

Pressure Drop for Laminar Flow in 3D Straight and Elbow Pipes Using Computational Fluid Dynamics

Iwan Kurniawan^{1,*}

1) Teknik Mesin, Universitas Riau, Pekanbaru

ABSTRACT – Designing piping systems for laminar flow requires an understanding of pressure drop. Pressure drop can offer insights for selecting pipe materials, designing an efficient piping system, and choosing the appropriate elbows and fittings. Utilizing numerical simulations, the pressure drop in straight pipes, 45° bends, 90° bends, and 180° bends is examined. Velocity profiles for straight pipes and bends are compared, revealing the increase in pressure drop caused by the bend in comparison to the straight pipe. The numerical simulation results indicate that the bend results in an increased pressure drop in the pipe's flow.

Diterima: 21 Oktober 2023
Direvisi: 30 Oktober 2023
Disetujui: 31 Oktober 2023

KEYWORDS: elbow, laminar flow, pipe, pressure drop

1. PENDAHULUAN

Aliran fluida dalam pipa merupakan fenomena penting dalam berbagai sektor, termasuk industri, rekayasa dan infrastruktur. Dalam konteks industri, pemahaman yang mendalam tentang aliran fluida dalam pipa sangat krusial. Hal ini berlaku untuk berbagai jenis industri termasuk petrokimia, farmasi, makanan dan minuman serta manufaktur. Aliran fluida digunakan untuk mengangkut bahan baku, produk jadi dan berbagai cairan dalam proses produksi. Efisiensi aliran dalam pipa mempengaruhi biaya produksi, kualitas produk dan keberlanjutan proses produksi. Dalam dunia rekayasa, aliran fluida memiliki implikasi luas, ini berkaitan dengan desain dan analisis perpipaan, baik yang digunakan dalam transportasi fluida, pembangkitan energi atau kendaraan. Para insinyur perlu memahami karakteristik aliran fluida dalam pipa untuk mengoptimalkan desain perangkat dan sistem. Dibiidang manufaktur, aliran fluida dalam pipa merupakan fondasi dari penyediaan air bersih, pengolahan limbah, sistem pemanas, pendingin dan pengangkutan bahan bakar. Keandalan dan efisiensi sistem perpipaan dalam infrastruktur perkotaan sangat penting untuk kehidupan sehari-hari penduduk kota.

Aliran fluida dalam pipa, *tube* atau *duct* dikenal dengan istilah *internal flow*. Salah satu masalah penting tentang aliran fluida dalam pipa adalah penurunan tekanan (*pressure drop*). *Pressure drop* dapat terjadi oleh beberapa hal yaitu *friction*, perbedaan elevasi/ketinggian, perubahan energi kinetik fluida, panjang dan diameter pipa, viskositas fluida, perubahan arah aliran disebabkan oleh *elbow* dalam pipa, sambungan dan *fitting*, temperatur fluida, kontaminan dan endapan, perencanaan sistem perpipaan yang tidak tepat, pemilihan material pipa yang salah juga dapat menyebabkan *pressure drop*. Semakin tinggi *pressure drop* yang terjadi

pada sistem perpipaan akan menyebabkan konsumsi daya pompa yang besar untuk mengalirkan fluida.

Untuk memahami *pressure drop* yang terjadi dalam pipa, para peneliti telah melakukan riset mengenai hal tersebut, [1] menganalisa *pressure drop* pada pipa dengan *baffles* untuk aliran laminar dan turbulen baik secara eksperimental maupun analitis. Oleh [2] menganalisis *pressure drop* pada *circular pipe* dengan *baffles* dan tanpa *baffles*, kehadiran *baffles* menyebabkan aliran laminar menjadi turbulen, sehingga meningkatkan *pressure drop*. *Pressure drop* pada aliran laminar untuk pipa *axisymmetric sudden expansions* telah diinvestigasi oleh [3]. Penelitian tentang *pressure drop* untuk elbow 90° telah dilakukan secara komprehensif oleh [4]. Dalam penelitian ini, *pressure drop* akan dianalisa dengan simulasi numerik dengan memvariasikan konfigurasi pipa yang berbentuk silinder yaitu pipa lurus, pipa dengan *elbow* 45°, 90° dan 180° mengetahui karakteristik aliran yang terjadi pada konfigurasi pipa tersebut akan memberikan gambaran umum tentang *pressure drop* yang terjadi. Hal tersebut dapat menjadi acuan dalam merancang sistem perpipaan yang lebih efisien, kebutuhan daya pompa yang diperlukan, pemilihan material pipa yang tepat untuk mengurangi hambatan dalam aliran fluida, pemahaman *pressure drop* dalam aliran laminar memainkan peran penting dalam penelitian dan inovasi di bidang mekanika fluida. Ini mendukung pengembangan teori dan teknologi baru.

