
Journal Of Industrial Engineering And Technology (Jointech) Universitas Muria Kudus

Journal homepage :
<http://journal.UMK.ac.id/index.php/jointech>

SIMULASI ALIRAN DUA FASA STRATIFIED AIR - UDARA PADA PIPA HORIZONTAL DENGAN PENDEKATAN VOLUME OF FLUID (VOF)

Ainul Yaqin¹, Akhmad Zidni Hudaya^{2,*}, Rianto Wibowo³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus, Jl. Lingkar Utara UMK,
Gondangmanis, Bae, Kudus, Jawa Tengah 59327, Indonesia

* email Korespondensi : akhmad.zidni@umk.ac.id

INFO ARTIKEL

Article history :

Received : 15-8-2024

Accepted : 23-12-2024

Kata Kunci:

Two-Phase Flow

Computational Fluid Dynamic

Volume Of Fluid

Stratified low

ABSTRAK

Fluctuations affect two-phase flow patterns. The purpose of this study is to investigate the characteristics of two-phase stratified flow patterns using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The Volume of Fluid (VOF) method is applied with $k-\epsilon$ turbulence in a 19mm diameter, 9m long T-shaped pipe, featuring a separating plate between the water and air inlets. Various flow patterns are observed, including stratification ripples, stratification waves, rolling waves, and pseudo slugs. At low pressure differences and velocities of $JL = 0.025\text{m/s}$ and $JG = 1.88\text{m/s}$, a smooth-layered interface profile is observed, clearly separating the water phase flowing continuously at the bottom and the gas flowing at the top due to the density difference, without any waves. When the velocity is increased to $JL = 0.040\text{m/s}$ and $JG = 5.246\text{m/s}$, a ripple wave flow pattern occurs, characterized by small waves accompanied by long waves. Further adjustment to $JL = 0.050\text{m/s}$ and $JG = 4.140\text{m/s}$ leads to the formation of a stratified roll flow pattern, characterized by long rolls, while at $JL = 0.076\text{ m/s}$ and $JG = 5.246\text{ m/s}$, pseudo slug flow forms due to increased water velocity causing gas instability and bubble formation in the liquid.

PENDAHULUAN

Penggunaan pipa horizontal secara luas dapat digunakan dalam berbagai hal, salah satunya pendistribusian air, sistem pendinginan dan pendistribusian minyak, namun sering terjadi keadaan dimana aliran di dalam pipa yang melibatkan dua massa jenis yang berbeda atau disebut aliran dua fasa. Hal ini dapat terjadi apabila adanya dua aliran atau lebih yang bermassa jenis berbeda mengalir dalam satu ruang (pipa) dimana aliran fluida tersebut terletak di bawah atau di atas yang lainnya. Aliran dua fasa sendiri mempunyai banyak klasifikasi salah satu diantaranya adalah aliran *stratified* yang dimana karakter pada aliran ini zat cair akan berada di bawah dan gas berada di atasnya (Sugianto dkk., 2018). Pola aliran *stratified* dapat terjadi pada

fluktuasi tekanan yang rendah, hal ini biasanya digunakan dalam industri perpipaan karena bentuk dari antarmuka pada pola aliran ini cenderung halus atau bergelombang (*wavy*) (Sukamta dkk., 2018).

Lain halnya dengan pola aliran *slugging* yang banyak dihindari karena getarannya yang tinggi. Hal tersebut dapat merusak perpipaan karena tingginya tekanan osilasi. Perpipaan atau suatu saluran yang dilewati oleh aliran *slug* gas dapat menyebabkan peningkatan tekanan yang sangat tinggi dan dapat menyebabkan masalah yang serius terhadap sistem yang sensitif pada fluktuasi dan getaran (Dinaryanto, 2018). Oleh karena itu, untuk alasan keamanan pada sistem perpipaan maka aliran dua fasa perlu dijaga pada kondisi pola aliran *stratified*. Untuk mendefinisikan fenomena aliran *stratified* perlu pemahaman terhadap perilaku dari aliran *stratified* seperti yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Wibowo dkk., (2015) dalam sebuah penelitiannya tentang sub-sub pola aliran *stratified* pada aliran dua fasa searah berdasarkan fluktuasi beda tekanan pada pipa horizontal, memberikan gambaran bahwa eksperimental dengan metode visual pada pipa berdiameter 26 mm dan panjang 10 m dengan kecepatan superfisial J_L dan J_G 0,025 - 0,075 m/s dan 1,88 - 3,77 m/s menghasilkan daerah pengamatan yang dibagi sub - sub daerah *stratified smooth*, *two dimensional wave*, *roll wave* *serata atomization*. Ini masih sulit diamati karena tidak digambarkannya morfologi pada pola aliran.

