

The Analysis of Diameter Expansion and Connection Angle Variations Effects In Hydropower Penstock Pipe Bend on Pressure Drop Using Computational Fluid Dynamics Simulation

Agung Widodo¹, Dony Hidayat Al- Janan^{1*}, Aldias Bahatmaka¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Semarang, INDONESIA

*Corresponding author: aljanan@mail.unnes.ac.id

Received April 12th 2026; Revised May 8th 2026; Accepted May 26th 2026

Abstract

Pipe bends in hydropower penstock systems effected pressure drop due to changes in fluid flow direction. Pressure drop in piping systems can decrease overall system efficiency. This study aims to analyze the effect of diameter expansion variations (1.25D and 1.5D) and connector angle variations (10°–90°) on pressure drop in 90° pipe bends using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The study employed an experimental approach based on ANSYS Fluent 2019 R3 simulation with 13 design variations, an inlet velocity of 7 m/s, water as the fluid, and the k-ε realizable turbulence model. Simulation results showed that the 1.25D design with a 10° connector angle produced the lowest pressure drop of 1,094.350 Pa, which is 47.7% lower than the standard 1D design with a pressure drop value of 2,090.634 Pa. Design 1.5D with a 90° connector angle yielded the highest pressure drop of 21,355.714 Pa, an increase of 921.51% from the standard 1D design. Increasing the connector angle consistently raised pressure drop in a non-linear pattern across both diameter variations. The 1.25D+10° design proved most optimal by combining effective flow velocity reduction with a gradual geometric transition, thereby minimizing flow separation and turbulence. These findings are expected to contribute to the optimization of hydropower penstock pipe design to improve overall flow system efficiency.

Keywords: *Penstock, Hydropower Plant, Pressure Drop, CFD, ANSYS*

Analisis Pengaruh Variasi Perbesaran Diameter dan Sudut Penghubung Belokan Pipa Pesat Pembangkit Listrik Tenaga Air Terhadap *Pressure Drop* Menggunakan Simulasi *Computational Fluid Dynamics*

Abstrak

Belokan pipa pada sistem pipa pesat (*penstock*) Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) menyebabkan *pressure drop* akibat perubahan arah aliran fluida. Penurunan tekanan pada sistem perpipaan dapat menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi perbesaran diameter (1,25D dan 1,5D) serta variasi sudut penghubung (10° – 90°) pada belokan pipa 90° terhadap *pressure drop* menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian menggunakan metode eksperimental berbasis simulasi ANSYS Fluent 2019 R3 dengan 13 variasi desain, kecepatan inlet 7 m/s, fluida air, dan model turbulensi *k-ε realizable*. Hasil simulasi menunjukkan desain 1,25D dengan sudut penghubung 10° menghasilkan *pressure drop* terendah sebesar 1.094,350 Pa, lebih rendah 47,7% dibandingkan desain standar 1D yang menghasilkan nilai *pressure drop* 2.090,634 Pa. Sedangkan pada desain 1,5D dengan sudut penghubung 90° menghasilkan *pressure drop* tertinggi sebesar 21.355,714 Pa atau meningkat 921,51% dari desain standar 1D. Peningkatan sudut penghubung secara konsisten meningkatkan *pressure drop* secara non-linear pada kedua variasi diameter. Desain 1,25D+ 10° terbukti paling optimal karena mengombinasikan penurunan kecepatan aliran yang efektif dengan transisi geometri yang landai sehingga meminimalisir separasi aliran dan turbulensi. Hasil penelitian ini diharapkan berkontribusi dalam optimasi desain pipa pesat PLTA guna meningkatkan efisiensi sistem aliran.

Kata kunci: Pipa Pesat, PLTA, Penurunan Tekanan, CFD, ANSYS

I. PENDAHULUAN

Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan air sebagai sumber energi. Energi potensial dan energi kinetik dari air dirubah menjadi energi mekanik oleh turbin dan kemudian energi mekanik dirubah menjadi energi listrik oleh generator (Hasibuan et al., 2022). Prinsip kerja PLTA pada dasarnya memanfaatkan energi potensial air yang berasal dari hulu sungai atau reservoir berupa bendungan yang memiliki ketinggian tertentu, energi potensial air diubah menjadi energi kinetik untuk selanjutnya digunakan untuk memutar turbin yang kemudian didistribusikan melalui transformator (Taufiqurrahman & Windarta, 2020). Dalam proses perubahan energi potensial air menjadi energi kinetik, air yang berasal dari *reservoir* berada diketinggian yang lebih tinggi disalurkan menuju rumah pembangkit (*power house*) melalui pipa pesat (*penstock*). Pipa pesat merupakan saluran yang digunakan untuk mengalirkan air dari *reservoir* ke rumah pembangkit. Desain pipa dirancang dengan mempertimbangkan kehilangan energi dan penurunan tekanan yang dapat terjadi, material pipa dipilih dengan tingkat kerugian *friction losses* yang minim, diameter pipa dipilih dengan pertimbangan keamanan, ketebalan pipa dipilih untuk menahan tekanan hidrolis serta pemilihan jenis sambungan mempertimbangan keamanan serta kehilangan energi (Alhabsyi et al., 2023).

Jalur pipa pesat akan mengikuti bentuk tanah yang tidak rata sehingga menyebabkan dalam desain pipa diharuskan ada lengkungan atau belokan. Belokan dalam saluran pipa dapat menyebabkan kehilangan energi dan penurunan tekanan karena aliran yang ada dalam saluran pipa mengalami perubahan arah aliran fluida, besarnya penurunan tekanan juga dipengaruhi oleh kecepatan aliran, kekasaran permukaan pipa, panjang pipa dan diameter pipa (Fadhli & Sriwati, 2017). Menurut Cengel & Cimbala (2018) pada penelitian Sidiq & Al-Janani (2025) *pressure drop* dapat memberikan dampak negatif terhadap performa dan efisiensi sistem, dapat meningkatkan biaya operasional serta menimbulkan risiko kerusakan komponen jika tidak dikelola dengan tepat. Oleh karena itu, penelitian tentang *pressure drop* penting dilakukan untuk menambah pengetahuan mengenai penyebab terjadinya *pressure drop*.