Artikel ini disusun sebagai berikut: Bagian 2 menguraikan rumusan model matematika dan menyajikan rincian pengaturan model simulasi Pada bagian 3, hasil dan pembahasan, menyajikan tentang karakteristik/profil aliran didalam pipa dan *pressure drop* yang terjadi . Terakhir, Bagian 4, menyajikan kesimpulan.

*Corresponding author: iwan.kurniawan@lecturer.unri.ac.id

Penerbit: Jurusan Teknik Mesin, Universitas Riau, <https://proksima.ejournal.unri.ac.id>

2. METODOLOGI

2.1 Persamaan Umum dan Deskripsi Masalah

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik untuk memecahkan persamaan Navier-Stokes dalam tiga dimensi untuk fluida Newtonian yang tidak dapat dimampatkan (incompressible). Kondisi aliran fluida adalah laminar. Oleh karena itu, persamaan-persamaan yang mencakup persamaan kontinuitas dan momentum dapat dituliskan sebagai berikut:

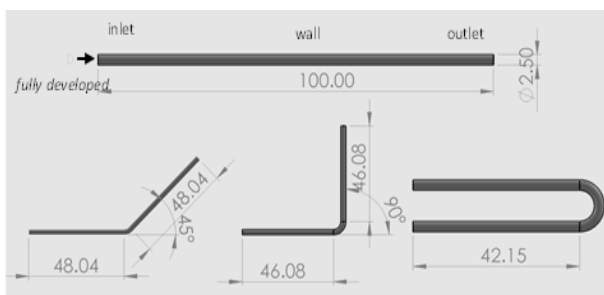
$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \cdot \nabla^2 u \quad (2)$$

Dimana ρ dan ν merupakan massa jenis fluida dan viskositas kinematik fluida, u merupakan vektor kecepatan aliran fluida dan p adalah tekanan.

Simulasi numerik ini menggunakan OpenFOAM v2306 yang merupakan aplikasi opensource CFD untuk menganalisa berbagai masalah dinamika fluida dan kalor.

Pada gambar 1, ditampilkan parameter geometri dari domain komputasi serta kondisi batas untuk pipa lurus. Kondisi ini juga berlaku untuk elbow 45o, 90o dan 180o. Sedangkan tabel 1 berisikan informasi tentang data fluida, geometri, kondisi batas dan kondisi awal dari simulasi numerik yang dilakukan.



Gambar 1. Geometri pipa dan elbow

Tabel 1. Data simulasi numerik pipa dan elbow

Properties Fluida	Geometri	Kondisi batas/awal
Massa jenis fluida = 1 kg/m ³	Panjang pipa lurus = 100 mm, Panjang pipa sama untuk elbow 45°, 90° dan 180°.	Aliran laminar dengan berkembang penuh (<i>fully developed</i>) diterapkan pada sisi masuk pipa

		(inlet), sisi keluar(outlet) diberikan nilai tekanan 0 Pa. sedangkan untuk wall di terapkan no slip condition.
Viskositas fluida = 0.00001 kg/m.s	Diameter pipa = 2,5 mm	Kecepatan rata-rata fluida masuk sebesar 2 m/s.
	Jumlah mesh untuk semua jenis pipa = 120.000 mesh	Aliran steady/solver simpleFoam

