

Numerical Simulation of Boundary Layer Flow in Straight Pipes [Simulasi Numerik Boundary Layer Pada Aliran Di Dalam Pipa Lurus]

Muhamad Ridwan Yunus¹⁾, Ali Akbar ^{*,2)}, Rachmat Firdaus ³⁾, Metatia Intan Mauliana ⁴⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

³⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

⁴⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: aliakbar@umsida.ac.id

Abstract. This study aims to analyze the development of the boundary layer in fluid flow in a straight pipe. The boundary layer is a thin layer near the pipe wall that experiences the influence of intimidation, thus affecting the flow distribution velocity. The study was conducted numerically using CFD (Computational Fluid Dynamics) software by utilizing ANSYS Fluent to solve the Navier-Stokes equations. The fluid flow described is water with a variation of kece. The simulation results show that the boundary layer thickness increases with the length of the pipe due to the effects that occur on the wall. In addition, the velocity profile shows a transition from plug flow conditions near the inlet to a parabolic profile in laminar flow and a logarithmic profile in turbulent flow. These findings provide important insights in designing piping systems, especially in improving flow efficiency and minimizing pressure losses.

Keyword – Numerical Simulation; Boundary Layer; Computational fluid dynamics; Ansys Fluent

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan boundary layer pada aliran fluida di dalam pipa lurus. Boundary layer merupakan lapisan tipis di dekat dinding pipa yang mengalami pengaruh gesekan, sehingga memengaruhi distribusi kecepatan aliran. Studi dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak CFD (Computational Fluid Dynamics) dengan memanfaatkan ANSYS Fluent untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes. Aliran fluida yang dianalisis adalah udara dengan kecepatan inlet 0.315 m/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketebalan boundary layer meningkat seiring dengan panjang pipa akibat efek gesekan dinding. Selain itu, profil kecepatan menunjukkan profil parabola pada aliran laminar. Temuan ini memberikan wawasan penting dalam perancangan sistem perpipaan, terutama dalam meningkatkan efisiensi aliran dan meminimalkan rugi-rugi tekanan.

Kata Kunci – Simulasi Numerik; Boundary Layer; Computational fluid dynamics; Ansys Fluent

I. PENDAHULUAN

Fluida adalah zat yang bergerak ketika diberikan gaya. Fluida dapat berubah bentuk dan bersifat tidak tetap. Fluida membentuk berbagai jenis benda padat sesuai dengan bentuk benda yang dilaluinya. Karakteristik aliran fluida meliputi massa jenis, tekanan, viskositas, koefisien gesek dan kecepatan aliran[1]

Viskositas merupakan salah satu faktor kunci dalam mekanika fluida karena memengaruhi resistensi aliran dan kehilangan energi. Ketika fluida mengalir melalui pipa, interaksi antara lapisan fluida dan dinding pipa menghasilkan gaya gesekan yang mengurangi kecepatan aliran dan menurunkan tekanan. Faktor-faktor seperti bilangan Reynolds, diameter pipa, dan faktor gesekan mempengaruhi seberapa besar penurunan tekanan ini terjadi. Bilangan Reynolds, yang merupakan perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos, membantu menentukan apakah aliran bersifat laminar atau turbulen, yang pada gilirannya mempengaruhi distribusi kecepatan fluida dan penurunan tekanannya. Pada aliran turbulen, misalnya, viskositas fluida berperan dalam mengatur distribusi energi antara lapisan fluida, memperbesar gaya gesekan dan menghasilkan penurunan tekanan yang lebih besar[2]-[4].

Dalam aplikasi industri, penting untuk mempertimbangkan penurunan tekanan ini, terutama pada sistem perpipaan yang kompleks seperti dalam pembangkit listrik, industri kimia, dan sistem distribusi air, karena penurunan tekanan yang besar dapat memengaruhi efisiensi sistem dan kebutuhan energi tambahan untuk mempertahankan aliran yang diinginkan. Pipa dengan tikungan atau belokan juga akan mengalami penurunan tekanan tambahan karena perubahan arah aliran yang menambah gangguan dan menghasilkan lebih banyak gesekan. Faktor-faktor ini harus diperhitungkan dalam desain dan analisis sistem aliran fluida dalam pipa[5]-[7]

