

Analisis Distribusi Tekanan dan Kecepatan dalam Pipa Elbow Menggunakan *Computational Fluid Dynamics*

Syukur Rahmat Gulo^{(1,a)*} dan Triati Dewi Kencana Wungu^(2,b)

¹Program Studi Sains Komputasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 40132

²Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 40132

*E-mail : ^(a) syukurxgl@gmail.com, ^(b) triati@itb.ac.id

Diterima (12 Agustus 2025), Direvisi (08 Januari 2026)

Abstract. Pipe elbows are often critical points in piping systems because they can cause pressure drops and fluid flow irregularities. This study aims to analyze the distribution of pressure and fluid velocity influenced by the combination of 90°, 60°, and 45° elbow angles and inlet velocities of 1 m/s, 3 m/s, and 5 m/s. Simulations were conducted using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method, with geometry creation in FreeCAD and numerical modeling in ANSYS Fluent using the realizable $k-\epsilon$ turbulence model. Simulation results show that the highest pressure distribution occurs on the outer side of the elbow, while the inner side experiences the lowest pressure. The largest pressure drop of 15552.25 Pa occurred in the 90° elbow with an inlet velocity of 5 m/s. Additionally, the velocity distribution revealed stronger secondary flow at larger bend angles and higher flow velocities, leading to flow turbulence. These findings indicate that the bend angle and inlet velocity significantly influence flow distribution and pressure loss, so both must be considered simultaneously in pipeline system design to enhance efficiency and flow stability.

Keywords: Elbow geometry, Pressure distribution, Velocity distribution, Computational Fluid Dynamics (CFD).

Abstrak. Belokan pipa (elbow) sering menjadi titik krusial dalam sistem perpipaan karena dapat menyebabkan penurunan tekanan dan ketidakaturan aliran fluida. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tekanan dan kecepatan fluida yang dipengaruhi oleh kombinasi variasi sudut elbow 90°, 60°, dan 45° dan kecepatan inlet 1 m/s, 3 m/s, dan 5 m/s. Simulasi dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dengan pembuatan geometri di FreeCAD dan pemodelan numerik di ANSYS Fluent menggunakan model turbulensi *realizable k-ε*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi tekanan tertinggi terjadi di sisi luar belokan, sedangkan sisi dalam mengalami tekanan paling rendah. Penurunan tekanan terbesar sebesar 15552.25 Pa terjadi pada elbow 90° dengan kecepatan inlet 5 m/s. Selain itu, distribusi kecepatan menunjukkan aliran sekunder yang semakin kuat pada sudut elbow yang lebih besar dan kecepatan aliran yang lebih tinggi, yang menyebabkan ketidakseragaman aliran. Temuan ini menunjukkan bahwa sudut elbow dan kecepatan inlet sangat memengaruhi distribusi aliran dan kerugian tekanan, sehingga keduanya perlu dipertimbangkan secara simultan dalam desain sistem perpipaan untuk meningkatkan efisiensi dan kestabilan aliran.

Kata kunci: Geometri *elbow*, distribusi tekanan, distribusi kecepatan, *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

PENDAHULUAN

Sistem perpipaan merupakan bagian penting dalam berbagai industri, termasuk pembangkit listrik, minyak dan gas, industri kimia, transportasi laut, dan biomedis. Pipa digunakan untuk memindahkan fluida dari satu titik ke titik lain, dan salah satu komponen yang umum digunakan adalah elbow, yang berfungsi mengubah arah aliran. Meskipun perannya sederhana, elbow sering menghasilkan dinamika aliran yang kompleks, seperti kehilangan energi, perubahan distribusi tekanan dan kecepatan, pembentukan aliran sekunder (*secondary flow*), serta potensi pemisahan aliran [1,2]. Fenomena-fenomena ini dapat memengaruhi efisiensi operasional dan stabilitas sistem, sehingga pemahaman mengenai karakteristik aliran pada elbow menjadi penting dalam perancangan sistem perpipaan.

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode yang efektif untuk menganalisis aliran pada geometri kompleks. Dibandingkan eksperimen fisik yang memerlukan biaya besar dan prosedur rumit, CFD memungkinkan prediksi aliran dengan akurasi tinggi melalui perangkat lunak seperti ANSYS Fluent [3]. Hal ini menjadikan CFD sebagai alat utama dalam berbagai kajian fluida industri.

