

Contents list available at [Sinta](https://sinta)

## ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin &amp; Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>

### Analisis Hidrodinamika dan Karakteristik *Pressure drop* pada Photobioreaktor Flat-Panel Sistem *Closed-loop* Menggunakan Computational Fluid Dynamics

Alif Nur Hidayat<sup>1\*</sup>, Boni Sena<sup>2</sup>, Siswadi<sup>3</sup>, Aisyah Agustin<sup>4</sup>, Putri Aprellya<sup>5</sup>, Pratikara Herlambang<sup>6</sup><sup>1,2</sup>Center of Education and Research Automotive Manufacturing Industry (CERAMI), Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jalan H.S. Ronggowaluyo, telukjambe Timur, Karawang 41361, Jawa Barat, Indonesia<sup>1,2,4,5,6</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jalan H.S. Ronggowaluyo, telukjambe Timur, Karawang 41361, Jawa Barat, Indonesia<sup>3</sup>Program Studi Statistika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jalan H.S. Ronggowaluyo, telukjambe Timur, Karawang 41361, Jawa Barat, Indonesia

#### ARTICLE INFO

##### Keywords:

*Computational Fluid Dynamics; Flat-Panel Photobioreaktor; Hydrodynamics; Pressure drop; Flow Distribution*

#### ABSTRACT

*Hydrodynamic performance plays a critical role in determining flow distribution and pressure losses in flat-panel photobioreaktor systems. This study investigates the hydrodynamic characteristics of a closed-loop flat-panel photobioreaktor using a three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) approach. A steady-state, incompressible, single-phase model was applied using water as the working fluid. The laminar assumption is justified by Reynolds numbers ranging from 299 to 2994, indicating laminar to early transitional flow regimes. Inlet velocities of 0.01–0.1 m/s were used to analyze velocity distribution, streamline patterns, and pressure drop behavior. The results show that pressure drop increases from 0.01008 Pa to 0.16170 Pa as inlet velocity increases tenfold, following a near-linear trend ( $R^2 \approx 0.99$ ). The maximum velocity reaches 0.3504 m/s, approximately 3.5 times the inlet velocity. Streamline analysis reveals a stable single-loop circulation with recirculation zones in the lower panel region. The pressure loss coefficient decreases from 0.202 to 0.0324 with increasing velocity, indicating reduced relative energy loss. These findings highlight a trade-off between flow circulation and energy*

\*Corresponding author: [alifnurhdyt666@gmail.com](mailto:alifnurhdyt666@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i2.11250>

Received 6 March 2026; Received in revised form 27 April 2026; Accepted 5 May 2026

Available online 1 September 2026

## Pendahuluan

*Flat-panel* photobioreaktor merupakan salah satu konfigurasi reaktor yang banyak digunakan dalam sistem kultivasi mikroalga karena memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, sehingga mampu meningkatkan distribusi cahaya dan efisiensi fotosintesis [1], [2], [6]. Selain itu, sistem *closed-loop* memberikan kontrol yang lebih baik terhadap kondisi operasi, seperti aliran fluida, distribusi nutrisi, dan stabilitas lingkungan dibandingkan sistem terbuka [1].

Namun demikian, performa photobioreaktor tidak hanya ditentukan oleh aspek biologis, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik hidrodinamika aliran fluida di dalam sistem. Distribusi aliran yang tidak merata dapat menyebabkan terbentuknya zona stagnan, ketidakhomogenan distribusi nutrisi, serta penurunan efisiensi transfer massa [14]. Di sisi lain, peningkatan kecepatan aliran untuk memperbaiki pencampuran seringkali diikuti oleh peningkatan kehilangan tekanan (*pressure drop*), yang berdampak langsung terhadap kebutuhan energi pompa. Oleh karena itu, terdapat *trade-off* antara peningkatan sirkulasi aliran dan efisiensi energi operasional yang perlu dianalisis secara kuantitatif.

Pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah banyak digunakan untuk menganalisis karakteristik aliran dalam photobioreaktor karena mampu memberikan informasi detail mengenai distribusi kecepatan, pola aliran, dan kehilangan tekanan tanpa memerlukan eksperimen yang kompleks [8], [13], [14]. Beberapa studi sebelumnya telah mengkaji performa hidrodinamika pada berbagai konfigurasi photobioreaktor, seperti tubular, *bubble column*, dan *flat-panel systems* [3], [4], [7],

[11]. Loomba et al. [18] menganalisis pengaruh parameter operasi terhadap performa reaktor, sedangkan Banerjee et al. [6] menunjukkan bahwa distribusi kecepatan memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi kultivasi mikroalga. Selain itu, Besagni et al. [11] menggunakan CFD untuk mengevaluasi pola aliran dalam sistem skala laboratorium.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada fenomena *multiphase flow* atau aspek biologis seperti pertumbuhan mikroalga [7], [12]. Studi yang secara khusus menganalisis perilaku hidrodinamika aliran satu fasa pada sistem *flat-panel* photobioreaktor dengan konfigurasi *closed-loop* menggunakan pendekatan CFD tiga dimensi masih relatif terbatas. Selain itu, kajian yang mengintegrasikan analisis distribusi kecepatan, pola sirkulasi aliran, kehilangan tekanan (*pressure drop*), serta parameter tak berdimensi seperti bilangan Reynolds dan koefisien kehilangan tekanan dalam satu kerangka analisis yang komprehensif masih belum banyak dilakukan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dirumuskan dalam beberapa pertanyaan penelitian, yaitu: (1) bagaimana pengaruh variasi kecepatan *inlet* terhadap distribusi kecepatan dan pola sirkulasi aliran di dalam photobioreaktor, serta (2) bagaimana karakteristik *pressure drop* dan kehilangan energi dalam sistem *closed-loop* pada berbagai kondisi operasi. Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik hidrodinamika aliran fluida dalam *flat-panel* photobioreaktor menggunakan simulasi CFD tiga dimensi, dengan fokus pada distribusi kecepatan, pola aliran, *pressure drop*, serta bilangan Reynolds.

Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada analisis kuantitatif yang

terintegrasi antara distribusi kecepatan, struktur aliran (*streamline*), *pressure drop*, bilangan Reynolds, serta koefisien kehilangan tekanan pada sistem flat-panel photobioreaktor dengan konfigurasi *closed-loop*. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara parameter operasi dan performa hidrodinamika, yang belum banyak dibahas secara simultan dalam penelitian sebelumnya.

