

## Merajut ilmu: pendekatan interdisipliner dalam pembelajaran IPA melalui studi mekanisme aliran darah

Maysha Syakila<sup>1\*</sup>, Siti Nurhafiza<sup>2</sup>, Sry Maharany<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan, Indonesia

\*email korespondensi: syahkila2323@gmail.com

### Abstrak

Sistem peredaran darah manusia merupakan contoh nyata dari penerapan mekanika fluida dalam biologi. Studi ini bertujuan untuk menganalisis dinamika aliran darah melalui pendekatan fisika dengan menggunakan model matematis seperti persamaan Navier-Stokes, hukum Hagen-Poiseuille, serta model fluida Casson dan Power-Law. Penelitian ini dilakukan dengan metode kajian literatur menggunakan 17 referensi yang diperoleh melalui perangkat Publish or Perish. Analisis literatur dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu (1) pencarian dan seleksi artikel berdasarkan relevansi dengan topik mekanika fluida dalam sistem peredaran darah, (2) sintesis informasi terkait model matematis dan aplikasinya dalam studi aliran darah, serta (3) analisis integrasi fisika dan biologi dalam bidang medis. Hasil kajian menunjukkan bahwa aliran darah dalam tubuh dipengaruhi oleh faktor viskositas, tekanan, diameter pembuluh darah, serta elastisitas dinding pembuluh. Model Navier-Stokes menjelaskan dinamika fluida darah, sedangkan hukum Hagen-Poiseuille menggambarkan hubungan antara tekanan dan viskositas dalam pembuluh. Model fluida Casson dan Power-Law lebih akurat dalam merepresentasikan karakteristik darah sebagai fluida non-Newtonian, khususnya dalam kondisi stenosis. Integrasi fisika dan biologi dalam kajian ini terlihat dalam penerapan konsep fluida untuk memahami fenomena hemodinamika dan pengembangan teknologi medis, seperti ultrasonografi Doppler dan desain katup jantung buatan. Namun, penelitian ini menemukan kesenjangan dalam studi mengenai pengaruh faktor lingkungan terhadap aliran darah dan pemanfaatan kecerdasan buatan dalam pemodelan yang lebih akurat. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan guna mengembangkan model yang lebih representatif terhadap kondisi fisiologis nyata.

**Kata Kunci:** Aliran Darah; Fisika Medis; Interdisipliner; Mekanika Fluida; Pemodelan Matematis

### Abstract

**Integrating knowledge: an interdisciplinary approach to science learning through the study of blood flow mechanisms.** The human circulatory system is a real example of the application of fluid mechanics in biology. This study aims to analyze blood flow dynamics through a physics approach using mathematical models such as the Navier-Stokes equation, Hagen-Poiseuille law, and Casson and Power-Law fluid models. This research was conducted using a literature review method with 17 references obtained through Publish or Perish. The literature analysis involved several steps: (1) searching and selecting articles relevant to fluid mechanics in the circulatory system, (2) synthesizing information related to mathematical models and their applications in blood flow studies, and (3) analyzing the integration of physics and biology in the medical field. The findings indicate that blood flow in the body is influenced by viscosity, pressure, vessel diameter, and vessel wall elasticity. The Navier-Stokes model explains blood fluid dynamics, while the Hagen-Poiseuille law describes the relationship between pressure and viscosity in blood vessels. The Casson and Power-Law fluid models better represent the non-Newtonian characteristics of blood, particularly in stenotic conditions. The integration of physics and biology in this study is evident in the application of fluid concepts to understand hemodynamic phenomena and the development of medical technologies such as Doppler ultrasonography and artificial heart valve design. However, this study identifies gaps in research regarding the impact of environmental factors on blood flow and the use of artificial intelligence for more accurate modeling. Therefore, further research is needed to develop models that more accurately represent real physiological conditions.

**Keywords:** Blood Flow; Medical Physics; Interdisciplinary; Fluid Mechanics; Mathematical Modelling

## Pendahuluan

Fisika dan biologi merupakan dua disiplin ilmu yang saling melengkapi dalam memahami berbagai proses kehidupan, termasuk sistem peredaran darah manusia (Julianti, Fitriisa dan Fatimah, 2024). Mekanika fluida, sebagai cabang fisika yang mempelajari perilaku fluida dalam berbagai kondisi, memiliki peran penting dalam menjelaskan dinamika aliran darah (Wilujeng, 2018). Dalam konteks sistem peredaran darah manusia, darah dianggap sebagai fluida yang mengalir melalui jaringan pembuluh darah, dengan karakteristik seperti kecepatan, tekanan, dan viskositas yang menentukan fungsinya dalam tubuh.