Dinaryanto (2018) dalam studi eksperimental aliran *slug* dalam pipa horizontal air dan udara digunakan sebagai fluidanya dengan kecepatan J_L 0,1-0,77 dan J_G 0,31-6,2 dengan pengamatan visual kamera video berkecepatan tinggi mendapatkan hasil pola aliran *slug* dibagi menjadi lima pola aliran yaitu *Slug-Plug* (SP), *Low Bubbles* (LB), *Low dispersed Bubbles* (LdB), *High dispersed Bubbles* (HdB), and *Slug-Wavy* (SW). Korawan (2015) pada eksperimentalnya variasi kecepatan superfisial dalam aliran dua fasa pada pipa horizontal dengan kecepatan U_{sl} 0.4 m/s, 0.55 m/s, 0.7 m/s, 0.85 m/s dan 1.0 m/s. *Volumetric ratio* 0.05 dengan pola yang berhasil diamati adalah *bubble flow*, *slug flow* dan *stratified flow*. Penelitian tersebut memperoleh hasil bahwa semakin besar nilai dari U_{sl} maka semakin panjang *bubble region*nya. Hal ini terjadi karena adanya perubahan *bubble flow* menjadi *stratified*.

Mazumder (2012) dalam analisis aliran *single* dan *multi phase* pada pipa *elbow* dengan 3 jenis kecepatan udara dan air dengan 6 titik pengamatan yang berbeda memperoleh hasil ke 6 titiknya mengalami peningkatan tekanan pada geometri *elbow* dan penurunan pada sisi outletnya. Hudaya dkk., (2019) dalam eksperimental dengan judul kajian eksperimen mengenai dinamika dan struktur antarmuka aliran *stratified* pada aliran dua fasa adiabatik searah pada pipa horizontal. Menerangkan bahwa karakteristik gelombang *stratified* air dan udara yang terbentuk dari pipa dengan diameter 26 mm dan Panjang 10 m dengan kecepatan superfisial udara 0,2 – 0,075 dan 4 – 16 m/s untuk superfisial udaranya, berhasil memperoleh beberapa korelasi baru yaitu *liquid hold-up*, faktor gesekan antarmuka, frekuensi, kecepatan, amplitudo dan panjang gelombang antarmuka serta *wall wetted fraction*.

Mahmuddin dkk. (2023) menganalisis pola aliran dan perubahan beda tekanan pada aliran dua fase searah dalam pipa horizontal. Penelitian ini mengintesis karakteristik dari aliran dua fase air dan minyak pada pipa horizontal dengan hasil beda tekanan pada aliran fluida akan mengalami peningkatan seiring bertambahnya debit dari air dan memperoleh transisi aliran *stratified* ke aliran *stratified wavy*.

Selain itu metode dengan *image processing* juga pernah dilakukan oleh Bhaskara dkk. (2018) yang meneliti karakteristik dari rezim *stratified wavy* dengan metode *image processing*. Hasilnya menunjukkan perubahan kecepatan superfisial setiap fluida berbanding lurus dengan kecepatan gelombang pada setiap titik pengamatan dan akan mengalami penurunan kecepatan gelombang pada daerah pengamatan yang lebih jauh. Dari penelitian tersebut sama dengan hasil dari penelitian Hanif dkk. (2018) yang menganalisa pola aliran *stratified wavy* dengan menganalisa tebal dan frekuensi pola alirannya. Hasil dari penelitian itu membuktikan bahwa semakin jauh fluida mengalir dari sisi masuknya maka nilai frekuensi dan tinggi gelombangnya akan mengalami penurunan. Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan bisa disimpulkan bahwa perubahan pada fluktuasi beda tekanan akan mempengaruhi hasil dari sub pola rezim

yang ada sehingga akan menghasilkan pola pola atau korelasi yang baru pada sebuah aliran. Akan tetapi dalam melakukan sebuah eksperimental akan memerlukan biaya dan waktu yang tidak sedikit dan tidak akan bebas dalam mengeksplorasinya.