Efek gesekan yang terjadi antara fluida dan permukaan pipa menyebabkan terbentuknya *boundary layer* atau lapisan batas dengan ketebalan yang terus bertambah seiring dengan perjalanan aliran di sepanjang permukaan pipa. Di dalam *boundary layer* ini, kecepatan fluida meningkat dari nol (di permukaan pipa) hingga mengakibatkan mendekati kecepatan aliran bebas (di luar *boundary layer*)[8]-[10]. Fenomena ini sangat bergantung pada beberapa faktor utama, seperti gradien tekanan, kekasaran permukaan pipa, dan kondisi aliran bebas. Dalam kehidupan sehari-

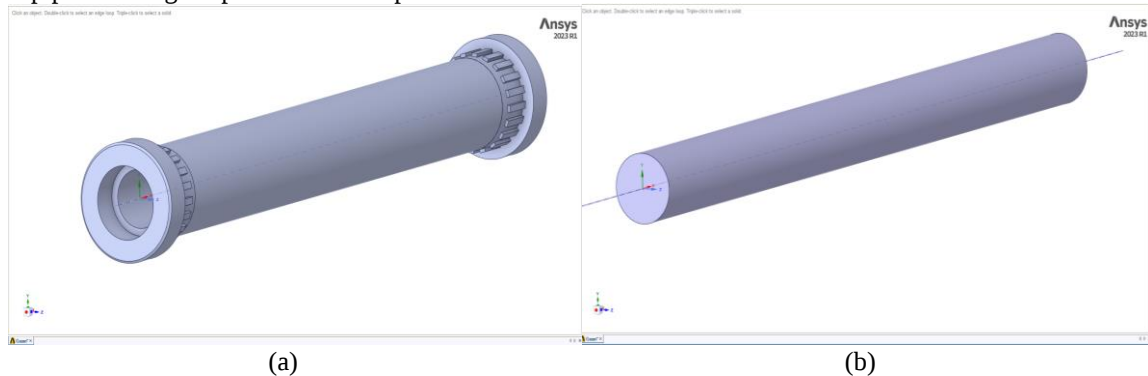
hari, prinsip-prinsip boundary layer dan aliran fluida, termasuk transisi dari aliran laminar ke turbulen, memiliki penerapan yang luas di berbagai bidang teknik, seperti penukar kalor, pipa air, hidrodinamika, aerodinamika, kipas angin dan turbin[11].

Oleh karena itu, untuk memperkirakan aliran fluida kompleks yang terjadi dalam sistem perpipaan maka studi numerik seperti *computational fluid dynamics (CFD)* dilakukan. Metode *CFD* memberikan kemudahan untuk menganalisis aliran boundary layer di sepanjang permukaan pipa lurus dan karakteristik aliran fluida [11]-[13].

II. METODE

A. Geometri Pipa Penelitian

Pembuatan geometri pipa menggunakan *software Solidwork* dan kemudian di export ke *Ansys SpaceClaim*, desain pipa ini mengacu pada analisa eksperimental.



Gambar 1. (a) Desain Pipa Penelitian (b) Domain Fluida Pipa

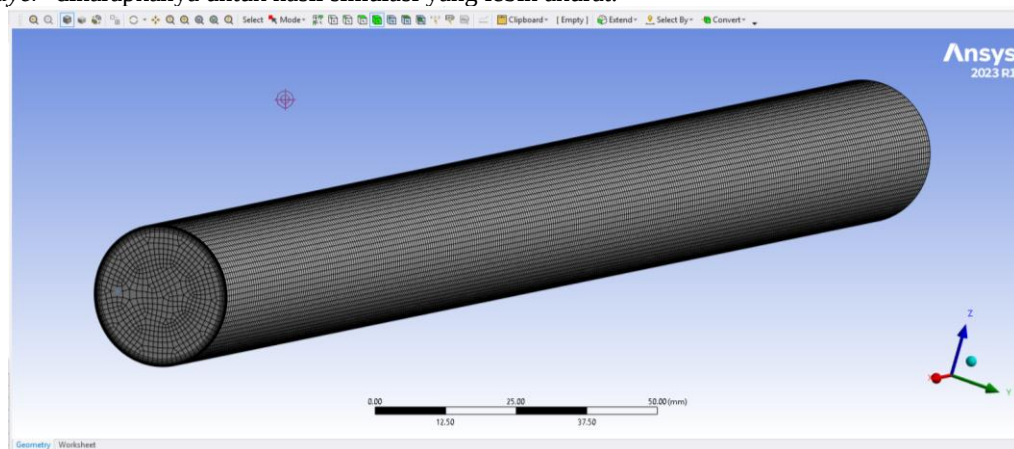
Pada penelitian ini digunakan pipa akrilik digunakan sebagai objek simulasi *CFD* memiliki dimensi sebagai berikut:

Tabel 1. Informasi Dimensi Ukuran Geometri Pipa Penelitian dan Domain Pipa

No	Nama	Keterangan Dimensi Ukuran
1	Diameter Pipa Uji	25.4 mm
2	Panjang Total Pipa	368 mm
3	Panjang Pipa Uji	250 mm
4	Diameter Domain Fluida	25.4 mm
5	Panjang Domain Fluida	340 mm

B. Meshing

Untuk menemukan keseimbangan yang wajar antara upaya komputasi dan akurasi solusi, kualitas mesh menjadi krusial [14],[15]. *Meshing* menggunakan Metode *multizone* dan dipermukaan dinding pipa di tambahkan 10 *inflation layer* diharapkan untuk hasil simulasi yang lebih akurat.



Gambar 2. Multizone Mesh dan Inflation Layer

Detail dari informasi mesh di tunjukan pada tabel 1.

Tabel 2. Informasi *Meshing*

No	Nama	Keterangan <i>Meshing</i>
1	<i>Nodes</i>	460023
2	<i>Element</i>	444808
3	<i>Orthogonal Quality</i>	0.99322
4	<i>Skewness</i>	7.2255e-002
5	<i>Method</i>	<i>Multizone</i>
6	<i>Inflation</i>	10

C. Setup (processing)1. *Boundary Condition*

Berikut adalah parameter-parameter yang di terapkan pada software ansys dalam *boundary condition*, terlihat pada tabel 2.

Tabel 3. Informasi *Boundary Conditions*

Nama	Keterangan
<i>Velocity Inlet</i>	
<i>Velocity Magnitude</i>	0.315 m/s
<i>Hydraulic Diameter</i>	25.4 mm
<i>Pressure Outlet</i>	
<i>Gauge Pressure</i>	0
<i>Hydraulic Diameter</i>	25.4 mm
<i>Wall-Plexiglass (Akrilik)</i>	
<i>Wall Motion</i>	<i>Stationary wall</i>
<i>Shear Condition</i>	<i>No-Slip</i>
<i>Height Rougness</i>	0.000041 mm

Boundary conditions dalam analisis *CFD* sangat penting untuk menentukan karakteristik aliran fluida. Seperti velocity inlet, mempengaruhi distribusi kecepatan, sedangkan pressure outlet, menentukan penurunan tekanan di sepanjang pipa[16]. Pada dinding pipa, wall boundary conditions, seperti no-slip, membentuk lapisan batas dan memengaruhi profil kecepatan. Kekasaran dinding juga berperan signifikan terhadap distribusi kecepatan dan headloss. Dengan penentuan boundary conditions yang tepat, distribusi kecepatan dan tekanan dapat dimodelkan secara akurat[17].

2. Model Viskos dan Solver

Dalam aliran turbulen maupun laminar perbedaan solver dan model *viscous* pada pengaturan sangat berperan penting dalam menentukan hasil dan ketelitianya dalam sebuah analisis *CFD*.

Tabel 4. Informasi *Viscous dan Solver*

Nama	Keterangan
Fluida (Udara)	
Densitas (kg/m^3)	1.225
Viskositas ($kg/m \cdot s$)	0.00001789
Viscous dan Solver	
Dimensi	3D
Kondisi Aliran	<i>Steady-State</i>
<i>Energy</i>	Off
<i>Multiphase</i>	Off
Viskos	<i>K-Omega SST</i>
Tipe	<i>COUPLED</i>
Initialisasi	<i>Hybrid</i>

D. Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan mengambil nilai tekanan dan kecepatan pada titik yang di tentukan, titik tersebut berada pada posisi depan lubang jarum pada studi ekperimentalnya. Pengambilan data dari titik origin ke arah yang di tentukan mulai dari point-p1, point-p2, point-p3, point-p4, dan point-p5. Untuk detail posisi point yang dapat dilihat pada tabel berikut.