2.2 Vertifikasi Hasil simulasi Numerik

Menurut persamaan klasik yang diberikan oleh [5] untuk aliran laminar *fully developed* secara analitis dapat ditulis sebagai berikut:

$$u_x(r) = 2 \cdot u_{x,ave} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \quad (3)$$

Dimana $u_{x,ave}$ adalah kecepatan fluida rata-rata masuk kedalam pipa, R merupakan jari-jari pipa sedangkan r adalah jarak radial dari titik sumbu ke dinding pipa. Dengan menggunakan persamaan Hagen-Poiseuille [5] dapat kita tentukan *pressure drop* yang terjadi pada pipa lurus horizontal dengan diameter konstan yaitu:

$$\Delta P = \frac{128\mu L \dot{V}}{\pi D^4} \quad (4)$$

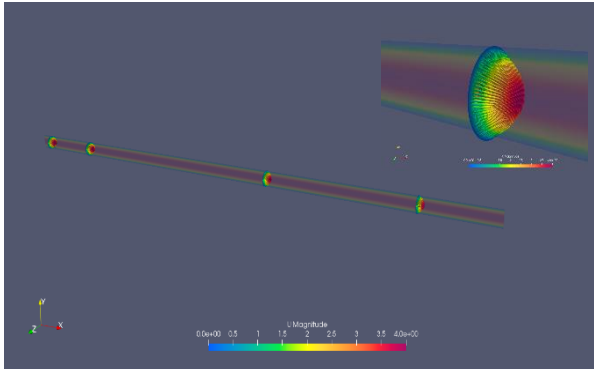
Dimana ΔP adalah *Pressure drop*, μ merupakan viskositas dinamik, L dan D adalah panjang dan diameter pipa. Pada tabel 2. Diperlihatkan hasil perbandingan simulasi numerik dengan hasil secara analitis dan hasil yang didapatkan oleh ansys fluent dan ansys CFX[4], persentase errornya adalah 0.2%.

Tabel 2. Hasil perbandingan analitis dengan simulasi numerik untuk pipa lurus.

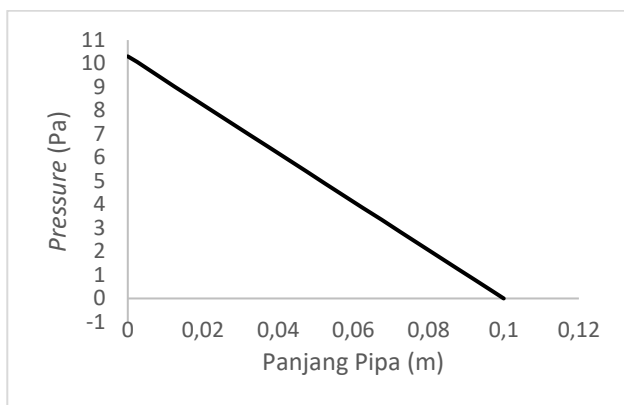
	Analitis (pers.4)	Ansys fluent	Ansys CFX	Open Foam
<i>Pressure Drop</i>	10.24	10.22	10.49	10.30
rasio		0.998	1.024	0.994

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pressure Drop Pada pipa lurus



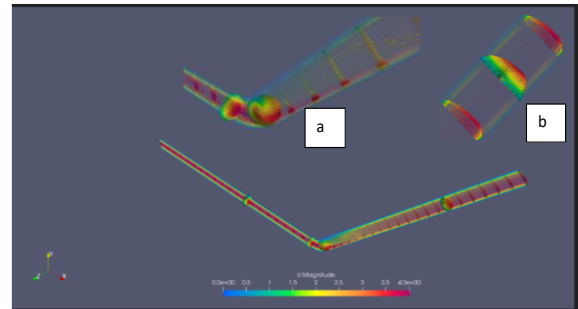
Gambar 2. *Fully developed* pada pipa lurus



