



Analisis Numerik Distribusi Tekanan dan Karakteristik Aliran Fluida C_4H_{10} Pada Swivel Joint Style 40 dengan Sudut Gerak Engsel 45°

Numerical Analysis of Pressure Distribution and Flow Characteristics of C_4H_{10} in Swivel Joint Style 40 with a 45° Hinge Angle

I Putu Redy Irawan^{1,a)}, Atus Buku², Yusuf Siahaya²

¹Jurusan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus

^{a)}Corresponding author: puturedyirawan@unm.ac.id

Abstrak

Swivel joint merupakan komponen penting pada sistem perpipaan industri yang berfungsi mengakomodasi gerakan rotasi sekaligus menjaga kontinuitas aliran fluida. Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi tekanan dan karakteristik aliran gas C_4H_{10} pada Swivel Joint Style 40 dengan sudut gerak engsel 45° menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi tiga dimensi kondisi tunak dilakukan menggunakan ANSYS Fluent 19.0 dengan model turbulensi $k-\omega$ SST. Hasil simulasi menunjukkan distribusi tekanan relatif (*gauge pressure*) maksimum sebesar $4,4 \times 10^{-2}$ Pa pada daerah inlet, dengan *pressure drop* sebesar 0,0738 Pa menuju outlet. Kecepatan aliran meningkat hingga 0,24 m/s pada daerah belokan tanpa menunjukkan separasi aliran yang signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa geometri Swivel Joint Style 40 mampu mempertahankan distribusi tekanan dan karakteristik aliran yang stabil. Temuan ini dapat menjadi referensi dalam evaluasi desain dan optimasi sistem perpipaan industri untuk meningkatkan efisiensi aliran dan keandalan operasi.

Kata Kunci: CFD; distribusi tekanan; karakteristik aliran; dan swivel joint style 40

Abstract

Swivel joints are essential components in industrial piping systems that accommodate rotational movement while maintaining flow continuity. However, changes in flow direction within the joint may induce pressure gradients and affect flow stability. This study aims to investigate the pressure distribution and flow characteristics of butane gas (C_4H_{10}) in a 45° Style 40 swivel joint using a *Computational Fluid Dynamics* (CFD) approach. Three-dimensional steady-state simulations were performed in ANSYS Fluent 19.0 employing the $k-\omega$ SST turbulence model. The simulation results indicate a maximum relative (*gauge*) pressure of 4.4×10^{-2} Pa at the inlet region, with an overall pressure drop of 0.0738 Pa toward the outlet. The maximum flow velocity reached 0.24 m/s without significant flow separation, indicating stable turbulent flow through the elbow section. These findings demonstrate that the 45° Style 40 swivel joint provides stable pressure distribution and flow characteristics, offering valuable insights for the design and optimization of industrial piping systems.

Keywords: CFD; pressure distribution; velocity distribution; and Style 40 swivel joint

PENDAHULUAN

Swivel joint merupakan komponen penting dalam sistem perpipaan industri yang berfungsi memungkinkan pergerakan rotasi antar segmen pipa tanpa mengganggu kontinuitas aliran fluida. Komponen ini banyak diaplikasikan pada *loading arm* [1], sistem transfer LPG/LNG [2], serta instalasi industri bertekanan tinggi yang membutuhkan fleksibilitas mekanis sekaligus keandalan hidrodinamika. Meskipun memberikan keuntungan dari

sisi mekanis, perubahan arah aliran yang terjadi di dalam swivel joint berpotensi menimbulkan ke tidak keseimbangan distribusi tekanan dan peningkatan rugi energi lokal akibat efek gaya sentrifugal dan gradien tekanan transversal [3], [4].

Dalam beberapa tahun terakhir, pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah digunakan secara luas untuk menganalisis karakteristik aliran pada pipa belokan, *elbow*, dan berbagai jenis *fitting* perpipaan.

Studi-studi terkini menunjukkan bahwa simulasi numerik tiga dimensi mampu menggambarkan pembentukan aliran sekunder, zona tekanan tinggi di sisi luar belokan, serta daerah tekanan rendah di sisi dalam belokan yang berkontribusi langsung terhadap *pressure drop* [5], [6]. Penggunaan perangkat lunak komersial seperti *ANSYS Fluent* juga telah terbukti andal dalam memprediksi distribusi tekanan dan struktur aliran internal pada sistem perpipaan industri [7], [8].

Aliran fluida gas dalam sistem perpipaan industri memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan fluida cair, terutama terkait dengan sifat kompresibilitas, densitas yang relatif rendah, serta sensitivitas terhadap perubahan geometri saluran. Pada kondisi operasi tertentu, perubahan arah aliran, penyempitan, maupun tidak sejajaran lintasan internal dapat menyebabkan gradien tekanan yang signifikan serta re-distribusi kecepatan aliran. Beberapa penelitian pada sistem perpipaan gas menunjukkan bahwa gangguan geometris, seperti belokan dan sambungan, berkontribusi besar terhadap kerugian energi lokal dan perubahan stabilitas aliran, terutama pada rezim turbulen rendah hingga menengah [9], [10].

Dalam aplikasi industri, gas LPG khususnya butana (C_4H_{10}) banyak digunakan sebagai sumber energi dan fluida proses, sehingga pemahaman terhadap perilaku alirannya di dalam komponen perpipaan menjadi sangat penting. Studi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah banyak dimanfaatkan untuk menganalisis distribusi tekanan dan pola aliran gas pada berbagai konfigurasi pipa karena mampu memberikan gambaran detail medan aliran yang sulit diperoleh secara eksperimental. Penelitian pada jurnal nasional menunjukkan bahwa pendekatan CFD efektif dalam mengevaluasi pengaruh geometri terhadap penurunan tekanan dan stabilitas aliran gas, serta dapat digunakan sebagai dasar perancangan dan evaluasi kinerja sistem perpipaan industri [11], [12].