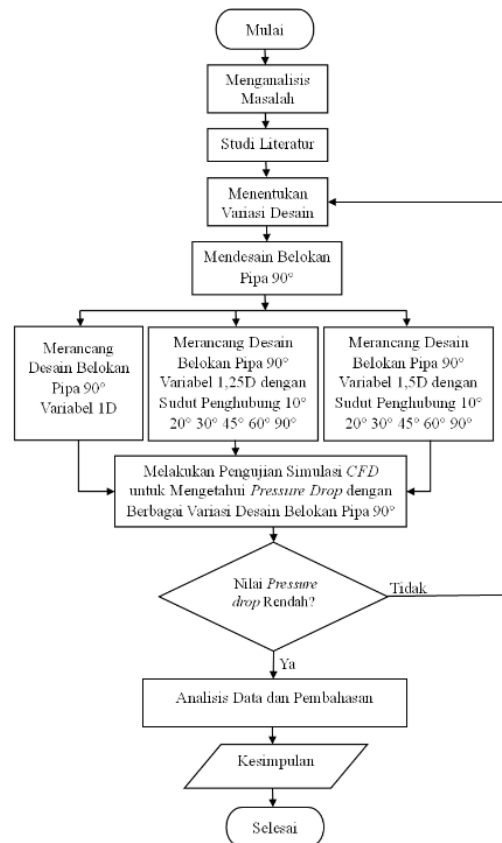
Penelitian tentang *pressure drop* sudah dilakukan oleh peneliti terutama tentang pengaruh belokan pipa terhadap *pressure drop*. Pada penelitian Saber & Maree (2022) melakukan pengamatan pada

belokan pipa 90° dengan radius kelengkungan yang berbeda, mendapatkan hasil berupa semakin besar radius kelengkungan pipa *pressure drop* akan semakin menurun. Kajian yang berbeda dilakukan oleh Karpenko et al. (2023) yang mengamati pengaruh belokan pipa dengan perbedaan besar sudut yaitu 45° dan 90° , ditemukan bahwa sudut belokan yang lebih besar dapat menyebabkan peningkatan *pressure drop*. Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya hanya berfokus pada analisis *pressure drop* yang terjadi pada belokan pipa dengan variasi besar sudut dan variasi kelengkungan sudut. Terdapat celah penelitian dimana belum banyak penelitian yang meneliti tentang variasi desain *elbow* dengan perbesaran diameter pada belokan pipa, serta penambahan variasi besar sudut penghubung antar diameternya. Pada penelitian sebelumnya juga belum banyak yang berfokus pada pipa berskala PLTA, dimana diameter pipa pesat PLTA biasanya lebih besar daripada pipa industri lainnya.

Kebaruan dalam penelitian ini terletak pada analisis pengaruh variasi desain *elbow* dengan perbesaran diameter pada belokan pipa dan variasi besar sudut penghubung antar diameternya terhadap *pressure drop* menggunakan metode simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan perangkat lunak *ANSYS Fluent 2019 R3*. Penggunaan simulasi numerik berbasis CFD dapat menampilkan visualisasi pola aliran dan distribusi tekanan. Menurut Joshi et al. (2022) simulasi CFD dapat memodelkan aliran fluida secara detail serta mendapatkan hasil yang akurat sebelum dilakukan proses eksperimen yang lebih rumit dan membutuhkan waktu serta biaya yang lebih rendah. Pemodelan dilakukan dengan memperhatikan kondisi aliran yang mendekati keadaan aktual pada pipa pesat PLTA, termasuk kecepatan aliran, jenis fluida, dan kondisi batas yang sesuai. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini perlu untuk dilakukan karena hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam upaya optimasi desain sistem pipa pesat pada PLTA. Pemahaman yang mendalam tentang pengaruh variasi desain *elbow* dengan perbesaran diameter pada belokan pipa, serta variasi besar sudut penghubung antar diameter terhadap *pressure drop* dapat membantu perancangan sistem aliran pipa menghasilkan efisiensi aliran yang optimal dan meminimalkan penurunan tekanan.

II. METODE PENELITIAN

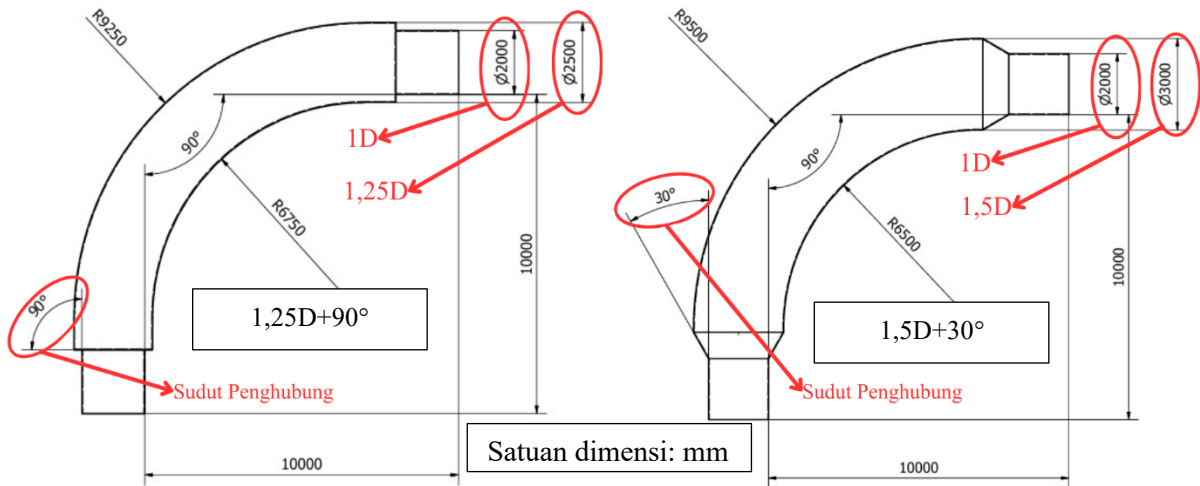
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental. Menurut Sugiyono (2022) penelitian eksperimen merupakan salah satu metode penelitian yang bertujuan membuktikan hubungan sebab-akibat antar variabel yang diteliti, metode eksperimen ditujukan untuk membuktikan pengaruh suatu perlakuan (*treatment*) terhadap subjek penelitian dan terhadap variabel penelitian. Desain penelitian eksperimen memungkinkan pengujian hipotesis secara sistematis dan terkontrol (Yulianti et al., 2024). Pada penelitian ini penulis akan melakukan perlakuan terhadap belokan pipa 90° dengan memvariasikan besar diameter pipa dan besar sudut penghubungnya untuk mengetahui dampaknya terhadap *pressure drop* yang dihasilkan oleh belokan pada sistem perpipaan. Penelitian ini menggunakan simulasi CFD yang diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur yang komprehensif. Analisis dilakukan menggunakan *software Ansys Fluent 2019 R3* yang dapat memodelkan aliran fluida secara detail dan hasil yang didapatkan cukup akurat. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi perbesaran diameter belokan pipa dan variasi sudut penghubung terhadap *pressure drop* pada belokan pipa 90° . Jumlah total variasi yang akan diuji yaitu 13 variasi. Langkah-langkah pada penelitian ini digambarkan dalam bentuk diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