Penelitian sebelumnya telah mengidentifikasi beberapa fenomena penting pada aliran dalam elbow. Studi menunjukkan bahwa gaya sentrifugal akibat perubahan arah aliran menyebabkan tekanan lebih tinggi pada sisi luar elbow dan lebih rendah pada sisi dalam [4], dan hasil simulasi CFD telah terbukti memiliki kesesuaian tinggi dengan data eksperimen [5]. Penelitian lain juga menemukan bahwa variasi sudut *elbow* berpengaruh signifikan terhadap besarnya penurunan tekanan dan

ketidakseragaman aliran [6,7]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut hanya menginvestigasi sudut elbow atau kecepatan inlet secara terpisah, sehingga belum memberikan pemahaman menyeluruh mengenai interaksi kedua parameter dalam memengaruhi karakteristik aliran. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi sudut elbow 90°, 60°, dan 45° serta kecepatan inlet 1 m/s, 3 m/s, dan 5 m/s terhadap distribusi tekanan dan kecepatan fluida menggunakan metode CFD. Dengan mengintegrasikan kedua parameter tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih lengkap mengenai karakteristik aliran dalam elbow dan menjadi landasan bagi optimasi desain sistem perpipaan.

Kontribusi penelitian ini terletak pada analisis simultan antara variasi sudut elbow dan kecepatan inlet, sebuah pendekatan yang belum diterapkan dalam penelitian sebelumnya yang umumnya hanya meninjau salah satu parameter secara terpisah. Kombinasi kedua parameter tersebut penting dikaji karena fenomena seperti gaya sentrifugal, aliran sekunder, ketidakseragaman distribusi kecepatan, serta besarnya penurunan tekanan tidak hanya dipengaruhi oleh geometri elbow, tetapi juga meningkat seiring bertambahnya kecepatan aliran. Dengan demikian, karakteristik hidrodinamika dalam elbow merupakan hasil interaksi langsung antara sudut elbow dan kecepatan inlet, sehingga kajian yang mengamati satu parameter saja tidak mampu menggambarkan perilaku aliran secara menyeluruh. Dengan menganalisis berbagai kombinasi kondisi aliran, penelitian ini memberikan kontribusi yang lebih komprehensif dalam menjelaskan bagaimana interaksi kedua parameter tersebut membentuk distribusi

tekanan dan kecepatan di dalam elbow, serta menawarkan dasar penting bagi optimasi desain sistem perpipaan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur yang komprehensif. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent karena perangkat lunak ini memiliki kemampuan tinggi dalam memodelkan aliran fluida kompleks, terutama pada geometri melengkung seperti pipa elbow. Proses dimulai dari pembuatan desain geometri di FreeCAD, dilanjutkan dengan meshing untuk diskritisasi domain, setup simulasi, dan perhitungan solusi numerik. Diagram alir penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

1. Desain Geometri Pipa

Desain geometri elbow dibuat menggunakan perangkat lunak FreeCAD. Simulasi dilakukan untuk tiga variasi sudut elbow, yaitu 90° , 60° , dan 45° . Parameter geometri pipa yang digunakan dalam simulasi meliputi panjang pipa sebelum dan sesudah elbow masing-masing sebesar 1 meter, radius kelengkungan elbow sebesar 0.05 meter, serta diameter pipa sebesar 0.034 meter.

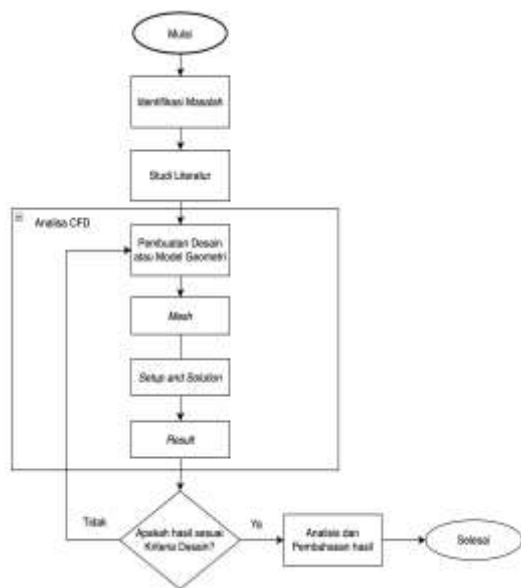
2. Diskritisasi Domain (*mesh*)