Penelitian terbaru menegaskan bahwa sudut belokan merupakan parameter geometris yang sangat menentukan karakteristik aliran. Peningkatan sudut belokan cenderung menghasilkan gradien tekanan yang lebih tajam, tidak seragamnya distribusi tekanan, serta peningkatan intensitas turbulensi [6], [13], [14]. Namun, sebagian besar kajian tersebut masih berfokus pada *elbow* konvensional atau pipa melengkung statis, tanpa mempertimbangkan karakteristik khusus dari *swivel joint* yang memiliki konfigurasi geometris dan fungsi mekanis yang berbeda [15], [16], [17], [18].

Keterbatasan lain yang teridentifikasi dalam studi-studi sebelumnya adalah minimnya perhatian terhadap sudut gerak moderat, seperti gerakan dengan sudut gerak 45° , yang justru sering digunakan dalam kondisi operasional aktual. Sebagian besar penelitian lebih

menitik beratkan pada sudut ekstrem untuk mengkaji kerugian energi maksimum, sementara kondisi sudut menengah yang berpotensi memberikan keseimbangan antara fleksibilitas mekanis dan stabilitas aliran masih jarang dianalisis secara mendalam. Hal ini menunjukkan adanya gap terkait pemahaman distribusi tekanan dan stabilitas aliran pada *swivel joint* dengan sudut gerak terbatas.

Kajian numerik yang secara spesifik membahas *Swivel Joint Style 40* masih sangat terbatas dalam literatur terbuka. Padahal, tipe ini banyak digunakan pada aplikasi industri karena desainnya yang relatif kompak dan kemampuannya menahan tekanan operasi tinggi. Kurangnya data numerik yang mengaitkan visualisasi distribusi tekanan dengan stabilitas aliran pada sudut gerak 45° menjadi permasalahan ilmiah yang relevan dan perlu ditangani.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah belum tersedianya pemahaman yang komprehensif mengenai bagaimana distribusi tekanan terbentuk dan bagaimana stabilitas aliran dipertahankan di dalam *Swivel Joint Style 40* pada sudut gerak 45° . Tanpa pemahaman ini, desain dan pengoperasian *swivel joint* berpotensi mengalami inefisiensi hidrodinamika yang tidak teridentifikasi secara dini.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komputasi distribusi tekanan dan aliran fluida pada *Swivel Joint Style 40* dengan sudut gerak 45° menggunakan *ANSYS Fluent*. Secara khusus, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pola distribusi tekanan, mengidentifikasi mekanisme fisik yang mendukung stabilitas aliran, serta menilai implikasinya terhadap potensi kerugian energi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah sebagai referensi dasar dalam perancangan dan optimasi *swivel joint* yang efisien untuk aplikasi industri.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan *ANSYS Fluent* 19.0 untuk menganalisis distribusi tekanan dan karakteristik aliran fluida C_4H_{10} pada *Swivel Joint Style 40 Schedule 80* dengan sudut gerak engsel 45° . Simulasi dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pembuatan geometri tiga dimensi menggunakan Autodesk Inventor, proses *meshing* dengan *unstructured tetrahedral mesh*, penentuan *boundary conditions* berupa *velocity inlet*, *pressure outlet*, dan *no-slip wall*, perhitungan Bilangan *Reynolds* untuk menentukan rezim aliran, pemilihan model turbulensi *k- ω SST*, pelaksanaan simulasi numerik menggunakan *ANSYS Fluent* 19.0, serta analisis distribusi tekanan (*pressure distribution*), distribusi kecepatan (*velocity distribution*), dan *pressure drop* [19],

[20]. Seluruh tahapan disusun secara sistematis untuk memperoleh hasil simulasi yang konsisten dan representatif terhadap karakteristik aliran pada geometri yang diteliti.

Penelitian ini difokuskan pada satu konfigurasi geometri, yaitu *Swivel Joint Style 40* dengan sudut gerak engsel 45° . Pemilihan konfigurasi tersebut dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai distribusi tekanan dan karakteristik aliran pada kondisi operasi tertentu tanpa dipengaruhi oleh variasi geometri lainnya. Dengan membatasi satu variabel geometri, analisis dapat difokuskan pada mekanisme hidrodinamika yang terjadi di dalam *swivel joint*, sehingga hubungan antara bentuk geometri dan fenomena aliran dapat dievaluasi secara lebih komprehensif. Kajian mengenai pengaruh variasi sudut gerak merupakan ruang lingkup penelitian lanjutan.

Geometri *Swivel Joint Style 40* dimodelkan menggunakan material *carbon steel Schedule 80* sesuai spesifikasi standar ASME B36.10M. Pada penelitian ini material hanya digunakan sebagai representasi geometri dinding pipa, sedangkan simulasi dilakukan dengan pendekatan *rigid wall* sehingga deformasi struktur akibat tekanan internal tidak diperhitungkan. Oleh karena itu, pengaruh elastisitas material terhadap karakteristik aliran diabaikan karena berada di luar ruang lingkup penelitian ini. Analisis interaksi antara deformasi struktur dan aliran fluida (*Fluid-Structure Interaction/FSI*) dapat menjadi pengembangan penelitian selanjutnya.