1. Desain Geometry Belokan Pipa

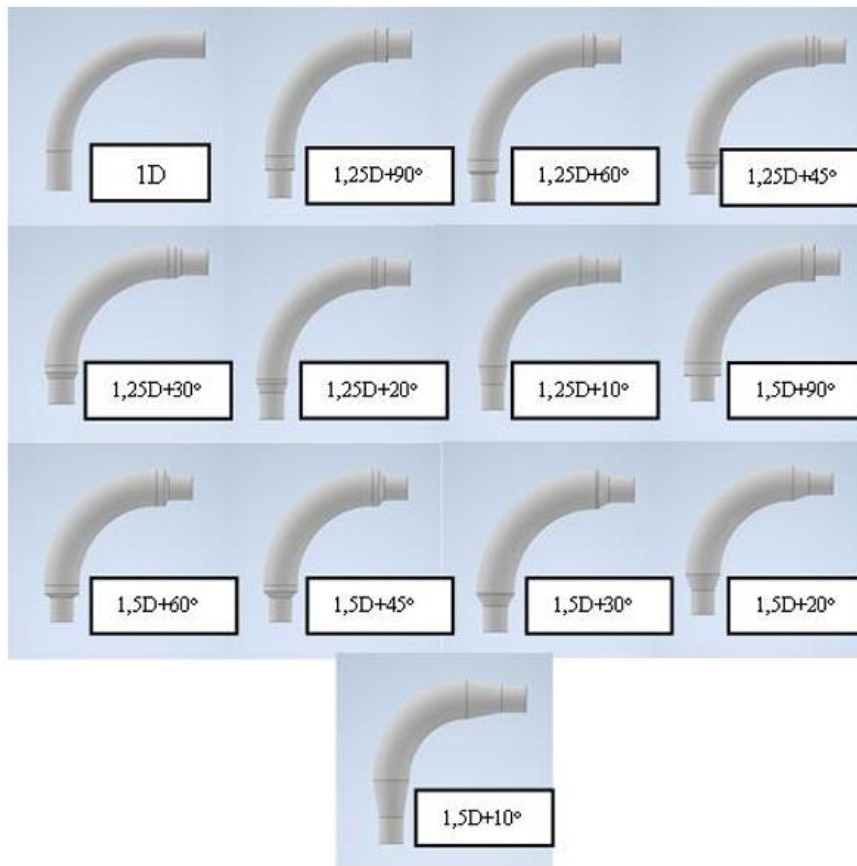
Desain *elbow* pipa 90° dibuat menggunakan *software Autodesk Inventor Profesional 2024*. Parameter dimensi geometri belokan pipa yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Ukuran pipa menyesuaikan pipa PLTA, penggunaan model geometri pipa berskala besar pada penelitian ini diharapkan memiliki relevansi yang lebih kuat terhadap aplikasi nyata di lapangan. Penelitian ini membandingkan 13 desain belokan pipa dengan variasi perbesaran diameter pipa 1,25D dan 1,5D, serta variasi besar sudut penghubung sebesar 90°, 60°, 45°, 30°, 20° dan 10°. Dalam penelitian ini, simbol D merepresentasikan diameter dari pipa, dimana pipa standar (tanpa perbesaran) dinamakan variasi 1D, yang memiliki nilai diameter luar sebesar 2 meter. Variasi perbesaran diameter (*expansion ratio*) dilakukan dengan memperbesar ukuran penampang pipa pada bagian belokan menggunakan faktor kelipatan dari diameter standar 1D. Perbesaran diameter 1,25D merupakan diameter pada area belokan diperbesar menjadi 1,25 kali dari diameter pipa standar, sedangkan perbesaran diameter 1,5D artinya diameter pada area belokan diperbesar menjadi 1,5 kali dari diameter pipa standar. Sudut penghubung dalam penelitian ini merujuk pada sudut kemiringan dinding transisi yang menghubungkan antara penampang pipa pesat standar 1D dengan penampang pipa yang diperbesar diameter 1,25D dan 1,5D pada area belokan. Gambaran dari perbesaran diameter 1,25D dengan sudut 90° dan 1,5D dengan sudut 30° dapat dilihat pada Gambar 2. Pada setiap variasi jarak antara input dan output pipa sama atau tidak terdapat perubahan yaitu 10.000 mm. Semua variasi desain belokan pipa 90° ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Contoh Perbesaran Diameter

Tabel 1. Dimensi Belokan Pipa

Parameter	Dimensi (mm)
Panjang Pipa	10.000
Radius Kelengkungan	8.000
Diamater 1D	2.000
Diamater 1,25D	2.500
Diamater 1,5D	3.000