Mekanika fluida adalah cabang fisika yang mempelajari perilaku pergerakan dari fluida. Pergerakan ini diamati dalam bentuk cairan maupun gas. Dalam konteks sistem peredaran darah manusia, darah dianggap sebagai fluida yang mengalir melalui jaringan pembuluh darah. Pemahaman tentang karakteristik aliran darah, seperti kecepatan, tekanan, dan viskositas, sangat penting untuk menjelaskan fungsi normal sistem kardiovaskular serta berbagai kondisi patologis. Penerapan prinsip-prinsip mekanika fluida, seperti hukum Stokes, persamaan Navier Stokes, dan model-model aliran darah, telah membantu menjelaskan fenomena dinamika aliran darah secara mendalam (Hudoarma, Gunawan dan Rohmawati, 2018; Aini *et al.*, 2024). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa viskositas darah dan model aliran, seperti model Hagen-Poiseuille dan model fluida non-Newtonian (misalnya, model Casson), memainkan peran penting dalam menjelaskan pola aliran darah di dalam pembuluh arteri (Jonuarti, 2013; Irawati, 2015; Jati dan Rizkiana, 2015). Selain itu, studi tentang pemodelan fluks aliran darah (Arsita, Prihandono dan Kusumastuti, 2024) dan penerapan hukum Stokes dalam mekanika fluida telah memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman aspek fisik dalam sistem peredaran darah.

Namun, terdapat kesenjangan penelitian dalam mengintegrasikan mekanika fluida dengan kondisi fisiologis nyata. Model matematis sering kali mengasumsikan darah sebagai fluida Newtonian, padahal darah memiliki sifat non-Newtonian yang kompleks. Selain itu, belum banyak penelitian yang secara eksplisit mengkaji pengaruh faktor lingkungan terhadap aliran darah serta bagaimana pendekatan berbasis kecerdasan buatan dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi pemodelan. Pendekatan interdisipliner yang lebih komprehensif diperlukan untuk mengatasi keterbatasan tersebut, sehingga model aliran darah dapat mencerminkan kondisi biologis secara lebih akurat (Quarteroni, 2015; Silitonga *et al.*, 2024).

Dari sudut pandang pembelajaran IPA, integrasi fisika dan biologi dalam sistem peredaran darah menjadi tantangan tersendiri bagi peserta didik. Konsep mekanika fluida sering kali dianggap abstrak, sehingga pembelajaran interdisipliner diperlukan untuk meningkatkan pemahaman siswa mengenai hubungan antara prinsip fisika dan fenomena biologis. Studi ini bertujuan untuk mengintegrasikan prinsip-prinsip fisika dan biologi guna memahami mekanisme aliran darah secara lebih menyeluruh. Dengan menggabungkan data empiris biologis dan model matematis fisika, diharapkan dapat dihasilkan pemahaman yang lebih akurat mengenai dinamika aliran darah. Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan strategi pembelajaran IPA yang lebih kontekstual dan berbasis fenomena nyata (Chabibah *et al.*, 2023; Fakhriyah *et al.*, 2023; Rahmadina, 2024)

Kajian ini menawarkan perspektif interdisipliner dalam memahami mekanisme aliran darah dengan mengintegrasikan konsep fisika dan biologi secara lebih mendalam. Studi-studi sebelumnya telah mengeksplorasi aspek mekanika fluida dalam sistem peredaran darah (Aini *et al.*, 2024; Arsita, Prihandono dan Kusumastuti, 2024). Namun, penelitian ini berupaya menjembatani kesenjangan antara model matematis dengan kompleksitas biologis dari sistem peredaran darah manusia. Dengan mengadopsi pendekatan interdisipliner, penelitian ini menyoroti bagaimana konsep fisika, khususnya dinamika fluida, dapat dikombinasikan dengan data biologis untuk meningkatkan akurasi model aliran darah.

Untuk memahami dinamika aliran darah, sejumlah penelitian terdahulu telah mengeksplorasi penerapan mekanika fluida pada sistem peredaran darah. Aini *et al.* (2024) menekankan pentingnya viskositas dalam mekanika fluida dengan mengacu pada teori hukum Stokes. Penelitian mereka menunjukkan bahwa viskositas merupakan parameter kunci yang mempengaruhi interaksi antara gaya dan aliran dalam fluida, sehingga berperan penting dalam mengatur laju aliran darah dan distribusi tekanan di dalam pembuluh darah. Pendekatan ini memberikan dasar teoritis yang kuat untuk pengembangan model aliran darah selanjutnya. Dalam upaya memahami variabilitas aliran darah, Arsita *et al.* (2024) mengembangkan model pemodelan fluks yang mempertimbangkan variabel tekanan dan kecepatan. Model ini menjelaskan bagaimana gradien tekanan mempengaruhi distribusi aliran darah dalam sistem peredaran, terutama antara arteri dan vena, dan menunjukkan bahwa perubahan pada parameter-parameter ini dapat mengubah efisiensi distribusi darah ke seluruh jaringan.

