



Studi Numerik Aliran Fluida pada Elbow 90° dengan Variasi Geometri dan Bukaannya Katup Menggunakan CFD Fluent

Jumriadi

Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Sam Ratulangi, Manado

Sitti Nur Isnian

Jurusan Penyuluhan Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo, Kendari

Alamat: Universitas Sam Ratulangi Manado

Korespondensi penulis: Jumriadi. jumriadi@unsrat.ac.id

Abstract. Piping systems are critical components across various industrial sectors, including agriculture. The 90° elbow plays a key role in directing fluid flow; however, abrupt changes in flow direction within the elbow often lead to pressure losses and vortex formation, particularly in configurations with small curvature radii. This study aims to analyze the fluid flow characteristics within a 90° elbow under different curvature radii (extreme, R30 mm, and R50 mm) and various valve opening conditions, using numerical simulation based on Computational Fluid Dynamics (CFD) in ANSYS Fluent 2019 R3. The simulation results show that increasing the curvature radius leads to a more uniform pressure distribution along the bend and a reduction in vortex formation. Although larger valve openings increase flow velocity and Reynolds number, the pressure and velocity contours do not exhibit significant changes in flow patterns. This study confirms that elbow geometry design greatly influences the hydrodynamic efficiency of piping systems and can help minimize the risk of damage due to uneven pressure distribution

Keywords: CFD, 90° elbow, pressure distribution, curvature radius, ANSYS Fluent.

Abstrak. Sistem perpipaan merupakan komponen krusial dalam berbagai sektor industri termasuk pertanian. Elbow 90° memainkan peran penting dalam mengarahkan aliran fluida. Namun, perubahan arah aliran secara tiba-tiba dalam elbow sering menimbulkan kerugian tekanan dan formasi pusaran (vortex), khususnya pada radius kecil. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik aliran fluida dalam elbow 90° dengan variasi radius kelengkungan (ekstrem, R30 mm, dan R50 mm) serta kondisi bukaannya katup yang berbeda, menggunakan metode simulasi numerik berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD) pada ANSYS Fluent 2019 R3. Visualisasi hasil menunjukkan bahwa semakin besar radius kelengkungan, distribusi tekanan sepanjang belokan menjadi lebih merata dan pembentukan vortex berkurang. Meskipun peningkatan bukaannya katup meningkatkan kecepatan aliran dan bilangan Reynolds, kontur tekanan dan kecepatan tidak menunjukkan perubahan signifikan dalam pola aliran. Studi ini menegaskan bahwa desain geometri elbow sangat memengaruhi efisiensi hidrodinamik sistem perpipaan dan dapat meminimalkan risiko kerusakan akibat tekanan tidak merata

Kata kunci: CFD, 90° elbow, pressure distribution, curvature radius, ANSYS Fluent.

LATAR BELAKANG

Sistem perpipaan merupakan elemen vital dalam berbagai sektor industri, seperti minyak dan gas, pengolahan air, industri makanan, polimer, hingga pembangkit listrik tenaga nuklir. Diantara komponen penting dalam sistem ini adalah elbow atau pipa siku memegang peran sentral karena kemampuannya dalam mengarahkan aliran fluida sesuai kebutuhan medan dan konfigurasi sistem (Banerjee & Mazumdar, 2024); (Shi et al., 2024). Dalam praktiknya, penggunaan konfigurasi elbow dalam system perpipaan sering dijumpai pada sektor pertanian seperti pada jaringan irigasi modern maupun system pengeringan hasil panen. Efisiensi hidrodinamik pada elbow sangat berpengaruh pada sistim distribusi air dan udara panas (Salvatierra-Rojas et al., 2021). Namun, penggunaan elbow juga membawa tantangan teknis yang signifikan. Perubahan aliran secara tiba-tiba pada elbow dapat menyebabkan fluktuasi tekanan yang kompleks dan berpotensi menimbulkan kerugian energi (Lin et al., 2021). Aliran yang melewati elbow tidak bersifat linear, melainkan membentuk pola aliran sekunder akibat gaya setrifugal yang dipicu oleh kelengkungan pipa. Intensitas aliran sekunder ini dipengaruhi oleh jari-jari tikungan (R) dan bilangan Reynolds (Re), menjadikan karakteristik aliran dalam elbow sangat kompleks dan dinamis (Alabdalah & Wnos, 2020).

