

Analisis Distribusi Kecepatan Fluida pada Daerah Boundary Layer di dalam Pipa Lurus Secara Eksperimental *(Experimental Analysis of Fluid Velocity Distribution in the Boundary Layer of a Straight Pipe)*

Keigant Abdullah Barafi¹⁾, Ali Akbar²⁾, A'rasy Fahrudin³⁾, Rachmat Firdaus⁴⁾.

^{1,2,3,4)} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia
E-mail: keigenabdullah12@gmail.com¹⁾, aliakbar@umsida.ac.id²⁾,
arasy.fahrudin@umsida.ac.id³⁾, firdausr@umsida.ac.id⁴⁾

Abstrak

Boundary layer adalah lapisan batas yang terbentuk akibat gesekan antara permukaan penampang dan fluida, sehingga terjadi gradiensi kecepatan. Penelitian ini mengamati gradiensi kecepatan fluida pada *boundary layer* dalam pipa lurus menggunakan metode eksperimental. Distribusi kecepatan fluida diukur menggunakan pipa akrilik berdiameter 1" dan jarum tumpul berdiameter 1,5 mm yang menyerupai tabung pitot dengan sistem perbedaan tekanan stagnasi dan tekanan statis. Fluida dengan berbagai viskositas dan laju aliran diuji untuk memahami pengaruhnya terhadap karakteristik lapisan batas. Dengan *flowrate* 10 liter/menit menunjukkan hasil pengukuran kecepatan fluida meningkat seiring bertambahnya jarak radial pada dinding pipa mulai dari $r_1 = 2$ mm (0,334 m/s), $r_2 = 5,5$ mm (0,341 m/s), $r_3 = 7,5$ mm (0,425 m/s), $r_4 = 10,5$ mm (0,438 m/s), dan pada $r_5 = 12,7$ mm (0,443 m/s). Kecepatan tertinggi tercatat di titik tengah pipa yang membuktikan bahwa hasilnya sesuai dengan karakteristik *boundary layer*, di mana gaya gesekan dan viskositas berkurang.

Kata Kunci: Aliran Fluida, *Boundary Layer*, Distribusi Kecepatan, Metode Eksperimen, Pipa Lurus.

Abstract

The boundary layer is a boundary layer formed due to friction between the cross-sectional surface and the fluid, resulting in a velocity gradient. This study observes the fluid velocity gradient in the boundary layer in a straight pipe using an experimental method. The fluid velocity distribution was measured using a 1" diameter acrylic pipe and a 1.5 mm diameter blunt needle that resembles a pitot tube with a system of stagnation pressure and static pressure differences. Fluids with various viscosities and flow rates were tested to understand their effects on the characteristics of the boundary layer. With a flowrate of 10 liters/minute shows that the results of fluid velocity measurements increase with increasing radial distance on the pipe wall starting from $r_1 = 2$ mm (0,334 m/s), $r_2 = 5,5$ mm (0,341 m/s), $r_3 = 7,5$ mm (0,425 m/s), $r_4 = 10,5$ mm (0,438 m/s), dan pada $r_5 = 12,7$ mm (0,443 m/s). The highest velocity was recorded at the middle point of the pipe which proves that the available results are in accordance with the boundary layer characteristics, where frictional and viscous forces are reduced.

Keywords: Fluid flow, Boundary Layer, Velocity distribution, Experimental study, Straight pipe

1. PENDAHULUAN

Fluida adalah zat yang memiliki kemampuan untuk mengalir dan mengubah bentuknya dengan wadah atau saluran yang dilaluinya. Fluida sendiri khususnya udara, sangat penting dalam industri dan rekayasa untuk berbagai aplikasi, seperti ventilasi, pendinginan, dan distribusi aliran udara [1][2]. Dalam kebanyakan kasus, proses pendistribusian fluida membutuhkan sistem perpipaan sebagai media transportasi dan alat bantu seperti peniup, atau blower, yang mengangkut fluida dari satu tempat ke tempat lain [3][4].