Studi oleh Hudoarma *et al.* (2018) menerapkan persamaan Navier-Stokes yang dikombinasikan dengan metode Lattice-Boltzmann untuk menganalisis aliran darah dalam pembuluh arteri. Penggunaan metode

komputasi ini memungkinkan simulasi numerik yang detail, mengungkapkan pola-pola laminar dan turbulen serta implikasinya terhadap kondisi fisiologis. Pendekatan matematis ini memberikan kerangka kerja untuk mendeskripsikan dinamika aliran darah dalam kondisi normal maupun patologis seperti stenosis. Irawati (2015) mengkaji dampak perubahan viskositas darah terhadap kesehatan kardiovaskular, dengan menunjukkan bahwa variasi viskositas dapat memicu risiko penyakit jantung. Lebih lanjut, penelitian oleh Jati & Rizkiana (2015) dan Jonuarti (2013) mengembangkan model non-Newtonian untuk menggambarkan kompleksitas aliran darah yang tidak dapat sepenuhnya dijelaskan oleh asumsi fluida Newtonian. Model-model ini lebih realistis dalam mencerminkan sifat darah yang bervariasi, terutama di bawah kondisi fisiologis tertentu.

Chabibah et al. (2023) dan Fakhriyah et al. (2023) menekankan bahwa pemahaman menyeluruh mengenai mekanisme aliran darah memerlukan sinergi antara fisika dan biologi. Keduanya mengemukakan bahwa data empiris biologis perlu diintegrasikan dengan model matematis untuk menciptakan pendekatan yang lebih komprehensif. Rahmadina (2024) juga menyoroti pentingnya pendekatan interdisipliner untuk menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik, sehingga model aliran darah yang dihasilkan tidak hanya bersifat teoretis, tetapi juga aplikatif dalam konteks klinis dan pendidikan.

Meskipun berbagai model telah dikembangkan, tinjauan pustaka menunjukkan adanya kesenjangan signifikan antara model matematis dan kondisi fisiologis nyata. Banyak penelitian masih mengandalkan asumsi fluida Newtonian, yang tidak sepenuhnya merepresentasikan sifat non-Newtonian darah. Oleh karena itu, terdapat peluang penelitian untuk mengembangkan model interdisipliner yang lebih adaptif, dengan mengintegrasikan data biologis secara mendalam dan mempertimbangkan variabilitas sifat darah. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan model yang lebih akurat, serta mendukung inovasi dalam diagnosis dan terapi penyakit kardiovaskular.

## Metode

Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur untuk menganalisis keterkaitan antara fisika dan biologi dalam memahami mekanisme aliran darah. Kajian literatur dilakukan dengan pendekatan sistematis guna mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menginterpretasikan berbagai sumber ilmiah yang relevan. Metode ini memungkinkan peneliti untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai konsep mekanika fluida dalam sistem peredaran darah berdasarkan penelitian terdahulu.

Penelitian ini bersifat kualitatif dengan pendekatan literature review. Menurut Hardani *et al.*, (2020), penelitian kualitatif adalah pendekatan penelitian yang bertujuan untuk memahami fenomena berdasarkan perspektif partisipan, dengan menekankan pada makna, pengalaman, dan interpretasi subjektif. Kajian ini tidak hanya merangkum teori yang telah ada, tetapi juga menganalisis hasil penelitian sebelumnya untuk memahami bagaimana mekanika fluida diterapkan dalam sistem peredaran darah. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan wawasan baru terkait hubungan antara konsep fisika dan proses biologis dalam tubuh manusia.

Sumber data utama dalam penelitian ini berasal dari jurnal ilmiah, buku, dan prosiding konferensi yang relevan. Literatur diperoleh melalui berbagai basis data akademik, seperti *Google Books*, *Google Scholar*, dan *ScienceDirect*, yang menyediakan akses terhadap berbagai penelitian terkini. Pengumpulan literatur dilakukan menggunakan perangkat lunak *Publish or Perish*, yang membantu dalam mencari, menganalisis, serta mengevaluasi publikasi akademik dengan lebih efisien. Dengan menggunakan sumber yang kredibel, penelitian ini diharapkan dapat menyajikan analisis yang valid dan mendalam terkait mekanika fluida dalam sistem peredaran darah.

## Langkah langkah Penelitian

Proses seleksi literatur dilakukan melalui beberapa tahap berikut:

1. Pencarian Literatur  
Pencarian literatur dilakukan menggunakan kata kunci yang relevan untuk memastikan bahwa sumber yang diperoleh sesuai dengan topik penelitian. Beberapa kata kunci yang digunakan meliputi *Mekanika fluida dalam sistem peredaran darah*, *Fluid mechanics in circulatory system*, dan *Blood viscosity physics*. Literatur yang diambil memiliki rentang tahun 2013-2024, agar informasi yang digunakan tetap aktual dan relevan dengan perkembangan penelitian terbaru.
2. Seleksi Literatur  
Literatur yang telah ditemukan kemudian diseleksi berdasarkan beberapa kriteria utama. Kriteria pertama adalah reputasi sumber, yang mencakup jurnal bereputasi seperti *Journal of Biomechanics*, *Physics of Fluids*, dan *Medical Engineering & Physics*. Kriteria kedua adalah jenis artikel, di mana penelitian ini mengutamakan artikel review serta penelitian empiris untuk mendapatkan cakupan informasi yang lebih luas. Selain itu, prioritas diberikan pada penelitian yang memiliki jumlah kutipan tinggi.
3. Analisis Literatur

Literatur yang telah dikumpulkan dianalisis secara mendalam untuk memastikan keterkaitannya dengan topik penelitian. Analisis dilakukan dengan membandingkan dan mengintegrasikan temuan dari berbagai penelitian sebelumnya. Dengan cara ini, dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai bagaimana mekanika fluida memengaruhi sistem peredaran darah. Selain itu, penelitian ini juga berupaya mengidentifikasi celah penelitian yang belum banyak dibahas dan dapat menjadi dasar bagi studi lebih lanjut.

