

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi di sektor industri, terutama dalam bidang pemrosesan fluida, mendorong perusahaan untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem perpipaan secara berkelanjutan dalam berbagai proses produksi. Aliran fluida dalam sistem perpipaan memegang peran penting dalam berbagai aplikasi teknik, termasuk di industri, HVAC, dan sistem transportasi. Salah satu komponen utama dalam sistem perpipaan adalah pipa *elbow* 90°, yang berfungsi untuk mengubah arah aliran fluida dalam jaringan pipa. Pipa *elbow* 90° seringkali mengalami perubahan arah aliran yang tajam, yang pada akhirnya mempengaruhi distribusi kecepatan dan pola aliran fluida di dalam pipa (Jing et al., 2020).

Aliran fluida di dalam pipa siku (*elbow*) mengalami penurunan tekanan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan pipa lurus, yang menjadi masalah utama dalam sistem perpipaan. Fenomena ini berakar dari perubahan arah aliran yang tajam, yang menciptakan gradien tekanan merugikan (*adverse pressure gradient*). Gradien tekanan ini kemudian memicu dua fenomena kompleks secara bersamaan. Pertama adalah terbentuknya aliran sekunder, yaitu pusaran (*vortex*) di mana fluida bergerak dari dinding luar ke dinding dalam akibat perbedaan tekanan, yang menyebabkan efek penyumbatan (*blockage effect*) (Arteaga-hernández et al., 2024). Pembentukan aliran sekunder ini sangat dipengaruhi oleh nilai Bilangan *Reynolds*. Fenomena kedua adalah separasi aliran, di mana aliran fluida terlepas dari permukaan dinding dalam karena tidak memiliki energi yang cukup untuk melawan gradien tekanan. Gabungan dari semua faktor inilah termasuk kerugian gesekan, aliran sekunder, dan separasi aliran yang pada akhirnya mengurangi energi aliran secara signifikan serta menurunkan kinerja dan efisiensi sistem perpipaan secara keseluruhan (Gajbhiye et al., 2020).

Untuk mengatasi masalah aliran dalam pipa siku, salah satu solusi rekayasa yang umum digunakan adalah dengan menambahkan elemen internal yang disebut *guide vanes* (sudu pengarah). Fungsi utama dari *guide vane* adalah untuk

mengontrol dan mengarahkan pola aliran secara aktif saat fluida melewati belokan. Dengan memandu aliran secara lebih mulus, *guide vane* dapat meminimalkan turbulensi yang dihasilkan, yang pada gilirannya mengurangi zona stagnasi dan mengoptimalkan distribusi kecepatan fluida di seluruh penampang pipa (Ziganshin et al., 2021). Secara keseluruhan, semua efek positif ini bertujuan untuk mencapai tujuan akhir, yaitu mengurangi kehilangan tekanan total dan meningkatkan efisiensi sistem perpipaan (Yin et al., 2022).

Metode simulasi numerik seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan alat yang sangat efektif untuk menganalisis karakteristik aliran fluida yang kompleks. Dengan menggunakan metode ini, peneliti dapat memodelkan dan mensimulasikan berbagai parameter aliran seperti kecepatan, tekanan, dan distribusi turbulensi dengan tingkat akurasi yang tinggi. Sebagai contoh konkret, penelitian yang dilakukan oleh (Faradis et al., 2024), yang menggunakan simulasi CFD untuk menganalisis pengaruh penghalang berbentuk segitiga (*Triangle Inlet Disturbance Body*) yang dipasang sebelum tikungan. Tujuan dari penghalang ini adalah untuk sengaja menciptakan turbulensi yang kuat agar aliran lebih mampu melawan gradien tekanan merugikan. Namun, temuan mereka secara signifikan menunjukkan bahwa penambahan penghalang ini justru memperkuat formasi *vortex* dan pada akhirnya meningkatkan penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi.

Berbeda dengan pendekatan penghalang, penelitian oleh (Li et al., 2022) kembali fokus pada *guide vane*, namun dengan tujuan spesifik untuk mengurangi erosi akibat partikel padat dalam aliran gas-solid. Untuk mencapai ini, mereka mengkombinasikan simulasi CFD-DPM dengan metode optimasi canggih, yaitu *Response Surface Methodology* (RSM). Studi mereka mengungkap mekanisme kerja *vane* yang efektif, di mana *vane* berfungsi sebagai pelindung (*shelter*) yang menghalangi partikel berkecepatan tinggi menghantam dinding siku secara langsung. Selain itu, *vane* juga memodifikasi medan aliran dengan memperluas area berkecepatan rendah di dekat dinding luar dan menyebarkan partikel agar tidak terkonsentrasi pada satu titik. Melalui pendekatan optimasi ini, mereka berhasil

menentukan geometri *vane* yang optimal untuk meminimalkan laju erosi secara signifikan.

Selain fokus pada modifikasi geometri, pemahaman karakteristik fluida yang lebih kompleks juga krusial, terutama untuk aplikasi industri seperti farmasi dan makanan. (Bibok et al., 2020) secara mendalam meneliti area ini dengan melakukan investigasi eksperimental dan numerik (CFD) secara bersamaan pada pipa siku yang dialiri fluida *non-newtonian*. Melalui pendekatan gabungan ini, mereka berhasil memvalidasi model CFD mereka terhadap data laboratorium, membuktikan keakuratannya dalam menghitung koefisien kerugian. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah pembuktian bahwa penggunaan Bilangan *Reynolds* yang dimodifikasi merupakan kunci untuk dapat menggeneralisasi perilaku aliran fluida *non-newtonian* yang kompleks, sehingga memungkinkan perancangan sistem perpipaan yang lebih akurat dan efisien untuk fluida-fluida tersebut.