Proses diskritisasi domain, atau yang dikenal sebagai mesh, merupakan langkah penting dalam simulasi CFD. Pada tahap ini, geometri fluida yang bersifat kontinu diubah menjadi jaring-jaring diskrit yang terdiri dari elemen-elemen kecil, memungkinkan dilakukannya perhitungan numerik. Dalam penelitian ini, digunakan *mesh* struktural berbentuk heksahedral

karena mampu menghasilkan grid berkualitas tinggi serta optimal dalam hal stabilitas numerik dan akurasi [11]. Untuk setiap variasi sudut elbow yang diteliti diterapkan konfigurasi mesh heksahedral dengan jumlah node sebanyak 32121 untuk sudut 90° , dan masing-masing 24576 untuk sudut 60° dan 45° . Jumlah elemen yang digunakan adalah 28178 untuk sudut 90° , serta masing-masing 20682 untuk sudut 60° dan 45° . Ukuran elemen yang digunakan dalam seluruh konfigurasi adalah sebesar 0.09 meter.

3. Setup and Solution

Setelah proses diskritisasi dan penetapan model fisik serta sifat material, langkah berikut adalah pengaturan kondisi batas dan prosedur solusi numerik. Seluruh pengaturan dan prosedur yang digunakan untuk menjalankan simulasi ini dapat dilihat secara lengkap dalam Tabel 1. Tabel ini berisi semua detail teknis tentang model fisika yang dipakai, kondisi batas yang diterapkan pada pipa, serta langkah-langkah dan parameter numerik yang digunakan untuk mendapatkan solusi. Model turbulensi *realizable $k - \varepsilon$* dipilih karena memiliki keunggulan dalam memprediksi aliran turbulen dengan tikungan tajam dan area separasi, seperti pada kasus elbow. Model ini telah terbukti mampu menangani prediksi tekanan dinding dan struktur aliran sekunder lebih baik dibandingkan dengan model standar *$k - \varepsilon$* , sehingga cocok untuk investigasi geometri kompleks [11].



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tabel 1. Kondisi Batas dan Parameter Fisik

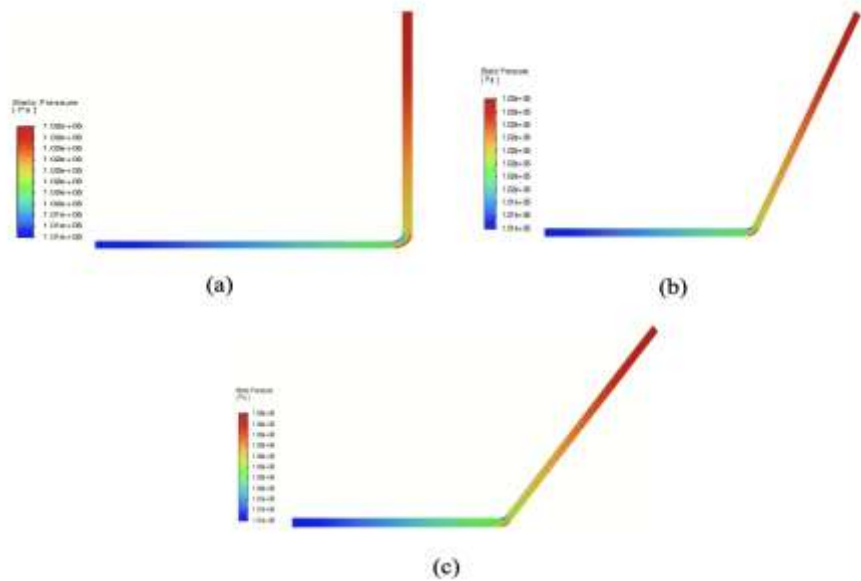
Kategori Pengaturan	Parameter	Nilai/ Metode
Model	Model	$k - \varepsilon$
Kondisi Batas	turbulensi	(<i>Realizable</i>)
	Kecepatan inlet	1 m/s, 3 m/s, 5 m/s
	Temperatur inlet	300 K
	Tekanan outlet	1 atm
	Kondisi dinding	<i>No-slip condition</i>
Material	Jenis Fluida	Air
	ρ	$998.2 \frac{kg}{m^3}$
	C_p	4182 J/kg K
Metode	Skema	SIMPLE
	Insialisasi	<i>Hybrid</i>
	Kriteria konvergensi	1×10^{-6}
	Jumlah iterasi maksimum	500

