjadi lebih cepat untuk memompa aliran

darah, besarnya tekanan yang diberikan oleh jantung ke pembuluh darah yang mengalami penyempitan berisiko pembuluh darah tersebut menggelembung dan pecah.

Besarnya penyempitan pembuluh darah dan tekanan aliran darah mengakibatkan kecepatan aliran darah berubah-ubah, semakin tinggi penyempitan maka semakin besar tekanan yang diberikan sehingga kecepatan aliran darah semakin meningkat. Dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 perubahan tekanan antara keadaan darah abnormal dan normal, saat keadaan aliran darah normal (tanpa adanya penyempitan) dengan tekanan normal yaitu sekitar 122 mmHg memberikan kecepatan aliran darah 30 cm/s tetapi pada saat abnormal 1 dengan penyempitan 20% didapatkan tekanan 217 mmHg memberikan kecepatan 54 cm/s atau hampir 2 kali lipat dari keadaan normal. Pada keadaan abnormal 2 tekanan yang diberikan $258,01$ mmHg maka dapat dilihat pada grafik kecepatannya 65 cm/s dan akan terus meningkat. Untuk kecepatan dapat dilihat pada Gambar 10 grafik perbandingan darah abnormal 1, abnormal 2 dan normal sebagai berikut:



Gambar 4.4. grafik perbandingan kecepatan aliran darah

Berdasarkan Gambar 4.4 grafik perbandingan darah abnormal 1, abnormal 2 dan normal di atas menunjukkan pergerakan kecepatan aliran darah terhadap waktu yang terjadi pada saat keadaan abnormal 1, abnormal 2 dan normal. Pada grafik keadaan normal aliran darah terlihat pada awal pergerakan aliran darah mengalami kurang stabil karena pada saat memulai simulasi adanya partikel yang tidak bertetangga sehingga dibutuhkan tetangga dari partikel tersebut untuk memulai interaksi dan untuk kecepatan aliran darah normal tidak mengalami kenaikan yang signifikan. Pada grafik keadaan abnormal 1, terdapat keadaan awal pada grafik didapatkan kurang stabil dikarenakan adanya partikel yang tidak memiliki tetangga terutama pada daerah penyempitan hal ini menyebabkan partikel tersebut mencari tetangganya untuk berinteraksi tetapi untuk interaksi selanjutnya sudah mulai stabil. Untuk kecepatan pada aliran darah abnormal 1 terjadi kenaikan yang berbeda dengan keadaan normal, dikarenakan perbedaan tekanan dari keadaan normal dan abnormal 1. Pada grafik keadaan abnormal 2

keadaan awal grafik mengalami pergerakan yang tidak stabil diawal dan penyebabnya sama dengan keadaan abnormal 1, untuk kecepatannya darah abnormal 2 mengalami peningkatan yang lebih dibandingkan dengan darah normal dan abnormal 1 karena disebabkan dari tekanan yang diberikan dan tingginya penyempitan

5. Penutup

5.2. Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil pengujian yang dilakukan, maka pada penelitian Tugas Akhir ini didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. SPH simulator yang dibuat menggunakan bahasa pemrograman C++ untuk simulasi kasus penyempitan pembuluh darah arteri memperoleh hasil yang mendekati realistik.
2. Hasil implementasi yang dilakukan terhadap pengujian pada 3 bentuk aliran darah, yaitu normal, abnormal 1 dan abnormal 2, menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan.
3. Ukuran penyempitan pada pembuluh darah arteri terhadap tekanan aliran darah sangat berpengaruh. Berdasarkan hasil simulasi tekanan darah normal adalah 122 mmHg. Untuk penyempitan 20% dari lebar pembuluh darah arteri didapatkan tekanan 217 mmHg, sedangkan penyempitan 70% dari lebar arteri didapatkan tekanan 258 mmHg. Tekanan darah yang tinggi ini akan mengakibatkan pembuluh darah pecah.

5.3. Saran

1. Pada simulasi yang dilakukan perlu adanya time periodik agar darah yang mengalir dapat berputar atau kembali ke awal lagi.
2. Simulasi aliran penyempitan pembuluh darah arteri disimulasikan dengan visualisasi yang lebih baik sehingga membentuk keadaan yang lebih real.
3. Pada simulasi untuk selanjutnya perlu adanya dinding pembuluh darah yang elastis sehingga membuat keadaan lebih nyata.

Daftar Pustaka

- [1] Nichols, M., dkk, 2014, *Cardiovascular disease in Europe 2014: epidemiology*
- [2] Vaik E, 2004, *Numerical Simulations Of Blood Flow in Arteries using Fluid-Structure Interactions*
- [3] Tsubota, K., dkk, 2006, *A Particle Method for Blood Flow Simulation.*
- [4] Prasetio, Gunawan (alih bahasa), 2004, *dasar-dasar fenomena transport volume 1*

transfer momentum edisi ke4, Jakarta, Penerbit Erlangga.

[5] Putra, Anggy Trisnawan, 2012, *Model dan Simulasi Dam Break 3D Berbasis Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)*, Institut Teknologi Bandung.

[6] Vor T. Gabe, M.D., Dkk, 1969 *Measurement of Instantaneous Blood Flow Velocity and Pressure in Conscious Man with a Catheter-Tip Velocity Probe*

[7] Viridi, M. R. A. Sentosa, P. Subekti dan Suprijadi, 2013 *Application of Computational Physics: Blood Vessel Constrictions and Medical Infuses*

[8] Goffin, Louis, 2012-2013, *Development of a didactic SPH model*, University de liege

[9] Tarwidi, Dede, 2012, *The Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Two-Dimensional Stefan Problem*, Kanazawa University

[10] Monaghan, J.J, 1992, *Smoothed Particle Hydrodynamics.*

[11] Young Peter, 2014, *The leapfrog method and other "symplectic" algorithms for integrating Newton's laws of motion.*

[12] Crespo, A.J.C., *Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics*, University of Vigo, 200