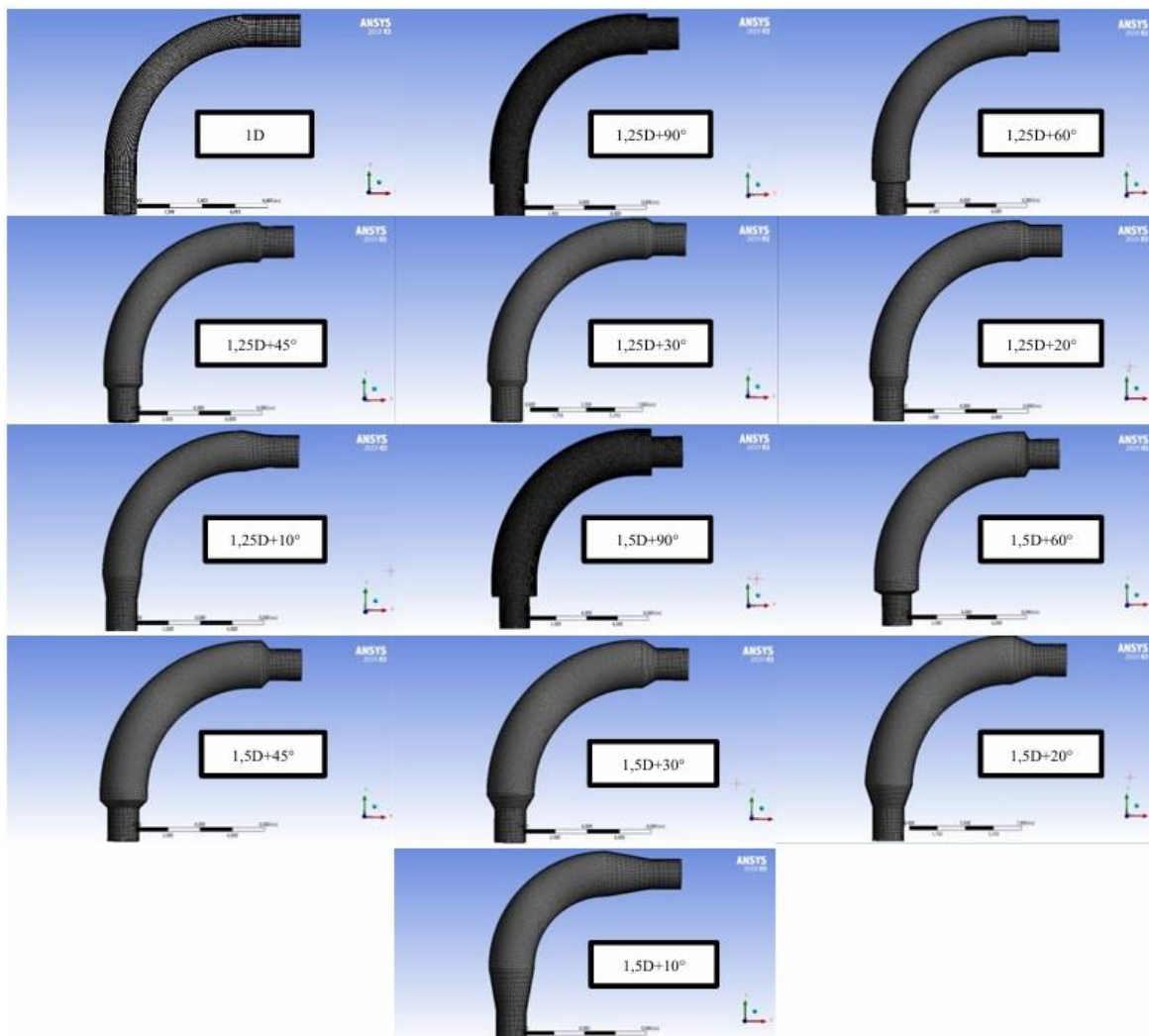


Gambar 3. Desain Variasi Belokan Pipa

2. Simulasi *Computational Fluid Dynamics*

Tahapan awal pada proses ini yaitu pembuatan variasi desain belokan pipa dalam *software Autodesk Inventor Profesional 2024*. Tahap selanjutnya yaitu mengekspor desain dalam jenis file “.stp”, kemudian file desain tersebut diimpor ke dalam *ANSYS Fluent* untuk selanjutnya dilakukan proses edit geometri dalam fitur *Space Claim* untuk melakukan pengecekan geometri serta volume dari desain belokan pipa dikarenakan pada simulasi ini menggunakan volume dari belokan pipa serta perubahan material desain dari *solid* dirubah menjadi *fluid* menggunakan fitur *Design Modeler*. Proses *Meshing* merupakan proses pemecahan domain menjadi volume yang lebih kecil sebelum melakukan analisa pada *fluent*. Ukuran *mesh* yang terdapat pada suatu objek akan mempengaruhi ketelitian analisis *CFD* yang dilakukan (Haq et al., 2025). Proses *meshing* diawali dengan menamai bagian *inlet* pipa untuk sisi masuk fluida dan *outlet* pipa untuk sisi keluar fluida, kemudian menentukan berapa ketelitian *mesh* yang digunakan, proses *meshing* dilakukan secara otomatis menggunakan fitur *generate* yang tersedia pada *ANSYS Fluent*. Penelitian ini menggunakan *mesh* dengan ukuran elemen yang digunakan pada masing-masing variasi desain sebesar 0,08 m. Hasil *meshing* dapat dilihat pada Gambar 4.

Proses *setup* merupakan proses dilakukan penginputan variabel-variabel yang sudah ditetapkan, penelitian ini menggunakan model turbulensi *k-ε realizable* karena memiliki keunggulan dalam memprediksi aliran turbulen yang melewati tikungan tajam (Gulo & Wungu, 2026). Penelitian ini menggunakan *materials* fluida *water-liquid* dengan nilai densitas sebesar $998,2 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas sebesar $0,001003 \text{ kg/(ms)}$ sebagai kondisi *default*. Input *boundary conditions* saluran masuk (*inlet*) didefinisikan sebagai kecepatan masuk (*velocity inlet*) dengan nilai kecepatan 7 m/s serta input saluran keluar (*outlet*) didefinisikan sebagai *pressure outlet* dengan metode spesifikasi turbulen menggunakan intensitas 5% sebagai kondisi *default* disetiap sisinya. *Boundary conditions* pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 4. Hasil *Meshing* Variasi Desain Belokan Pipa

Proses *solution* dilakukan dengan menentukan skema *SIMPLE*, menentukan *initialization methods*, dimana pada penelitian ini menggunakan *hybrid initialization*. Proses lainnya dalam tahapan ini adalah menentukan kriteria konvergensi senilai 1×10^{-6} dan menentukan jumlah iterasi dengan jumlah iterasi maksimum 700. Proses *results* merupakan proses untuk membaca data akhir hasil dari simulasi dilakukan. Proses ini menampilkan profil tekanan, kecepatan aliran fluida, *streamline* dan sebagainya.

Tabel 2. Kondisi Batas Simulasi

Kategori Pengaturan	Parameter	Nilai / Metode
Model	Model turbulensi	k-ε (<i>realizable</i>)
Material	Jenis Fluida	Air
	ρ	998,2 kg/m ³
	C _p	4182 J/kg K
Kondisi batas	Kecepatan inlet	7 m/s
	Tekanan outlet	0 Pa
	Kondisi dinding	<i>No-slip condition, roughness standart</i>
Metode	Skema	<i>SIMPLE</i>
	Inisialisasi kriteria konvergensi	1×10^{-6}
	Jumlah iterasi maksimum	700

III. HASIL PENELITIAN

Data penelitian yang akan dianalisis pada penelitian ini yaitu data *pressure drop*. Pengambilan data dilakukan menggunakan metode simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan menggunakan *software ANSYS Fluent 2019 R3*. Pada Tabel 3 menampilkan nilai *pressure drop* dengan 13 total variasi.