Penelitian ini tidak hanya berfokus pada identifikasi masalah aliran dalam pipa siku, tetapi secara proaktif bertujuan untuk memberikan solusi yang dapat diterapkan langsung dalam desain sistem perpipaan. Dengan memahami secara mendalam karakteristik aliran di dalam pipa *elbow* 90°, penelitian ini bertujuan menghasilkan rekomendasi desain yang lebih efisien. Pada gilirannya, perancangan yang lebih baik ini diharapkan dapat secara signifikan mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan. Lebih jauh lagi, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan teknologi perpipaan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Alhakiem et al., 2021).

Relevansi penelitian ini semakin diperkuat dalam konteks industri modern yang terus menuntut peningkatan efisiensi dan pengurangan biaya operasional. Dalam berbagai aplikasi krusial seperti sistem HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) dan sistem distribusi air, setiap peningkatan efisiensi aliran fluida seperti yang diupayakan dalam studi ini akan berdampak langsung pada kinerja dan konsumsi energi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki nilai ganda tidak hanya memberikan kontribusi akademis dalam pemahaman

dinamika fluida, tetapi juga menawarkan wawasan praktis yang signifikan untuk aplikasi rekayasa di dunia industri (Nurhaliza et al., 2023).

Oleh karena itu, penelitian ini akan mengkaji secara numerik karakteristik aliran fluida di dalam pipa *elbow* 90° dengan memvariasikan jumlah dan posisi *guide vanes*. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi desain *guide vane* yang optimal dengan mengevaluasi kemampuannya dalam meningkatkan kualitas aliran, mengurangi kehilangan tekanan, dan menjaga efisiensi sistem perpipaan. Pada akhirnya, studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting bagi perancangan sistem perpipaan yang lebih efisien dan andal di berbagai sektor industri.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang sebelumnya, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi *guide vanes* terhadap karakteristik aliran fluida, serta bagaimana variasi ini memengaruhi distribusi tekanan, profil kecepatan dan *pressure drop* pada aliran fluida di dalam pipa *elbow* 90°
2. Bagaimana pengaruh variasi pemasangan *guide vanes* terhadap kemampuannya dalam memitigasi distorsi aliran dan aliran sekunder.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan memahami karakteristik aliran fluida dalam pipa *elbow* 90° dengan variasi penambahan *guide vanes* melalui pendekatan numerik. Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menganalisa pengaruh variasi *guide vanes* terhadap karakteristik aliran fluida, serta bagaimana variasi ini memengaruhi distribusi kecepatan, distribusi tekanan dan *pressure drop* pada aliran fluida di dalam pipa *elbow* 90°
2. Untuk mengidentifikasi karakteristik aliran fluida dalam pipa *elbow* 90° tanpa *guide vanes* dan penambahan *guide vanes* terhadap kemampuannya dalam memitigasi distorsi aliran dan aliran sekunder

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah wawasan dan pengetahuan dalam bidang mekanika fluida, khususnya terkait karakteristik aliran fluida di pipa *elbow* 90° dengan variasi penambahan *guide vanes* menggunakan pendekatan *Computational fluid dynamics* (CFD).
2. Menghasilkan data numerik yang dapat digunakan untuk memvalidasi desain sistem perpipaan atau simulasi CFD pada penelitian berikutnya.
3. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode simulasi karakteristik aliran fluida di pipa *elbow* 90° dengan variasi penambahan *guide vanes* menggunakan pendekatan *Computational fluid dynamics* (CFD), yang dapat diterapkan pada penelitian lanjutan dan dalam perancangan sistem perpipaan di berbagai industri.

1.5. Batasan Masalah

Adapun Batasan – Batasan masalah pada penelitian ini, antara lain:

1. Penelitian hanya difokuskan pada pipa *elbow* dengan sudut 90. Geometri lain, seperti *elbow* dengan sudut berbeda atau bentuk pipa yang tidak melingkar, tidak akan dianalisis.
2. Penelitian akan mempelajari pengaruh variasi desain *guide vanes* termasuk jumlah dan posisi, terhadap karakteristik aliran fluida. Variabel lain yang mungkin mempengaruhi aliran, seperti temperatur dan jenis fluida, tidak akan menjadi fokus dalam penelitian ini.
3. Penelitian hanya akan membahas aliran fluida yang bersifat tunggal dan *incompressible*, yaitu aliran cairan (air), tanpa memperhitungkan aliran gas atau campuran fluida (*multiphase*).
4. Penelitian ini memakai nilai bilangan *Reynolds* sebesar $Re = 5,08 \times 10^5$ yang masuk dalam kategori turbulen dengan *density* (ρ) $999,7 \text{ kg/m}^3$ dan *dynamic viscosity* (μ) $1.308 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$.
5. Jenis pipa *elbow* 90 yang digunakan dalam simulasi adalah HDPE (*High-Density Polyethylene*)