Fluida dihisap pada sisi masuk (*inlet*) sistem peniup dan dikeluarkan pada sisi tekan (*outlet*). Karakteristik peniup dan kondisi sistem penyaluran fluida sangat memengaruhi kinerja sistem ini. Faktor-faktor seperti kekasaran permukaan dinding, jenis dan jumlah sambungan, sifat fluida, panjang dan diameter pipa, kecepatan dan jenis aliran memengaruhi penurunan tekanan aliran yang dikenal sebagai *head loss* [5].

Head losses merupakan kehilangan energi fluida karena hambatan selama aliran di pipa, yang berdampak langsung pada efisiensi sistem dan jumlah energi yang digunakan. Rugi aliran biasanya dibagi menjadi *major losses* dan *minor losses*. *Major losses* terjadi karena gesekan antara fluida dan dinding pipa sepanjang aliran, sedangkan *minor losses* terjadi karena gangguan aliran yang disebabkan perubahan geometri sistem seperti belokan, sambungan, atau perubahan luas penampang, yang dikenal sebagai *sudden expansion* dan *sudden contraction* [6]–[8]

Ketika fluida mengalir melewati permukaan padat, baik datar maupun lengkung, terbentuk lapisan batas (*boundary layer*) karena gaya gesek dan efek viskositas fluida. Pada titik ini, kecepatan fluida berubah sangat banyak, mulai dari kecepatan nol di permukaan dinding karena kondisi tanpa slip (*no slip condition*) hingga mendekati kecepatan maksimum di tengah aliran. Karakteristik lapisan batas ini sangat mempengaruhi distribusi fluida [9] [10].

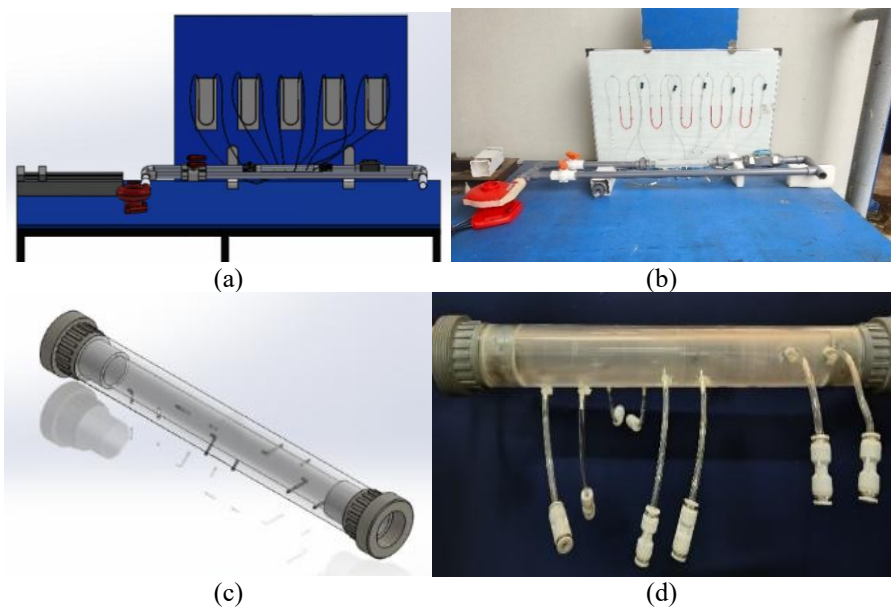
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi kecepatan fluida pada lapisan batas dalam pipa lurus pada skala laboratorium. Karena itu, penelitian eksperimental yang secara khusus mengamati distribusi kecepatan fluida pada lapisan batas dalam pipa lurus menggunakan pendekatan pengukuran perbedaan tekanan stagnasi dan tekanan statis masih relatif terbatas. Penelitian ini diharapkan