Tabel 3. Nilai *Pressure Drop* pada Desain *Elbow* Pipa 90°

Variasi Desain	<i>Pressure Drop</i> (Pa)
1D	2.090,634
1,25D + 10°	1.094,350
1,25D + 20°	1.443,357
1,25D + 30°	2.082,713
1,25D + 45°	3.716,635
1,25D + 60°	5.904,963
1,25D + 90°	12.021,776
1,5D + 10°	1.181,170
1,5D + 20°	1.380,105
1,5D + 30°	2.360,805
1,5D + 45°	3.982,239
1,5D + 60°	6.927,999
1,5D + 90°	21.355,714

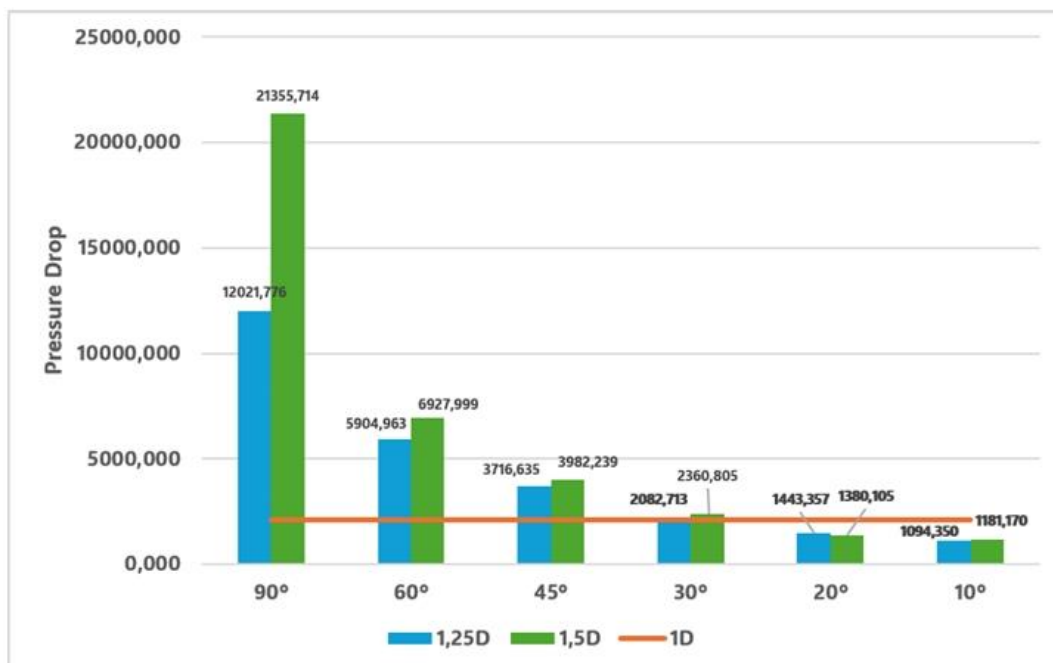
Berdasarkan Tabel 4.1 didapatkan hasil pengujian *pressure drop* pada belokan pipa 90°. Hasil

pengujian menunjukkan bahwa pada variasi desain 1D didapatkan nilai *pressure drop* sebesar 2.090,634 Pa. Desain belokan pipa 1,25D dengan sudut penghubung 10° merupakan desain optimal yang menghasilkan *pressure drop* terendah sebesar 1.094,350 Pa, lebih rendah 47,7% dibandingkan desain standar 1D. Sedangkan pada variasi 1,5D dengan sudut penghubung 90° merupakan desain dengan *pressure drop* tertinggi yang menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 21.355,714 atau meningkat sekitar 921,51% dibandingkan desain standar 1D.

IV. PEMBAHASAN

1. Analisis Variasi Perbesaran Diameter Terhadap Nilai *Pressure Drop*

Berdasarkan Gambar 5 grafik perbandingan nilai *pressure drop* antara desain 1D dengan variasi perbesaran diameter 1,25D dan 1,5D pada masing-masing sudut penghubung menunjukkan hasil yang bervariasi, desain belokan pipa 1,25D dengan sudut penghubung 10° merupakan desain optimal yang menghasilkan *pressure drop* terendah sebesar 1.094,350 Pa, lebih rendah 47,7% dibandingkan desain standar 1D. Sedangkan pada variasi 1,5D dengan sudut penghubung 90° merupakan desain dengan *pressure drop* tertinggi yang menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 21.355,714 atau meningkat sekitar 921,51% dibandingkan desain standar 1D.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Data Hasil Pengujian *Pressure Drop*

Variasi perbesaran diameter memiliki pengaruh terhadap nilai *pressure drop* yang dihasilkan. Pada variasi perbesaran diameter 1,25D dan 1,5D menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih rendah dibandingkan desain belokan pipa standar 1D pada sudut penghubung kecil 10° dan 20° . Sedangkan, pada sudut penghubung yang lebih besar seperti 30° sampai 90° , nilai *pressure drop* pada kedua kelompok variasi perbesaran diameter lebih tinggi dari nilai *pressure drop* pada desain 1D. Pada sudut 10° desain 1,25D menghasilkan *pressure drop* lebih rendah daripada 1,5D dengan selisih 86,82 Pa, namun pada sudut 20° kondisi berbanding terbalik dimana 1,5D menghasilkan *pressure drop* lebih rendah dari 1,25D dengan selisih 63,25 Pa. Mulai sudut 30° ke atas, desain 1,25D secara konsisten menghasilkan *pressure drop* yang lebih rendah dibandingkan 1,5D, dengan selisih yang semakin besar hingga mencapai 9.333,938 Pa pada sudut 90° .

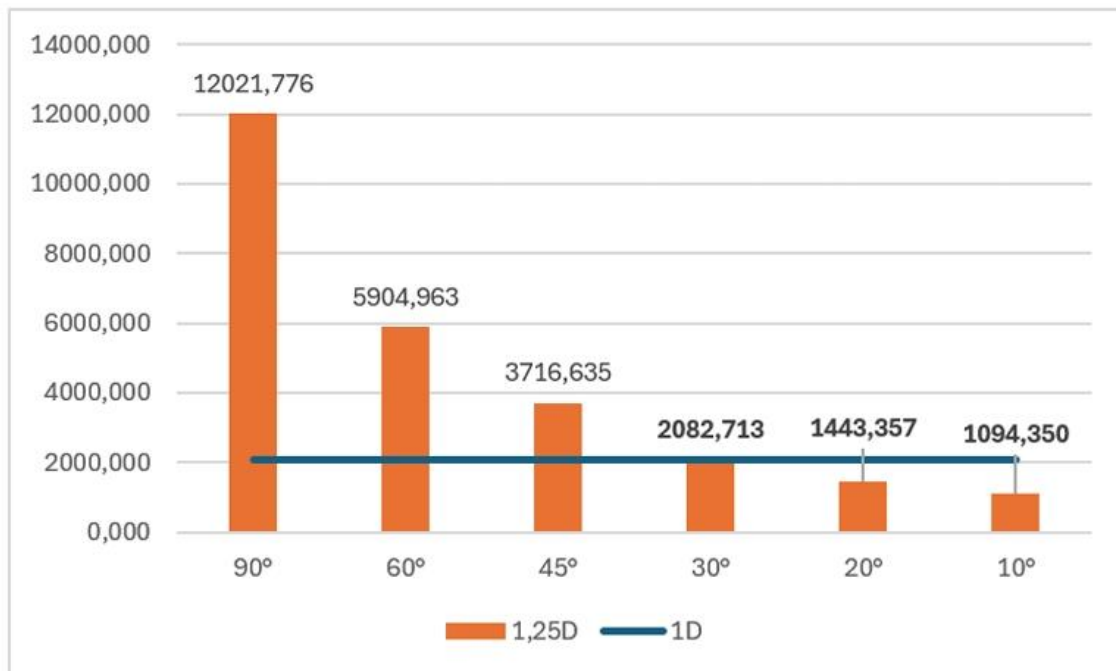
Berdasarkan persamaan kontinuitas dimana perbesaran diameter pada belokan pipa artinya memperluas penampang aliran, persamaan tersebut menggambarkan bahwa ketika diameter pipa