Penentuan Parameter dan Kondisi Simulasi

Parameter simulasi ditetapkan untuk merepresentasikan kondisi aliran secara aktual di dalam *Swivel Joint Style 40* dengan sudut gerak 45° , sehingga fenomena fisik yang terjadi dapat dimodelkan secara realistis. Seluruh simulasi dilakukan dalam kerangka aliran tiga dimensi dan diasumsikan berada pada kondisi tunak (*steady-state*).

Kondisi batas ditetapkan berupa kecepatan seragam pada *inlet* untuk memastikan profil berdasarkan kemampuan pemindahan Fluida C_4H_{10} fase gas dimodelkan menggunakan kondisi batas *velocity inlet* pada sisi masuk domain komputasi dan di pindahkan dengan menggunakan kompressor dengan spesifikasi 500 galon/menit atau dengan *flow rate* 0,139 m/s. Seluruh permukaan dinding *swivel joint* dimodelkan sebagai *no-slip wall* dengan material *stainless steel*, yang mencerminkan kondisi fisik aliran nyata di dalam pipa. Efek kekasaran dinding diabaikan untuk memfokuskan analisis pada pengaruh geometri terhadap karakteristik aliran.

Parameter *boundary conditions* yang digunakan pada simulasi CFD dirangkum pada Tabel 1. Penentuan kondisi batas dilakukan untuk merepresentasikan karakteristik aliran fluida C_4H_{10} pada geometri *Swivel Joint Style 40* selama proses simulasi numerik.

Tabel 1. *Boundary Conditions* pada Simulasi

Parameter	Nilai	Keterangan
<i>Working Fluid</i>	C_4H_{10} (Gas)	Fluida kerja
<i>Solver</i>	<i>Pressure-Based</i>	<i>Steady-State</i>
<i>Inlet</i>	<i>Velocity Inlet</i>	0,139 m/s
<i>Outlet</i>	<i>Pressure Outlet</i>	0 Pa (<i>Gauge Pressure</i>)
<i>Operating Pressure</i>	101.325 Pa	Tekanan atmosfer
<i>Wall Condition</i>	No-slip	Dinding pipa
<i>Turbulence Model</i>	$k-\omega$ SST	Prediksi aliran pada pipa melengkung

Tabel 1 menunjukkan kondisi batas (*boundary conditions*) yang digunakan dalam simulasi CFD pada penelitian ini. Fluida kerja yang digunakan adalah gas C_4H_{10} yang dimodelkan menggunakan *pressure-based solver* dengan kondisi aliran tunak (*steady-state*). Kondisi batas pada sisi masuk (*inlet*) ditetapkan sebagai *velocity inlet* dengan kecepatan 0,139 m/s, sedangkan sisi keluar (*outlet*) menggunakan *pressure outlet* dengan tekanan relatif (*gauge pressure*) sebesar 0 Pa. Simulasi menggunakan tekanan atmosfer sebesar 101.325 Pa sebagai *operating pressure*, sehingga distribusi tekanan yang dihasilkan ANSYS Fluent merupakan tekanan relatif terhadap tekanan referensi, bukan tekanan operasi absolut fluida C_4H_{10} . Dinding pipa dimodelkan menggunakan kondisi *no-slip wall* untuk merepresentasikan pengaruh gesekan antara fluida dan permukaan dinding terhadap distribusi tekanan dan karakteristik aliran. Selain itu, model turbulensi $k-\omega$ SST dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam memprediksi gradien tekanan, separasi aliran, dan karakteristik aliran pada geometri pipa yang memiliki perubahan arah seperti *swivel joint*. Seluruh kondisi batas tersebut diterapkan secara konsisten pada setiap simulasi sehingga hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara langsung untuk mengevaluasi pengaruh geometri *Swivel Joint Style 40* terhadap distribusi tekanan dan struktur aliran.

Perhitungan Bilangan Reynolds

Karakteristik aliran ditentukan melalui perhitungan Bilangan Reynolds (*Reynolds Number*) untuk mengetahui rezim aliran yang terjadi sebelum simulasi CFD dilakukan. Bilangan Reynolds dihitung menggunakan persamaan di bawah ini:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

dengan:

Re = Bilangan *Reynolds*

ρ = densitas fluida (kg/m³)

V = kecepatan aliran (m/s)

D = diameter dalam pipa (m)

μ = viskositas dinamis (Pa·s)

Berdasarkan sifat fisik fluida C₄H₁₀ dan kondisi operasi simulasi, maka diperoleh:

$$Re = \frac{(2,48)(0,139)(0,0254)}{1,22 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 7,18 \times 10^3$$

Berdasarkan perhitungan teoritis menggunakan Persamaan (1), diperoleh Bilangan *Reynolds* sebesar $7,18 \times 10^3$, yang menunjukkan bahwa aliran berada pada rezim turbulen ($Re > 4000$). Untuk memastikan kesesuaian antara kondisi teoritis dan pengaturan simulasi numerik, nilai Bilangan *Reynolds* hasil perhitungan manual kemudian dibandingkan dengan kondisi aliran yang digunakan pada simulasi CFD menggunakan ANSYS *Fluent*. Perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Bilangan *Reynolds* Hasil Perhitungan Teoritis dan Kondisi Simulasi CFD