#### 4. Penyusunan Sintesis Temuan

Setelah analisis dilakukan, langkah berikutnya adalah menyusun sintesis temuan berdasarkan konsep utama. Beberapa konsep yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini meliputi model aliran darah, sifat viskositas darah, serta aplikasi mekanika fluida dalam dunia medis. Penyusunan sintesis dilakukan dengan menghubungkan teori mekanika fluida dengan fenomena fisiologis dalam sistem peredaran darah. Dengan sintesis yang sistematis, penelitian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih terstruktur terkait bagaimana prinsip fisika diterapkan dalam proses biologis.

Tebel berikut menyajikan jurnal dan buku yang digunakan dalam penelitian ini.

**Tabel 1.** Penelitian Mekanika Fluida dalam Sistem Peredaran Darah

No	Peneliti dan Tahun Terbit	Judul Penelitian
1	Aini, R.N. et al. (2024)	Anatomi mekanika fluida viskositas dalam teori hukum Stokes
2	Arsita, S., Prihandono, B., & Kusumastuti, N. (2024)	Pemodelan fluks pada aliran darah
3	Hudoarma, F.M. et al. (2018)	Analisis Aliran Darah dalam Pembuluh Arteri dengan Persamaan Navier-Stokes
4	Irawati, L. (2015)	Viskositas Darah dan Aspek Medisnya
5	Jati, B.M.E. & Rizkiana, A.P. (2015)	Studi Penentuan Viskositas Darah Ayam dengan Metode Aliran Fluida di Pipa Kapiler
6	Fakhriyah, R., et al. (2023)	Analisis Aliran Darah dalam Stenosis Arteri dengan Model Fluida Casson dan Power-Law
7	Quarteroni, A. (2015)	Modeling the Heart and the Circulatory System

Dengan metode ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang komperhensif mengenai integrasi fisika dan biologi dalam memahami mekanisme aliran darah, serta mengidentifikasi celah penelitian yang dapat dijadikan dara untuk studi lebih lanjut.

## Hasil dan Pembahasan

Dari hasil analisis terhadap literatur yang telah dipilih, ditemukan bahwa dinamika aliran darah dapat dijelaskan menggunakan berbagai model fisika:

### 1. Prinsip Mekanika Fluida dalam Sistem Peredaran Darah

Fisika, khususnya mekanika fluida, memainkan peran penting dalam memahami sistem peredaran darah di tubuh manusia. Darah sebagai fluida memiliki sifat viskositas, tekanan, dan kecepatan aliran yang dapat dianalisis menggunakan prinsip-prinsip fisika. Hukum Hagen-Poiseuille dan persamaan Navier-Stokes sering digunakan dalam pemodelan aliran darah untuk menggambarkan distribusi tekanan serta kecepatan aliran dalam pembuluh darah (Hudoarma, Gunawan dan Rohmawati, 2018)

Pada sistem peredaran darah, arteri, vena, dan kapiler bertindak sebagai saluran tempat darah mengalir. Aliran darah dalam pembuluh ini bergantung pada beberapa faktor seperti kekentalan darah, tekanan jantung, serta elastisitas dinding pembuluh darah. Studi oleh Irawati (2015) menunjukkan bahwa viskositas darah dapat mempengaruhi resistensi pembuluh, yang pada akhirnya berdampak pada tekanan darah dan suplai oksigen ke jaringan tubuh.

### 2. Model Matematis untuk Aliran Darah

Berbagai model matematis telah dikembangkan untuk memahami perilaku aliran darah di dalam tubuh. Model yang umum digunakan antara lain:

#### a. Persamaan Navier-Stokes

Digunakan untuk menggambarkan aliran darah sebagai fluida Newtonian dan non-Newtonian dalam berbagai kondisi fisiologis (Hudoarma, Gunawan dan Rohmawati, 2018). Persamaan Navier-

Stokes (NS) diatur oleh hukum kekekalan massa dan momentum yang menyatakan bahwa kecepatan. Persamaan ini didasarkan pada hukum kekekalan massa dan momentum, yang dinyatakan sebagai berikut.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

dengan  $\mathbf{u}$  adalah kecepatan. Lalu, hukum kekekalan pada momentum mengarah ke persamaan NS berikut.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u}$$

$u$  adalah kecepatan aliran darah (m/s)

$p$  adalah tekanan darah (pa)

$\nu$  adalah viskositas kinematik darah (m<sup>2</sup>/s)

$t$  adalah waktu (s)

$\mathbf{u}$  Menunjukkan vektor kecepatan darah dalam pembuluh darah. Darah sebagai fluida bergerak dengan kecepatan yang berbeda tergantung pada letaknya dalam pembuluh darah—lebih cepat di tengah dan lebih lambat di dekat dinding pembuluh akibat gesekan.