diperbesar maka kecepatan aliran fluida akan menurun (Dewadi et al., 2023). Penurunan kecepatan pada aliran fluida dapat meningkatkan tekanan fluida sesuai dengan persamaan bernoulli. Prinsip bernoulli menyatakan bahwa dimana pada aliran fluida yang memiliki kecepatan rendah maka tekanan fluida menjadi tinggi. Sedangkan pada aliran fluida dengan kecepatan tinggi maka tekanan pada fluida tersebut menjadi rendah (Rathakrishnan, 2022). Namun efektivitas perbesaran diameter juga bergantung pada sudut penghubung yang digunakan.

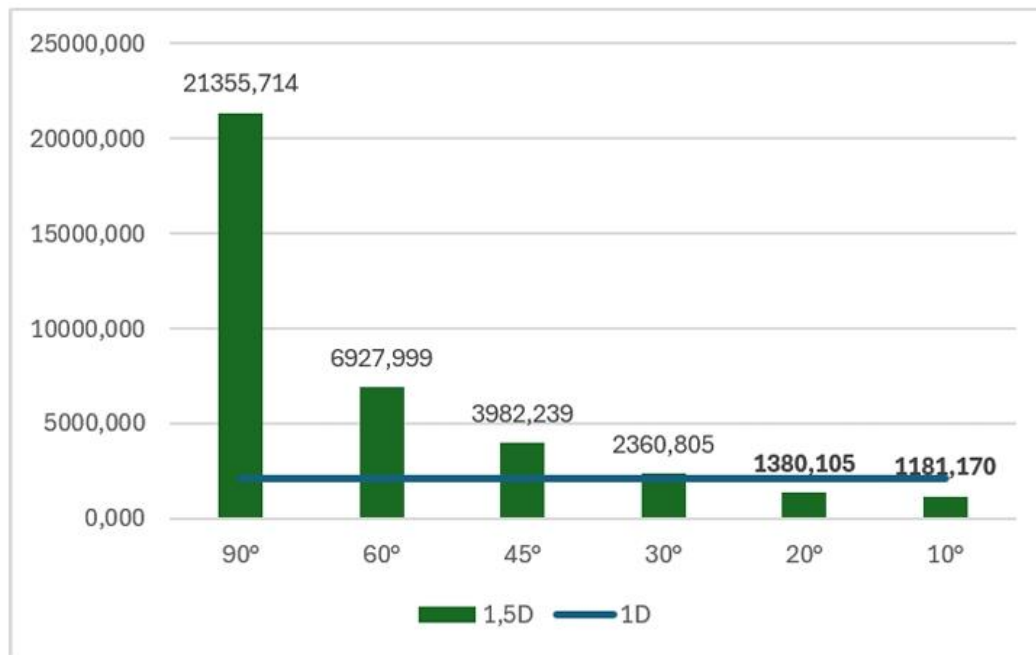
Perbesaran diameter 1,25D terbukti lebih efektif karena memberikan perbesaran penampang yang landai sehingga aliran dapat menyesuaikan arah alirannya secara bertahap. Sedangkan perbesaran 1,5D yang terlalu besar justru menciptakan perubahan yang terlalu signifikan, terutama pada sudut penghubung besar, sehingga memicu separasi aliran (*flow separation*) dan zona resirkulasi yang lebih luas yang pada akhirnya meningkatkan *pressure drop* secara signifikan. Hal ini sesuai dengan penelitian Mulyana & Riyandi (2019) dan Nuryoto et al. (2024) yang menyatakan bahwa besarnya luas penampang pipa berpengaruh terhadap besarnya nilai *pressure drop*, dimana semakin luas penampang maka nilai *pressure drop* yang dihasilkan semakin kecil. Besarnya nilai *pressure drop* juga dipengaruhi oleh kemiringan pipa, semakin besar sudut kemiringannya semakin besar nilai *pressure drop* nya.

Variasi perbesaran diameter berpengaruh signifikan terhadap nilai *pressure drop* pada belokan pipa. Perbesaran diameter 1,25D terbukti lebih efektif dalam meminimalisir *pressure drop* dibandingkan 1,5D. Pengaruh positif perbesaran diameter hanya efektif pada sudut penghubung kecil, sedangkan pada sudut besar perbesaran diameter yang berlebihan justru meningkatkan *pressure drop*.

2. Analisis Variasi Besar Sudut Penghubung Terhadap Nilai *Pressure Drop*



Gambar 6. Grafik Data Hasil Pengujian *Pressure Drop* Variasi 1,25D



Gambar 7. Grafik Data Hasil Pengujian *Pressure Drop* Variasi 1,5D

Gambar 6 menunjukkan pada variasi perbesaran diameter 1,25D semakin kecil sudut penghubung antar diameter, semakin kecil juga nilai *pressure drop* yang dihasilkan. Nilai *pressure drop* paling tinggi dihasilkan oleh desain dengan besar sudut penghubung 90° yang menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 12.021,776 Pa. Selanjutnya desain dengan sudut penghubung 60° menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 5.904,963 Pa, desain dengan sudut penghubung 45° menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 3.716,635 Pa, desain dengan sudut penghubung 30° menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 2.082,713 Pa, desain dengan sudut penghubung 20° menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 1.443,357 Pa. Sedangkan nilai *pressure drop* paling rendah dihasilkan oleh desain dengan sudut penghubung 10° yang menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 1.094,350 Pa.

Gambar 7 menunjukkan pada variasi perbesaran diameter 1,5D semakin kecil sudut penghubung antar diameter, semakin kecil juga nilai *pressure drop* yang dihasilkan. Nilai *pressure drop* paling tinggi dihasilkan oleh desain dengan besar sudut penghubung 90° yang menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 21.355,714 Pa. Selanjutnya desain dengan sudut penghubung 60° menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 6.927,999 Pa, desain dengan sudut penghubung 45° menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 3.982,239 Pa, desain dengan sudut penghubung 30° menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 2.360,805 Pa, desain dengan sudut penghubung 20° menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 1.380,105 Pa. Sedangkan nilai *pressure drop* paling rendah dihasilkan oleh desain dengan sudut penghubung 10° yang menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 1.181,170 Pa.