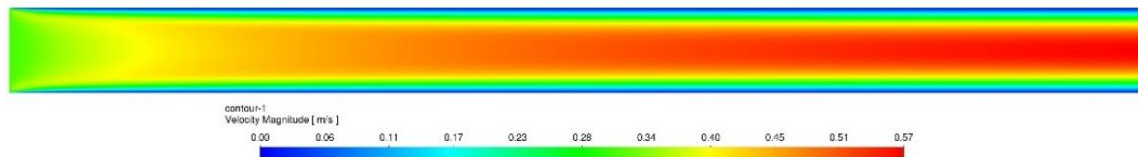
Tabel 5. Letak Titik Pengambilan Data

Nama	Koordinat (mm)		
	X	Y	Z
point-p1	63	-11	0
point-p2	112	-5.66	-5.66
point-p3	161	-4.24	4.24
point-p4	210	0	-4
point-p5	256	0	0

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

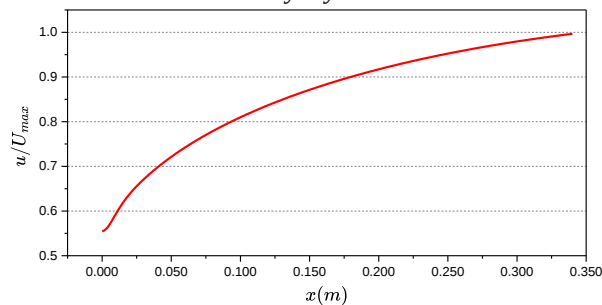
A. Hasil Simulasi

1. Profile Kecepatan



Gambar 3. Kontur Kecepatan

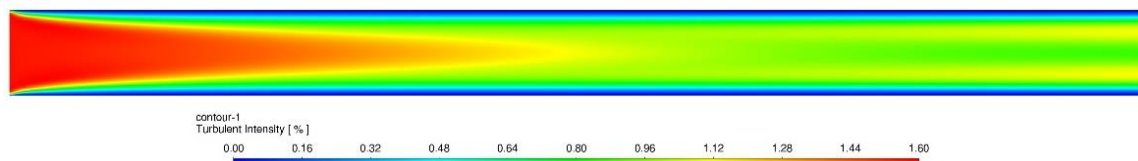
Pada gambar 3.1 menunjukkan distribusi kecepatan aliran dalam sebuah pipa dengan skala warna yang mewakili besar kecepatan dalam satuan meter per detik (m/s). Pada bagian masuk (*inlet*) di sebelah kiri. Pada bagian tepi atas dan bawah pipa menunjukkan aliran melambat ketika mendekati dinding pipa karena gesekan antara fluida dan permukaan pipa, hal ini disebabkan oleh efek *boundary layer*.



Gambar 4. Grafik Kecepatan Pada Penampang Pipa

Pada grafik tersebut, sumbu horizontal menunjukkan posisi sepanjang penampang pipa dalam meter (m), sedangkan sumbu vertikal merupakan rasio kecepatan fluida pada arah aliran utama terhadap kecepatan maksimum (u/U_{max}) dalam penampang pipa, dengan nilai bersifat tanpa dimensi (dimensionless).

2. Intensitas Turbulen

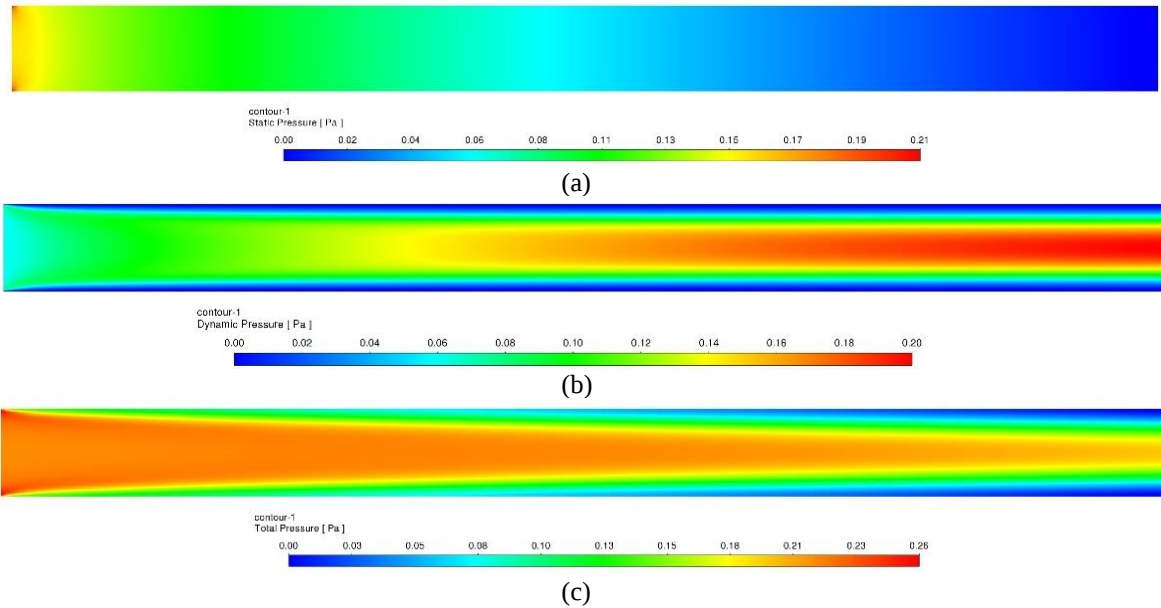


Gambar 5. Profile Intensitas Turbulent

Gambar distribusi Intensitas turbulensi direpresentasikan dengan gradasi warna, di mana setiap warna menunjukkan tingkat turbulensi tertentu berdasarkan persentase. Warna biru gelap mengindikasikan intensitas