Kompleksitas aliran ini menjadikan elbow sebagai objek kajian yang menarik dan representative dalam studi-studi teknis, khususnya untuk perhitungan kerugian tekanan (mayor dan minor), perpindahan panas, serta analisis aliran multifasa (Smyk et al., 2024). Dalam konteks industri, elbow 90 derajat adalah jenis yang paling umum digunakan, terutama dalam system perpipaan nuklir, minyak dan gas, serta air. Fleksibilitas dan efisiensinya dalam menyambungkan komponen menjadikan elbow 90 derajat sebagai elemen krusial dalam desain system fluida industry (Abuhatira et al., 2021).

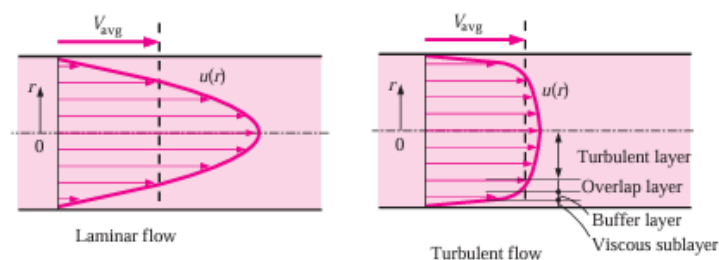
Seiring dengan kemajuan teknologi, Computational Fluid Dynamics (CFD) telah menjadi alat penting dalam menganalisis karakteristik aliran dalam elbow. CFD menawarkan pendekatan prediktif yang efisien dan ekonomis dibandingkan metode eksperimental konvensional. Melalui penyelesaian persamaan konversi massa, momentum, dan energi secara numerik, CFD memungkinkan visualisasi mendetail terhadap fenomena aliran, perpindahan panas, dan reaksi kimia dalam system pipa (Alabdalah & Wnos, 2020); (Abuhatira et al., 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi numerik menggunakan ANSYS Fluent guna menganalisis perilaku aliran fluida pada elbow 90 derajat dengan variasi radius kelengkungan. Hasil dari studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi tambahan sebagai referensi dalam desain sistem perpipaan yang efisien dan berkelanjutan dalam aplikasi teknik dan industry, termasuk irigasi dan pengeringan pertanian.

KAJIAN TEORITIS

Aliran Laminar dan Turbulen

Rezim aliran dapat berupa aliran laminar atau turbulen. Aliran laminar ditandai dengan aliran yang teratur dan lancar. Sebaliknya, aliran turbulen ditandai dengan tekanan dan kecepatan yang acak/kacau dengan perubahan yang terjadi di sepanjang aliran. Gerakan aliran ini dapat divisualisasikan dengan menyuntikkan pewarna ke dalam aliran. Pewarna yang disuntikkan ke dalam aliran laminar akan menghasilkan garis aliran linier, sedangkan aliran turbulen akan menghasilkan garis aliran yang tidak teratur. Konsep aliran laminar dan turbulen pertama kali didemonstrasikan oleh Osborne Reynolds pada tahun 1884. Selain visualisasi, rezim aliran dapat ditentukan berdasarkan kuantifikasi yang disebut dengan bilangan Reynolds (Re). Bilangan Reynolds adalah parameter tanpa dimensi yang digunakan untuk mengklasifikasikan jenis aliran yang terjadi dalam pipa. Aliran laminar berada pada range ≤ 2300 . Untuk bilangan Reynolds aliran turbulen berada pada angka ≥ 4000 . Jika bilangan Reynolds berada pada antara $2300 \leq Re \leq 4000$ disebut aliran transisi (Trivedi et al., 2023).