Hasil pengujian pada kedua variasi perbesaran diameter menunjukkan hasil yang sama, dimana nilai *pressure drop* meningkat seiring dengan peningkatan besar sudut penghubung. Pengujian nilai *pressure drop* pada variasi desain 1,25D peningkatan sudut penghubung dari 10° ke 90° menyebabkan peningkatan *pressure drop* dari 1.094,350 Pa menjadi 12.021,776 Pa, atau meningkat sebesar 898,0%. Pada variasi 1,5D, peningkatan sudut penghubung dari 10° ke 90° menyebabkan peningkatan *pressure drop* dari 1.181,170 Pa menjadi 21.355,714 Pa, atau meningkat sebesar 1.707,9%. Terdapat pola peningkatan *pressure drop* yang konsisten seiring bertambahnya sudut penghubung pada kedua variasi. Pola ini bersifat non-linear, di mana laju peningkatan *pressure drop* semakin besar seiring kenaikan sudut, terutama pada transisi dari sudut 60° ke 90°. Pada kelompok 1,5D, laju peningkatan dari sudut 60° ke 90° mencapai 208,3%, yang menunjukkan bahwa kombinasi sudut penghubung besar dan perbesaran diameter yang besar justru dapat meningkatkan nilai *pressure drop*.

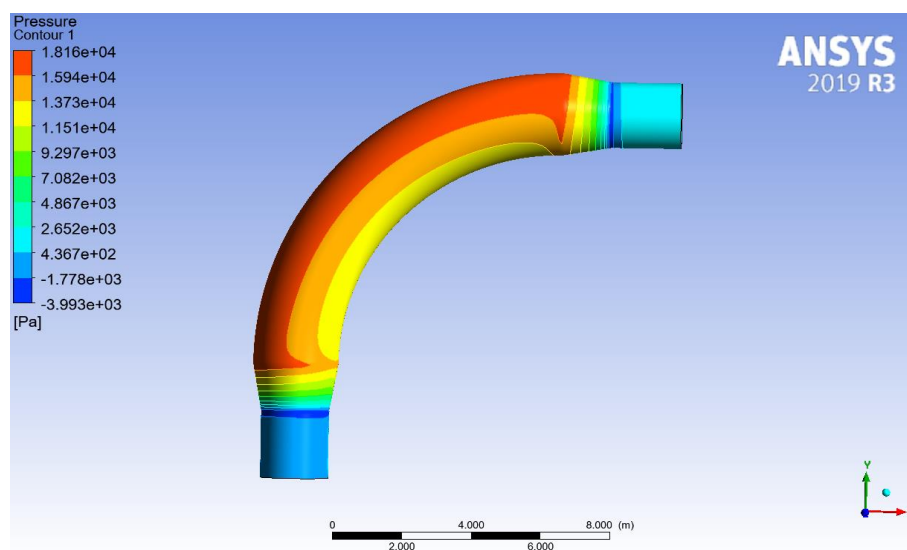
Sudut penghubung menentukan seberapa tiba-tiba perubahan geometri yang dialami aliran fluida di

titik transisi antara diameter yang diperbesar dengan zona belokan. Sudut penghubung kecil seperti 10° menciptakan transisi yang halus atau *smooth transition* sehingga profil kecepatan aliran dapat beradaptasi secara bertahap tanpa mengalami separasi. Sebaliknya, sudut penghubung besar seperti 90° menciptakan perubahan arah geometri yang sangat tiba-tiba di titik transisi, memaksa fluida untuk mengubah arah secara mendadak sehingga mengakibatkan separasi aliran, menyebabkan turbulensi, dan peningkatan intensitas aliran sekunder (*secondary flow*). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Karpenko et al. (2023) yang menemukan bahwa sudut belokan yang lebih besar menyebabkan peningkatan *pressure drop* akibat semakin besarnya perubahan arah aliran yang memicu turbulensi dan separasi aliran di area belokan. Penelitian Al-Tameemi et al. (2025) juga menyatakan bahwa penurunan tekanan aliran pada belokan dipengaruhi oleh variasi sudut, dan aliran balik (*back flow*) di area belokan merupakan penyebab utama peningkatan *pressure drop* pada sudut yang lebih besar.

Sudut penghubung merupakan faktor yang mempengaruhi besar nilai *pressure drop* yang dihasilkan. Terdapat pengaruh yang cukup signifikan antara besarnya sudut penghubung dengan nilai *pressure drop*, dimana peningkatan sudut dari 10° ke 90° menyebabkan kenaikan *pressure drop* sebesar 898,0% pada variasi 1,25D dan 1.707,9% pada variasi 1,5D. Pada sudut penghubung kecil 10° dan 20° secara konsisten menghasilkan *pressure drop* terendah pada kedua variasi perbesaran diameter.

3. Analisis Variasi Desain Paling Optimal dalam Meminimalisir *Pressure Drop*

Berdasarkan seluruh hasil simulasi CFD terhadap 13 variasi desain belokan pipa, desain 1,25D dengan sudut penghubung 10° menghasilkan nilai *pressure drop* terendah sebesar 1.094,350 Pa. Nilai tersebut lebih rendah 47,7% dibandingkan desain belokan pipa standar 1D yang menghasilkan nilai *pressure drop* sebesar 2.090,634 Pa. *Contours* tekanan pada desain 1,25D dengan sudut penghubung 10° dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. *Contours* Distribusi Tekanan pada Desain 1,25D+ 10°

Berdasarkan Gambar 4.4 *contours* tekanan pada desain 1,25D dengan sudut penghubung 10° menunjukkan gradien warna yang halus dan transisi bertahap tanpa adanya perubahan tekanan secara tiba-tiba yang mengindikasikan separasi aliran. Distribusi tekanan yang merata ini menggambarkan kondisi aliran yang efisien dimana aliran fluida dapat disalurkan dengan penurunan tekanan yang minimum dari *inlet* menuju *outlet*.