Di sisi lain pengamatan juga dilakukan melalui komputasi dinamik seperti yang dilakukan oleh Shi dkk. (2017) dengan melakukan simulasi pemodelan multifase *volume of fluid* dan model turbulen SST k- ω . Hasil simulasi menunjukkan pola aliran dengan gambaran *cross-sectional* untuk karakter turbulen yang berbeda-beda. Deendarlianto dkk. (2016) melakukan simulasi numerik dengan tujuan mengetahui fenomena aliran dua fasa dari *gas-liquid plug* pada pipa horizontal dengan skema *volume of fluid* dengan kondisi *no slip walls*. Dalam hal ini penggunaan simulasi secara numerik dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) menjadi suatu hal alternatif yang menarik. Simulasi yang dilakukan pada CFD terhadap aliran stratifikasi air dan udara pada sebuah pipa horizontal dapat memberikan pemahaman yang rinci dan efisiensi terhadap identifikasi pola aliran dalam pipa dan memprediksi perilaku-perilaku aliran dalam pipa.

Maka dari itu penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi numerik pada aliran stratifikasi air dan udara pada pipa horizontal. Dengan dilakukannya simulasi ini diharapkan dapat memperoleh informasi tentang pola-pola aliran *stratified* air-udara di dalam pipa horizontal, serta membandingkan perubahan pola-pola aliran seiring dengan perubahan kecepatan pada superfisial air-udara.

Dalam rangka untuk keperluan desain dan optimasi suatu sistem/peralatan yang melibatkan perilaku aliran dua fasa maka perlu mencari metode lain yakni dengan studi numerik CFD. Hal ini disebabkan karena keterbatasan data dan kerahasiaan data eksperimental peneliti lain tidak bisa bebas dipaparkan dan didapat dengan mudah. Melalui studi numerik CFD, perkembangan seluruh aliran dapat diprediksi melalui studi perilaku aliran lokal. Hal ini dapat menghemat biaya riset eksperimen yang sangat mahal. Studi ini dapat memberikan kontribusi besar untuk perencanaan yang harus melibatkan sistem aliran stratifikasi seperti pendinginan dan pemisahan air dan udara tanpa perlu dilakukannya uji eksperimen. Dengan penggabungan dua elemen terhadap pemahaman aliran stratifikasi dan simulasi numerik serta kebutuhan terhadap pemahaman perancangan pipa horizontal, penelitian ini memiliki relevansi dan penting dalam bidang rekayasa aliran fluida.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian adalah studi numerik mengenai karakteristik lokal dari pola-pola aliran dua fase *stratified* yang terbentuk menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi numerik ini menggunakan *software* Ansys Fluent 2023 R2 Student. Hasil simulasi akan divalidasi menggunakan hasil eksperimental yang pernah dilakukan. Untuk mempermudah dalam visualisasi dan informasi secara jelas maka dibuatlah diagram penelitian seperti pada Gambar 1.