## Metode Penelitian

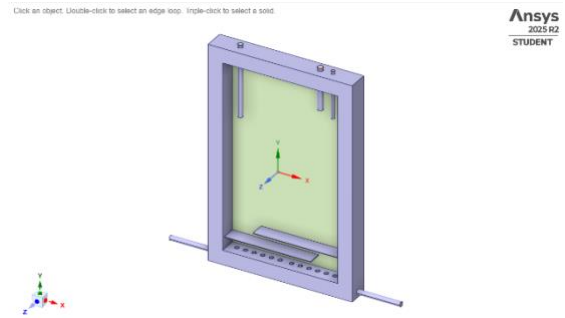
### Geometri dan Domain Komputasi.

Geometri yang digunakan dalam penelitian ini merepresentasikan sistem flat-panel photobioreaktor dengan konfigurasi *closed-loop* circulation yang terdiri dari satu *inlet* dan satu *outlet*. Konfigurasi ini dipilih karena banyak digunakan dalam aplikasi kultivasi mikroalga skala laboratorium hingga pilot-scale serta mampu menghasilkan distribusi aliran yang relatif seragam dan mudah dikontrol [1], [9]. Dimensi geometri ditentukan berdasarkan rasio desain yang umum digunakan pada sistem *flat-panel photobioreaktor* sebagaimana dilaporkan dalam literatur [6], [10]. Parameter utama geometri ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter Geometri Photobioreaktor Flat-Panel

Parameter	Nilai
Tinggi volume reaktor	1300 mm
Lebar volume reaktor	800 mm
Ketebalan volume reaktor	100 mm
Diameter <i>inlet</i>	30 mm
Diameter <i>outlet</i>	30 mm

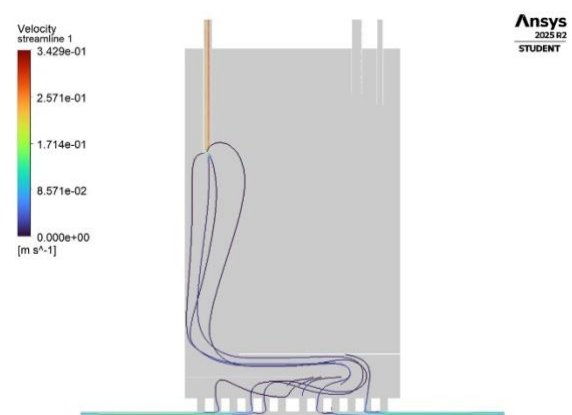
Dimensi volume fluida sebesar 1.3 m × 0.8 m × 0.1 m dipilih untuk mempertahankan rasio aspek panel yang masih berada dalam rentang desain photobioreaktor panel datar, sehingga memungkinkan terbentuknya sirkulasi internal yang stabil tanpa menghasilkan gradien tekanan yang berlebihan [1], [10].



Gambar 1 Geometri dan domain komputasi fluida pada flat-panel photobioreaktor.

Domain komputasi didefinisikan sebagai volume fluida internal tanpa mempertimbangkan struktur padat dinding reaktor, dengan asumsi dinding bersifat tidak tembus (*impermeable wall*) dan memenuhi kondisi *no-slip boundary condition*. Model geometri dibuat menggunakan perangkat lunak CAD dan kemudian diimpor ke ANSYS untuk proses diskretisasi numerik.

Konfigurasi sistem bersifat *closed-loop*, di mana fluida masuk melalui *inlet* dan mengalir ke bawah sepanjang panel akibat momentum aliran, kemudian membentuk sirkulasi internal sebelum keluar melalui *outlet*. Pola aliran ini menghasilkan satu loop sirkulasi utama yang menjadi karakteristik sistem *closed-loop* photobioreaktor.



Gambar 2 Visualisasi pola aliran (*streamline*) dan sirkulasi fluida dalam sistem *closed-loop* flat-panel photobioreaktor.

Gambar 2 menunjukkan visualisasi pola aliran fluida berdasarkan hasil simulasi CFD yang merepresentasikan sistem *closed-loop*.

Fluida masuk melalui *inlet*, kemudian mengalir ke bawah sepanjang panel dan membentuk sirkulasi internal sebelum keluar melalui *outlet*. Pola *streamline* memperlihatkan terbentuknya satu sirkulasi dominan (*single-loop circulation*) serta zona resirkulasi (*recirculation zone*) di bagian bawah reaktor, yang berperan dalam meningkatkan pencampuran fluida di dalam sistem.

Kecepatan *inlet* maksimum sebesar 0.1 m/s dipilih berdasarkan rentang operasi sistem photobioreaktor tertutup yang dilaporkan dalam studi eksperimental dan numerik sebelumnya [11]. Untuk mengevaluasi sensitivitas karakteristik hidrodinamika terhadap variasi debit aliran, kecepatan *inlet* divariasikan menjadi 0.05 m/s, 0.03 m/s, dan 0.01 m/s. Variasi ini tetap berada dalam rentang aliran laminar dan kondisi operasi yang realistis untuk sistem panel datar [12]. Pemilihan variasi kecepatan tersebut bertujuan untuk menganalisis pengaruh perubahan momentum fluida terhadap distribusi kecepatan, pola sirkulasi, dan kehilangan tekanan tanpa mengubah konfigurasi geometri sistem.

**Pemodelan CFD dan Kondisi Batas.** Simulasi dilakukan menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* tiga dimensi berbasis metode *finite volume* pada perangkat lunak ANSYS Fluent. Fluida kerja yang digunakan adalah air dengan sifat fisis konstan, yaitu massa jenis  $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas dinamik  $\mu = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Aliran diasumsikan sebagai satu fasa (*single-phase*), inkompresibel, dan isothermal.

Model aliran yang digunakan adalah model laminar dengan asumsi kondisi *steady-state*. Pemilihan model laminar didasarkan pada analisis bilangan Reynolds yang dihitung menggunakan diameter *inlet* sebagai panjang karakteristik:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

dengan  $V$  adalah kecepatan *inlet* dan  $D$  adalah diameter *inlet*. Berdasarkan variasi kecepatan *inlet* yang digunakan (0.01–0.1 m/s), diperoleh rentang bilangan Reynolds sebesar 299–2994. Nilai ini menunjukkan bahwa aliran berada dalam rejim laminar hingga transisi awal, sehingga efek turbulensi belum dominan dan model laminar dinyatakan sesuai untuk merepresentasikan karakteristik aliran dalam sistem yang dianalisis [11], [12].