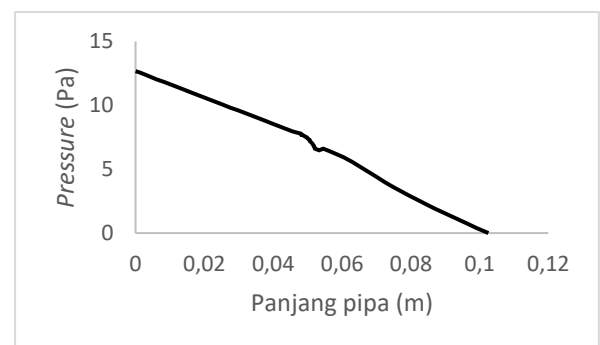
Gambar 3. Perubahan tekanan sepanjang pipa

Pada gambar 2, untuk aliran laminar dalam pipa lurus, profil kecepatan umumnya bersifat parabolik. Ini berarti bahwa kecepatan fluida bervariasi sepanjang radius pipa, dengan kecepatan maksimum terjadi di tengah pipa dan berkurang saat mendekati dinding pipa. Profil kecepatan aliran laminar dalam pipa silinder dapat dijelaskan oleh persamaan 3. Sebagai contoh, di tengah pipa ($r = 0$), kecepatan fluida maksimum ditemukan, dan kecepatan berkurang saat mendekati dinding pipa (r mendekati R). Profil kecepatan ini menggambarkan aliran laminar yang teratur dalam pipa lurus dan berbentuk parabolik. Pada gambar 3, terlihat tekanan berubah secara linier sepanjang pipa. Hal ini disebabkan gesekan fluida terhadap dinding pipa. *pressure drop* pada pipa lurus sebesar 10,30 Pa.

3.2. Pressure Drop Pada pipa dengan elbow 45°



Gambar 4. Profil kecepatan pada elbow 45°



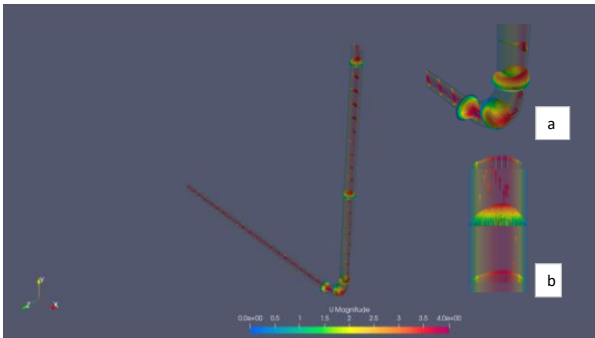
Gambar 5. Perubahan tekanan sepanjang pipa/elbow 45°

Pada gambar 4a, perubahan profil kecepatan yang terjadi pada elbow 45°, terlihat bahwa profil kecepatan yang berbentuk parabolik pada kondisi masuk elbow 45°, dimana kecepatan maksimum berada pada $r = 0$. Sewaktu fluida melewati elbow 45° profile tersebut berubah, dimana pada radius dalam pipa memiliki kecepatan rendah sedangkan kecepatan maksimum mendekati radius luar dari elbow tersebut. Setelah melewati elbow 45°, profil kecepatan cenderung untuk membentuk *fully developed* kembali dalam arah *downstream*. Dalam kasus diatas, karena panjang pipa setelah elbow 45° tidak cukup panjang, sampai pada kondisi batas outlet, profil kecepatan berbentuk parabolik seperti persamaan 3 tidak tercapai, gambar 4b. Ini juga memberikan gambaran untuk penempatan flowmeter dalam mendapatkan pengukuran kecepatan fluida yang tepat.

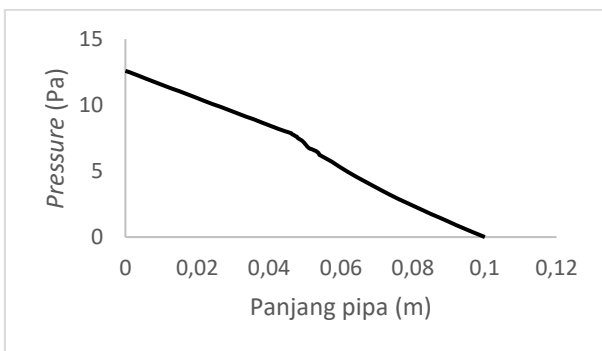
Pada gambar 5, *pressure drop* yang terjadi pada elbow 45° meningkat dibandingkan dengan pipa lurus dengan kondisi panjang pipa yang sama yaitu 0,1 m. Besarnya *pressure drop* yang terjadi adalah 12,671 Pa. Ada peningkatan sebesar 2,371 Pa. Hal ini disebabkan ada penurunan tekanan dan perubahan arah aliran yang terjadi pada elbow 45°.