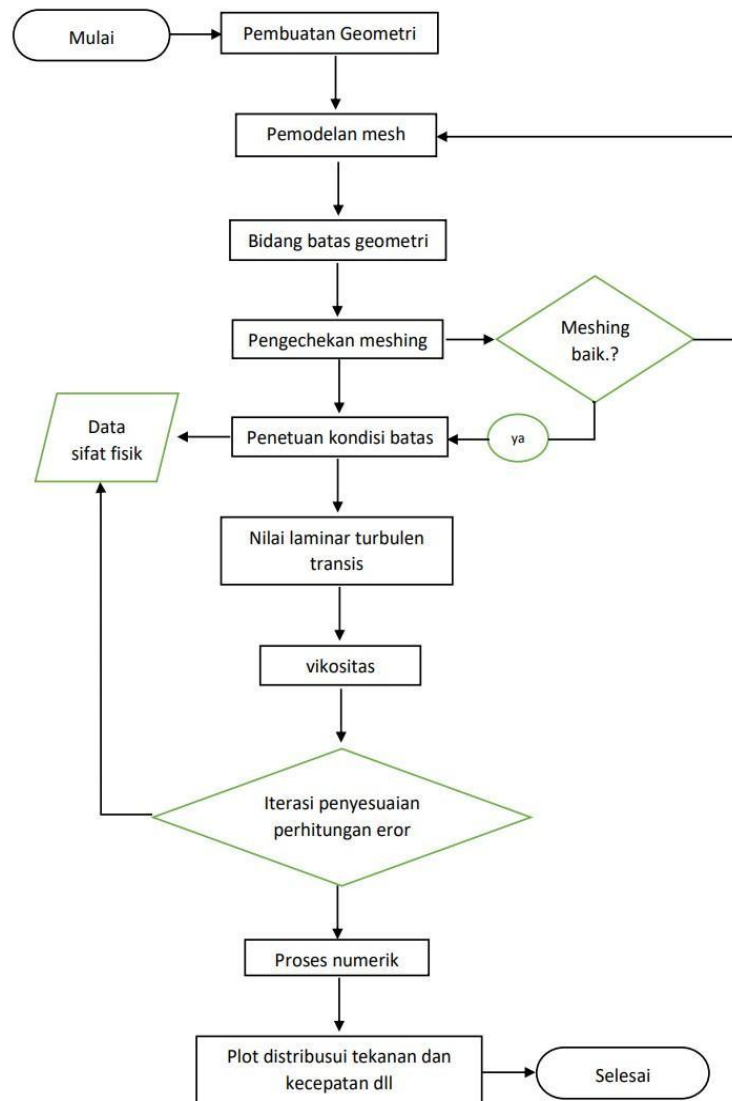
Simulasi pada *Ansys Fluent* akan dibagi menjadi 3 tahapan yaitu *preprocessing* (geometri, pembuatan mesh dan penempatan kondisi batas), *processing* (perhitungan simulasi menggunakan komputasi), dan *post processing* (hasil dari simulasi).

A. *Preprocessing*

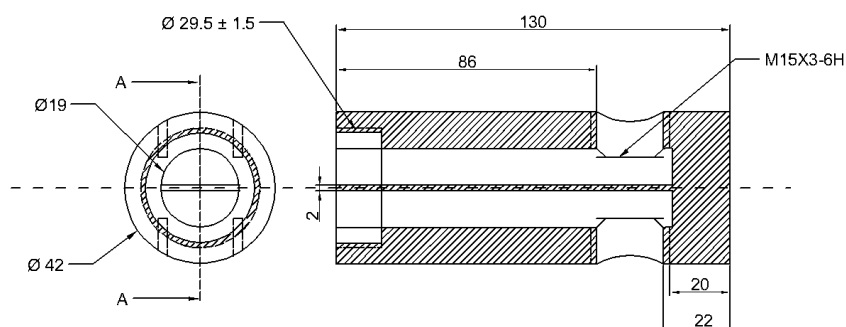
Untuk pembuatan geometrinya, penggunaan desain modeler dipilih untuk media definisi dari bentuk riil benda yang dipresentasikan menjadi bentuk 2D. Dengan ukuran panjang pipa 8m dan untuk diameter dalam pipa 19 mm. Pipa yang akan disimulasikan ini menggunakan mixer T sederhana yang nantinya akan terpasang pada bagian saluran masuk dimana model dari mixer ini memiliki plat pemisah dengan tebal 2 mm yang di letakkan di tengah mixer, penggunaan mixer T dengan plat pemisah ini dimaksudkan supaya air dan udara tidak langsung bertemu dan mempermudah dalam pengamatan (*stratified flow*) (Hudaya dkk., 2019). Untuk titik pengamatan pada simulasi ini menggunakan 210D pada saat aliran kondisi *fully developed*.

Untuk *meshing* menggunakan jenis *quadrilaterals* dengan *face mashing* dan nodenya 1066078 sementara elemennya 1008006. Selanjutnya penentuan daerah pengamatan lokasi

yang akan disimulasikan dimana inlet air merupakan saluran masuknya fluida air dalam pipa; Inlet udara merupakan saluran masuknya fluida udara dalam pipa; dan Outlet merupakan saluran keluar dari pipa.