HASIL DAN PEMBAHASAN

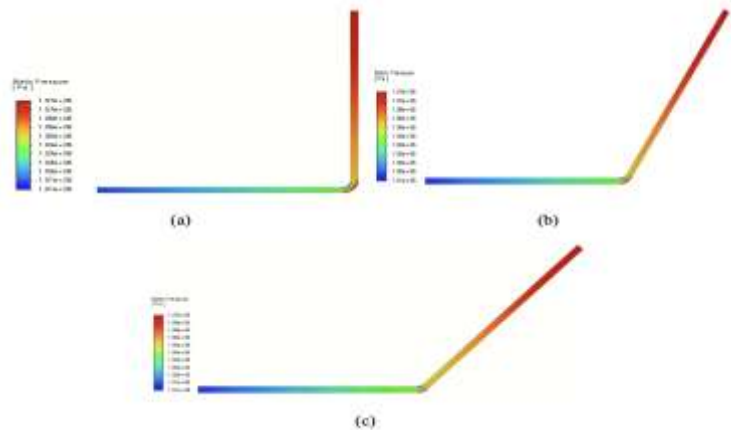
Fenomena aliran fluida pada pipa berbelok menunjukkan perubahan distribusi tekanan dan kecepatan yang dipengaruhi secara langsung oleh geometri elbow dan kecepatan aliran. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa tekanan selalu lebih tinggi pada sisi luar dan lebih rendah pada sisi dalam elbow untuk semua kecepatan inlet yang diuji, seperti ditunjukkan pada Gambar 2, 3, dan 4. Pola ini paling dominan pada elbow 90° karena perubahan arah aliran yang lebih tajam memperbesar gaya sentrifugal yang mendorong fluida ke dinding luar. Pada elbow 60° dan 45°, perbedaan tekanan tersebut lebih kecil karena belokan lebih landai sehingga perubahan momentum lebih rendah. Peningkatan kecepatan inlet memperkuat perbedaan tekanan tersebut pada 5 m/s, gradien tekanan meningkat signifikan, menunjukkan bahwa kecepatan aliran dan sudut elbow merupakan faktor yang saling memperkuat dalam menentukan besarnya penurunan tekanan. Nilai kuantitatif tekanan inlet dan outlet disajikan pada Tabel 2, yang menunjukkan peningkatan penurunan tekanan (ΔP) pada semua variasi sudut seiring kenaikan kecepatan. Hal ini digambarkan lebih jelas pada Gambar 5, yang menunjukkan bahwa penurunan tekanan meningkat sejalan dengan kecepatan aliran. Misalnya, pada elbow 90°, penurunann tekanan meningkat dari 834.5 Pa pada 1 m/s menjadi 6108.6 Pa pada 3 m/s, dan mencapai 15552.25 Pa pada 5 m/s. Hasil ini konsisten dengan temuan Zhang et al. [4] dan Nikmah et al. [6] yang melaporkan bahwa semakin besar sudut elbow, semakin besar pula potensi peningkatan rugi tekanan dan peluang pemisahan aliran akibat intensitas gaya sentrifugal yang meningkat.

Tabel 2. Data hasil simulasi tekanan, kecepatan pada berbagai geometri elbow dan kecepatan inlet