Persamaan yang diselesaikan dalam simulasi ini meliputi persamaan kontinuitas dan persamaan momentum (Navier–Stokes) untuk fluida inkompresibel. Persamaan kontinuitas dinyatakan sebagai:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

Sedangkan persamaan momentum dinyatakan sebagai:

$$\rho(V \cdot \nabla)V = -\nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (3)$$

dengan  $V$  adalah vektor kecepatan dan  $P$  adalah tekanan fluida. Kedua persamaan ini digunakan untuk memprediksi distribusi kecepatan dan tekanan dalam domain komputasi.

Kondisi batas yang diterapkan dalam simulasi ditentukan untuk merepresentasikan sistem *closed-loop* flat-panel photobioreaktor secara realistis. Ringkasan kondisi batas yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Kondisi batas simulasi

Boundary	Tipe Boundary	Nilai
<i>Inlet</i>	<i>Velocity inlet</i>	0.01; 0.03; 0.05; 0.1 m/s
<i>Outlet</i>	<i>Pressure outlet</i>	0 Pa ( <i>gauge pressure</i> )
<i>Wall</i>	<i>Wall</i>	<i>No-slip, impermeable</i>

Pada sisi *inlet*, kondisi batas didefinisikan sebagai *velocity inlet* dengan variasi

kecepatan sebesar 0.01, 0.03, 0.05, dan 0.1 m/s. Variasi ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh debit aliran terhadap distribusi kecepatan, pola sirkulasi, dan kehilangan tekanan dalam sistem. Nilai maksimum 0.1 m/s dipilih berdasarkan rentang operasi sistem photobioreaktor tertutup yang dilaporkan dalam literatur [11], sedangkan nilai yang lebih rendah digunakan untuk mengamati perubahan karakteristik aliran pada kondisi laminar.

Pada sisi *outlet*, kondisi batas didefinisikan sebagai *pressure outlet* dengan tekanan referensi sebesar 0 Pa (gauge pressure). Kondisi ini digunakan untuk merepresentasikan pelepasan fluida ke lingkungan referensi tanpa hambatan tambahan, sehingga memungkinkan aliran berkembang secara alami berdasarkan perbedaan tekanan dalam sistem.

Seluruh dinding reaktor dimodelkan sebagai wall boundary dengan kondisi *no-slip*, di mana kecepatan fluida pada dinding bernilai nol. Selain itu, dinding diasumsikan bersifat tidak tembus (*impermeable*), sehingga tidak terjadi perpindahan massa melalui batas domain.

Pemilihan kondisi batas tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa aliran fluida dalam simulasi sepenuhnya dikontrol oleh variasi kecepatan *inlet* dan geometri sistem, sehingga karakteristik hidrodinamika yang diperoleh dapat dianalisis secara konsisten dan representatif terhadap kondisi operasi nyata.

Untuk mengevaluasi karakteristik hidrodinamika sistem, parameter utama yang dianalisis meliputi distribusi kecepatan, pola aliran (*streamline*), serta kehilangan tekanan (*pressure drop*). Kehilangan tekanan dihitung sebagai selisih tekanan antara *inlet* dan *outlet*:

$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \quad (4)$$

Selain itu, digunakan koefisien kehilangan tekanan (K) sebagai parameter tak berdimensi yang dinyatakan sebagai:

$$K = \Delta P / (\frac{1}{2} \rho V^2) \quad (5)$$

Parameter-parameter tersebut digunakan untuk menganalisis hubungan antara variasi kecepatan *inlet* terhadap performa hidrodinamika sistem secara kuantitatif.

### Diskretisasi Numerik dan Validasi.

Domain komputasi didiskretisasi menggunakan mesh tiga dimensi berbasis elemen tak beraturan yang disesuaikan dengan geometri flat-panel photobioreaktor. Untuk meningkatkan akurasi di daerah dengan gradien kecepatan tinggi, dilakukan local refinement di sekitar *inlet*, *outlet*, dan area dekat dinding.

Kualitas mesh dievaluasi menggunakan parameter skewness dan orthogonal quality. Mesh yang digunakan memenuhi kriteria umum CFD, yaitu skewness < 0.85 dan orthogonal quality > 0.2, sehingga layak digunakan untuk simulasi numerik.

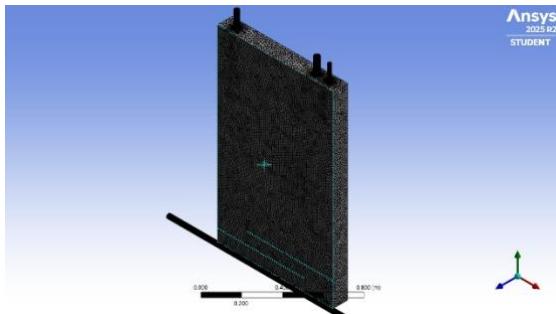
Uji independensi grid dilakukan untuk memastikan bahwa solusi numerik tidak bergantung pada ukuran mesh. Tiga variasi ukuran elemen global digunakan, yaitu 0.04 m, 0.03 m, dan 0.015 m. Perbandingan hasil ditinjau berdasarkan nilai kecepatan maksimum dan tekanan pada *inlet*.

Tabel 3 Variasi Ukuran Elemen pada Uji Independensi Grid

Ukuran elemen (m)	Jumlah elemen	keterangan
0,04	394679	Mesh Kasar
0,03	404477	Mesh Menengah
0,015	534568	Mesh Halus

Hasil menunjukkan bahwa perbedaan antara mesh menengah dan mesh halus kurang dari 1%, sehingga solusi dinyatakan telah mencapai kondisi *grid-independent*. Oleh karena itu, mesh dengan ukuran elemen

0.015 m dipilih sebagai mesh akhir untuk seluruh simulasi.



Gambar 3 Visualisasi mesh dengan ukuran elemen 0,015 m

Gambar 3 menunjukkan distribusi elemen mesh pada domain komputasi, dengan kepadatan elemen yang lebih tinggi di sekitar *inlet* dan dinding untuk menangkap gradien aliran secara lebih akurat.

Simulasi dilakukan menggunakan pressure-based solver dengan pendekatan *steady-state*. Kopling tekanan–kecepatan menggunakan metode SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Skema diskretisasi spasial menggunakan second-order upwind untuk meningkatkan akurasi perhitungan.