$\nabla$  adalah operator diferensial yang menunjukkan perubahan suatu besaran dalam ruang. Dalam mekanika fluida, operator ini digunakan untuk menghitung perubahan kecepatan, tekanan, dan viskositas dalam arah tertentu.  $\nabla p$  berarti gradien tekanan, yaitu perubahan tekanan darah sepanjang pembuluh. Jantung menciptakan perbedaan tekanan darah antara arteri dan vena, yang mendorong aliran darah. Gradien tekanan yang tinggi memungkinkan darah mengalir dari jantung ke kapiler, sedangkan gradien yang rendah dapat menyebabkan aliran yang lebih lambat atau bahkan penyumbatan dalam kondisi patologis.  $\nabla^2 \mathbf{u}$  adalah laplasian dari kecepatan, yang menggambarkan bagaimana kecepatan aliran menyebar dalam ruang.

Persamaan ini sering digunakan dalam simulasi aliran darah untuk memahami distribusi kecepatan dan tekanan dalam sistem kardiovaskular, baik dalam kondisi normal maupun patologis. Persamaan Navier-Stokes memungkinkan kita memahami bagaimana darah mengalir dalam sistem kardiovaskular dengan mempertimbangkan kecepatan, tekanan, dan viskositas. Setiap simbol dalam persamaan memiliki peran penting dalam menjelaskan berbagai fenomena fisiologis dan patologis dalam peredaran darah. Pemahaman yang lebih baik tentang prinsip ini dapat digunakan dalam rekayasa biomedis, seperti desain kateter, katup jantung buatan, serta pengembangan model simulasi untuk analisis risiko penyakit kardiovaskular.

## b. Hukum Poiseuille

Hukum Hagen-Poiseuille menjelaskan hubungan antara tekanan darah, panjang pembuluh, serta viskositas darah dalam menentukan kecepatan aliran. Beberapa teknik untuk menghitung viskositas telah digunakan, salah satunya dengan mengamati aliran cairan ke saluran kapiler. Karakteristik pipa kapiler, viskositas zat cair, dan tekanan hidrostatis mempengaruhi laju aliran zat cair. Laju aliran zat cair dapat diketahui dengan mengikuti Hukum Hagen-Poiseuille pada persamaan (1). Kecepatan rata-rata  $V$  untuk aliran laminar dari sebuah cairan viskos pada pipa dengan panjang  $L$  dan radius  $r$  diberikan oleh sebuah persamaan hubungan Hagen-Poiseuille (Okimustava *et al.*, 2020).

$$V = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \eta L}$$

Dimana :

$V$  = laju aliran darah (m/s)

$R$  = jari-jari pembuluh darah (m)

$\Delta P$  = perbedaan tekanan antara dua ujung pembuluh darah (Pa)

$\eta$  = viskositas darah (Pa.s)

$L$  = panjang pembuluh darah (m)

Persamaan ini menunjukkan bahwa laju aliran darah berbanding lurus dengan perbedaan tekanan ( $\Delta P$ ) dan pangkat empat dari jari-jari pembuluh ( $R^4$ ) serta berbanding terbalik dengan viskositas darah ( $\eta$ ) dan panjang pembuluh ( $L$ ).

Selain itu, dalam aliran laminar cairan tak terkompresi yang mengalir melalui pembuluh dengan jari-jari  $r$ , tegangan yang menurun akibat pengurangan kekentalan di sepanjang pipa dapat dijelaskan dengan hukum Hagen-Poiseuille sebagai berikut:

$$\Delta P_c = \frac{8\eta L_c}{r^2} u$$

dimana

$\Delta P_c$  = penurunan tekanan akibat viskositas (pa),

$\eta$  = viskositas dinamis darah (Pa.s),

$L_c$  = panjang pembuluh darah yang dilalui (m),

$r$  = jari-jari pembuluh (m),

$u$  = kecepatan aliran rata-rata (m/s).