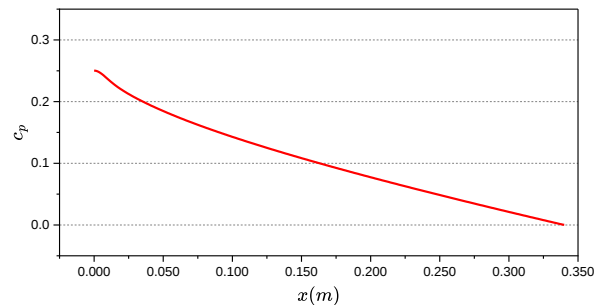
turbulensi yang sangat rendah, sekitar 0.01%, yang umumnya terjadi di dekat dinding pipa atau pada daerah aliran yang stabil.

3. Profile Tekanan



Gambar 6. Hasil Distribusi Kontur (a) Tekanan Statis, (b) Tekanan Dinamis dan (c) Tekanan Total

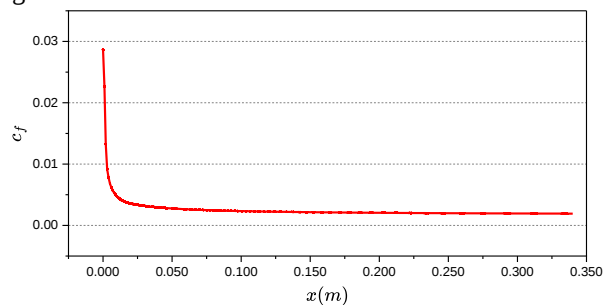
Tekanan statis bervariasi sepanjang pipa, dengan penurunan tekanan terjadi secara perlahan-lahan sepanjang penampang pipa. Untuk tekanan dinamis, terkait erat dengan kecepatan aliran, ditunjukkan oleh variasi warna pada gambar. Daerah dengan warna merah mengindikasikan kecepatan aliran yang tinggi, sementara daerah dengan warna biru menunjukkan kecepatan aliran yang rendah. Perubahan tekanan dinamis ini umumnya disebabkan oleh perubahan penampang pipa.



Gambar 7. Grafik Koefisien Tekanan Pada Penampang Pipa

Grafik ini merupakan hasil simulasi CFD yang menggambarkan distribusi koefisien tekanan (C_p) sepanjang penampang pipa dengan panjang total 340 mm. Sumbu horizontal (x) menunjukkan posisi sepanjang pipa dalam satuan meter, sedangkan sumbu vertikal merepresentasikan nilai koefisien tekanan tanpa dimensi.