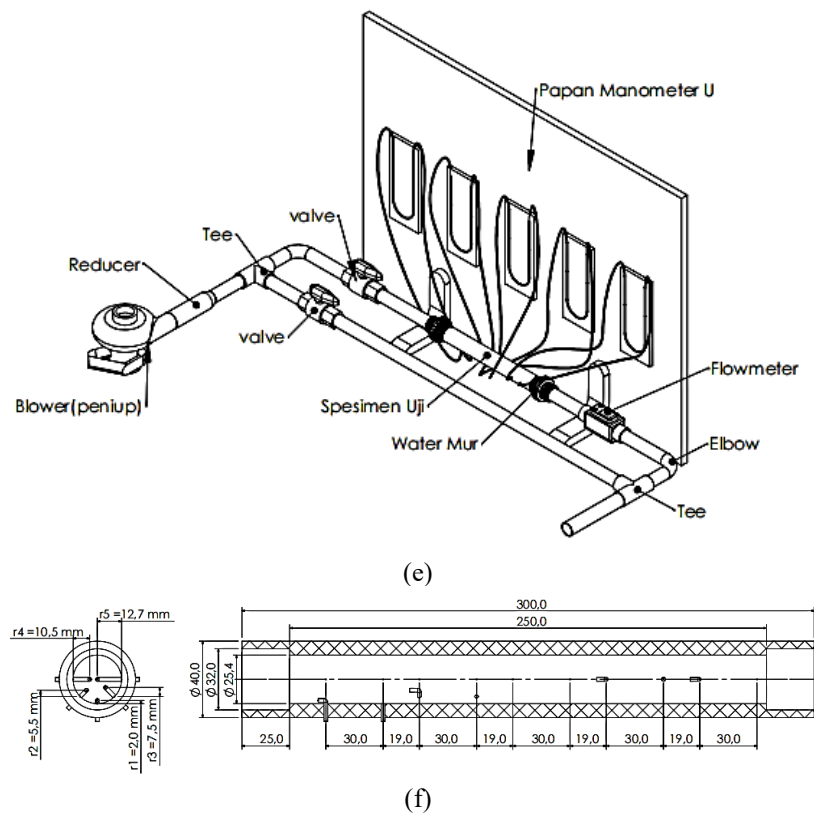
dapat meningkatkan pemahaman kita tentang karakteristik aliran fluida di dekat dinding pipa dan membantu kita menentukan cara membuat sistem perpipaan yang lebih efisien.

2. METODE PENELITIAN

a. Desain Penelitian

Tujuan dari penelitian eksperimental ini adalah untuk menganalisis distribusi kecepatan fluida pada daerah lapis batas dalam pipa lurus. Metode eksperimental digunakan untuk mengumpulkan informasi aktual tentang karakteristik aliran fluida dan hubungannya dengan dinding pipa berdasarkan hasil pengukuran langsung. Untuk tujuan penelitian ini, material akrilik dipilih karena memungkinkan proses fabrikasi benda uji lebih mudah dan memungkinkan pengamatan visual aliran fluida menjadi lebih mudah. Pipa lurus berdiameter satu inci adalah objek penelitian. Sistem pengujian dibangun sebagai instalasi perpipaan tertutup yang dilengkapi dengan *blower*, atau peniup, sebagai sumber aliran; *flowmeter* digunakan untuk mengatur dan mengukur debit aliran; dan manometer U digunakan untuk mengukur tekanan. Tempat tes dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo [11][12]. Gambar 1 menunjukkan skema instalasi dan objek penelitian.

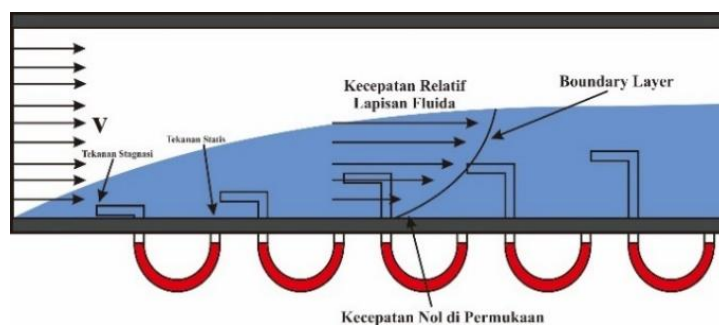




Gambar 1. (a) Desain Instalasi, (b) Hasil Jadi Instalasi, (c) Desain Spesimen uji, (d) Hasil Jadi Spesimen, (e) Skema Instalasi, (f) Dimensi Spesimen

b. Karakteristik Boundary Layer

Boundary layer adalah lapisan tipis fluida yang terbentuk di dekat permukaan dinding pipa karena gaya gesek dan efek viskositas fluida. Kecepatan fluida berubah secara signifikan di daerah ini, mulai dari kecepatan nol di permukaan dinding karena kondisi tanpa slip hingga mendekati kecepatan aliran bebas di luar lapisan batas. Distribusi kecepatan di daerah batas merupakan faktor penting dalam antrian. Karakteristik *boundary layer* terhadap kecepatan fluida dapat di jelaskan di bawah ini.



