

Analisa Laju Entrainment Pada Aliran Air Mancur Dengan Metode Computational Fluid Dynamics (CFD)

Alviani Hesthi Permata Ningtyas^{*1}, Ilham Arifin Pahlawan², Rilo Chandra Muhamadin³, Katon Muhammad⁴, Moh. Jufriyanto⁵, Muhammad Rafly Arifin⁶

^{1,2,3,6}Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Gresik, Indonesia

⁴Teknik Industri, Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia

⁵Teknik Industri, Universitas Muhammadiyah Gresik, Indonesia

Email: ¹alvianihesthi@umg.ac.id, ²ilhamarifin@umg.ac.id, ³rilochoandra@umg.ac.id,

⁴katon.muhammad@gmail.com, ⁵jufriyanto@umg.ac.id, ⁶raflyarifin@gmail.com

Abstrak

Penetratif entrainment pada aliran air mancur transisi dan turbulen merupakan fenomena penting yang memengaruhi efisiensi energi dan distribusi massa dalam berbagai aplikasi teknik, seperti sistem pendinginan dan rekayasa lingkungan. Permasalahan utama dalam studi ini adalah kurangnya pemahaman kuantitatif mengenai mekanisme entrainment pada kondisi aliran dengan variasi densitas dan kecepatan yang kompleks. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi laju aliran entrainment penetratif menggunakan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulasi dilakukan dalam ruang berdimensi 40 cm × 30 cm × 20 cm dengan pemodelan mesh tetrahedral, menghasilkan 21.839 node dan 81.742 elemen. Dua inlet dengan densitas berbeda digunakan: 997 kg/m³ pada ketinggian 18 cm dan 1.100 kg/m³ pada ketinggian 0 cm, guna merepresentasikan kondisi transisi hingga turbulen. Hasil simulasi menunjukkan bahwa laju entrainment meningkat signifikan seiring kenaikan bilangan Reynolds. Pada outlet (ketinggian 0 cm), diperoleh densitas 1.021,2 kg/m³, laju aliran volumetrik 26.729,3 mm³/s, dan bilangan Reynolds sebesar 1.381,91, yang mengindikasikan kondisi aliran laminar. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme entrainment lebih didominasi oleh difusi massa daripada turbulensi dalam kondisi ini. Penelitian ini memberikan gambaran tentang pengembangan sistem yang efisien untuk aplikasi dengan aliran rendah hingga menengah. Implikasinya, desain sistem pendinginan dan pengolahan air dapat dioptimalkan dengan mempertimbangkan karakteristik entrainment pada berbagai kondisi aliran

Kata kunci: aliran turbulen, Computational Fluid Dynamics (CFD), distribusi densitas, laju aliran.

Evaluation of Penetrative Entrainment Flowrate Calculation in Transitional or Turbulent Fountains Using the CFD Method

Abstract

Penetrative entrainment in transitional and turbulent fountain flows is a crucial phenomenon influencing energy efficiency and mass distribution in various engineering applications, such as cooling systems and environmental engineering. The main challenge addressed in this study is the limited quantitative understanding of entrainment mechanisms under complex flow conditions involving variable density and velocity. This research aims to evaluate the penetrative entrainment flow rate using Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulations were conducted in a domain measuring 40 cm × 30 cm × 20 cm, using a tetrahedral mesh with 21,839 nodes and 81,742 elements. Two inlets with different densities were introduced to represent transitional to turbulent conditions: 997 kg/m³ at 18 cm height and 1,100 kg/m³ at 0 cm height. The simulation results show a significant increase in entrainment rate with rising Reynolds numbers. At the outlet (0 cm height), the flow exhibited a density of 1,021.2 kg/m³, a volumetric flow rate of 26,729.3 mm³/s, and a Reynolds number of 1,381.91, indicating laminar flow conditions. This suggests that, under these conditions, the entrainment mechanism is predominantly governed by mass diffusion rather than turbulence. These findings contribute to the development of more efficient systems for low-to-moderate flow applications. The implications are particularly relevant for optimizing the design of cooling and water treatment systems, where accurate modeling of entrainment behavior under various flow regimes can lead to improved performance and resource efficiency.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, density distribution, flow rate, turbulent fountain flows.