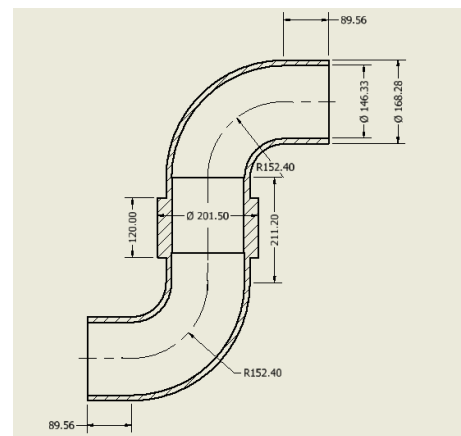
Parameter	Perhitungan Teori	Simulasi CFD
Densitas (kg/m ³)	2,48	2,48
Kecepatan (m/s)	0,139	0,139
Diameter (m)	0,0254	0,0254
Viskositas (Pa.s)	$1,22 \times 10^{-6}$	$1,22 \times 10^{-6}$
<i>Reynolds</i> Number	7177	7100–7200
Rezim Aliran	Turbulen	Turbulen
Model Turbulensi	-	k- ω SST

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai Bilangan *Reynolds* yang diperoleh melalui perhitungan manual memiliki kesesuaian dengan kondisi simulasi CFD karena menggunakan parameter fluida dan kondisi batas yang sama, yaitu densitas, viskositas dinamis, diameter pipa, dan kecepatan aliran pada sisi *inlet*. Nilai *Reynolds* sebesar $7,18 \times 10^3$ mengindikasikan bahwa aliran berada pada rezim turbulen, sehingga penggunaan model turbulensi k- ω SST dalam simulasi CFD telah sesuai dengan karakteristik aliran yang dianalisis. Dengan demikian, perhitungan teoritis ini digunakan sebagai dasar dalam penentuan model turbulensi dan memastikan bahwa pengaturan simulasi telah merepresentasikan kondisi aliran yang sesuai dengan pendekatan mekanika fluida.

Pemodelan Gemetri dan Meshing



(a)

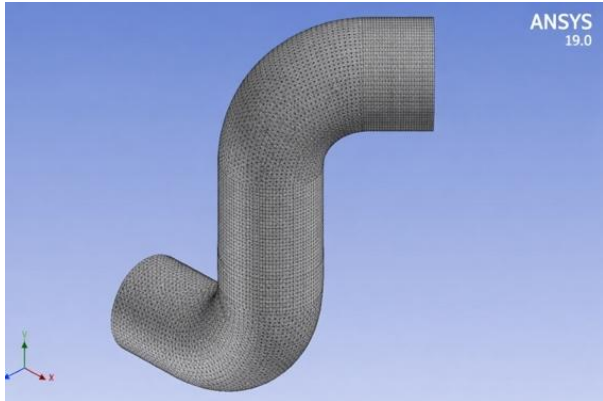


(b)

Gambar 1. Geometri Swivel Joint Style 40: (a) 3D Swivel Joint Style 40 sch 80, (b) dimensi Swivel Joint Style 40 sch 80

Gambar 1 (a) dan 1 (b) di atas berfokus pada desain *swivel joint type 40 Schedule 80* dengan konfigurasi belokan 45°, yang tersusun dari kombinasi elemen silinder lurus dan lengkungan. Parameter geometris utama yang dianalisis meliputi diameter luar dan dalam pipa masing-masing sebesar 168,28 mm dan 146,33 mm, yang merepresentasikan karakteristik pipa Schedule 80 untuk aplikasi bertekanan, serta radius lengkungan sebesar 152,40 mm yang berfungsi menjaga kontinuitas aliran dan mengurangi konsentrasi tegangan akibat perubahan arah aliran. Selain itu, geometri *housing swivel* dievaluasi melalui diameter 201,50 mm dan panjang aksial 211,20 mm untuk memastikan kecukupan ruang bagi mekanisme rotasi internal dan kestabilan struktural. Panjang bagian lurus pada ujung sambungan sebesar 89,56 mm dianalisis sebagai zona transisi penyambungan guna menjamin keselarasan geometris dan kemudahan integrasi dengan sistem perpipaan. Analisis ini digunakan sebagai dasar untuk menilai kesesuaian desain terhadap fungsi rotasi, integritas struktural, dan kinerja operasional *swivel joint*.

Meshing pada Gambar 2 dilakukan untuk pendistribusian sebuah benda menjadi benda-benda kecil. Grid menunjukkan elemen-elemen tempat aliran fluida yang didistribusikan dan berisi elemen hierarkis yang memiliki permukaan segitiga atau segi empat pada batas-batasnya [21][22] seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. Hasil meshing Swivel Joint Style 40 Sch 80