Gambar 1. Profil aliran laminar dan turbulen dalam pipa (Çengel & Cimbala, 2006)

Persamaan yang digunakan

Secara umum, aliran dalam tabung menggunakan tiga persamaan (Alabdalah & Wnos, 2020), yakni:

1. Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

2. Persamaan momentum

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \tau} + \frac{\partial (\bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} B_T \cdot g \cdot (T - T_\infty) + F$$

Dimana: F = centrifugal forces, dan $B_T \cdot g \cdot (T - T_\infty)$ = fluid buoyancy forces

3. Persamaan Energy

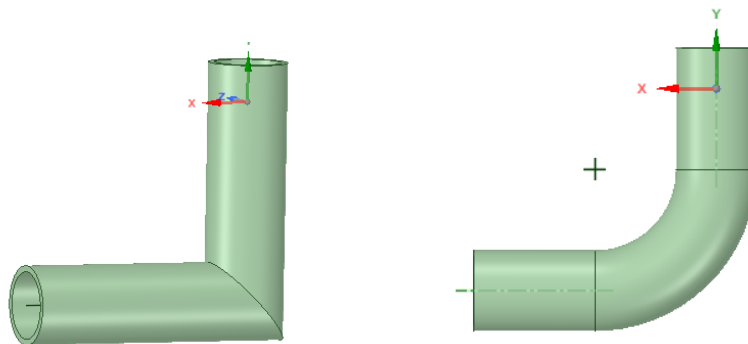
$$\frac{\delta \rho c_p T}{\delta \tau} + \frac{\delta \rho c_p U_j T}{\delta x_j} = \frac{\delta \left[k \frac{\delta T}{\delta x_j} - \delta \rho c_p \bar{u}_j T \right]}{\delta x_j} + \phi_i$$

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan satu unit computer dan program CFD Fluent (ANSYS 2019 R3) untuk melihat perilaku aliran dan distribusi tekan dalam elbow 90° dengan tiga variasi radius yang digunakan. Adapun dimensi elbow 90° diameter dalam 17 mm, diameter luar 20 mm dengan Panjang elbow 60 mm

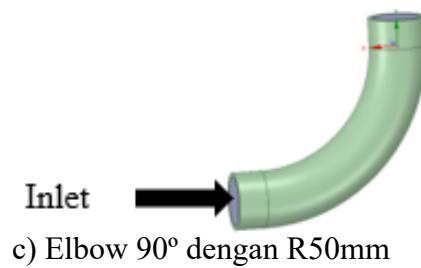
1. Pembuatan Geometri

Desain geometri elbow dilakukan menggunakan tools yang telah tersedia pada ANSYS Fluent



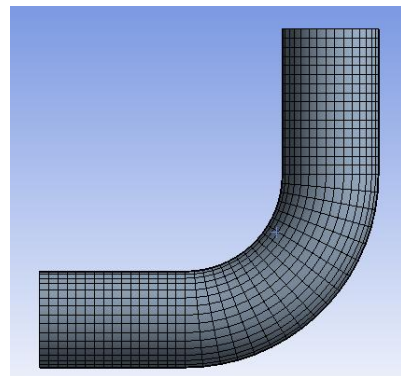
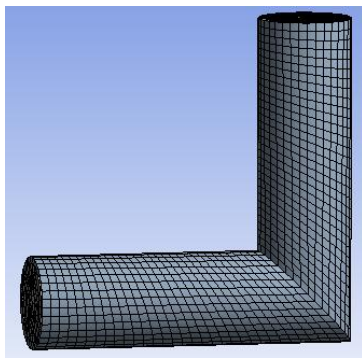
Gambar 2: a) Elbow 90° extrem