1. PENDAHULUAN

Aliran yang dipengaruhi oleh gaya apung memiliki banyak aplikasi dalam bidang teknik, seperti pada proses ekstraksi mineral dari kubah garam, stratifikasi suhu di lautan, dan sistem ventilasi *Under Floor Air Distribution* (UFAD). Dalam ekstraksi mineral kubah garam, air garam dimasukkan ke dalam rongga kubah, di mana air garam yang lebih berat mengendap di lapisan bawah sementara minyak yang lebih ringan naik ke lapisan atas untuk kemudian dipompa ke tangki penyimpanan. Pada stratifikasi lautan, perbedaan suhu dan salinitas menciptakan lapisan-lapisan yang berbeda, di mana lapisan campuran (*mixed layer*)[1], [2] memiliki gradien suhu kecil, lapisan termoklin memiliki gradien yang lebih curam, dan laut dalam memiliki suhu terendah. Sementara itu, sistem ventilasi UFAD memanfaatkan perbedaan densitas udara untuk meningkatkan efisiensi sirkulasi udara, dengan udara dingin mengisi bagian bawah ruangan dan mendorong udara panas ke atas, memastikan distribusi udara yang lebih baik.

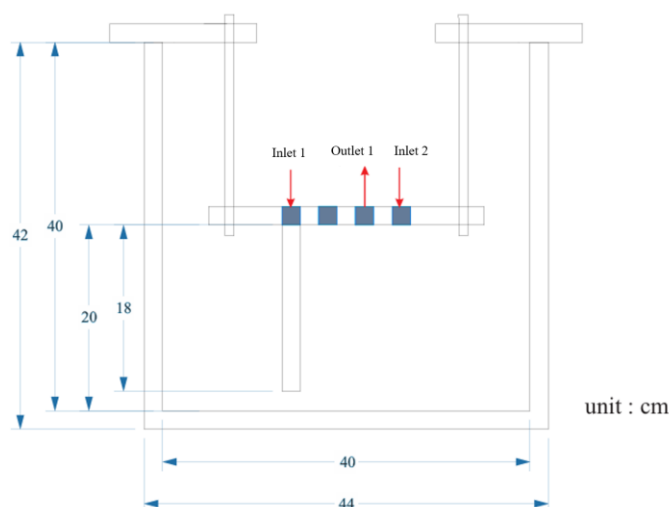
Pada sistem aliran yang mengalami kondisi transisi hingga turbulen, terutama pada nozzle atau outlet yang mengeluarkan fluida ke dalam air laut, pola aliran menjadi lebih kompleks[2]. Kondisi ini mengakibatkan munculnya vorteks dan fluktuasi aliran yang mempersulit prediksi entrainment dengan metode analitis atau pendekatan empiris[3], [4]. Pemahaman terhadap mekanisme penetrative entrainment masih menjadi tantangan karena kompleksitas interaksi antara faktor-faktor seperti kecepatan aliran, perbedaan densitas, dan kondisi turbulensi. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk menganalisis fenomena ini adalah metode Computational Fluid Dynamics (CFD)[3], [5]–[8], yang memungkinkan pemodelan fenomena aliran secara mendetail tanpa perlu eksperimen fisik yang mahal dan kompleks. Penerapan Computational Fluid Dynamics (CFD) menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi tantangan ini[6]. CFD memungkinkan pemodelan aliran fluida dalam kondisi realistis, dengan memasukkan faktor-faktor fisik seperti turbulensi dan interaksi fluida, sehingga memungkinkan analisis prediktif untuk kondisi operasi tertentu di lepas pantai.