Gambar 2. Karakteristik *Boundary Layer*

Analisis Distribusi Kecepatan Fluida pada Daerah Boundary Layer di dalam Pipa Lurus Secara Eksperimental (Keigant Abdullah Barafi, Ali Akbar, A'rasy Fahrudin, Rachmat Firdaus)

c. Spesifikasi Alat dan Bahan

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah *blower*, *flowmeter* dengan satuan L/menit, manometer U yang memiliki fluida kerja air, dan jarum tumpul berdiameter 1,5 mm yang berfungsi seperti tabung Pitot untuk mengukur perbedaan tekanan stagnasi dan tekanan statis. Untuk mengurangi gangguan terhadap pola aliran fluida, jarum pengukur diposisikan tegak lurus terhadap arah aliran dan pengukuran dilakukan pada beberapa posisi radial dari dinding pipa menuju pusat penampang.

d. Prosedur Pengujian

Pengujian dimulai dengan menghidupkan sistem aliran dan menggunakan *flowmeter* untuk mengontrol debit aliran hingga mencapai nilai konstan 10 L/menit. Setelah aliran mencapai kondisi tunak, atau kondisi tetap, selisih tekanan diukur dengan manometer U pada lima titik pengamatan, masing-masing mewakili posisi radial yang berbeda di dalam pipa. Untuk mendapatkan nilai rata-rata yang lebih representatif dan mengurangi pengaruh fluktuasi pengukuran, setiap titik pengukuran diukur tiga kali.

e. Teknik Pengolahan Data

Untuk memperoleh data yang dibutuhkan dalam rangka mencapai tujuan penelitian, menggunakan rumus berikut:

1) Perhitungan Hasil Data

Kecepatan fluida pada *flowmeter* merupakan salah satu parameter utama untuk menentukan laju aliran fluida. Dalam konteks ini, kecepatan umumnya merujuk pada kecepatan rata-rata fluida di dalam pipa atau saluran lainnya, yang dihitung berdasarkan volume fluida yang melewati penampang pipa per satuan waktu[13]. Kecepatan ini menjadi faktor penting dalam menghitung debit aliran dan memastikan akurasi pengukuran *flowmeter* pada kecepatan aliran diperoleh dari persamaan :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

V : Kecepatan (meter/detik)
Q : Laju Aliran (meter/detik)
A : Luas Penampang

D : Diameter pipa

π : $3,14/\frac{22}{7}$

2) Tekanan Manometer u pada tiap $\Delta h1$ sampai $\Delta h5$

Menghitung tekanan dari hasil $\Delta h1$ sampai $\Delta h5$:

$$P = \rho \cdot g \cdot \Delta h \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

P : Tekanan (Pa)

ρ : Densitas fluida pada manometer U (Air = 1.000 kg/m^3)

g : Percepatan gravitasi (9,81 meter/detik)

Δh : Selisih antara tekanan stagnasi ($h1$) dan tekanan statis ($h2$)

3) Kecepatan Fluida

Menghitung kecepatan fluida dari hasil langkah diatas :

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho \text{ udara}}} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan :

V : Kecepatan (meter/detik)

P : Tekanan (Pa)

ρ : Densitas fluida pada manometer U (udara = $1,225 \text{ kg/m}^3$)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Hasil Data Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan *flowmeter* yang diatur pada debit Aliran 10 L/menit, diperoleh data selisih tinggi tekanan (Δh) pada lima titik pengukuran, yaitu $\Delta h1$, $\Delta h2$, $\Delta h3$, $\Delta h4$, dan $\Delta h5$. Data rata-rata selisih tinggi tekanan di masing-masing titik pengukuran disajikan pada tabel dibawah.