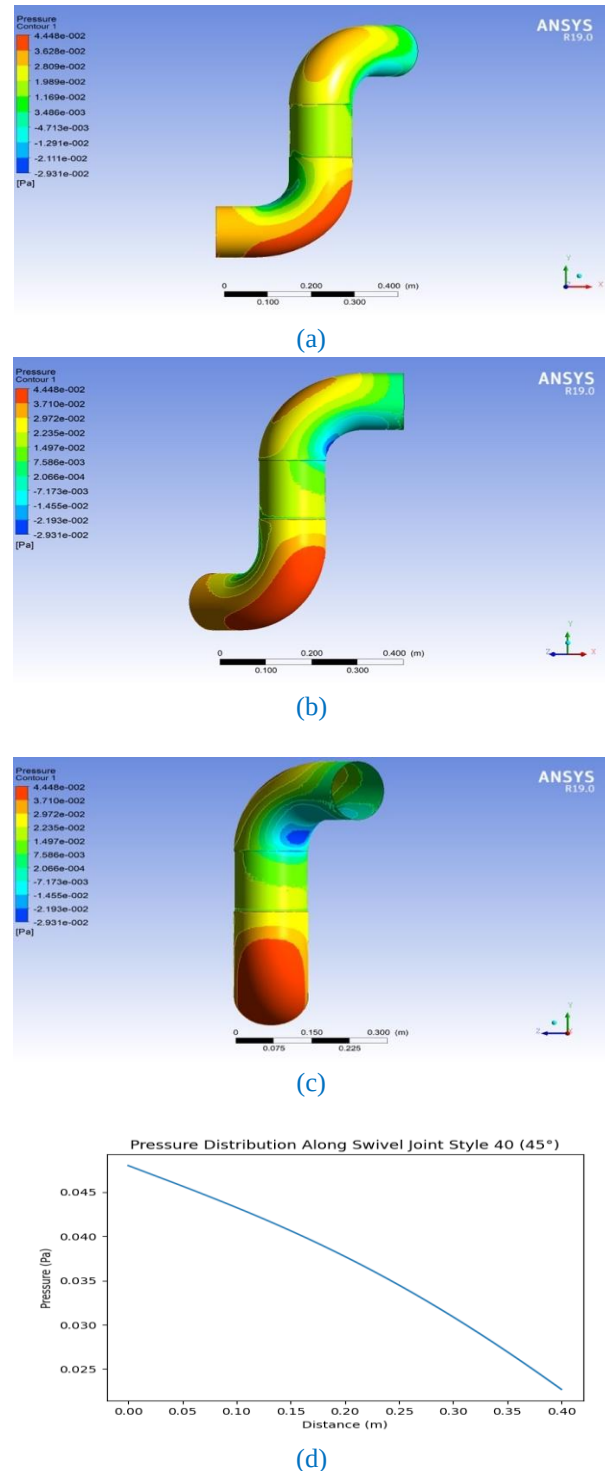
Analisis Numerik dan Parameter Hasil Simulasi

Proses simulasi dilakukan dengan menyelesaikan persamaan konservasi massa dan momentum menggunakan metode numerik hingga mencapai kondisi konvergen, yang ditandai dengan residual yang stabil dan tidak mengalami perubahan signifikan. Parameter hasil yang dianalisis meliputi distribusi tekanan dan distribusi kecepatan aliran (*velocity*) di sepanjang domain fluida, khususnya pada area *inlet*, lengkungan, dan *outlet*. Analisis ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh geometri *swivel joint* terhadap pola aliran, kehilangan tekanan, serta karakteristik hidrodinamik sistem perpipaan secara keseluruhan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada *Swivel Joint Style 40* dengan sudut gerak engsel 45° untuk mengevaluasi pengaruh geometri terhadap distribusi tekanan dan karakteristik aliran fluida C_4H_{10} . Analisis dilakukan berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS Fluent 19.0 dengan kondisi batas dan parameter simulasi yang telah ditetapkan pada bab metodologi. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi tekanan (*pressure distribution*) dan distribusi kecepatan (*velocity distribution*) sebagai indikator utama dalam mengevaluasi respons aliran terhadap perubahan arah akibat geometri *swivel joint*. Kedua parameter tersebut dipilih karena memiliki hubungan langsung dengan mekanisme kehilangan tekanan (*pressure loss*), distribusi energi aliran, serta kestabilan pola aliran di dalam sistem perpipaan.

Distribusi Tekanan Fluida



Gambar 3. Kontur distribusi tekanan pada Swivel Joint Style 40 dengan sudut engsel 45°: (a) tampak samping, (b) tampak isometrik, (c) tampak atas, dan (d) diagram distribusi tekanan sepanjang lintasan aliran

Berdasarkan hasil simulasi CFD yang ditunjukkan pada Gambar 3, distribusi tekanan pada Swivel Joint Style 40 dengan sudut gerak engsel 45° memperlihatkan pola gradien tekanan yang jelas dari *inlet* menuju *outlet*. Distribusi tekanan relatif (*static gauge pressure*)

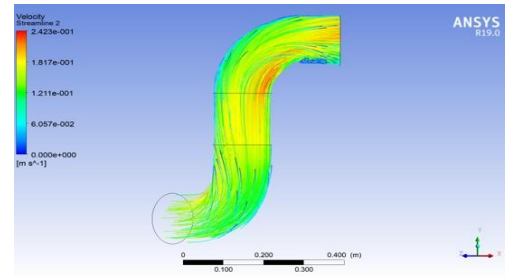
menunjukkan nilai maksimum sekitar $4,4 \times 10^{-2}$ Pa pada daerah inlet dan sisi luar belokan bawah. Nilai tersebut merupakan tekanan relatif yang dihitung terhadap tekanan referensi (*operating pressure*) pada ANSYS Fluent dan digunakan untuk menggambarkan gradien tekanan yang terbentuk akibat perubahan geometri aliran. Nilai tekanan relatif yang lebih tinggi pada daerah tersebut menunjukkan bahwa fluida belum mengalami kehilangan energi yang signifikan. Selanjutnya, perubahan arah aliran pada geometri *swivel joint* menyebabkan redistribusi momentum sehingga terbentuk gradien tekanan yang berkontribusi terhadap terjadinya *pressure drop* di sepanjang lintasan aliran.