b) Elbow 90° dengan R30mm



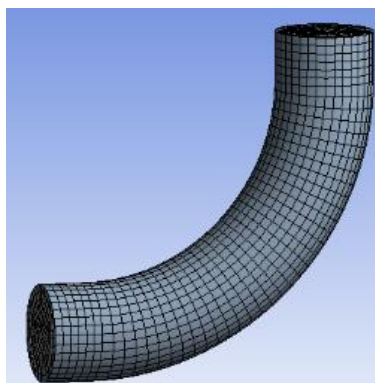
2. Mesh

Meshing adalah pendiskritan sebuah benda menjadi bagian-bagian kecil. Grid menunjukkan sel atau elemen tempat aliran tersebut mengalir. Mesh ini berisi elemen-elemen hirarkis yang memiliki permukaan segitiga dan segiempat pada batasbatasnya seperti yang terlihat pada gambar 3.



Gambar 3: a) Meshing Elbow 90° ekstreme

b) Meshing Elbow 90° R30mm



c) Meshing Elbow 90° R50mm

Prosedur penelitian

Adapun prosedur penelitian sebagai berikut:

- a. Membuat geometri *elbow* menggunakan Fluid Flow (Fluent) yang tersedia pada software ANSYS 2019 R3
 - b. Membuat/generate mesh geometri elbow yang telah didesain sebelumnya (3D)
 - c. Melakukan Setup dengan memilih material yang digunakan dan menetapkan boundary condition sesuai model yang ditetapkan
 - d. Mendefinisikan model, gunakan model standar dengan perintah *define-models-viscous*. Pada panel *viscous model* klik-*k epsilon [2 eqn]*-ok.
 - e. Menentukan sifat material yang akan dipakai (*water liquid H2O*).
 - f. Menentukan kondisi batas (*boundary layer*), *in (velocity inlet)*, *out (pressure outlet)* dan *wall (wall)*.
 - g. Mengatur parameter kontrol numerik, memasukkan data-data yang dibutuhkan (*fluida, velocity inlet, pressure outlet* dan *wall*)
 - h. Melakukan pengecekan berbagai komponen yang telah diinput dengan menjalankan run calculation
 - i. Memeriksa hasil perhitungan
- Menyimpan hasil perhitungan

HASIL DAN PEMBAHASAN

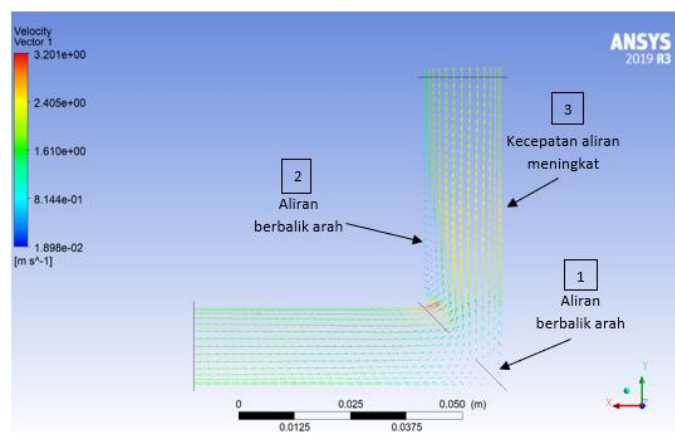
Teknik Analisa Data

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah studi numerik aliran yang melintasi *elbow* dengan berbagai jenis radius dengan menggunakan *software CFD (ANSYS Fluent 2019 R3)*. Hasil dari penelitian disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara profil kecepatan dengan jenis *elbow* 90° yang radiusnya berbeda-beda, membandingkan profil kecepatan aliran fluida pada saat melewati *elbow* 90° dengan berbagai radius dan membandingkan bagaimana profil kecepatan fluida menurun akibat kerugian tekanan setelah melewati *elbow* 90° dengan berbagai radius.