Air mancur memiliki pola aliran yang berbeda dari jet dan plume[3], [9], [10]. Aliran yang keluar dari sumber naik hingga mencapai ketinggian tertentu sebelum jatuh kembali ke arah yang berlawanan dengan aliran sumbernya. Fluida pada air mancur turbulen ini melewati fluida sekitarnya dan mengalami gaya apung yang berlawanan arah. Proses ini disebut dengan *entrainment*[11]–[13].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perhitungan laju aliran entrainment penetratif pada air mancur dengan karakteristik transisi atau turbulen menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Evaluasi dilakukan dengan menganalisis pola aliran serta karakteristik entrainment yang terbentuk dalam simulasi numerik. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menilai akurasi perhitungan laju entrainment penetratif dengan membandingkan hasil simulasi CFD terhadap model empiris atau data eksperimen yang tersedia. Faktor-faktor yang mempengaruhi entrainment, seperti kecepatan awal jet[8], [14]–[16] dan viskositas fluida, juga akan diidentifikasi untuk memahami parameter dominan dalam fenomena ini. Selain itu, keandalan metode CFD dalam memprediksi entrainment pada kondisi transisi dan turbulen akan dievaluasi dengan berbagai konfigurasi geometri dan kondisi batas.

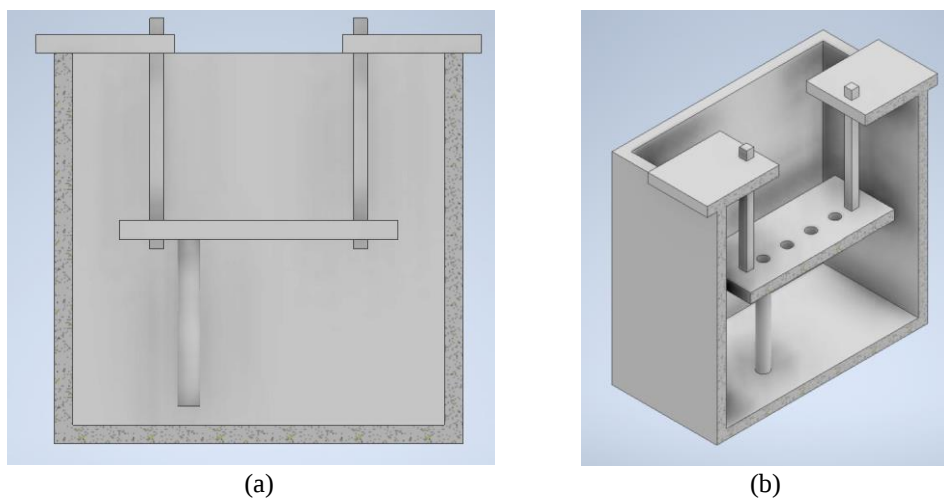
2. METODE PENELITIAN

Metode pada penelitian ini menggunakan metode CFD, CFD adalah Computational Fluid Dynamics dimana metode numerik yang digunakan untuk menganalisis dan mempelajari perilaku aliran fluida. Metode Computational Fluid Dynamics (CFD) digunakan dalam penelitian ini karena mampu menganalisis perilaku aliran fluida secara rinci dan kuantitatif tanpa perlu eksperimen fisik yang kompleks dan mahal. CFD memungkinkan pemodelan kondisi multiphase, gradien densitas, serta variasi kecepatan aliran dalam ruang tiga dimensi. Software yang digunakan adalah Autodesk CFD 2024, yang dipilih karena user-friendly dengan langsung terintegrasi CAD. Dimensi tangki seperti pada gambar 1 dimana panjang, lebar dan tinggi 40 cm x 30 cm x 20 cm. Ada 2 inlet dengan ketinggian yang berbeda dimana simulasi dimulai dari masuknya fluida dengan densitas tinggi dan densitas rendah masuk secara bersamaan, akan ada aliran fluida yang keluar pada pintu keluar yang tangki.



Gambar 1. Dimensi tangki simulasi

Pada gambar 1. Menunjukkan dimensi tangki yang digunakan untuk simulasi perilaku fluida ketika fluida dengan densitas rendah atau air tawar masuk pada lubang ke 4 pada gambar 1 dengan nilai densitas 997 kg/m^3 . Sedangkan pada fluida dengan densitas tinggi masuk pada kedalaman 18 cm dari titik 0 dimana densitas fluida sebesar 1100 kg/m^3 .