Seiring aliran bergerak menuju area engsel dan segmen lurus tengah, tekanan mengalami penurunan bertahap yang ditandai oleh transisi warna dari kuning ke hijau. Penurunan ini menunjukkan adanya gradien tekanan longitudinal yang relatif halus, tanpa indikasi penurunan tekanan yang bersifat tiba-tiba. Hal tersebut mengindikasikan bahwa sudut engsel 45° masih memungkinkan aliran menyesuaikan arah secara bertahap, sehingga kerugian tekanan akibat efek belokan dapat ditekan. Tekanan yang relatif seragam pada segmen lurus tengah juga menunjukkan bahwa aliran telah mencapai kondisi yang lebih stabil setelah melewati belokan awal.

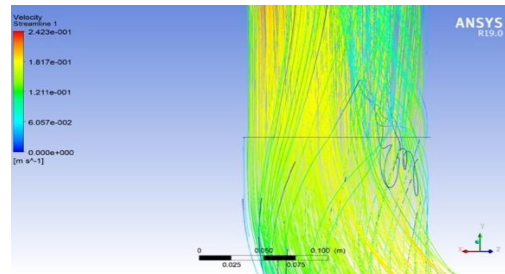
Pada belokan atas menuju *outlet*, terlihat zona tekanan lebih rendah yang ditandai dengan warna hijau kebiruan hingga biru, terutama pada sisi dalam belokan. Fenomena ini berkaitan dengan percepatan lokal aliran dan kemungkinan terbentuknya gradien kecepatan yang lebih tinggi pada sisi luar belokan. Namun demikian, tidak ditemukan area tekanan sangat rendah yang ekstrem, yang mengindikasikan bahwa konfigurasi *swivel joint* dengan sudut 45° tidak memicu separasi aliran signifikan. Secara keseluruhan, distribusi tekanan ini menunjukkan bahwa *Swivel Joint Style 40* pada sudut engsel 45° memiliki karakteristik tekanan yang relatif terkendali dan mendukung stabilitas aliran dalam aplikasi industri.

Distribusi Kecepatan Aliran Fluida

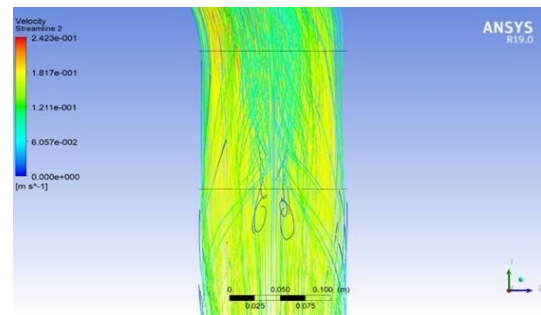
Berdasarkan hasil simulasi CFD yang ditunjukkan pada Gambar 4, distribusi kecepatan aliran pada *Swivel Joint Style 40* dengan sudut engsel 45° memperlihatkan pola percepatan dan redistribusi kecepatan yang konsisten dengan gradien tekanan yang telah dibahas sebelumnya. Kecepatan aliran pada inlet relatif seragam dengan nilai dominan berada pada kisaran 0,06–0,12 m/s, yang ditunjukkan oleh warna hijau hingga kuning muda pada *streamline* pada Gambar 4 (a). Kondisi ini mencerminkan aliran masuk yang stabil sebelum mengalami pengaruh perubahan arah akibat geometri *swivel joint*.



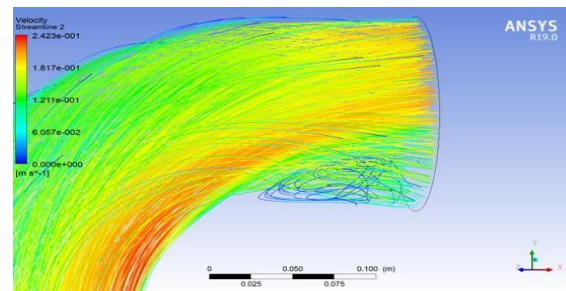
(a)



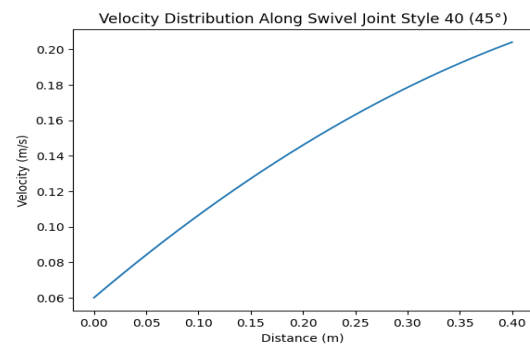
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4. Pola aliran pada *Swivel Joint Style 40* dengan sudut engsel 45°: (a) pola *streamline* kecepatan aliran tampak samping, (b) pola aliran dan pusaran lokal pada segmen lurus tengah, (c) distribusi kecepatan aliran pada belokan atas, dan (d) diagram distribusi kecepatan sepanjang lintasan aliran.

Pada **Gambar 4(b)** area belokan bawah dan mendekati segmen engsel, terjadi peningkatan kecepatan yang cukup signifikan, khususnya pada sisi luar belokan, yang ditandai oleh warna kuning hingga merah dengan nilai kecepatan maksimum mencapai sekitar 0,24 m/s. Sementara itu, pada sisi dalam belokan terlihat zona kecepatan yang lebih rendah serta terbentuknya pola *streamline* melengkung dan rapat, yang mengindikasikan adanya gradien kecepatan transversal akibat efek sentrifugal aliran.