4. Koefisien Gesek Dinding

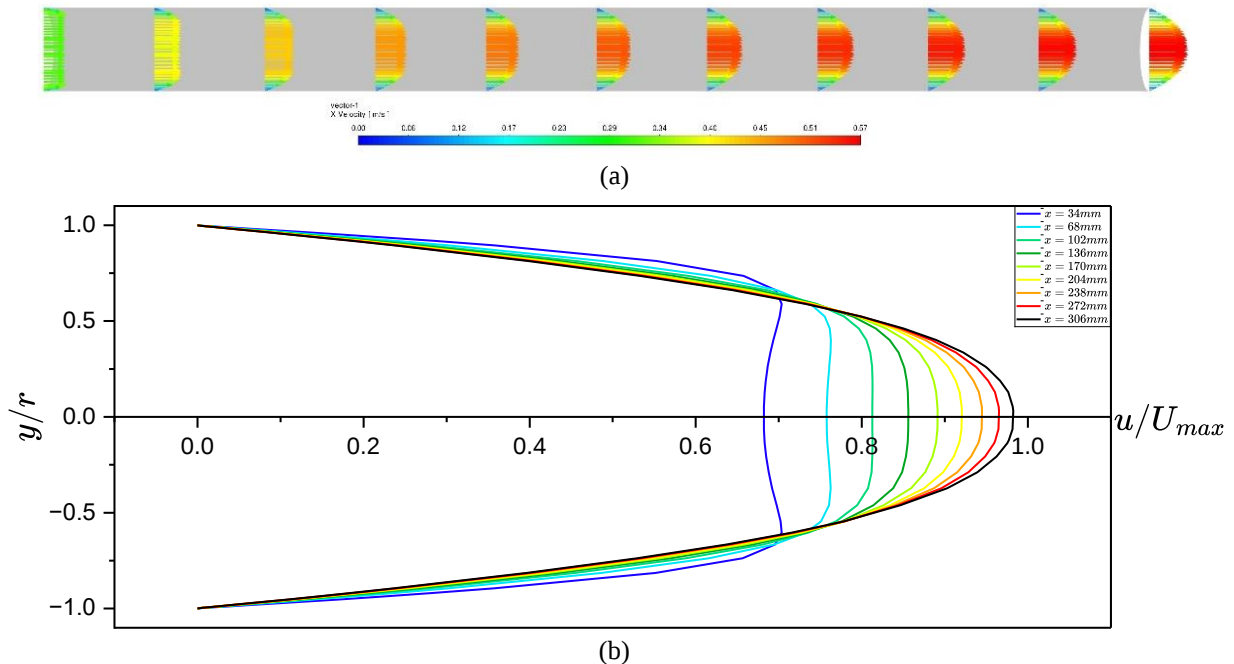


Gambar 8. Koefisien Gesek Sepanjang Permukaan Dinding Pipa

Grafik ini menggambarkan distribusi koefisien gesekan dinding (c_f) pada dinding pipa dengan panjang total 340 mm berdasarkan hasil simulasi CFD. Sumbu horizontal (x) menunjukkan posisi sepanjang pipa dalam satuan meter, sedangkan sumbu vertikal merepresentasikan nilai yaitu koefisien gesekan kulit (c_f) tanpa dimensi.

Pada awal pipa, nilai sangat tinggi, sekitar 0,04. Hal ini disebabkan oleh adanya lapisan batas yang baru terbentuk di dekat inlet, di mana gradien kecepatan normal terhadap dinding sangat besar, menghasilkan gesekan yang signifikan. Namun, seiring bertambahnya Panjang (x), nilai c_f menurun tajam. Penurunan ini mencerminkan perkembangan lapisan batas yang semakin tebal, sehingga efek gesekan terhadap fluida menjadi lebih kecil.

B. Perkembangan *Boundary Layer* Sepanjang Pipa



Gambar 9. (a) Profile Vektor Kecepatan (b) Grafik Profile Kecepatan di Setiap Posisi X

Seiring bertambahnya jarak x , lapisan batas terlihat tumbuh lebih tebal, yang dapat diamati dari profil kecepatan yang menjadi lebih parabolik. Pada ($x = 0.170\text{ mm}$) dan seterusnya, area dengan kecepatan maksimum di tengah pipa menyusut, dan distribusi kecepatan menunjukkan transisi menuju aliran sepenuhnya berkembang (*fully developed flow*).

Pada posisi lebih hilir ($x = 0.272\text{ mm}$ s/d $x = 0.306\text{ mm}$), profil kecepatan telah berbentuk parabolik sempurna, yang merupakan karakteristik aliran laminar sepenuhnya berkembang dalam pipa. Dalam kondisi ini, gradien kecepatan di dekat dinding tetap konstan, dan tidak ada perubahan signifikan pada profil kecepatan di sepanjang panjang pipa.

C. Data Hasil Pada Titik Tertentu

Data hasil simulasi mencakup kecepatan (m/s) dan Tekanan (Pa) pada titik yang koordinatnya telah ditentukan dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 6. Hasil Kecepatan dan Tekanan Pada Titik yang Ditentukan

Nama	Kecepatan (m/s)	Tekanan Statik (Pa)	Tekanan Dinamis (Pa)	Tekanan Total (Pa)
Point-p1	0.236	0.106	0.034	0.140
Point-p2	0.408	0.082	0.102	0.184
Point-p3	0.467	0.062	0.134	0.196
Point-p4	0.507	0.044	0.158	0.202
Point-p5	0.545	0.027	0.182	0.209

D. Pembahasan Hasil Simulasi

Hasil simulasi menunjukkan perkembangan aliran dari kondisi belum berkembang (*developing flow*) hingga mencapai aliran berkembang penuh (*fully developed flow*). Pada daerah dekat inlet, boundary layer mulai terbentuk dan tumbuh secara progresif sepanjang pipa hingga bertemu di tengah penampang. Hal ini menghasilkan profil kecepatan berbentuk parabola, yang khas pada aliran laminar. Efek gesekan antara fluida dan dinding pipa

menyebabkan kecepatan fluida di dekat dinding mendekati nol (no-slip condition). Setelah boundary layer mencapai ketebalan maksimum, aliran menjadi sepenuhnya berkembang.