Tabel 1. Hasil Pengujian

<i>Flowmeter 10L/menit</i>					
No	$\Delta h1$	$\Delta h2$	$\Delta h3$	$\Delta h4$	$\Delta h5$
1	8 mm	9 mm	12 mm	13 mm	15 mm
2	7 mm	8 mm	12 mm	13 mm	13 mm

3	6 mm	5 mm	10 mm	10 mm	9 mm
Rata-rata (mm)	7 mm	7,3 mm	11,3 mm	12 mm	12,3 mm
Rata-rata (m)	0,007 m	0,0073 m	0,0113 m	0,012 m	0,0123 m

Dari hasil tabel diatas terlihat bahwa nilai selisih tekanan meningkat dari titik pengukuran Δh_1 hingga Δh_5 . Hal ini menunjukkan distribusi kecepatan fluida yang bervariasi sepanjang penampang pipa, dimana kecepatan fluida cenderung meningkat seiring dengan menjauhnya titik pengukuran dari permukaan pipa menuju bagian tengah pipa.

b. Perhitungan Kecepatan Fluida

Menghitung kecepatan rata-rata pada flowmeter yang nantinya dijadikan acuan pada hasil Tabel 2.

Diketahui :

$$Q : 10 \text{ L/menit} = 0,01 \text{ m}^3/\text{menit} = 0,00016 \text{ m}^3/\text{detik}$$

$$D : \text{Diameter} = 1 \text{ inci} = 25,4 \text{ mm} = 0,0254 \text{ m}$$

$$\pi : 3,14/\frac{22}{7}$$

$$A : 0,0005064 \text{ m}^2$$

Kecepatan rata-rata fluida dapat dicari menggunakan debit dimana :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2}$$

Nilai yang digunakan pada d yaitu pipa yang memiliki diameter 1" inci = 25,4 mm = 0,0254 m, sehingga :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,00016 \text{ m}^3/\text{detik}}{\frac{3,14}{4} \cdot 0,0254^2} = 0,315 \text{ m/s}$$

Hasil kecepatan rata-rata didapatkan dengan nilai 0,315 m/s, maka dari hasil perhitungan kecepatan pada Tabel 2 harus mendekati nilai kecepatan rata-rata.

Kecepatan fluida dihitung dengan persamaan :

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho}}$$

Untuk nilai tekanan didapatkan dari persamaan :

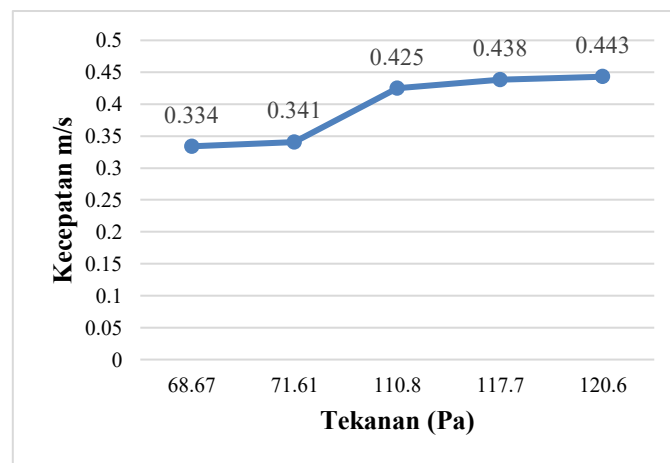
$$P = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Dari persamaan di atas didapatkan nilai tekanan (Pa) untuk menghitung kecepatan dengan memasukkan nilai Δh_1 sampai Δh_5 . Sehingga didapatkan hasil kecepatan pada Tabel 2.