1. Elbow 90° extreme

Tabel 1. Data kecepatan pada inlet tiap bukaan katup

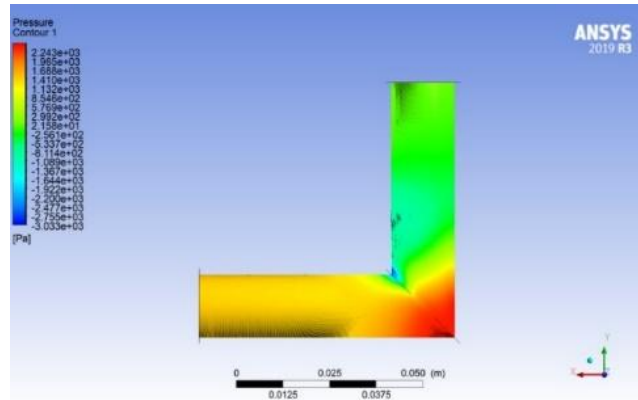
Bukaan Katup	V (m/s)	P (Pa)	Density (kg/m ³)	Viskositas Kinematik (m ² /s)
28°	1.69	1441.57	996.6	8.627E-07
45°	2.1	654.6	996.6	8.627E-07
70°	2.96	263.4	996.6	8.627E-07



Gambar 4a. Profil aliran dalam elbow 90° extreme

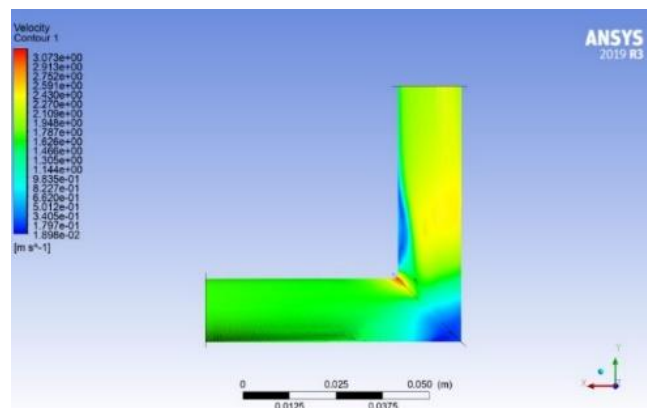
Pada penelitian ini, setiap elbow dilakukan variasi bukaan katup yang sama dan kecepatan aliran yang masuk melalui inlet pada setiap bukaan katup sebagaimana terlihat pada table 1.

Pada gambar 4a memperlihatkan arah aliran *fluida* (*stream line*). Adanya aliran yang berbalik arah pada daerah (1 dan 2) maka terjadilah pusaran air (*vortex*), hal ini disebabkan oleh kecepatan aliran yang rendah dan tidak dapat menembus kecepatan pada garis sumbu (*free stream*). Pada daerah (3) terjadi peningkatan kecepatan aliran *fluida*, ini disebabkan karena tekanan pada daerah tersebut rendah (lihat gambar 4b) sehingga kecepatan pada garis sumbu (*free stream*) meningkat setelah melalui belokan.



Gambar 4b. kontur tekanan untuk bukaan katup 28°

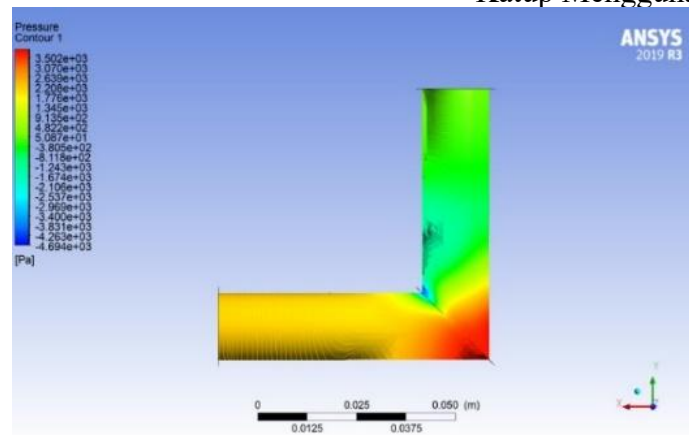
Pada gambar 4c memperlihatkan aliran memasuki pipa dengan angka *Reynolds* 33302 dimana bentuk aliran adalah turbulen berkembang penuh (*fully developed*) dengan suhu yang konstan (27 °C). Setelah melalui belokan 90° yang ekstrem terjadi aliran berbalik arah, dimana pada permukaan pipa dekat belokan terjadi penurunan tekanan. Saat melalui belokan terlihat bahwa aliran tidak berkembang penuh, tetapi kembali menjadi berkembang penuh dengan angka *Reynolds* 35848.27, ini memperjelas fenomena penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi pada belokan.