Nilai koefisien gesekan dinding (c_f) mengalami penurunan signifikan di daerah dekat inlet akibat gradien kecepatan yang tinggi. Setelah aliran mencapai kondisi berkembang penuh, nilai c_f stabil dan menunjukkan karakteristik khas aliran laminar. Kecepatan maksimum tercapai di tengah penampang pipa dan lebih tinggi dari kecepatan inlet. Hal ini sesuai dengan prinsip kekekalan massa dan momentum dalam aliran internal. Pada inlet, kecepatan fluida seragam sebesar 0.329 m/s, kemudian boundary layer mulai terbentuk dalam daerah yang disebut entrance region. Setelah boundary layer berkembang sepenuhnya, aliran memasuki fully developed region, yang tetap stabil kecuali ada gangguan seperti belokan, ekspansi, atau kontraksi.

Tekanan statik pada outlet diambil sebagai nol, yang berarti setara dengan tekanan atmosfer. Sementara itu, tekanan dinamis dihitung berdasarkan kecepatan aliran pada penampang pipa. Tidak terdapat perubahan signifikan dalam intensitas turbulensi, yang menegaskan bahwa aliran dalam simulasi ini tetap laminar. Hal ini dikonfirmasi oleh perhitungan Reynolds number, di mana transisi menuju turbulensi biasanya terjadi pada intensitas turbulensi di atas 5%.

IV KESIMPULAN

Dari hasil simulasi CFD pada penampang pipa telah dilakukan didapatkan hasil yang dapat disimpulkan sebagai berikut.

Aliran berkembang dari kondisi developing flow hingga mencapai fully developed flow. Boundary layer tumbuh secara bertahap sepanjang pipa hingga bertemu di tengah penampang, menghasilkan profil kecepatan parabola khas aliran laminar. Koefisien gesekan dinding (c_f) mengalami penurunan signifikan di dekat inlet akibat gradien kecepatan yang tinggi, lalu stabil setelah aliran berkembang penuh.

Kecepatan maksimum terjadi di tengah penampang pipa dan lebih tinggi dari kecepatan inlet, sesuai dengan hukum kekekalan massa dan momentum. Tekanan statik pada outlet dianggap nol sebagai referensi terhadap tekanan atmosfer, sementara tekanan dinamis bergantung pada kecepatan fluida.

Tidak ada perubahan signifikan dalam intensitas turbulensi, menegaskan bahwa aliran tetap laminar dengan Reynolds number pada inlet yang menunjukkan kondisi fully developed laminar flow

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya ucapkan kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat serta rekan aslab, rekan himpunan, maupun teman teman seperjuangan yang telah membantu untuk menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] J. Jalaluddin, S. Akmal, N. ZA, and I. Ibrahim, "ANALISA PROFIL ALIRAN FLUIDA CAIR DAN PRESSURE DROP PADA PIPA L MENGGUNAKAN METODE SIMULASI COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) Abstrak," *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, vol. 8, no. 1, pp. 97–108, 2019, doi: <https://doi.org/10.29103/jtku.v8i1.3396>.
- [2] Y. Ge *et al.*, "Application and development of optical-based viscosity measurement technology," *Opt Lasers Eng*, vol. 181, no. April, p. 108413, 2024, doi: [10.1016/j.optlaseng.2024.108413](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108413).
- [3] N. Hayati, A. Purwanto, and E. Muladi, "CFD (Computational Fluid Dynamic) untuk menganalisis head loss akibat perubahan diameter," *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, vol. 18, no. 2, pp. 1–4, 2023, doi: [10.36289/jtmi.v18i2.441](https://doi.org/10.36289/jtmi.v18i2.441).
- [4] E. J. Rumaherang, W. M. E. Wattimena, S. M. Rawulun, and E. Noya, "Studi Regim Aliran Fluida Dan Penentuan Head Loss Akibat Gesekan Pada Instalasi Perpipa-an," *ALE Proceeding*, vol. 6, pp. 154–161, 2023, doi: [10.30598/ale.6.2023.154-161](https://doi.org/10.30598/ale.6.2023.154-161).
- [5] D. Pratama, K. Hadiningrum, and R. F. Muldiani, "Studi Awal Pengaruh Temperatur terhadap Karakteristik Aliran Fluida Pada Belokan Pipa 90° melalui Simulasi," *Jurnal MIPA*, vol. 11, no. 2, p. 68, 2022, doi: [10.35799/jm.v11i2.41826](https://doi.org/10.35799/jm.v11i2.41826).
- [6] S. Sudirman and H. Harves, "Analisa Headloss Aliran Fluida Pada Pipa Lurus Dengan Variasi Debit Aliran Dan Variasi Diameter Pipa," *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 8, no. 2, p. 165, 2022, doi: [10.35308/jmkn.v8i2.5674](https://doi.org/10.35308/jmkn.v8i2.5674).