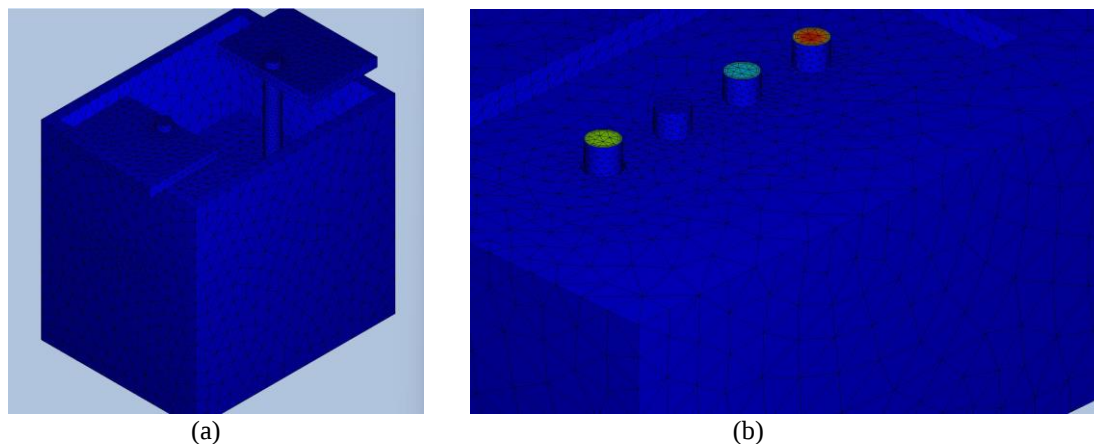


Gambar 2. Tangki digambar dengan file stp (a) tampak depan dan (b) gambar isometrik

Gambar 2 merupakan gambar tangki sebelum dilakukan simulasi dengan CFD model, dimana file harus disimpan dalam bentuk stp agar bisa dimasukkan kedalam software Autodesk CFD. Tidak banyak penelitian yang menggunakan Autodesk CFD dalam menganalisa perilaku aliran. Dengan kondisi batas dinding tankansi tidak ada gesekan dan tekanan outlet adalah tekanan atmosfer.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum mendapatkan hasil simulasi, ada proses meshing yang harus dilakukan terlebih dahulu dimana Meshing dalam simulasi CFD merupakan tahap krusial untuk mendiskretisasi domain aliran menjadi elemen kecil guna meningkatkan akurasi dan efisiensi perhitungan. Dalam penelitian ini, digunakan unstructured tetrahedral mesh dengan 21.839 node dan 81.742 elemen untuk menangani variasi densitas dan pola aliran transisi hingga turbulen. Refinement dilakukan pada area dengan gradien tinggi, seperti inlet dan outlet, serta boundary layer dioptimalkan untuk menangkap fenomena tegangan geser di dekat dinding. Validasi mesh dilakukan melalui uji grid independence guna memastikan solusi tidak bergantung pada jumlah elemen. Pemilihan mesh yang optimal memastikan akurasi hasil. Seperti pada gambar 3 dibawah ini



(a)

(b)

Gambar 2. Messing (a) tangki dan (b) fluida didalam tangki

Dalam simulasi CFD, perbedaan antara massa aliran masuk (27,71 g/s) dan massa aliran keluar (27,296 g/s) menunjukkan adanya sedikit ketidakseimbangan massa sebesar 0,416 g/s. Idealnya, dalam kondisi steady-state dan jika tidak ada sumber atau hilangnya massa dalam domain, hukum konservasi massa harus tetap berlaku, yaitu total massa yang masuk harus sama dengan massa yang keluar. Perbedaan kecil ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti kesalahan numerik dalam diskretisasi, konvergensi simulasi yang belum sempurna, atau adanya akumulasi massa sementara dalam domain akibat pemodelan turbulensi atau efek kompresibilitas.