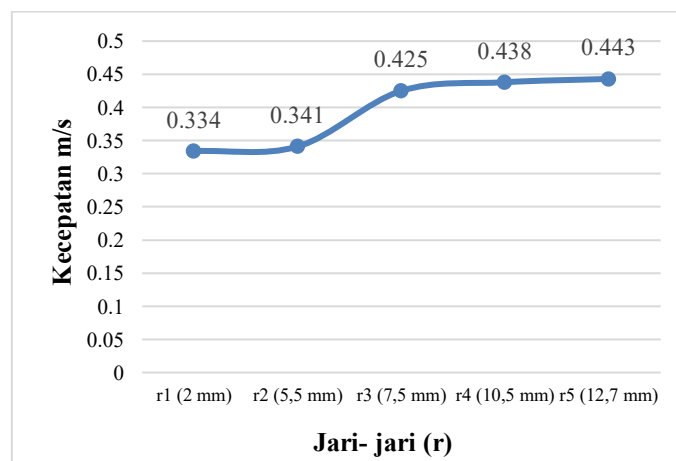
Tabel 2. Hasil Perhitungan Kecepatan

No	Jari-jari (mm)	Δh (m)	Tekanan (Pa)	Kecepatan (m/s)
1	2	0,007	68,67	0,334
2	5,5	0,0073	71,61	0,341
3	7,5	0,0113	110,8	0,425
4	10,5	0,012	117,7	0,438
5	12,7	0,0123	120,6	0,443

Dari hasil diatas kecepatan fluida meningkat seiring dengan meningkatnya selisih perbedaan tekanan (Δh). Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin jauh titik pengukuran dari permukaan pipa maka semakin besar kecepatan fluida yang terukur pada manometer U, dan kecepatan tertinggi tercatat pada titik Δh_5 .



Gambar 3. Grafik Tekanan dan Kecepatan



Gambar 4. Grafik Kecepatan pada Berbagai Posisi

c. Analisis Distribusi Kecepatan Fluida

Pada aliran di dalam pipa, pola distribusi kecepatan fluida yang ditemukan dalam penelitian ini menunjukkan karakteristik lapisan batas. Gaya gesek dipengaruhi oleh viskositas fluida dan kondisi tanpa slip, atau kondisi tanpa slip, sehingga kecepatan fluida relatif rendah. Nilai kecepatan terendah pada titik Δh_1 dan Δh_2 menunjukkan kondisi ini.

Pengaruh gaya gesek berkurang seiring dengan jarak titik pengukuran dari dinding pipa. Akibatnya, di daerah tengah penampang pipa, energi kinetik fluida meningkat dan kecepatan aliran meningkat hingga hampir mencapai maksimum. Hal ini sesuai dengan teori aliran internal, di mana profil kecepatan fluida pipa lurus menunjukkan gradien kecepatan terbesar di dekat dinding dan relatif konstan di bagian tengah aliran [2].

Hasilnya menunjukkan bahwa distribusi kecepatan fluida pada daerah lapis batas dapat digambarkan secara kualitatif dengan menggunakan metode pengukuran yang menggunakan manometer U. Oleh karena itu, metode eksperimental yang digunakan dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar untuk analisis lebih lanjut tentang pengaruh lapis batas terhadap rugi-rugi aliran (*head loss*) dan efisiensi sistem perpipaan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

a. Kesimpulan

Dalam pipa lurus, penelitian eksperimental mengenai distribusi kecepatan fluida pada daerah batas lapisan menunjukkan bahwa kecepatan fluida meningkat seiring dengan jarak dari permukaan dinding pipa ke bagian tengah penampang. Akibat gaya gesek dan kondisi tanpa slip, kecepatan fluida relatif rendah pada daerah yang dekat dengan dinding pipa. Sebaliknya, pada daerah yang lebih jauh dari dinding pipa, kecepatan fluida relatif tinggi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa distribusi kecepatan fluida yang diperoleh sejalan dengan karakteristik lapisan batas pada aliran internal, dengan gradien kecepatan tertinggi di dekat dinding pipa. Fenomena ini menunjukkan bahwa selain memainkan peran penting dalam pembentukan profil kecepatan aliran, viskositas fluida juga berperan dalam menyebabkan rugi-rugi aliran, atau kehilangan kepala, sepanjang pipa. Oleh karena

itu, pemahaman tentang karakteristik lapisan batas dan distribusi kecepatan fluida sangat penting.

b. Saran

Untuk mempelajari dampak perubahan bilangan Reynolds terhadap sifat lapisan batas dan distribusi kecepatan fluida di dalam pipa, penelitian lebih lanjut disarankan untuk melakukan variasi debit aliran. Selain itu, dapat dilakukan dengan menggunakan material pipa dengan berbagai tingkat kekasaran permukaan untuk mengevaluasi dampak kekasaran dinding terhadap profil kecepatan dan rugi-rugi aliran, atau kehilangan kepala. Dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), penelitian juga dapat dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimen dengan simulasi numerik. Tujuannya adalah untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku aliran fluida. Untuk meningkatkan akurasi pengukuran kecepatan fluida pada daerah lapisan batas, disarankan untuk menggunakan alat ukur kecepatan yang lebih presisi, seperti *hot-wire anemometer* atau *pitot tube*.