- [7] A. Admin *et al.*, “Rancang Bangun Visualisasi Aliran Air Di Dalam Pipa Tubular Dengan Vortex Generator Untuk Meningkatkan Sifat Turbulensi Fluida,” *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 7, no. 2, pp. 205–215, 2021, doi: 10.56521/teknika.v7i2.321.
- [8] S. Hutagalung and W. A. Widodo, “Studi Numerik Karakteristik Aliran Melintasi Silinder Sirkular dengan Penempatan Airfoil NACA 0012, NACA 0018, NACA 0024 di Belakang Silinder,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 13, no. 1, 2024, doi: 10.12962/j23373539.v13i1.142096.
- [9] T. Joshi, O. Parkash, and G. Krishan, “Numerical Investigation of Slurry Pressure Drop at Different Pipe Roughness in a Straight Pipe Using CFD,” *Arab J Sci Eng*, vol. 47, no. 12, pp. 15391–15414, 2022, doi: 10.1007/s13369-022-06583-1.
- [10] L. Silvestri, “CFD modeling in Industry 4.0: New perspectives for smart factories,” *Procedia Comput Sci*, vol. 180, no. 2019, pp. 381–387, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.01.359.
- [11] * Luhung, D. Achmad, E. Yohana, and M. Tauviquirrahman, “Investigasi Numerik Pengaruh Penambahan Rotary Agitator Terhadap Karakteristik Hidrodinamika Gas-Solid Fluidized Bed Dengan Pendekatan Two Fluid Model-Kinetic Theory of Granular Flow,” *Jurnal Teknik Mesin S-1*, vol. 10, no. 4, pp. 589–596, 2022.
- [12] A. Yonanda and D. A. Amrizal, “Karakteristik Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Spiral Menggunakan Metode Simulasi CFD Characteristics a Spiral Flat Plate Solar Collectors Using CFD Simulation Method,” *Open Science and Technology*, vol. 01, no. 01, pp. 2776–169, 2021, [Online]. Available: <https://opscitech.com/journal>
- [13] M. U. Nuha, A. Fatahillah, and S. Setiawani, “Analisis Numerik Aliran Udara pada Rongga Hidung akibat Penyakit Sinusitis menggunakan Metode Volume Hingga,” *Limits: Journal of Mathematics and Its Applications*, vol. 19, no. 2, p. 217, 2022, doi: 10.12962/limits.v19i2.13683.
- [14] A. Kusmayadi, E. A. Suyono, D. Nagarajan, J. S. Chang, and H. W. Yen, “Application of computational fluid dynamics (CFD) on the raceway design for the cultivation of microalgae: a review,” *J Ind Microbiol Biotechnol*, vol. 47, no. 4–5, pp. 373–382, 2020, doi: 10.1007/s10295-020-02273-9.
- [15] S. Schmelter, M. Olbrich, E. Schmeier, and M. Bär, “Numerical simulation, validation, and analysis of two-phase slug flow in large horizontal pipes,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 73, 2020, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101722.
- [16] B. Gde Didit Citra Anggarana and I. Made Gatot Karohika, “Analisis Aerodinamika Bodi Mobil Dengan Variasi Kecepatan Menggunakan Perangkat Lunak Cfd,” *SIBATIK JOURNAL: Jurnal Ilmiah Bidang Sosial, Ekonomi, Budaya, Teknologi, dan Pendidikan*, vol. 1, no. 8, pp. 1455–1462, 2022, doi: 10.54443/sibatik.v1i8.192.
- [17] A. Ruggiero, R. D’Amato, and S. Affatato, “Comparison of meshing strategies in THR finite element modelling,” *Materials*, vol. 12, no. 14, pp. 1–11, 2019, doi: 10.3390/ma12142332.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.