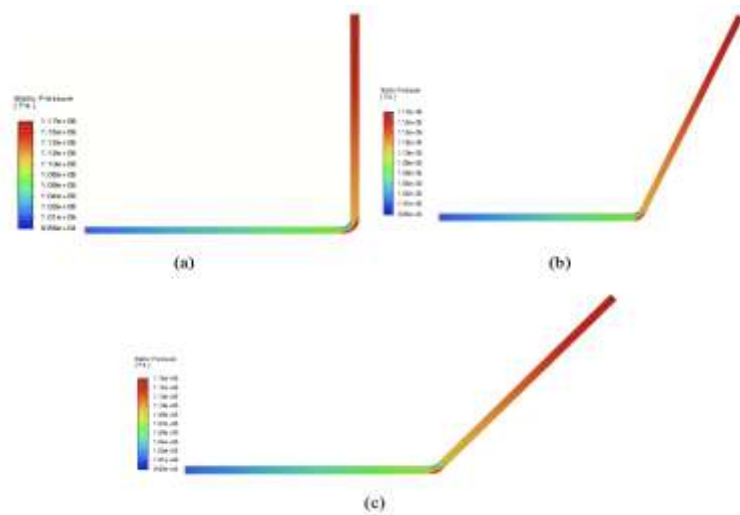
Kecepatan inlet ($\frac{m}{s}$)	Geometri elbow (°)	Tekanan inlet rata-rata (Pa)	Tekanan outlet rata-rata (Pa)	Penurunan tekanan (Pa)	Kecepatan outlet m/s)
1	90	102665.55	101831.05	834.5	0.999967
	60	102650.71	101829.57	821.14	0.999941
	45	102584.66	101830.42	754.24	0.999951
3	90	111969.78	105861.18	6108.6	2.999982
	60	111872.37	105850.93	6021.44	2.999986
	45	111269.26	105855.89	5413.37	2.999914
5	90	129459.97	113907.72	15552.25	5.000019
	60	129230.53	113882.45	15348.08	4.999810
	45	127549.94	113894.04	13655.9	4.999893



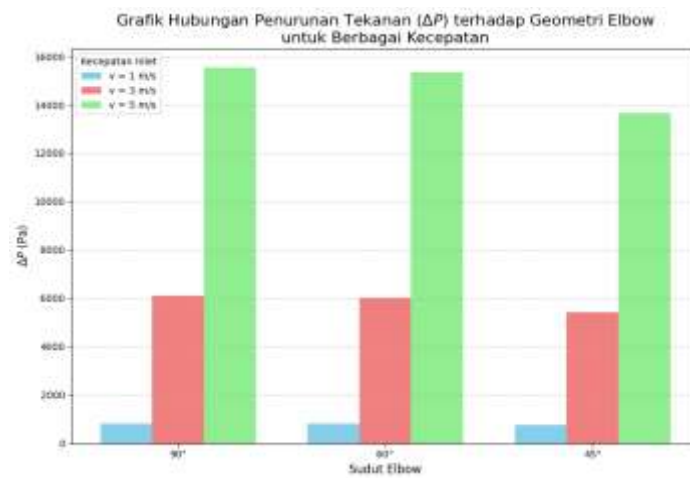
Gambar 2. Distribusi tekanan pada pipa elbow untuk berbagai geometri sudut pada kecepatan inlet 1 m/s (a) 90°, (b) 60° dan (c) 45°



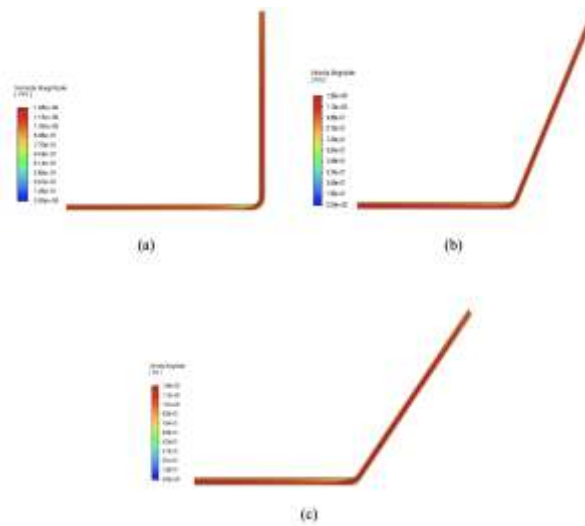
Gambar 3. Distribusi tekanan pada pipa elbow untuk berbagai geometri sudut pada kecepatan inlet 3 m/s (a) 90°, (b) 60° dan (c) 45°