3.3. Pressure Drop Pada pipa dengan elbow 90°

*Corresponding author: iwan.kurniawan@lecturer.unri.ac.id



Gambar 6. Profil kecepatan pada elbow 90°

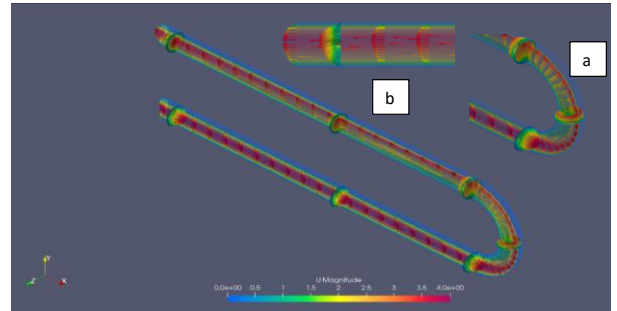


Gambar 7. Perubahan tekanan sepanjang pipa/elbow 90°

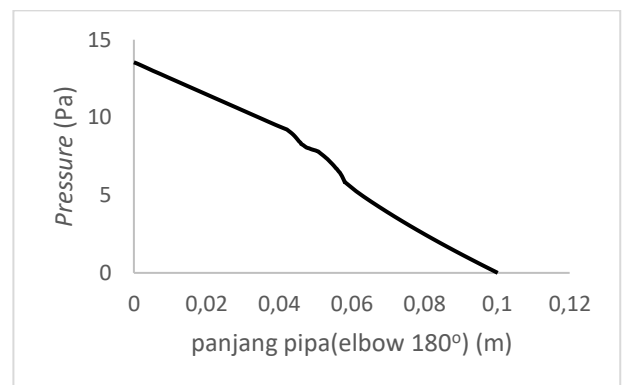
Sebagaimana dengan *elbow* 45°, pada *elbow* 90° juga mengalami perubahan profil kecepatan dalam aliran laminar. Pada kondisi masuk *elbow* 90°, profil kecepatan berbentuk parabolik, terlihat pada gambar 6a. setelah melewati *elbow* 90°, profil berubah secara signifikan, dimana kecepatan maksimum tidak pada $r = 0$, melainkan mendekati radius terluar dari *elbow* 90°. Setelah melewati *elbow* 90°, profil kecepatan cenderung untuk membentuk *fully developed* aliran laminar yang berbentuk parabolik. Terlihat pada gambar 6b, profil kecepatan berbentuk parabolik lebih cepat terbentuk sebelum mencapai kondisi batas outlet dari pipa dibandingkan dengan *elbow* 45°.

Pressure drop yang di tampilkan pada gambar 7, terlihat bawah nilainya lebih kecil dibandingkan dengan *elbow* 45°. *Pressure drop* yang dihasilkan sebesar 12.5955 Pa. ada kenaikan sebesar 2,2955 Pa dari *pressure drop* pipa lurus. Hal ini juga disebabkan oleh perubahan arah aliran pada daerah *elbow* 90°, gesekan/hambatan akibat viskositas pada dinding *elbow* 90° serta perbedaan kecepatan pada dinding luar dan dalam *elbow*.