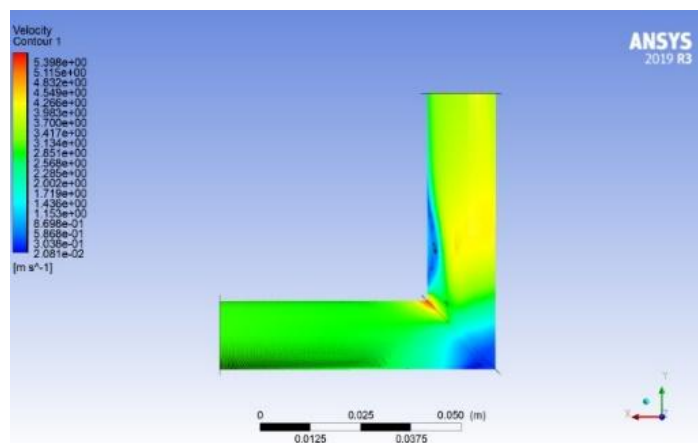
Gambar 4c. kontur kecepatan untuk bukaan katup 28°

Untuk bukaan katup 45° dan 70° kecepatan aliran yang masuk pada elbow meningkat menjadi 2.1 m/s dan 2.96 m/s dengan penurunan tekan setiap bukaan katup yakni 654.6 Pa dan 263.4 Pa. Namun, distribusi tekanan dan profil aliran yang terjadi pada elbow 90° ekstrime hampir sama dengan bukaan katup 28° sebagaimana yang terlihat pada gambar 5 dan 6. Peningkatan kecepatan akan mengakibatkan penurunan tekanan sekaligus meningkatkan bilangan *Reynolds*.

Studi Numerik Aliran Fluida pada Elbow 90° dengan Variasi Geometri dan Bukaannya Katup Menggunakan CFD Fluent