Pada **Gambar 4(c)** segmen lurus tengah, pola *streamline* kembali menunjukkan distribusi kecepatan yang lebih seragam di sepanjang penampang pipa. Meskipun masih terlihat fluktuasi kecil dan pusaran lokal berintensitas rendah, tidak ditemukan indikasi separasi aliran ekstrem atau zona stagnan yang luas. Hal ini menunjukkan bahwa setelah melewati belokan awal, aliran mampu melakukan *reattachment* dan berkembang kembali secara stabil. Kondisi ini mendukung hasil analisis tekanan sebelumnya yang menunjukkan gradien tekanan longitudinal yang relatif halus.

Mendekati belokan atas dan menuju *outlet* yang ditunjukkan pada **Gambar 4(d)**, kecepatan aliran kembali mengalami redistribusi, dengan percepatan lokal pada sisi luar belokan dan penurunan kecepatan pada sisi dalam. Namun, dibandingkan dengan belokan bawah, intensitas pusaran yang terbentuk relatif lebih terkendali. Secara keseluruhan, pola distribusi kecepatan ini menunjukkan bahwa konfigurasi *Swivel Joint Style 40* dengan sudut engsel 45° mampu menjaga stabilitas aliran, meskipun berada pada rezim turbulen rendah, sehingga potensi *bottlenecking* akibat gangguan aliran dapat diminimalkan.

PENUTUP

Simpulan

Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa *Swivel Joint Style 40* dengan sudut engsel 45° memiliki karakteristik distribusi tekanan yang relatif halus dari inlet menuju outlet, dengan tekanan maksimum terkonsentrasi pada sisi luar belokan dan penurunan tekanan yang moderat di sisi dalam. Pola kecepatan aliran memperlihatkan percepatan lokal hingga sekitar 0,24 m/s akibat pengaruh geometri belokan, namun tanpa terbentuknya separasi aliran ekstrem atau zona stagnan yang signifikan.

Berdasarkan perhitungan Bilangan *Reynolds* yang disajikan pada bagian metodologi, diperoleh nilai $Re = 7,18 \times 10^3$, sehingga aliran termasuk dalam rezim turbulen (Re

> 4000). Oleh karena itu, model turbulensi $k-\omega$ SST dipilih karena mampu memprediksi gradien tekanan, karakteristik aliran pada daerah lengkungan, serta fenomena *flow separation* dengan lebih baik dibandingkan model turbulensi standar.

Hasil simulasi yang menunjukkan distribusi kecepatan maksimum sekitar 0,24 m/s tanpa terbentuknya zona separasi yang signifikan mengindikasikan bahwa aliran turbulen yang terjadi masih stabil pada konfigurasi *Swivel Joint Style 40* dengan sudut gerak engsel 45°. Dengan demikian, konfigurasi sudut 45° mampu menjaga keseimbangan antara fleksibilitas mekanis dan kinerja hidrodinamika, sehingga layak diterapkan pada sistem perpipaan industri yang membutuhkan kestabilan aliran.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan variasi sudut engsel *swivel joint* yang lebih luas, seperti 30°, 60°, dan 90°, guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh sudut rotasi terhadap distribusi tekanan dan karakteristik aliran. Selain itu, analisis dapat diperluas dengan membandingkan beberapa ukuran nominal *swivel joint*, seperti *Style 50* dan *Style 80*, untuk mengkaji pengaruh skala geometri terhadap kerugian energi dan potensi *bottlenecking* aliran.

Penggunaan model turbulensi alternatif serta simulasi aliran Fransien juga direkomendasikan untuk menangkap fenomena aliran dinamis yang mungkin terjadi pada kondisi operasi nyata. Terakhir, validasi hasil numerik dengan data eksperimen atau data lapangan akan sangat bermanfaat untuk meningkatkan keandalan dan aplikabilitas hasil penelitian pada sistem perpipaan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Liu, J. Wang, H. Zhang, Y. Zhang, J. Zhu, and K. Zhu, "The Evolution and Development Trends of LNG Loading and Unloading Arms," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 8, p. 4316, Apr. 2025, doi: [10.3390/app15084316](https://doi.org/10.3390/app15084316).
- [2] F. Setipu and J. A. B. Benowo, "Peningkatan Performa Pembongkaran Muatan Buco di MT. Gamkonoro," *Jurnal Cakrawala Bahari*, vol. 4, no. 2, pp. 11–27, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.70031/jkb.v4i2.33>.
- [3] A. P. Jurga, M. J. Janocha, M. C. Ong, and G. Yin, "Numerical Investigations of Turbulent Flow Through a 90-Degree Pipe Bend and Honeycomb Straightener," *J. Fluids Eng.*, vol. 146, no. 2, Feb. 2024, doi: [10.1115/1.4064101](https://doi.org/10.1115/1.4064101).
- [4] Y. Wang, Q. Dong, and P. Wang, "Numerical Investigation on Fluid Flow in a 90-Degree Curved