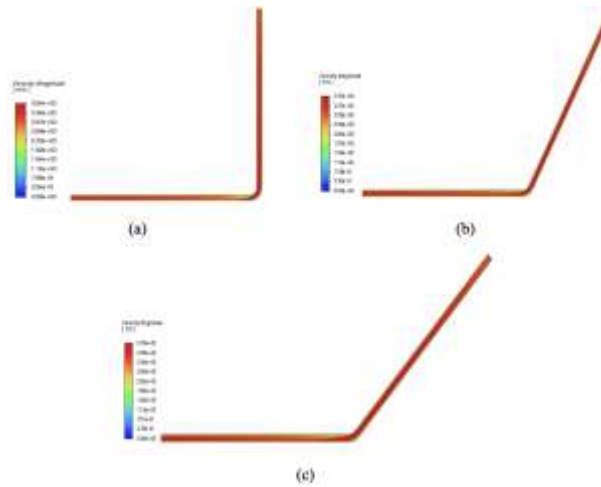
Gambar 4. Distribusi tekanan pada pipa elbow untuk berbagai geometri sudut pada kecepatan inlet 5 m/s (a) 90°, (b) 60° dan (c) 45°



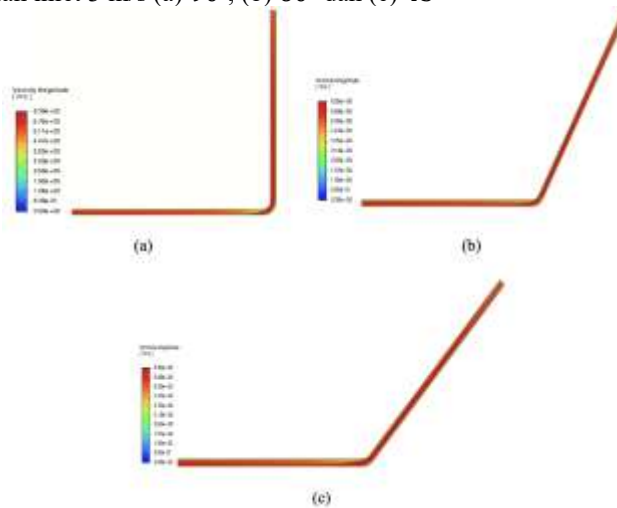
Gambar 5. Grafik hubungan penurunan tekanan (Δp) terhadap geometri elbow untuk berbagai kecepatan inlet



Gambar 6. Distribusi kecepatan pada pipa elbow untuk berbagai geometri sudut pada kecepatan inlet 1 m/s (a) 90°, (b) 60° dan (c) 45°



Gambar 7. Distribusi kecepatan pada pipa elbow untuk berbagai geometri sudut pada kecepatan inlet 3 m/s (a) 90°, (b) 60° dan (c) 45°



Gambar 8. Distribusi kecepatan pada pipa elbow untuk berbagai geometri sudut pada kecepatan inlet 5 m/s (a) 90°, (b) 60° dan (c) 45°

Selain memengaruhi tekanan, geometri elbow juga memengaruhi distribusi kecepatan fluida. Gambar 6, 7, dan 8 menunjukkan bahwa fluida mengalir lebih cepat pada sisi dalam elbow dan melambat pada sisi luar akibat perubahan arah aliran. Ketidakseragaman ini meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan inlet dan paling mencolok pada elbow 90°, di mana aliran sekunder terbentuk paling kuat. Pada 1 m/s, pola aliran sekunder mulai terlihat namun belum dominan. Pada 3 m/s, pola ini lebih jelas dan terorganisir, terutama pada elbow 90° dan 60°. Pada 5 m/s, aliran sekunder mencapai intensitas tertinggi, membentuk vorteks yang kuat dan zona kecepatan rendah yang lebih luas di sisi luar tikungan. Pola-pola ini sejalan dengan hasil Meng et al. [5] dan Nikmah et al. [6], serta sesuai dengan karakteristik aliran turbulen seperti dijelaskan oleh Pavithra et al. [10].

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut elbow dan kecepatan aliran memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik aliran. Elbow 90° menghasilkan fenomena aliran paling kompleks, termasuk penurunan tekanan terbesar, distribusi kecepatan paling tidak seragam, dan intensitas aliran sekunder paling kuat. Sebaliknya, elbow 45° menunjukkan pola aliran yang lebih stabil dengan rugi tekanan lebih rendah. Peningkatan kecepatan inlet memperkuat seluruh fenomena hidrodinamika yang diamati. Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya dan menunjukkan keandalan simulasi CFD dalam memprediksi pola aliran, penurunan tekanan, distribusi kecepatan, dan

pengaruh viskositas pada geometri kompleks [7], [10], [11]. Temuan ini mengisi celah penelitian yang belum banyak membahas interaksi simultan antara sudut elbow dan kecepatan aliran, serta memberikan dasar penting untuk optimasi desain sistem perpipaan, terutama pada aplikasi dengan kecepatan aliran tinggi.