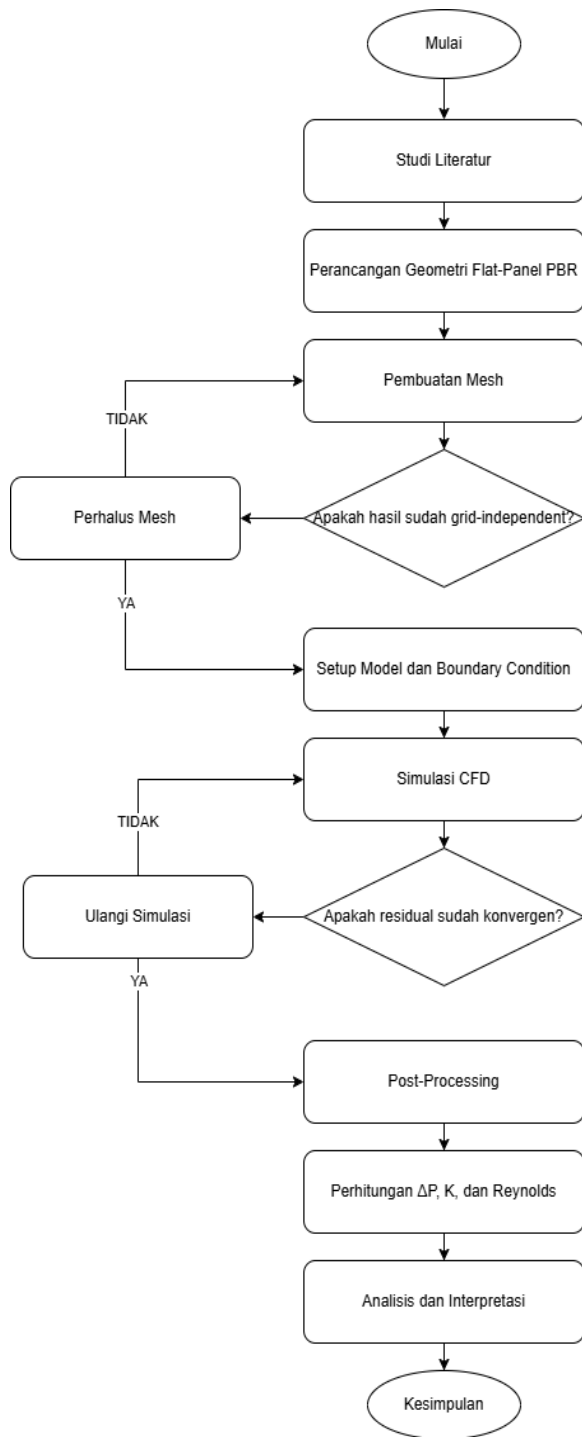
Kriteria konvergensi ditentukan berdasarkan nilai residual, yaitu  $< 10^{-3}$  untuk persamaan kontinuitas dan  $< 10^{-6}$  untuk persamaan momentum. Selain itu, konvergensi juga dipantau melalui kestabilan nilai kecepatan maksimum dan tekanan *inlet* terhadap iterasi.

Pendekatan ini memastikan bahwa hasil simulasi yang diperoleh bersifat stabil, konvergen, dan tidak bergantung pada ukuran mesh, sehingga dapat digunakan untuk analisis hidrodinamika secara kuantitatif.

Untuk memastikan alur tersusun secara sistematis dan terstruktur, tahapan penelitian dirangkum dalam bentuk diagram alir, diagram menggambarkan proses mulai dari perancangan geometri, pemodelan,

numerik, proses simulasi, validasi numerik, hingga analisis hasil.

Penyusunan alur penelitian yang sistematis merupakan praktik umum dalam studi berbasis CFD untuk menjamin konsistensi antara tahapan pemodelan, verifikasi numerik, dan interpretasi hasil [7], [14], [15].



Gambar 4 Diagram alir penelitian

## Hasil dan Pembahasan

### Konvergensi dan Validasi Numerik.

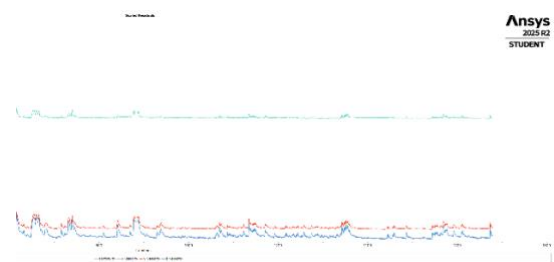
Evaluasi konvergensi dilakukan untuk memastikan bahwa solusi numerik yang diperoleh telah mencapai kondisi stabil dan tidak mengalami perubahan signifikan terhadap iterasi. Simulasi dijalankan menggunakan *pressure-based solver* dengan

pendekatan *steady-state* dan model aliran laminar. Kriteria konvergensi ditetapkan berdasarkan nilai residual, yaitu kurang dari  $10^{-3}$  untuk persamaan kontinuitas dan kurang dari  $10^{-6}$  untuk persamaan momentum, yang merupakan standar umum dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* [3], [16]

Gambar 5 menunjukkan grafik konvergensi residual untuk variasi kecepatan *inlet* sebesar 0,1 m/s. Terlihat bahwa residual mengalami penurunan secara eksponensial pada tahap awal iterasi, kemudian mencapai kondisi stabil setelah sekitar 800 iterasi. Tidak ditemukan fluktuasi atau osilasi residual yang signifikan pada tahap akhir iterasi, yang menunjukkan bahwa solusi telah mencapai kondisi *numerically converged*. Hal ini menandakan bahwa hasil simulasi telah cukup stabil untuk dianalisis lebih lanjut.



Gambar 5 Grafik Konvergensi Residual pada Kecepatan Inlet 0,1 m/s 1-750 iterasi



Gambar 6 Grafik Konvergensi Residual pada Kecepatan Inlet 0,1 m/s 750-1500 iterasi

Selain konvergensi residual, dilakukan uji independensi grid untuk memastikan hasil tidak bergantung pada ukuran elemen mesh. Tiga ukuran elemen global digunakan, yaitu 0,04 m, 0,03 m dan 0,015 m.

Tabel 4 Uji independensi grid

Ukuran elemen	Tekanan <i>inlet</i> (Pa)	Kecepatan maksimum (m/s)
0,04	0,16149	0,34883
0,03	0,16184	0,35058
0,015	0,16170	0,35041

Berdasarkan Tabel 4, terlihat bahwa perbedaan hasil antara mesh menengah (0,03 m) dan mesh halus (0,015 m) sangat kecil. Error relatif tekanan *inlet* dihitung sebesar 0,086%, sedangkan error relatif kecepatan maksimum sebesar 0,048%. Kedua nilai tersebut berada di bawah batas toleransi 1%, sehingga dapat disimpulkan bahwa solusi numerik telah mencapai kondisi *grid-independent*.