3.4. *Pressure Drop* Pada pipa dengan *elbow* 180°



Gambar 8. Profil kecepatan pada elbow 180°



Gambar 9. Perubahan tekanan sepanjang pipa/elbow 180°

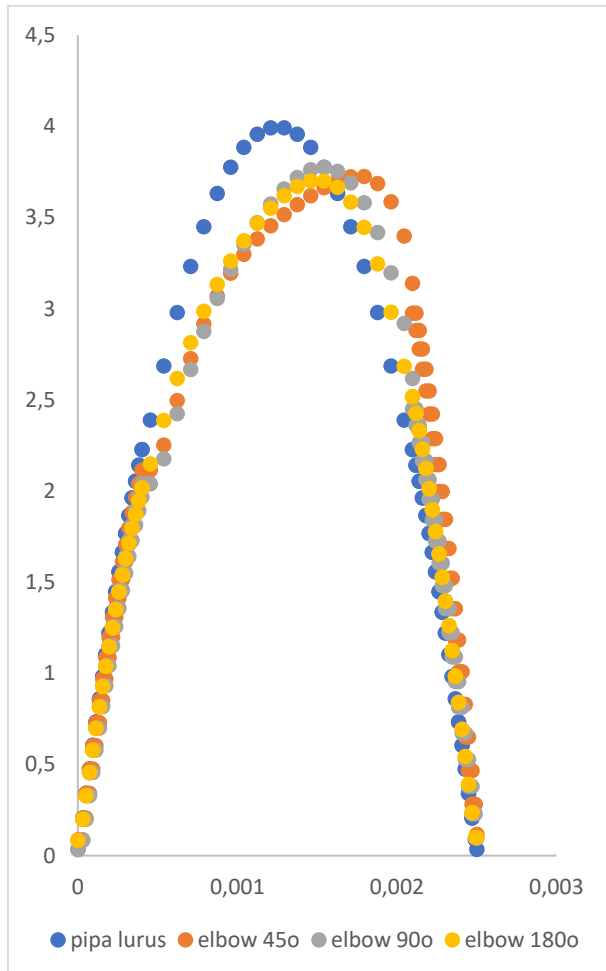
Kecepatan fluida saat masuk ke *elbow* akan tergantung pada kecepatan aliran pada pipa yang mengarah ke *elbow*. Pada pipa lurus, dalam kasus aliran laminar, kecepatan fluida cenderung homogen, dan kecepatan maksimum akan terjadi di tengah pipa. Namun, saat masuk ke *elbow*, fluida harus mengubah arahnya sebesar 180 derajat. Akibatnya, kecepatan maksimum yang ada di tengah pipa akan bergeser menjadi kecepatan minimum di tengah *elbow*. Saat fluida memasuki *elbow* 180 derajat, terjadi perubahan arah aliran yang drastis. Hal ini berarti kecepatan fluida akan mengalami perubahan arah sebesar 180 derajat. Inersia fluida menyebabkan kecepatan maksimum saat masuk ke *elbow* tidak dapat berubah secara instan. Karena itu, ada periode transisi di mana kecepatan akan mengurangi nilainya saat memasuki *elbow*. Saat fluida keluar dari *elbow*, kecepatan akan mengalami perubahan sebaliknya. Kecepatan minimum saat keluar dari *elbow* akan bergerak kembali ke tengah pipa, dan kecepatan akan meningkat secara bertahap. Sebagai hasilnya, kecepatan maksimum akan terjadi di tengah pipa setelah keluar dari *elbow*, terlihat pada gambar 9a dan 9b.

Kondisi ini menciptakan penurunan tekanan yang signifikan dalam *elbow* 180° karena perubahan arah aliran dan hambatan gesekan di sepanjang perjalanan fluida melalui *elbow*. Jumlah perubahan kecepatan, inersia fluida, dan hambatan gesekan semuanya berkontribusi pada penurunan tekanan. Dalam kasus ini, besarnya penurunan tekanan pada

*Corresponding author: iwan.kurniawan@lecturer.unri.ac.id

elbow 180° adalah 13.5464 Pa. ada kenaikan sebesar 3.2464 Pa dari pipa lurus. gambar 9.

3.4. Profil Kecepatan pada pipa



Gambar 10. Profil kecepatan pada sisi outlet

Dari gambar 10, terlihat bahwa kecenderungan aliran fluida untuk membentuk *fully developed* untuk masing-masing elbow. Tampak dari gambar *elbow* 90° dan 180° lebih cepat untuk membentuk *fully developed* dibandingkan dengan *elbow* 45°. Kecepatan lebih besar dalam arah radial luar dari pipa untuk *elbow* 45°, dibandingkan *elbow* 90° dan *elbow* 180°.