Hukum Hagen-Poiseuille menjelaskan bagaimana faktor fisiologis seperti diameter pembuluh darah ( $R$ ), viskositas darah ( $\eta$ ), panjang pembuluh darah ( $L$ ), dan perbedaan tekanan ( $\Delta P$ ) memengaruhi laju aliran darah ( $V$ ). Laju aliran darah sangat bergantung pada jari-jari pembuluh darah karena berbanding lurus dengan pangkat empat dari RRR dalam persamaan hukum Hagen-Poiseuille. Artinya, sedikit penyempitan pembuluh (vasokonstriksi) dapat menyebabkan penurunan drastis dalam aliran darah, sedangkan pelebaran pembuluh (vasodilatasi) meningkatkan aliran darah secara signifikan. Viskositas darah ( $\eta$ ) menentukan seberapa mudah darah mengalir; peningkatan viskositas, seperti pada polisitemia atau dehidrasi, menyebabkan peningkatan resistensi aliran, sedangkan penurunan viskositas, seperti pada anemia, mengurangi hambatan tetapi juga dapat menurunkan kapasitas pengangkutan oksigen. Perbedaan tekanan darah ( $\Delta P$ ) antara arteri dan vena berfungsi sebagai pendorong utama aliran darah. Jika tekanan darah turun drastis, seperti dalam kondisi syok hipovolemik, aliran darah ke jaringan dapat terganggu. Panjang pembuluh darah ( $L$ ) juga mempengaruhi resistensi aliran darah, di mana peningkatan panjang pembuluh, seperti pada obesitas, meningkatkan hambatan dan berkontribusi terhadap hipertensi. Dengan memahami hubungan antara simbol-simbol dalam persamaan Hagen-Poiseuille dan faktor fisiologis, kita dapat memahami bagaimana tubuh mengatur aliran darah dan bagaimana gangguan dalam sistem ini dapat menyebabkan masalah kesehatan.

### c. Model Fluida Casson dan Power-Law

Model fluida Casson dan Power-Law digunakan untuk menggambarkan perilaku aliran darah dalam kondisi stenosis, yaitu penyempitan lumen arteri yang menyebabkan gangguan dalam distribusi tekanan dan kecepatan aliran darah. Dalam kondisi ini, model aliran non-Newtonian lebih sesuai karena darah menunjukkan sifat yang tidak mengikuti hukum Newton secara sempurna. (Jonuarti, 2013).

#### - Model Fluida Casson

Model Casson memperhitungkan perilaku darah sebagai fluida non-Newtonian dengan viskositas yang bergantung pada tegangan geser. Persamaan konstitutif untuk model fluida Casson dinyatakan sebagai berikut:

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{du}{dy}$$

Dimana

$\tau$  adalah tegangan geser (N/m<sup>2</sup>)

$\tau_0$  adalah tegangan geser minimum yang diperlukan untuk mengalirkan fluida (N/m<sup>2</sup>),

$\eta$  adalah viskositas fluida (Pa), dan

$\frac{du}{dy}$  adalah laju geser darah.

Pada daerah stenosis, penyempitan pembuluh meningkatkan resistansi terhadap aliran darah, menyebabkan jantung bekerja lebih keras untuk mempertahankan sirkulasi. Jika resistansi aliran meningkat, jantung harus bekerja lebih keras untuk mempertahankan sirkulasi darah yang cukup.

Resistansi aliran pada model Casson diberikan oleh:

$$\lambda = f + g \left( \frac{\delta h}{2R_0} \right) + h \left( \frac{\delta h}{2R_0} \right)^2$$

Dimana,  $f, g, h$  adalah koefisien yang bergantung pada geometri stenosis, dan  $\delta h/2R_0$  menunjukkan rasio antara tinggi stenosis terhadap radius arteri normal.

- Power-Law

Sementara itu, model Power-Law, juga dikenal sebagai hubungan Ostwald-de Waele, menggambarkan darah sebagai fluida non-Newtonian yang perilaku alirannya mengikuti hubungan eksponensial terhadap tegangan geser, yang dinyatakan sebagai:

$$\tau = m \left( \frac{du}{dy} \right)^n$$

Dimana,

$\tau$  adalah tegangan geser,

$m$  adalah konstanta kekentalan, dan

$n$  adalah eksponen yang menggambarkan sifat aliran fluida.

Jika nilai  $n$  meningkat, maka resistansi aliran juga meningkat, yang berarti darah dengan viskositas lebih tinggi memerlukan tekanan lebih besar untuk tetap mengalir. Simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi stenosis, semakin besar pula resistansi aliran darah, yang dapat menyebabkan peningkatan tekanan darah dan beban kerja jantung. Dengan memahami model Casson dan Power-Law, kita dapat menjelaskan bagaimana perubahan viskositas darah dan penyempitan pembuluh mempengaruhi dinamika sirkulasi darah, serta bagaimana kondisi patologis seperti stenosis dapat memperburuk aliran darah dalam sistem kardiovaskular.

### 3. Aplikasi Interdisipliner: Fisika dan Biologi dalam Studi Sistem Peredaran Darah

Pendekatan interdisipliner antara fisika dan biologi dalam sistem peredaran darah memungkinkan pemahaman yang lebih dalam mengenai mekanisme aliran darah dan aplikasinya dalam dunia medis serta pendidikan IPA (Siti Mardhatillah Musa *et al.*, 2024). Dalam kajian ini, pendekatan mekanika fluida diterapkan untuk menganalisis dinamika darah yang mengalir melalui pembuluh, dengan mempertimbangkan berbagai model matematis yang digunakan dalam fisika.