Penelitian ini memberikan gambaran yang jelas mengenai pengaruh sudut elbow dan kecepatan aliran terhadap distribusi tekanan dan kecepatan di dalam pipa, serta menunjukkan konsistensi dengan tren hasil studi terdahulu. Namun, validasi eksperimen langsung terhadap konfigurasi yang digunakan belum dilakukan, sehingga verifikasi tambahan diperlukan untuk memastikan kesesuaian model dengan kondisi nyata. Selain itu, penggunaan satu jenis fluida dan satu ukuran pipa membatasi cakupan generalisasi hasil. Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada verifikasi eksperimental dan evaluasi parameter desain yang lebih luas agar pemahaman mengenai perilaku aliran dalam elbow dapat diperkuat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi sudut elbow dan kecepatan inlet secara signifikan memengaruhi distribusi tekanan dan kecepatan fluida dalam sistem perpipaan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa elbow 90° menghasilkan penurunan tekanan tertinggi, mencapai 15552.25 Pa, serta distribusi kecepatan yang paling tidak seragam akibat terbentuknya aliran sekunder yang kuat, terutama pada

kecepatan inlet 5 m/s. Sebaliknya, elbow 45° memberikan pola aliran yang lebih stabil dan penurunan tekanan yang lebih rendah. Temuan ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan sudut elbow dan kecepatan aliran secara simultan dalam perancangan sistem perpipaan, guna mengurangi kerugian tekanan dan menjaga kestabilan aliran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Sains Komputasi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, atas dukungan fasilitas komputasi dan sumber daya yang memungkinkan terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Smyk, M. Stopel, and M. Szyca, "Simulation of flow and pressure loss in the example of the elbow", *Water*, vol. 16, no. 13, p. 1875, 2024.
- [2] D. G. Karkoulas, A. G. Panagiotopoulos, A. I. Giannaros, and D. P. Margaris, "A comparison of computational and experimental fluid dynamics studies between scaled and original wing sections, in single-phase and two-phase flows, and evaluation of the suggested method", *Computation*, vol. 10, no. 3, p. 33, 2022.
- [3] T. E. Boye, T. C. Nwaoha, S. D. Olusegun, and F. I. Ashiedu, "A validation method of computational fluid dynamics (CFD) simulation against experimental data of transient flow in pipes system", *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 6, pp. 67–79, 2017.
- [4] J. Zhang, H. Huang, K. Hu, and P. Zhang, "Analysis of elbow effect on the high pressure gas pipe," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1600, no. 1, p. 012087, 2020.
- [5] X. Meng, C. Qin, and J. Li, "Pressure distribution and similarity theory of an elbow flowmeter based on experiments and CFD simulations," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, no. 1, p. 21, 2022.
- [6] A. Nikmah, R. Amalia, and D. Satrio, "Analysis of the effect of bend angle outlet main steam line on the steam flow characteristic", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 972, no. 1, p. 012064, 2022.
- [7] Zhang, D. Wang, W. Wang, and Z. Zhu, "Numerical investigation and optimization of the flow characteristics of bend pipe with different bending angles", *Processes*, vol. 10, no. 8, p. 1510, 2022.
- [8] H. S. Santana, A. G. P. da Silva, M. G. M. Lopes, A. C. Rodrigues, O. P. Taranto, and J. L. Silva Jr., "Computational methodology for the development of microdevices and microreactors with ANSYS CFX", *MethodsX*, vol. 7, pp. 82–103, 2020.
- [9] X. Li, X. Yin, and X. Gu, "Quadrilateral and hexahedral mesh generation based on surface foliation theory", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 316, pp. 758–781, 2017.
- [10] J. Pavithra, M. S. Uma, and S. N. Sridhara, "Computational fluid dynamics analysis of heat transfer and fluid flow in mixing elbow", in *Proc. AMIET 2020*, 2020.
- [11] B. Debtera, V. P. Sundramurthy, and I. Neme, "Computational fluid dynamics and analysis of fluid flow in pipe: Effect of fluid viscosity" *Journal of Computational*, 2020.