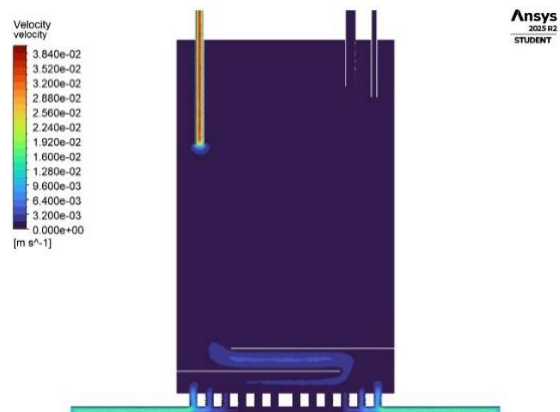
Pemilihan mesh akhir dilakukan pada ukuran elemen 0,015 m karena memberikan hasil yang paling stabil dengan tingkat akurasi tinggi, meskipun membutuhkan waktu komputasi yang lebih besar dibandingkan mesh yang lebih kasar. Namun, peningkatan akurasi ini penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi mencerminkan fenomena fisik yang sebenarnya.

Secara keseluruhan, validasi numerik dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu konvergensi residual dan independensi grid. Kedua hasil tersebut menunjukkan bahwa simulasi telah memenuhi kriteria kestabilan dan akurasi numerik. Dengan demikian, variasi hasil yang diperoleh pada tahap selanjutnya dapat dikaitkan secara langsung dengan pengaruh parameter fisik, khususnya variasi kecepatan *inlet*, dan bukan disebabkan oleh kesalahan numerik.

### Distribusi Kecepatan dan Struktur

**Sirkulasi Internal** Distribusi kecepatan dianalisis menggunakan kontur kecepatan dan visualisasi *streamline* pada bidang tengah domain untuk setiap variasi kecepatan *inlet* (0,01; 0,03; 0,05; dan 0,1

m/s). Hasil visualisasi kontur kecepatan ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 7 Kontur Distribusi Kecepatan pada Variasi Kecepatan *Inlet*

Pada kecepatan *inlet* 0,01 m/s, distribusi kecepatan relatif homogen dengan gradien yang rendah. Zona berkecepatan tinggi hanya terlokalisasi di sekitar *inlet* sebelum mengalami difusi momentum ke seluruh volume reaktor. Kondisi ini menunjukkan dominasi gaya viskos yang menyebabkan aliran cenderung stabil dan teredam.

Ketika kecepatan *inlet* ditingkatkan menjadi 0,05 m/s, gradien kecepatan meningkat secara signifikan terutama pada jalur utama aliran menuju bagian bawah reaktor. Distribusi kecepatan mulai menunjukkan terbentuknya pola sirkulasi internal yang lebih jelas akibat peningkatan interaksi antara momentum fluida dan geometri sistem.

Pada kecepatan *inlet* 0,1 m/s, terjadi percepatan lokal yang signifikan di sekitar *inlet* akibat efek kontraksi dan redistribusi momentum fluida. Kecepatan maksimum yang diperoleh dari hasil simulasi adalah sebesar 0,3504 m/s. Nilai ini menunjukkan bahwa fluida mengalami akselerasi lokal hingga sekitar 3,5 kali kecepatan *inlet*, yang merupakan karakteristik umum aliran dalam sistem saluran tertutup dengan satu nozzle masuk [7].

Untuk mengevaluasi pengaruh variasi kecepatan *inlet* terhadap kecepatan maksimum dalam domain, dilakukan

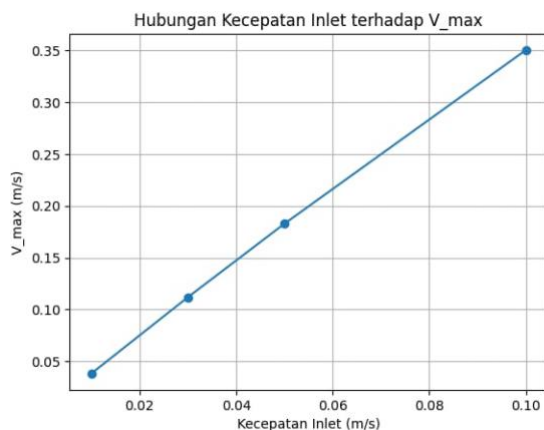
perbandingan nilai kecepatan maksimum pada setiap variasi.

Tabel 5 Kecepatan maksimum pada variasi kecepatan inlet

Kecepatan Inlet (m/s)	V <sub>max</sub> (m/s)
0,01	0,03815
0,03	0,11183
0,05	0,18277
0,1	0,35041

Berdasarkan Tabel 5, terlihat bahwa kecepatan maksimum meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan inlet dengan kecenderungan hampir linear. Rasio antara kecepatan maksimum dan kecepatan inlet berada pada kisaran 3,5–3,8, yang menunjukkan bahwa fenomena akselerasi internal relatif konstan dalam rentang operasi yang dianalisis.

Hubungan antara kecepatan inlet dan kecepatan maksimum ditunjukkan pada Gambar 7.



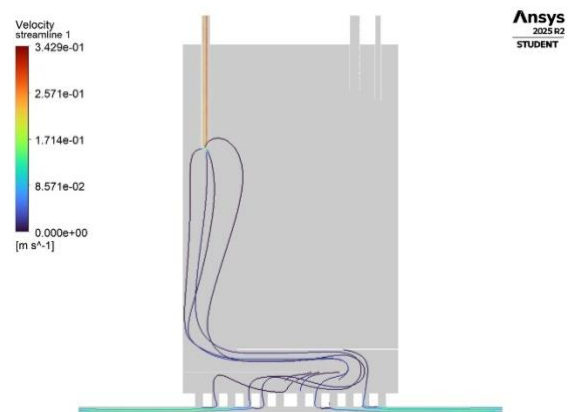
Gambar 8 Grafik Hubungan Kecepatan Inlet dan kecepatan Maksimum

Gambar 8 menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan inlet menghasilkan peningkatan kecepatan maksimum secara hampir linear. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi momentum fluida dalam sistem meningkat secara proporsional tanpa menyebabkan perubahan signifikan pada struktur pola aliran. Tren ini konsisten dengan

karakteristik aliran laminar pada sistem dengan rasio aspek tinggi [3].