Studi oleh Chabibah *et al.* (2023) dan Fakhriyah *et al.* (2023) menekankan pentingnya kolaborasi antara fisika dan biologi dalam mengembangkan teknologi medis modern. Fisika membantu memahami dinamika aliran darah, sedangkan biologi memberikan konteks fisiologis yang memungkinkan interpretasi yang lebih akurat.

Beberapa aplikasi lain dari integrasi fisika dan biologi dalam sistem peredaran darah antara lain:

- **Pemantauan Aliran Darah dengan Teknologi Ultrasonografi Doppler**  
Prinsip efek Doppler, yang menjelaskan perubahan frekuensi gelombang akibat pergerakan objek, digunakan dalam Ultrasonografi Doppler (DUS) untuk mengukur kecepatan dan arah aliran darah dalam pembuluh. Teknologi ini menjadi alat penting dalam mendeteksi penyumbatan arteri atau kelainan aliran darah tanpa prosedur invasif (Saosang dan Kasman, 2021).
- **Desain Katup Jantung Buatan**  
Dalam rekayasa biomedis, simulasi aliran darah berbasis persamaan Navier-Stokes digunakan untuk merancang katup jantung buatan yang dapat meniru fungsi katup alami. Penelitian menunjukkan bahwa desain yang optimal harus mencegah turbulensi berlebih, yang dapat meningkatkan risiko pembentukan gumpalan darah (Quarteroni, 2015).
- **Deteksi Penyakit dengan Biosensor**  
Biosensor berbasis fisika memungkinkan deteksi dini penyakit kardiovaskular, seperti aterosklerosis, dengan menganalisis perubahan viskositas darah. Sensor ini bekerja berdasarkan interaksi antara medan listrik dan sifat mekanik darah, sehingga memberikan hasil yang lebih cepat dan akurat dibandingkan metode konvensional (Saosang dan Kasman, 2021).
- **Simulasi Aliran Darah untuk Prediksi Risiko Penyakit**  
Dengan bantuan komputasi berbasis fisika, model simulasi aliran darah dapat membantu dokter dalam memprediksi risiko penyakit kardiovaskular. Model ini digunakan untuk menganalisis bagaimana hipertensi, diabetes, atau obesitas dapat mempengaruhi aliran darah dan meningkatkan risiko serangan jantung atau stroke (Wibisono, Yusuf SPT., MSc., 2017).  
Perpaduan antara fisika dan biologi dalam bidang medis telah membawa perubahan besar dalam diagnosis, pengobatan, dan pencegahan penyakit peredaran darah. Namun, masih ada banyak tantangan yang perlu dijawab melalui penelitian lebih lanjut.

#### 4. Kesenjangan Penelitian (research Gap)

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan dalam memahami mekanisme aliran darah dari perspektif fisika dan biologi, masih terdapat beberapa celah penelitian yang dapat dieksplorasi lebih lanjut, seperti:

- Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Aliran Darah: Sebagian besar studi masih berfokus pada aspek internal tubuh, sedangkan pengaruh faktor lingkungan seperti suhu dan tekanan atmosfer masih kurang dieksplorasi.
- Pemodelan Numerik yang Lebih Akurat: Beberapa model aliran darah masih bersifat idealisasi dan belum sepenuhnya mencerminkan kondisi fisiologis yang kompleks, terutama pada pasien dengan gangguan kardiovaskular.
- Penggunaan AI dalam Analisis Aliran Darah: Pemanfaatan kecerdasan buatan dalam memprediksi pola aliran darah berdasarkan data pasien masih terbatas dan membutuhkan pengembangan lebih lanjut.

Dengan adanya kesenjangan ini, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengembangkan model yang lebih realistis dan aplikatif dalam dunia medis.

#### Kesimpulan

Penelitian mengenai mekanika fluida dalam sistem peredaran darah menunjukkan bahwa fisika memainkan peran penting dalam memahami dinamika aliran darah, mulai dari penggunaan persamaan Navier-Stokes, hukum Hagen-Poiseuille, hingga model fluida kompleks seperti Casson dan Power-Law. Integrasi antara fisika dan biologi telah menghasilkan berbagai aplikasi dalam dunia medis, termasuk teknologi ultrasonografi Doppler, desain katup jantung buatan, biosensor untuk deteksi penyakit, serta pemodelan numerik untuk prediksi risiko kardiovaskular. Meskipun telah banyak kemajuan dalam bidang ini, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang perlu dieksplorasi lebih lanjut, seperti pengaruh faktor lingkungan terhadap aliran darah, pemodelan numerik yang lebih akurat, pemanfaatan AI dalam analisis aliran darah, serta integrasi model eksperimental dan simulasi komputasi. Dengan mengisi celah ini, diharapkan penelitian di masa depan dapat memberikan wawasan yang lebih dalam tentang mekanisme peredaran darah serta meningkatkan efektivitas dalam diagnosis, pencegahan, dan pengobatan penyakit kardiovaskular. Sebagai kesimpulan, pendekatan interdisipliner antara fisika dan biologi dalam memahami sistem peredaran darah tidak hanya memperkaya ilmu pengetahuan, tetapi juga memiliki dampak besar dalam pengembangan teknologi medis dan peningkatan layanan kesehatan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan di bidang ini sangat diperlukan untuk menjawab tantangan medis di masa depan serta menciptakan solusi inovatif bagi permasalahan kardiovaskular yang semakin kompleks.