5. 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.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Maulana and W. Sujana, "Analisa Variasi Foot Valve Dan Jatuh Air Terhadap Karakteristik Pada Pompa Sentrifugal," *J. Flywheel*, vol. 12, no. 2, pp. 10–13, 2021, doi: 10.36040/flywheel.v12i2.4277.
- [2] A. Salama, "Velocity Profile Representation for Fully Developed Turbulent Flows in Pipes: A Modified Power Law," *Fluids*, vol. 6, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids610036>.
- [3] F. Wicaksono and S. Subekti, "Analisis Pengaruh Penyumbatan Aliran Fluida pada Pipa dengan Metode Fast Fourier Transform," *J. Din. Vokasional Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, pp. 77–83, 2021, doi: 10.21831/dinamika.v6i1.36339.
- [4] I. Syahrizal and D. Perdana, "Kajian Eksperimen Instalasi Pompa Seri dan Paralel Terhadap Efisiensi Penggunaan Energi," *Turbo J. Progr. Stud. Tek.*

Analisis Distribusi Kecepatan Fluida pada Daerah Boundary Layer di dalam Pipa Lurus Secara Eksperimental (Keigant Abdullah Barafi, Ali Akbar, A'rasy Fahrudin, Rachmat Firdaus)

- Mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 194–200, 2020, doi: 10.24127/trb.v8i2.1056.
- [5] P. Journal and O. F. Science, “Proses maintenance dan evaluasi kinerja pompa 56-p- 101 d di unit utilities PT. XYZ,” vol. 4, no. 1, pp. 35–38, 2024.
- [6] A. Fahrudin and M. Mulyadi, “Rancang Bangun Alat Uji Head Losses Dengan Variasi Debit Dan Jarak Elbow 90O Untuk Sistem Perpipaan Yang Efisien,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, pp. 32–35, 2018, doi: 10.24127/trb.v7i1.680.
- [7] W. Waspodo, “Analisa Head Loss Sistem Jaringan Pipa Pada Sambungan Pipa Kombinasi Diameter Berbeda,” *Suara Tek. J. Ilm.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2017, doi: 10.29406/stek.v8i1.534.
- [8] V. M. Sauer, “Flow Development in the Entrance Region of Slender Converging Pipes,” *Arxiv*, 2025.
- [9] L. Sun, X. Sun, Y. Li, and C. Wang, “Experimental Study on Flow Structure Characteristics of Gap Flow Boundary Layer Based on PIV,” *Water*, vol. 15, 2023.
- [10] S. Hariyadi, “Simulasi Dinamika Aliran Turbulen Pada Flat Plate Boundary Layer Menggunakan Turbulent Model $k - \epsilon$ (Standard, Realizable, RNG),” *J. Teknol. Penerbangan*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2017.
- [11] S. H. S.P., “Analisis Perbandingan Velocity Dan Shear Stress Perkembangan Boundary Layer Flat Plate Menggunakan Turbulent Model $k - \epsilon$ (Standard, Realizable, RNG),” *J. Penelit.*, vol. 2, no. 1, pp. 27–37, 2017, doi: 10.46491/jp.v2e1.109.27-37.
- [12] M. Mahmuddin, H. Hasan, and M. S. Habiba, “Studi Eksperimental tentang Perubahan Beda Tekanan dalam Aliran Dua Fase Cair-Cair dengan Variasi Sudut Ekspansi pada Saluran Pembesaran Mendadak,” *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 10, no. 1, pp. 334–342, 2024.
- [13] I. A. Gunawan, M. arif, D. Albari, Z. Lillahulhaq, Syamsuri, and A. R. Dwicahyani, “Perancangan dan Analisa Sistem Perpipaan Pompa Sertifugal P.100/15 pada Unit Kilang Cepu,” pp. 449–455, 2021.