Ini dapat dijelaskan oleh perubahan geometri dalam masing-masing *elbow* dan bagaimana perubahan ini memengaruhi distribusi kecepatan aliran. Perubahan arah aliran yang lebih drastis pada *elbow* 90 derajat dan *elbow* 180 derajat dapat menyebabkan perubahan kecepatan yang lebih signifikan dalam arah radial pipa. Mari kita jelaskan perbedaan ini untuk masing-masing elbow:

1. **Elbow 45°:** Pada *elbow* 45°, perubahan arah aliran kurang drastis dibandingkan dengan *elbow* 90° dan

180°. Oleh karena itu, kecepatan aliran dalam arah radial pipa cenderung lebih besar di sepanjang radius luar dari pipa. Hal ini menghasilkan distribusi kecepatan yang lebih merata dalam elbow dan memerlukan lebih banyak jarak untuk mencapai *fully developed flow*.

2. **Elbow 90°:** Pada elbow 90°, perubahan arah aliran lebih tajam. Ini menyebabkan aliran lebih cepat bergerak dari pusat *elbow* ke dinding luar pipa, menciptakan distribusi kecepatan yang lebih merata dan lebih cepat dalam mencapai *fully developed flow*.
3. **Elbow 180°:** Elbow 180° memiliki perubahan arah aliran yang paling drastis. Aliran berbalik arah secara penuh, dan ini menciptakan distribusi kecepatan yang sangat merata dan menyebabkan aliran mencapai *fully developed flow* dengan sangat cepat.

Fully developed flow mengacu pada kondisi di mana profil kecepatan aliran menjadi konstan sepanjang pipa, dan tidak ada lagi perubahan signifikan dalam distribusi kecepatan. Perbedaan ini berdasarkan geometri *elbow* mencerminkan bagaimana perubahan arah aliran memengaruhi aliran fluida dalam pipa, dan hal ini dapat memiliki implikasi pada perancangan dan analisis sistem aliran fluida.

4. KESIMPULAN

Untuk aliran laminar *pressure drop* dapat dipecahkan dengan persamaan Hagen-Poiseuille terutama untuk pipa lurus horizontal dengan diameter konstan. Sedangkan untuk pipa yang menggunakan *elbow*, persamaan tersebut perlu dimodifikasi dan akan menjadi sedikit rumit untuk di selesaikan secara analitis. Pipa lurus, *Elbow* 45°, 90° dan 180°, dianalisa dengan menggunakan aplikasi OpenFOAM. Dari hasil simulasi numerik didapatkan kenaikan *pressure drop* untuk masing-masing *elbow* tersebut jika dibandingkan dengan pipa lurus. Kenaikan *pressure drop* tersebut disebabkan oleh perubahan aliran pada bagian *elbow* sehingga terjadi penurunan tekanan. Kenaikan *pressure drop* untuk elbow 45°, 90° dan 180° terhadap pipa lurus masing-masing 2,371 Pa, 2,2955 Pa dan 3.2464 Pa.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para pengembang aplikasi openfoam terutama openfoam.com.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Mushtak, S B Chin, S. Al-Zuhair, L. Xiaoyu, Pressure Drop in Laminar and Turbulent Flows in Circular Pipe with Baffles–An Experimental and Analytical Study, *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 33 (2006), 303-319.
- [2] P. Ashu, P. Rahul, Comparative Pressure Drop in Laminar and Turbulent Flows in Circular Pipe with and without Baffles using FEV, *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 1 (2015), 10-18.
- [3] P. J. Oliveira, F. T. Pinho, Pressure drop coefficient of laminar Newtonian flow in axisymmetric sudden expansions, 18 (1997), 518-529.
- [4] P.L. Spedding, E. Benard, G.M. McNally, Fluid Flow through 90 Degree Bends, *Dev.Chem.Eng. Mineral Process*, 12(2004), 107-128.
- [5] Y. A. Çengel, J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, New York (2010).
- [6] *Fluid Dynamics Verification Manual (Ansys.Inc)*, 2023.