Selain kecepatan maksimum, distribusi kecepatan minimum juga diamati pada daerah dekat dinding dan zona resirkulasi. Nilai kecepatan minimum mendekati nol ( $V \approx 0$  m/s) akibat kondisi *no-slip* pada dinding, di mana fluida mengalami hambatan viskos yang menyebabkan penurunan kecepatan secara signifikan.

Pola aliran dianalisis lebih lanjut menggunakan visualisasi *streamline* untuk memahami struktur sirkulasi internal dalam sistem.



Gambar 9 Visualisasi Streamline pada Variasi Kecepatan Inlet

Gambar 9 menunjukkan bahwa aliran fluida membentuk satu sirkulasi dominan (*single-loop circulation*). Pada kecepatan inlet rendah (0,01 m/s), zona resirkulasi (*recirculation zone*) relatif kecil dan terbatas di bagian bawah reaktor. Seiring peningkatan kecepatan inlet, zona tersebut menjadi lebih luas dan intens, yang menunjukkan peningkatan interaksi antar lapisan aliran.

Pembentukan zona resirkulasi disebabkan oleh perubahan arah aliran di bagian bawah reaktor serta interaksi antara gaya inersia dan gaya viskos. Secara fisik, gaya inersia berbanding lurus dengan  $\rho V^2$ , sedangkan gaya viskos berbanding lurus dengan  $\mu V$ . Pada kecepatan yang lebih tinggi,

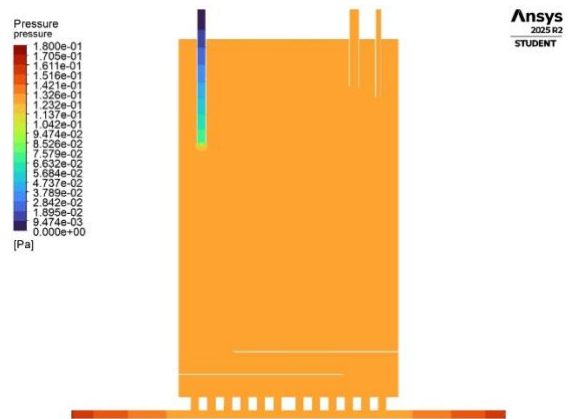
peningkatan gaya inersia lebih dominan dibandingkan gaya viskos, sehingga aliran cenderung mempertahankan arah geraknya lebih lama sebelum dibelokkan oleh gradien tekanan.

Zona resirkulasi yang terbentuk ditandai oleh perubahan arah *streamline*, penurunan kecepatan lokal, serta peningkatan waktu tinggal (*residence time*). Dari sudut pandang rekayasa, kondisi ini memberikan dua implikasi utama. Pertama, peningkatan *residence time* dapat meningkatkan homogenitas pencampuran dan distribusi nutrisi dalam sistem *photobioreaktor*. Kedua, peningkatan intensitas sirkulasi juga berpotensi meningkatkan disipasi energi akibat gesekan viskos, yang berkontribusi terhadap kehilangan tekanan dalam sistem [16].

Secara keseluruhan, peningkatan kecepatan *inlet* memperkuat struktur sirkulasi internal tanpa menyebabkan instabilitas aliran yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih beroperasi dalam karakteristik aliran laminar hingga transisi ringan, di mana pola aliran tetap stabil, terkontrol, dan dapat diprediksi.

**Analisis Kehilangan Tekanan ( $\Delta P$ ) dan Distribusi Tekanan.** Distribusi tekanan dianalisis menggunakan kontur tekanan statik pada bidang tengah domain untuk setiap variasi kecepatan *inlet*. Hasil visualisasi ditunjukkan pada Gambar 10.

Gambar 10 menunjukkan bahwa tekanan maksimum terjadi pada daerah *inlet* dan menurun secara bertahap menuju *outlet*. Pola ini konsisten untuk seluruh variasi kecepatan, namun dengan gradien tekanan yang semakin tajam seiring peningkatan kecepatan *inlet*. Pada kecepatan 0,01 m/s, distribusi tekanan relatif landai, sedangkan pada 0,1 m/s terlihat gradien tekanan yang signifikan terutama di daerah masuk dan perubahan arah aliran.



Gambar 10 Kontur Distribusi Tekanan pada Variasi Kecepatan Inlet

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui persamaan momentum (*Navier–Stokes*), di mana komponen gradien tekanan ( $-\nabla P$ ) berperan sebagai gaya pendorong untuk menyeimbangkan efek gaya viskos. Peningkatan kecepatan *inlet* menyebabkan peningkatan komponen inersia ( $\rho V^2$ ), sehingga diperlukan gradien tekanan yang lebih besar untuk mempertahankan keseimbangan momentum aliran [17].

Kehilangan tekanan ( $\Delta P$ ) dihitung sebagai selisih tekanan rata-rata antara *inlet* dan *outlet*, yang dinyatakan sebagai:  $\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet}$

Karena tekanan *outlet* ditetapkan sebesar 0 Pa (*gauge pressure*), maka  $\Delta P$  secara langsung sama dengan tekanan pada *inlet*. Nilai  $\Delta P$  untuk setiap variasi kecepatan *inlet* ditunjukkan pada Tabel 6.

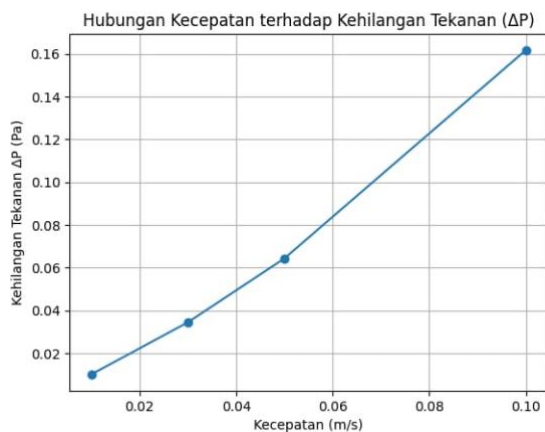
Tabel 6 Kehilangan Tekanan pada Variasi Kecepatan Inlet

Kecepatan <i>inlet</i> (m/s)	$\Delta P$ (Pa)
0,01	0,01008481
0,03	0,03444641
0,05	0,06432413
0,1	0,16170271

Berdasarkan Tabel 6, terlihat bahwa peningkatan kecepatan *inlet* dari 0,01 m/s

menjadi 0,1 m/s (meningkat 10 kali) menghasilkan peningkatan kehilangan tekanan dari 0,01008 Pa menjadi 0,16170 Pa, atau meningkat sekitar 16 kali. Hal ini menunjukkan bahwa  $\Delta P$  meningkat lebih cepat dibandingkan peningkatan linear sempurna, namun belum mencapai pola kuadratik penuh.