Gambar 5. Kontur tekanan untuk bukaan katup 45°

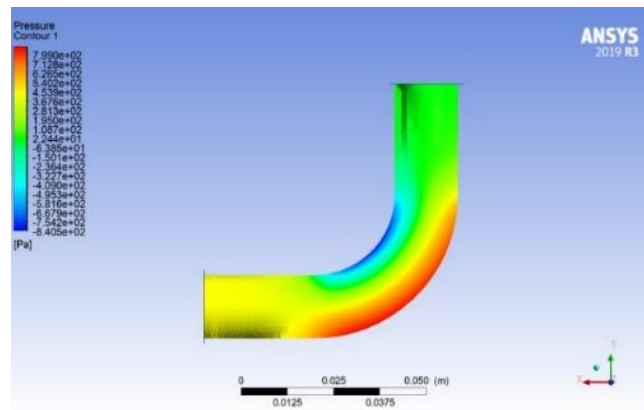


Gambar 6. kontur kecepatan untuk bukaan katup 70°

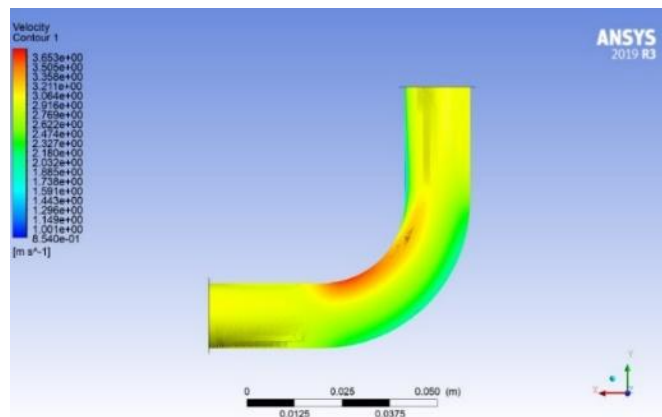
Ketika bukaan katup diperbesar menjadi 70°, mengakibatkan kecepatan aliran meningkat menjadi 2.96 m/s dengan tekanan pada inlet 263.4 Pa. Hal ini menunjukkan aliran yang masuk adalah aliran turbulen. Dari gambar nampak terlihat distribusi tekanan masih berpusat pada sudut ekstrime elbow sehingga mengakibatkan aliran berbalik arah. Kontur distribusi tekanan dan profil aliran pada elbow 90° ekstrime hampir sama dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Alabdalah & Wnos (2020)

2. Elbow 90° dengan R 30mm

Untuk elbow 90° dengan R 30mm pada semua bukaan katup memiliki visialisasi yang mirip, ketika aliran melewati belokan, tekanan pada belokan bagian luar tidak lagi terpusat pada satu bagian sebagaimana yang terjadi pada elbow 90° ekstrime, namun telah terjadi sebaran tekanan hampir sepanjang belokan seperti yang terlihat pada gambar 7.



Gambar 7 Kontur tekanan bukaan katup 28°

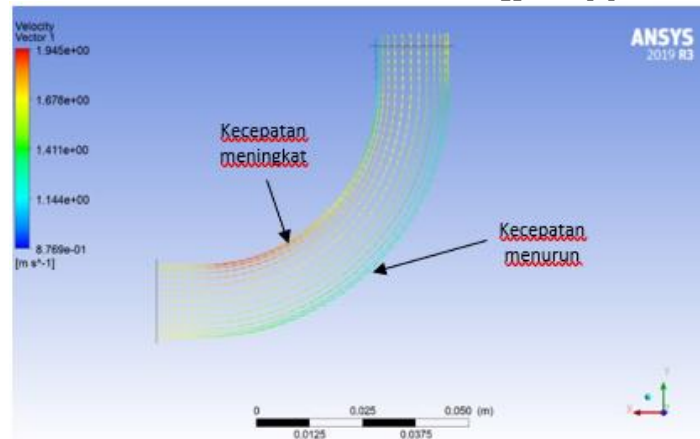


Gambar 8 Kontur kecepatan bukaan katup 70°

Pada gambar 8, Vortisitas sekunder masih teramati; namun, intensitasnya berkurang secara signifikan dibandingkan dengan konfigurasi elbow 90° yang ekstrem. Setelah melewati belokan, aliran hampir kembali berkembang penuh dengan kecepatan konstan.

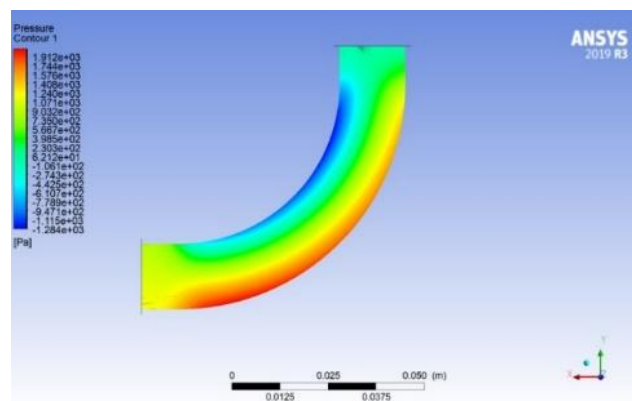
3. Elbow 90° dengan R 50mm

Pada elbow 90° dengan R50mm pada setiap bukaan katup, masih terlihat profil kecepatan aliran belum stabil namun sudah lebih baik dibandingkan elbow yang lain. Pada belokan bagian dalam pipa, terjadi peningkatan kecepatan dan belokan bagian luar pipa terjadi fenomena penurunan kecepatan. Sebagaimana gambar 9.