Begitu pula dengan volume flow rate, di mana total volume aliran masuk adalah 27.136,82 mm³/s, sedangkan volume aliran keluar hanya 26.729,2 mm³/s. Perbedaan sebesar 407,62 mm³/s bisa mengindikasikan adanya perubahan densitas fluida dalam domain simulasi, yang sering terjadi jika fluida mengalami pemampatan atau ekspansi. Jika fluida dianggap inkompresibel, perbedaan ini kemungkinan besar berasal dari kesalahan numerik dalam mesh atau metode penyelesaian numerik yang digunakan. Seperti pada tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Rancangan Analisis Komputasi (10pt, ditengah)

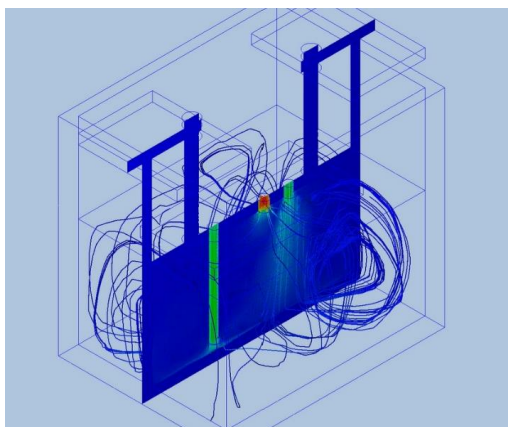
Keterangan	Inlet 1	Inlet 2	Outlet 1
inlet bulk pressure	13.5029 N/m ²	8.97119 N/ m ²	
mach number	4.12028 x 10 ⁻⁹	2.06014 x 10 ⁻⁹	5.85504 x 10 ⁻⁹
mass flow	18.4748 g/s	9.23738 g/s	27.296 g/s
node near minimum x,y,z of opening	367.0	389.0	378
reynolds number	935.322	467.661	1381.91
total mass flow		27.7122 g/s	27.296 g/s
total vol. flow		27136.9 mm ³ /s	26729.3 mm ³ /s
volume flow	18091.2 mm ³ /s	9045.62 mm ³ /s	26729.3 mm ³ /s

Berdasarkan hasil simulasi, terjadi perbedaan antara data inlet dan outlet yang menunjukkan karakteristik aliran fluida dalam sistem. Dari sisi laju aliran massa, total mass flow rate yang masuk ke sistem melalui dua inlet adalah 27.7122 g/s, sedangkan yang keluar melalui outlet adalah -27.296 g/s. Perbedaan kecil sekitar 0.416 g/s ini dapat disebabkan oleh akumulasi massa dalam domain simulasi atau kesalahan numerik dalam perhitungan. Selain itu, volume flow rate menunjukkan perbedaan yang serupa, dengan total 27,136.9 mm³/s di inlet dan -26,729.3 mm³/s di outlet, menunjukkan kemungkinan adanya efek kompresibilitas atau fluktuasi numerik.

Dari segi tekanan, nilai bulk pressure pada inlet 1 dan inlet 2 masing-masing adalah 13.5029 N/m² dan 8.97119 N/m², sedangkan tekanan pada outlet adalah 0.0 N/m². Penurunan tekanan ini menunjukkan bahwa fluida mengalami ekspansi atau kehilangan tekanan sepanjang jalur aliran, yang bisa disebabkan oleh gesekan, perubahan geometri, atau boundary condition yang kurang tepat. Tekanan outlet yang bernilai nol patut diperiksa lebih lanjut, karena jika sistem terhubung ke lingkungan terbuka, tekanan seharusnya mendekati tekanan atmosfer.

Kecepatan aliran relatif rendah, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai Mach number yang sangat kecil di semua titik (orde 10⁻⁹). Hal ini mengindikasikan bahwa aliran berada dalam kondisi hampir statis atau memiliki kecepatan yang jauh lebih kecil dibandingkan kecepatan suara dalam medium tersebut. Sementara itu, nilai Reynolds number di inlet 1 dan inlet 2 masing-masing adalah 935.322 dan 467.661, sedangkan di outlet meningkat menjadi 1381.91. Kenaikan Reynolds number ini menunjukkan bahwa aliran di outlet mengalami percepatan atau perubahan kondisi

yang menyebabkan peningkatan efek inersia relatif terhadap viskositas fluida. Meskipun masih dalam rentang aliran laminar, nilai ini menunjukkan potensi transisi ke turbulen jika terdapat gangguan dalam aliran.