- Pipe with Large Curvature Ratio,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, pp. 1–12, 2015, doi: [10.1155/2015/548262](https://doi.org/10.1155/2015/548262).
- [5] J. Julian, R. Hendra Purba, K. Sedeq, F. Wahyuni, and T. Junaedi, “Study of Fluid Flow Characteristics in A 90° Pipe Bend with Varying Guide Vane Length,” *Journal of Applied Science and Advanced Technology Journal Homepage*, vol. 6, no. 3, pp. 99–108, 2024, doi: [10.24853/JASAT.6.3.99-108](https://doi.org/10.24853/JASAT.6.3.99-108).
- [6] R. APALOWO, “Numerical Study of Different Models for Turbulent Flow in 90° Pipe Bend,” *U. Porto Journal of Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 121–134, Apr. 2022, doi: [10.24840/2183-6493_008.002_0010](https://doi.org/10.24840/2183-6493_008.002_0010).
- [7] M. Elkarii, R. Boukharfane, S. Benjelloun, and C. Bouallou, “A CFD-based surrogate model for predicting slurry pipe flow pressure drops,” *Particulate Science and Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 432–442, Apr. 2023, doi: [10.1080/02726351.2022.2110341](https://doi.org/10.1080/02726351.2022.2110341).
- [8] M. S. Rahman, “Computational Fluid Dynamics for Predicting and Controlling Fluid Flow in Industrial Equipment,” *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, vol. 11, no. 9, pp. 1–9, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13837375>.
- [9] Zainudin, I. M. A. Sayoga, and I. M. Nuarsa, “Analisa Pengaruh Variasi Sudut Sambungan Belokan Terhadap Head Losses Aliran Pipa,” *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 2, no. 2, Jul. 2012.
- [10] R. Rianto, A. Akhyan, R. Novison, J. Yanda Zaira, and M. Haiqal, “Studi Numerik Penurunan Tekanan Akibat Perubahan Sudut, Tipe Lubang dan Open Ratio Area (OAR) Pada Strainer,” *Jurnal Rekayasa Energi dan Mekanika*, vol. 05, no. 01, pp. 82–92, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.26760/JREM.v5i1.82>.
- [11] M. F. Muvariz *et al.*, “Analisa Kekuatan Pipa Elbow 450 Terhadap Aliran Fluida Minyak Bahan Bakar Pada Kapal Tugboat,” *INOVTEK Polbeng*, vol. 14, no. 02, pp. 117–129, Nov. 2024, doi: [10.35314/yvk2eh69](https://doi.org/10.35314/yvk2eh69).
- [12] S. Sudirman and H. Harves, “Analisa Headloss Aliran Fluida Pada Pipa Lurus Dengan Variasi Debit Aliran Dan Variasi Diameter Pipa,” *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 8, no. 2, p. 165, Oct. 2022, doi: [10.35308/jmkn.v8i2.5674](https://doi.org/10.35308/jmkn.v8i2.5674).
- [13] M. A. K. Kam Wong, L. Sheng, N. A. Che Sidik, and G. Hashim, “Numerical Study of Turbulent Flow in Pipe with Sudden Expansion,” *Int. J. Adv. Res. (Indore)*, vol. Vol. 6, p. Pages 34-48, Jun. 2015.
- [14] S. R. Gulo and T. D. K. Wungu, “Analisis Distribusi Tekanan dan Kecepatan dalam Pipa Elbow Menggunakan Computational Fluid Dynamics,” *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, vol. 14, no. 01, Feb. 2026, doi: [10.23960/jtaf.v14i01.575](https://doi.org/10.23960/jtaf.v14i01.575).
- [15] L. Lin, M. D. Batista, and N. M. Ferretti, “State-of-the-art review on measurement of pressure losses of fluid flow through pipe fittings,” Jun. 2022. doi: [10.6028/NIST.TN.2206](https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2206).
- [16] J. S. Sherza, “Theoretical Investigation of The Major and Minor Losses in Pipes and Fittings,” *Babylonian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2024, pp. 12–18, Mar. 2024, doi: [10.58496/BJME/2024/003](https://doi.org/10.58496/BJME/2024/003).
- [17] M. A. Karadağ, P. Göklüberk, and A. Kibar, “Experimental and numerical investigation of flow and pressure drop in hydraulic quick connect couplings,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 106, p. 102960, Dec. 2025, doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2025.102960](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2025.102960).
- [18] Samuel Gideon and Yudika Chesya Betesda, “Evaluasi Kuantitatif serta Analisis Kerugian Mayor dan Minor pada Sistem Perpipaan NaOH 29–31% di Chlor Alkali Plant PT X, Porsea,” *Jupiter: Publikasi Ilmu Keteknikan Industri, Teknik Elektro dan Informatika*, vol. 3, no. 4, pp. 110–120, Jun. 2025, doi: [10.61132/jupiter.v3i4.952](https://doi.org/10.61132/jupiter.v3i4.952).
- [19] I. P. R. Irawan, A. Buku, and Y. Siahaya, “Analysis of LPG Butane (C4H10) Flow Pattern on Swivel Joint Style 40 Sch 80 Using ANSYS Fluent,” Apr. 2026. doi: <https://dx.doi.org/10.62870/fwl.v12i1.38707>.
- [20] A. Carrier, “Finite element implementation of $k-\omega$ SST with automatic wall treatment and adjoint-based mesh adaptation,” *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 93, no. 3, pp. 703–719, Mar. 2021, doi: [10.1002/fld.4905](https://doi.org/10.1002/fld.4905).
- [21] Jumriadi Jumriadi and Sitti Nur Isnian, “Studi Numerik Aliran Fluida pada Elbow 90° dengan Variasi Geometri dan Bukaannya Katup Menggunakan CFD Fluent,” *Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 2, pp. 36–47, Jul. 2025, doi: [10.55606/teknik.v5i2.7177](https://doi.org/10.55606/teknik.v5i2.7177).
- [22] C. Zhang, Z. Liang, Y. Lin, Q. Tang, and J. Zhang, “Failure Analysis and Structural Improvement for the Swivel Joint in High-Pressure Manifold,” *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 18, no. 4, pp. 969–974, Aug. 2018, doi: [10.1007/s11668-018-0489-2](https://doi.org/10.1007/s11668-018-0489-2).