Hubungan antara kecepatan *inlet* dan kehilangan tekanan ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 11 Grafik  $\Delta P$  vs Kecepatan Inlet

Hasil regresi linear terhadap data menunjukkan hubungan:  $\Delta P = 1,58V - 0,004$  dengan koefisien determinasi ( $R^2 \approx 0,99$ )

Nilai  $R^2$  yang mendekati 1 menunjukkan bahwa hubungan antara kecepatan *inlet* dan kehilangan tekanan bersifat hampir linear. Secara teoritis, pada aliran laminar dalam saluran tertutup, kehilangan tekanan berbanding lurus terhadap kecepatan aliran ( $\Delta P \propto V$ ), sedangkan pada aliran turbulen umumnya mengikuti hubungan kuadratik ( $\Delta P \propto V^2$ ). Oleh karena itu, hasil simulasi ini konsisten dengan karakteristik aliran laminar [13], [18].

Secara energi, kehilangan tekanan berkaitan langsung dengan kebutuhan daya pompa yang dinyatakan sebagai:  $P_{\text{hyd}} = Q \cdot \Delta P$

dengan  $Q$  adalah debit volumetrik. Karena  $Q$  sebanding dengan kecepatan ( $Q = A \cdot V$ ), maka:

$$P_{\text{hyd}} \propto V \cdot \Delta P$$

Dengan  $\Delta P$  yang meningkat mendekati linear terhadap  $V$ , maka daya hidrolik pompa meningkat secara kuadratik terhadap kecepatan ( $P_{\text{hyd}} \propto V^2$ ). Hal ini menunjukkan adanya trade-off antara peningkatan sirkulasi aliran dan konsumsi energi sistem.

Secara keseluruhan, peningkatan kecepatan *inlet* menghasilkan peningkatan gradien tekanan dan kehilangan tekanan yang signifikan, namun tetap mempertahankan pola distribusi tekanan yang halus (*smooth pressure field*). Tidak ditemukan fluktuasi tekanan acak yang mengindikasikan transisi turbulen, sehingga karakteristik aliran masih konsisten dengan rejim laminar hingga transisi ringan.

**Analisis Koefisien Kehilangan Tekanan (K) dan Bilangan Reynolds.** Untuk memperkuat analisis hidrodinamika secara non-dimensional, digunakan koefisien kehilangan tekanan ( $K$ ) yang dinyatakan sebagai:

$$K = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (6)$$

di mana  $\Delta P$  adalah kehilangan tekanan,  $\rho$  adalah massa jenis fluida, dan  $V$  adalah kecepatan *inlet*. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi efisiensi aliran secara independen terhadap skala sistem.

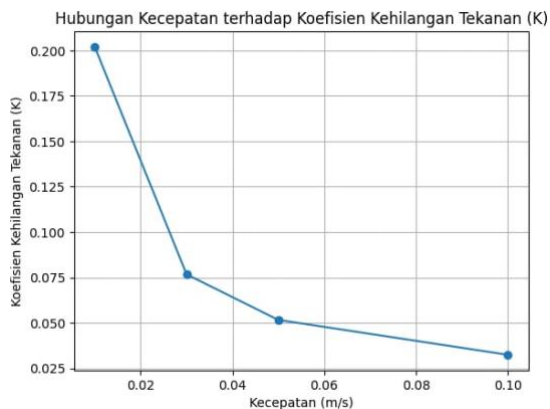
Nilai koefisien kehilangan tekanan untuk setiap variasi kecepatan *inlet* ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7 Koefisien Kehilangan Tekanan

Kecepatan (m/s)	$\Delta P$ (Pa)	$K$
0,01	0,01008481	0,202
0,03	0,03444641	0,0767
0,05	0,06432413	0,0516
0,1	0,16170271	0,0324

Berdasarkan Tabel 7, terlihat bahwa nilai  $K$  cenderung menurun seiring dengan peningkatan kecepatan *inlet*. Penurunan ini menunjukkan bahwa sistem menjadi relatif lebih efisien pada kecepatan yang lebih tinggi dalam hal kehilangan energi per satuan energi kinetik. Fenomena ini umum terjadi pada aliran laminar dalam sistem tertutup, di mana dominasi gaya viskos berkurang relatif terhadap gaya inersia seiring peningkatan kecepatan aliran [13].

Hubungan antara kecepatan *inlet* dan koefisien kehilangan tekanan ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 12 Grafik hubungan kecepatan inlet dan koefisien kehilangan tekanan ( $K$ )

Gambar 12 menunjukkan tren penurunan nilai  $K$  terhadap peningkatan kecepatan *inlet*. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun kehilangan tekanan absolut meningkat, efisiensi relatif sistem terhadap energi kinetik aliran justru meningkat.

Selain analisis non-dimensional, karakteristik aliran juga dievaluasi menggunakan bilangan Reynolds yang dinyatakan sebagai:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

di mana  $D$  adalah diameter karakteristik (diameter inlet) dan  $\mu$  adalah viskositas dinamik fluida.

Tabel 8 Bilangan Reynolds pada Variasi Kecepatan Inlet

Kecepatan (m/s)	Reynolds
0,01	299
0,03	898
0,05	1497
0,1	2994

Berdasarkan Tabel 8, nilai Reynolds berada pada kisaran 299 hingga 2992, yang menunjukkan bahwa aliran berada dalam rejim laminar hingga mendekati transisi. Hal ini konsisten dengan hasil distribusi kecepatan dan tekanan sebelumnya yang tidak menunjukkan adanya fluktuasi acak atau instabilitas khas aliran turbulen.

Secara keseluruhan, hasil analisis non-dimensional ini menunjukkan konsistensi antara fenomena fisik yang diamati dengan teori dasar mekanika fluida. Hubungan  $\Delta P$  yang mendekati linear terhadap kecepatan, penurunan nilai  $K$ , serta kisaran bilangan Reynolds yang masih berada dalam rejim laminar memperkuat validitas model simulasi yang digunakan.