Gambar 3. Pergerakan fluida

Pada gambar 3 menunjukkan bahwa pergerakan fluida pada tangki mendorong beberapa area dengan adanya penurunan tekanan dari inlet ke outlet dalam sistem ini dapat dijelaskan oleh adanya gesekan dan laju aliran fluida. Kehilangan tekanan akibat gesekan terjadi karena interaksi fluida dengan dinding saluran, yang bergantung pada panjang jalur aliran, kekasaran permukaan, serta koefisien gesekan. Nilai tekanan outlet dari hasil simulasi diperoleh yaitu sebesar 0.0 N/m^2 tampak tidak realistis dan kemungkinan merupakan tekanan gauge dalam simulasi, yang berarti tekanan absolutnya perlu dikoreksi agar sesuai dengan kondisi fisik sebenarnya, seperti tekanan atmosfer jika outlet terbuka ke lingkungan. Berdasarkan persamaan Bernoulli, percepatan aliran juga dapat menyebabkan penurunan tekanan, namun dalam kasus ini, nilai Mach number yang sangat kecil sebesar 5.85504×10^{-9} menunjukkan bahwa efek ini tidak dominan, sehingga kehilangan tekanan lebih mungkin disebabkan oleh gesekan dan perubahan geometri. Untuk memastikan kebenaran hasil simulasi, perlu dilakukan verifikasi terhadap definisi tekanan outlet, distribusi tekanan sepanjang aliran, serta pengaruh viskositas dan bilangan Reynolds, karena nilai $Re \sim 1381$ menunjukkan potensi transisi aliran yang dapat mempengaruhi kehilangan tekanan dalam sistem.

4. KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa laju entrainment meningkat seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds, menandakan adanya pengaruh signifikan dari dinamika aliran terhadap proses pencampuran antar fluida. Pada kondisi aliran laminar, entrainment lebih didominasi oleh mekanisme difusi massa akibat perbedaan densitas, bukan oleh pencampuran turbulen. Fenomena ini menghasilkan pola perpindahan massa yang stabil dan teratur. Implikasi praktis dari temuan ini adalah pentingnya mempertimbangkan karakteristik entrainment berbasis difusi dalam desain sistem yang beroperasi pada aliran rendah hingga menengah, seperti sistem pendinginan cairan, pengolahan air, dan aplikasi rekayasa lingkungan lain yang memerlukan efisiensi perpindahan massa tanpa gangguan turbulensi. Desain yang memanfaatkan gradasi densitas secara efektif dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem. Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Simulasi belum divalidasi secara eksperimental, dan ketidakseimbangan kecil pada laju massa dan volumetrik menunjukkan perlunya evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi batas, khususnya pada outlet. Selain itu, distribusi kecepatan dan potensi stagnasi aliran belum dianalisis secara menyeluruh. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan pendekatan eksperimental sebagai validasi serta mengeksplorasi efek variasi geometri dan viskositas terhadap pola entrainment. Integrasi antara simulasi numerik dan uji laboratorium akan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap fenomena ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Imran, K. E. Kakosimos, O. Srouf, and L. N. Véhot, "Nomograph derivation for underwater sour gas releases in shallow waters based on computational fluid dynamics simulations," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 189, no. June, pp. 745–755, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.06.053.
- [2] A. Huber, W. Tang, A. Flowe, B. Bell, K. Kuehlert, and W. Schwarz, "Development and applications of CFD simulations in support of air quality studies involving buildings," *13th Jt. Conf. Appl. Air Pollut. Meteorol. with Air Waste Manag. Assoc.*, pp. 223–229, 2004.
- [3] P. V. Nielsen, "Fifty years of CFD for room air distribution," *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 78–90, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.02.035.
- [4] I. Olmedo, P. V. Nielsen, M. Ruiz de Adana, R. L. Jensen, and P. Grzelecki, "Distribution of exhaled contaminants and personal exposure in a room using three different air distribution strategies," *Indoor Air*, vol. 22, no. 1, pp. 64–76, 2012, doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00736.x.
- [5] K. Mohammadzadeh, S. H. Hashemabadi, and S. Akbari, "CFD simulation of viscosity modifier effect on cutting transport by oil based drilling fluid in wellbore," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 29, pp. 355–364, 2016, doi: 10.1016/j.jngse.2015.11.011.
- [6] E. V. P. J. Manjula, W. K. H. Ariyaratne, C. Ratnayake, and M. C. Melaaen, "A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport," *Powder Technol.*, vol. 305, pp. 782–793, 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2016.10.026.
- [7] E. I. Epelle and D. I. Gerogiorgis, "A multiparametric CFD analysis of multiphase annular flows for oil and gas drilling applications," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 106, pp. 645–661, 2017, doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.08.011.
- [8] P. P. Jati and A. Widyaparaga, "Simulasi CFD Dinamika Kecepatan Gelombang Aliran Stratified Wavy Dua Fasa Minyak-Air pada Pipa Horizontal," *J. Mech. Des. Test.*, vol. 3, no. 1, p. 1, 2021, doi: 10.22146/jmdt.56417.
- [9] Q. Wang, L. Ding, Z. Xue, T. Chen, X. Pan, and M. Short, "Bubble plume dispersion from underwater gas leakage: An experimental and dimensionless modelling study," *Appl. Ocean Res.*, vol. 153, no. October, p. 104305, 2024, doi: 10.1016/j.apor.2024.104305.
- [10] Y. Tominaga and T. Stathopoulos, "Ten questions concerning modeling of near-field pollutant dispersion in the built environment," *Build. Environ.*, vol. 105, pp. 390–402, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.06.027.
- [11] Ahmad Maksum, Gun Gun Ramdhan Gunadi, Faiz Irza Ramadhan, and Candra Damis Widiyawaty, "Desain Fully Welded Plate Heat Exchanger untuk Pemanfaatan Asap Pirolysis dengan Metode Computational Fluid Dynamic (CFD)," *J. Mek. Terap.*, vol. 5, no. 1, pp. 8–15, 2024, doi: 10.32722/jmt.v5i1.6268.
- [12] A. B. Prasetyo, F. Fauzun, A. A. Azmi, and R. I. Yaqin, "Studi Numerik Kontur Pola Aliran Fluida Pendinginan Pada Mold Injeksi Molding," *Infotekmesin*, vol. 12, no. 1, pp. 104–109, 2021, doi: 10.35970/infotekmesin.v12i1.493.
- [13] B. Jalaali and E. Kumolosari, "Simulasi aliran dua fase pada campuran air-minyak di pipa horizontal dengan parameter termal," *Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol.*, vol. 13, no. 2, pp. 113–122, 2021, doi: 10.28989/angkasa.v13i2.1042.
- [14] A. H. Sitepu, M. R. Alwi, S. Hariyanto, M. I. Nikmatullah, and M. I. Nur, "Analisis Efektivitas Heat Exchanger Type Shell and Tube Menggunakan CFD," *J. Ris. Teknol. Terap. Kemaritiman*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2024, doi: 10.25042/jrt2k.062024.01.
- [15] D. Almuchizzun *et al.*, "Analisis Desain Blade Turbin Air Mikrohidro Archimedes Screw Terapung Berbasis CFD," *Danial & Wicaksono*, vol. 4, no. 1, pp. 24–29, 2023.
- [16] I. Solihat, A. S. Prasetyo, P. Sebayang, A. P. Tetuko, A. M. Sebayang, and M. Nasrun, "Simulasi Numerik Sistem Water Oil Separator Menggunakan Software Dinamika Fluida," *Pist. J. Tech. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2021, doi: 10.32493/pjte.v5i1.14718.