Gambar 9 Profil aliran elbow 90° R50mm

Untuk kontur tekanan pada semua bukaan katup, menunjukkan bahwa distribusi tekanan pada elbow secara bertahap menjadi seragam dan gradien tekanan pipa secara bertahap menjadi tidak signifikan. Meskipun bagian luar elbow masih terjadi tekanan yang lebih besar dibandingkan elbow bagian dalam, tetapi perbedaan tekanan antara sisi dalam dan luar secara bertahap berkurang (lihat gambar 10). Hasil ini konsisten sebagaimana yang telah dilaporkan oleh Liu et al., (2021).



Gambar 10 Kontur tekanan bukaan katup 70°

KESIMPULAN DAN SARAN

Karakteristik aliran fluida pada elbow 90° menunjukkan bahwa penggunaan radius belokan yang lebih besar mampu menyebarkan distribusi tekanan secara lebih merata di sepanjang lengkungan pipa. Hal ini secara efektif mengurangi pembentukan vortex terpusat yang umum terjadi pada elbow dengan radius kecil. Vortex besar tidak hanya meningkatkan kerugian tekanan, tetapi juga berpotensi menimbulkan keausan dan kerusakan komponen dalam jangka panjang. Sementara itu, variasi bukaan katup berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan aliran dan nilai bilangan Reynolds.

Namun, perubahan ini tidak secara signifikan memengaruhi pola kontur tekanan dan kecepatan, yang tetap menunjukkan visualisasi aliran serupa pada setiap kondisi bukaan katup. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya desain geometri elbow dalam mengoptimalkan performa sistem perpipaan dan mengurangi risiko gangguan aliran. Selain itu, hasil ini dapat dijadikan referensi tambahan dalam merancang system perpipaan pertanian, seperti irigasi dan pengeringan hasil panen yang membutuhkan efisiensi aliran dan distribusi tekanan yang stabil.

DAFTAR REFERENSI

- Abuhatira, A. A., Salim, S. M., & Vorstius, J. B. (2021). Numerical Simulation of Turbulent Pipe Flow With 90-Degree Elbow Using Wall Y+ Approach. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 10(January 2022). <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-69986>
- Alabdalah, A., & Wnos, L. (2020). Numerical Simulation and Flow Analysis of a 90-Degree Elbow. *International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science*, 6(4), 10–13. <https://doi.org/10.22161/ijcmes.64.1>
- Banerjee, A., & Mazumdar, J. (2024). A numerical investigation on rheological turbulent flow through a 90° mixing elbow. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00547-y>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). FLUID MECHANICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS. In *McGraw-Hill (United States)*.
- Lin, P., Lei, D., & Liao, J. (2021). Study on the influence of elbow with different curvature radii on pipeline leak location. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(10), 1–12. <https://doi.org/10.1177/16878140211053424>
- Liu, D., Du, K., Qin, S., & Zhou, X. (2021). Numerical simulation of flow characteristics in vertical elbows of pneumatic conveying. *Vibroengineering Procedia*, 39(1), 146–151. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.22225>
- Salvatierra-Rojas, A., Ramaj, I., Romuli, S., & Müller, J. (2021). CFD-simulink modeling of the inflatable solar dryer for drying paddy rice. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/app11073118>
- Shi, X., Chai, Y., Chen, H., Tao, H., & Jin, Q. (2024). Numerical simulation of pressure loss and flow characteristics in combined elbow pipes for solid-liquid two-phase flow. *Water Science and Technology*, 90(4), 1099–1114. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.262>
- Smyk, E., Stopel, M., & Szyca, M. (2024). Simulation of Flow and Pressure Loss in the Example of the Elbow. *Water (Switzerland)*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/w16131875>
- Trivedi, A., Kumar, R., & Gautam, A. V. (2023). *Background* : 13, 4573–4592.