Hasil ini juga sejalan dengan studi sebelumnya pada sistem *photobioreaktor* dan aliran internal saluran tertutup yang menunjukkan bahwa pada bilangan Reynolds rendah hingga menengah, kehilangan tekanan cenderung meningkat secara linear terhadap kecepatan, sementara efisiensi relatif sistem meningkat dengan bertambahnya momentum aliran [5], [18].

## Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis karakteristik hidrodinamika Photobioreaktor tipe *flat-panel closed-loop* menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) tiga dimensi dengan model aliran laminar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa solusi numerik telah memenuhi kriteria konvergensi dan independensi grid, dengan perbedaan hasil kurang dari 1% pada mesh final. Distribusi kecepatan memperlihatkan adanya percepatan lokal di sekitar *inlet* serta

terbentuknya satu sirkulasi dominan yang stabil di dalam panel.

Kehilangan tekanan ( $\Delta P$ ) meningkat mendekati linear terhadap kecepatan *inlet*, dengan hubungan regresi yang sangat kuat ( $R^2 \approx 0,99$ ), konsisten dengan karakteristik aliran laminar dalam saluran tertutup. Koefisien kehilangan tekanan (K) menunjukkan tren menurun terhadap peningkatan kecepatan, mengindikasikan bahwa rasio kehilangan energi terhadap energi kinetik berkurang pada kecepatan yang lebih tinggi.

Analisis bilangan Reynolds menegaskan bahwa sistem beroperasi dalam rejim laminar hingga transisi ringan, sehingga penggunaan model laminar dinyatakan valid. Secara keseluruhan, peningkatan kecepatan *inlet* memperkuat intensitas sirkulasi internal namun juga meningkatkan kehilangan tekanan dan kebutuhan daya pompa secara kuadratik terhadap kecepatan. Oleh karena itu, diperlukan kompromi desain antara peningkatan homogenitas aliran dan efisiensi energi operasional.

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi geometri *inlet-outlet* yang berbeda, variasi skala reaktor, serta integrasi model multiphase atau turbulensi pada rentang Reynolds yang lebih tinggi guna memperoleh pemahaman hidrodinamika yang lebih komprehensif.

## Referensi

- [1] G. Luzi and C. McHardy, "Modeling and Simulation of Photobioreactors with Computational Fluid Dynamics—A Comprehensive Review," Jun. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15113966.
- [2] B. Amanna, P. A. Bahri, and N. R. Moheimani, "Application of computational fluid dynamics in optimizing microalgal photobioreactors," *Algal Res.*, vol. 83, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.algal.2024.103718.
- [3] U. Ojaniemi, A. Tamminen, J. Syrjänen, and D. Barth, "CFD modeling of CO<sub>2</sub> fixation by microalgae cultivated in a lab scale photobioreaktor," *Bioresour. Technol.*, vol. 415, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.biortech.2024.131715.
- [4] Y. Zhao *et al.*, "Numerical study on the internal fluid mixing and its influencing mechanisms of the wave-driven floating photobioreaktor for microalgae production," *Front. Mar. Sci.*, vol. 10, Jan. 2023, doi: 10.3389/fmars.2023.1095590.
- [5] Q. Zhang *et al.*, "Sustainable microalgae cultivation: a comprehensive review of open and enclosed systems for biofuel and high value compound production," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Oct. 2024. doi: 10.1051/e3sconf/202457701008.
- [6] A. Guzmán-Palomino, L. Aguilera-Vázquez, H. Hernández-Escoto, P. M. García-Vite, and A. L. Martínez-Salazar, "Dynamical Simulation, Sensitivity, and Productivity Analysis of a Light-Photoacclimation Model for Microalgae-Based Carbohydrate Production in Continuous Photobioreactors," *Processes*, vol. 11, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/pr11071866.
- [7] A. C. Coşkun and D. Duranoğlu, "Improving photoreaktor design with ansys fluent flow simulation," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol. 30, no. 7, pp. 991–997, 2024, doi: 10.5505/pajes.2024.27448.

- [8] T. T. Imre, N. Miklos, and R. Jančo, “Flow Simulation in an Alga Photobioreaktor Tested Under Laboratory Conditions,” *Strojnický Casopis*, vol. 74, no. 1, pp. 35–44, May 2024, doi: 10.2478/scjme-2024-0004.
- [9] W. Gu, E. Theau, A. W. Anderson, D. F. Fletcher, J. M. Kavanagh, and D. D. McClure, “A modelling workflow for quantification of photobioreaktor performance,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 477, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.147032.
- [10] G. Besagni, F. Inzoli, and T. Ziegenhein, “Two-Phase Bubble Columns: A Comprehensive Review”, doi: 10.3390/2020013.
- [11] V. Loomba, E. von Lieres, and G. Huber, “How do operational and design parameters effect biomass productivity in a flat-panel photo-bioreaktor? A computational analysis,” *Processes*, vol. 9, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.3390/pr9081387.
- [12] S. Banerjee *et al.*, “Flow Rate Optimization in a Flat-Panel Photobioreaktor for the Cultivation of Microalgae for Mitigating Waste Gas,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/w15152824.
- [13] B. Amanna, P. A. Bahri, and N. R. Moheimani, “CFD-based investigation of sparger position and aeration rate in inclined flat plate photobioreaktors,” *Algal Res.*, vol. 92, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.algal.2025.104423.
- [14] Y. D. A Kenteng, H. Chen, K. N. Opoku, F. Ullah, S. Wang, and S. Kumar, “The Role of Computational Fluid Dynamics (CFD) in Phytohormone-Regulated Microalgae-Based Carbon Dioxide Capture Technology,” Feb. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su17030860.
- [15] S. Hubbard, “Development and Application of an Open Access Bioreaktor Performance Modelling Workflow for Cultivated Meat Yield Prediction and Optimisation,” 2024. doi: 10.31224/3788.
- [16] X. Cui, J. Yang, Y. Feng, and W. Zhang, “Simulation of a Novel Tubular Microalgae Photobioreaktor with Aerated Tangent Inner Tubes: Improvements in Mixing Performance and Flashing-Light Effects,” *Archaea*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8815263.
- [17] W. M. S. Dayanath, Y. A. Lim, I. M. S. K. Ilankoon, M. N. Chong, and S. C. Foo, “Flow visualisation in flat panel photobioreaktors with optimised gas spargers using fluorescent dyes and microspheres to evaluate mixing mechanisms and microalgae growth,” *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 32, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.biteb.2025.102301.