Kombinasi desain 1,25D dengan sudut 10° menghasilkan nilai *pressure drop* yang paling kecil. Variasi tersebut dapat meminimalisir penurunan tekanan melalui perbesaran diameter 1,25D untuk menurunkan kecepatan dan meningkatkan tekanan serta sudut penghubung 10° yang landai sehingga dapat meminimalisir adanya turbulensi pada aliran fluida yang dapat menyebabkan meningkatnya penurunan tekanan, sudut penghubung 10° lebih efektif dibandingkan dengan sudut-sudut yang lebih besar.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) terhadap 13 variasi desain belokan pipa 90° pada pipa, didapatkan variasi desain 1,25D dengan sudut penghubung 10° menghasilkan penurunan nilai *pressure drop* paling signifikan sebesar 47,7% dibandingkan desain standar 1D, yaitu dari 2.090,634 Pa menjadi 1.094,350 Pa. Variasi perbesaran diameter berpengaruh signifikan terhadap nilai *pressure drop* pada belokan pipa. Perbesaran diameter terbukti yang efektif menurunkan *pressure drop* hanya pada sudut penghubung kecil 10° dan 20°. Desain 1,25D terbukti lebih efektif dibandingkan 1,5D karena memberikan perbesaran penampang yang landai sehingga aliran dapat beradaptasi secara bertahap tanpa memicu separasi aliran. Sedangkan perbesaran diameter 1,5D yang terlalu besar menciptakan perubahan penampang yang terlalu signifikan sehingga memicu separasi aliran (*flow separation*) dan zona resirkulasi yang lebih luas. Sudut penghubung merupakan faktor yang berpengaruh terhadap nilai *pressure drop*, dimana semakin kecil sudut penghubung maka semakin kecil pula nilai *pressure drop* yang dihasilkan. Desain 1,25D dengan sudut penghubung 10° merupakan kombinasi paling optimal dengan *pressure drop* terendah sebesar 1.094,350 Pa atau lebih rendah 47,7% dibandingkan desain standar 1D sebesar 2.090,634 Pa. Keunggulan desain ini terletak pada kombinasi dua faktor yang saling menguatkan, yaitu perbesaran diameter 1,25D yang secara baik menurunkan kecepatan aliran sesuai persamaan kontinuitas sehingga tekanan meningkat, serta sudut penghubung 10° yang landai sehingga mampu meminimalisir separasi aliran, turbulensi, aliran balik (*back flow*) dan kehilangan energi di area belokan.

VI. REFERENSI

- Alhabsyi, A. C., Badrun, B., & Yusuf, A. R. (2023). Studi Perencanaan Pipa Penstock Pada Pembangunan PLTA Poso. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi*, 1(3), 156–159. <https://doi.org/10.56326/jptsk.v1i3.3014>
- Al-Tameemi, W. T. M., Al-Tameemi, M. R. J., & Khudhair, A. J. (2025). PRESSURE LOSS COEFFICIENT OF LAMINAR FLOW ACROSS 30°, 45° AND 60° MINI MITRE BENDS. *Kufa Journal of Engineering*, 16(4), 288–301. <https://doi.org/10.30572/2018/KJE/160417>
- Dewadi, M. F., Pido, R., & Issafira, D. R. (2023). MEKANIKA FLUIDA (M. F. Dewadi, Ed.). *Indie Press*. www.indiepress.id
- Fadhli, & Sriwati. (2017). STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI BELOKAN PIPA (ELBOW) TERHADAP KECEPATAN ALIRAN FLUIDADAN KERUGIAN TEKANAN. 12, 1717–1721.
- Gulo, S. R., & Wungu, T. D. K. (2026). Analisis Distribusi Tekanan dan Kecepatan dalam Pipa Elbow Menggunakan Computational Fluid Dynamics. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 14(01), 40.
- Haq, R. N., Prasetyo, B. Y., & Praktiko. (2025). Simulasi Computational Fluids Dynamic Distribusi Temperatur dan Kecepatan Udara Pada Sistem Pendingin Thermoelectric. *IRWNS*, 323–329.
- Hasibuan, B. A., Siahaan, J. C., & Harianda, I. (2022). ANALISIS UNJUK KERJA TURBIN AIR KAPASITAS 3×6 MW PADA BEBAN NORMAL DAN BEBAN PUNCAK DI UNIT PLTA PAKKAT PT. ENERGY SAKTI SANTOSA. *SINERGI Polmed : JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN*, 13–22. <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index>
- Joshi, T., Parkash, O., & Krishan, G. (2022). CFD modeling for slurry flow through a horizontal pipe bend at different Prandtl number. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23731–23750.
- Karpenko, M., Stosiak, M., Šukevičius, Š., Skačkauskas, P., Urbanowicz, K., & Deptuła, A. (2023). Hydrodynamic Processes in Angular Fitting Connections of a Transport Machine's Hydraulic Drive. *Machines*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/machines11030355>
- Mulyana, C., & Riyandi, D. N. (2019). MODEL PENGARUH DIAMETER PIPA TERHADAP PRESSURE DROP PADA PIPA PLTP DOMINASI UAP. *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, 03(01), 26–32.
- Nuryoto, Rahmayetty, R., Yusuf Rumbino, Astrilia Damayanti, & Doni Rahmat Wicakso. (2024). OBSERVASI PENURUNAN TEKANAN (PRESSURE DROP) PADA SISTEM PERPIPAAN: PENGARUH PANJANG DAN DIAMETER PIPA, ELBOW, DAN TEE. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 15(2), 1023–1039. <https://doi.org/10.21776/jrm.v15i2.1666>

- Rathakrishnan, E. (2022). *FLUID MECHANICS An Introduction* (4th ed.). PHI Learning Private Limited.
- Saber, H. A., & Maree, I. E. (2022). A COMPUTATIONAL STUDY OF CURVATURE EFFECT ON PRESSURE DROP OF GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW THROUGH 90 DEGREE ELBOW. *Thermal Science*, 26(4), 3215–3228. <https://doi.org/10.2298/TSCI210322002S>
- Sidiq, F. M., & Al-Janan, D. H. (2025). Analysis of the Effect of 90 0 Pipe Elbow Design Variations and Inlet Flow Velocity on Pressure Drop Using Computational Fluid Dynamics Simulation. *Jurnal Vokasi Mekanika*, 7(3), 355–366.
- Sugiyono. (2022). METODE PENELITIAN KUANTITATIF, KUALITATIF, DAN R&D. ALFABETA.
- Taufiqurrahman, A., & Windarta, J. (2020). Overview Potensi dan Perkembangan Pemanfaatan Energi Air di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 1(3), 124–132. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.10036>
- Yulianti, R., Syukrilla, W. A., Febriyanti, T. L., Rahayu, D. S., Agung, B. H., Oktariantio, M. L., Koto, S. K., Rahmawan, S., Asmara, A., Sidabutar, Y. A., Krisma, D. A., Adi, N. R. M., & Zulaeha, O. (2024). Metode Penelitian Eksperimen Konsep, Implementasi, dan Studi Kasus. *PT. Mifandi Mandiri Digital*.