#### Referensi

- Aini, R.N. *et al.* (2024) "Anatomi mekanika fluida viskositas dalam teori hukum stokes," 8(11), hal. 146–150.
- Arsita, S., Prihandono, B. dan Kusumastuti, N. (2024) "Pemodelan fluks pada aliran darah," 13(4), hal. 523–532.
- Chabibah, N. *et al.* (2023) *Buku Ajar Ilmu Biomedik Dasar*. Kota Jambi: Sonpedia Publishing Indonesia.
- Fakhriyah, F. *et al.* (2023) *Bahan Ajar Biofisika Berbasis Literasi Sains*. Jawa Tengah: PT Nasya Expanding Management.
- Hardani *et al.* (2020) *Buku Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif, Revista Brasileira de Linguística Aplicada*. Yogyakarta: CV. Pustaka Ilmu Group Yogyakarta.
- Hudoarma, F.M., Gunawan, P.H. dan Rohmawati, A.A. (2018) "Analisis Aliran Darah Dalam Pembuluh Arteri Menggunakan Persamaan Navier-Stokes Dan Metode Lattice-Boltzmann," *E-Jurnal Matematika*, 7(2), hal. 102. Tersedia pada: <https://doi.org/10.24843/mtk.2018.v07.i02.p191>.
- Irawati, L. (2015) "Viskositas Darah Dan Aspek Medisnya," *Majalah Kedokteran Andalas*, 34(2), hal. 102. Tersedia pada: <https://doi.org/10.22338/mka.v34.i2.p102-111.2010>.
- Jati, B.M.E. dan Rizkiana, A.P. (2015) "Studi Penentuan Viskositas Darah Ayam dengan Metode Aliranm Fluida di Dalam Pipa Kapiler Berbasis Hukum Poisson," *Jurnal Fisika Indonesia*, 19(57), hal. 43–47.
- Jonuarti, R. (2013) "Analisis Aliran Darah dalam Stenosis Arteri Menggunakan Model Fluida Casson dan Power-Law," *Jurnal Ilmu Dasar*, 14(2), hal. 73–78. Tersedia pada: <http://jurnal.unej.ac.id/index.php/JID>.
- Julianti, Fitriasia, A. dan Fatimah, S. (2024) "Taksonomi Ilmu Pengetahuan: Ilmu Itu Beraneka Ragam Spesialisasi dan Disiplin Interdisipliner," *Cendekia: Jurnal Ilmu Pengetahuan*, 4(4), hal. 623–632.
- Okimustava, O. *et al.* (2020) "Studi hukum Hagen-Poiseuille dalam menentukan diameter terbaik pipa kapiler pada eksperimen penentuan viskositas zat cair," *Berkala Fisika Indonesia : Jurnal Ilmiah Fisika, Pembelajaran dan Aplikasinya*, 11(1), hal. 18. Tersedia pada: <https://doi.org/10.12928/bfi->

jifpa.v11i1.20333.

- Quarteroni, A. (2015) *Modeling the heart and the circulatory system*. New york: Springer. Tersedia pada: <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=622qCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=fluid+mechanics+in+the+circulatory+system&ots=uV3ObJqer7&sig=Jq5TLtX38uymkbJS-3mVNicGXA>.
- Rahmadina (2024) "Pembelajaran Biologi Melalui Pendekatan Interdisipliner dalam Mengatasi Kesenjangan di Era Teknologi Digital," in *Optimasi Keterampilan Pembelajaran Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*. Tulungagung: Akademia Pustaka, hal. 127–131. Tersedia pada: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13855554>.
- Saosang, K. dan Kasman, K. (2021) "Analisis Fisis Deteksi Kolesterol Darah Berbasis Biosensor," *Gravitasi*, 20(2), hal. 51–54. Tersedia pada: <https://doi.org/10.22487/gravitasi.v20i2.15735>.
- Silitonga, A. *et al.* (2024) "Analisis Penerapan Mekanika Fluida pada Sistem Peredaran Darah," *SAKOLA: Journal of ...* [Preprint]. Tersedia pada: <http://rayyanjournal.com/index.php/sakola/article/view/2698>.
- Siti Mardhatillah Musa *et al.* (2024) *Fisika Kesehatan*. Jawa Tengah: PT Nasya Expanding Management.
- Wibisono, Yusuf SPT., MSc., P.. (2017) *Biomaterial dan Bioproduk*. Universitas Brawijaya Press.
- Wilujeng, I. (2018) *IPA Terintegrasi Dan Pembelajarannya*. Yogyakarta: UNY Press.