Gambar 1. Diagram Alir



Gambar 2. Mixer Air – Udara



Gambar 3. Meshing

Batas-batas kondisi pada simulasi aliran *stratified* ini menggunakan pemodelan *volume of fluid* (VOF) dimana air diatur sebagai fase primer dan udara sebagai fase sekunder (persamaan 3). Pemilihan VOF digunakan agar fluida dapat diasumsikan mengalir secara *kontinu* pada pipa. Menurut Akhlaghi dkk., (2019) *Volume Of Fluid* adalah salah satu pemodelan fisika yang diterapkan pada simulasi fluida yang dapat memprediksi penurunan tekanan dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 13.1%. Model VOF ini sering dipakai untuk mensimulasikan suatu aliran 2 fluida atau lebih yang tidak bisa bercampur dengan menyelesaikan persamaan momentum untuk mengetahui antarmuka pada kedua fluida dengan cara analisis terhadap fluida didasarkan pada kekekalan massa dan momentum (persamaan 1 dan 2).

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 \alpha_0)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \cdot \alpha_0 \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

Dimana p adalah tekanan, μ adalah viskositas, g adalah percepatan gravitasi dan F adalah gaya. Model turbulensi yang digunakan pada simulasi ini menggunakan *realizable k- ω* dengan mengaktifkan turbulen damping dan memasukan nilai dari *surface tension* air dan udara 0.072. *Surface tension* ini berguna sebagai perhitungan gaya gesek antara air dan udara sehingga hasil dari simulasi ini bisa mendekati. Sementara untuk model turbulensinya menggunakan *realizable k- ω* dan dipilih karena memiliki tingkat akurasi yang baik dibanding metode RNG k-epsilon ataupun standard k-epsilon (Sukamta dkk., 2018). Untuk kondisi batas dan properties dari kedua fluida disamakan dari eksperimental yang pernah dilakukan yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 1. Kondisi Batas Penelitian

Kondisi Batas	Nilai
inlet water	superfisial water J_L (m/s)
inlet gas / air	superfisial gas J_G (m/s)
dinding pipa	No-slip walls condition
outlet	pressure outlet

Tabel 2. Properties Fluida

Properties	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/ms)
Air	997	0,00086

Udara	1.225	1.7894e-05
-------	-------	------------

Tabel 3. Kecepatan Aliran

	Kecepatan Aliran (m/s)			
Superfisial air / liquid (J_L)	0,025	0,040	0,050	0,076
Superfisial udara / gas (J_G)	1,88	5,246	4,140	5,246

B. Processing

Sementara untuk simulasi menggunakan skema transien dengan menggunakan pendekatan eksplisit dan untuk konvergensinya ditetapkan pada waktu 0.001 detik. Dengan jumlah maximal time step 20 dan iterasinya sebesar 20.000.

C. Post Processing

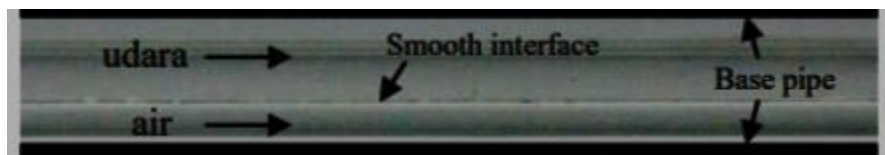
Post processor adalah langkah pasca pemrosesan untuk mengekstraksi hasil data dari *processor* dengan mengambil data – data yang dibutuhkan untuk memahami perilaku aliran dan interaksi antar fase seperti debit cairan, tekanan, dan kecepatan aliran fluida yang nantinya dari data tersebut akan di analisis dari karakteristik fluktuitas beda tekannya.

HASIL DAN PEMBAHASA

1. Visualisasi

b. Aliran *stratified smooth*

Pada kecepatan $J_L = 0.025$ m/s dan $J_G = 1.88$ m/s perbedaan tekanan yang rendah mengakibatkan terbentuknya profil antarmuka aliran *stratified smooth* sehingga memperlihatkan fase dari air mengalir di bagian bawah secara kontinyu dan fase gas mengalir pada bagian atas karena perbedaan densitas. Hal ini sesuai dengan karakteristik aliran *stratified smooth*. Hal ini sesuai dengan kajian eksperimental yang pernah dilakukan oleh (Wibowo et al., 2015) dimana pada kajian eksperimentalnya menyebutkan bahwa kecepatan dari superficial gas 1.88 m/s dan superficial air 0.025 m/s akan membentuk aliran *stratified smooth*.



Gambar 4. Contoh Visualisasi Aliran *Stratified Smooth*
($J_L = 0,025$ m/s, $J_G = 1,88$ m/s, dan $\phi = 19$ mm) Wibowo dkk., (2015)

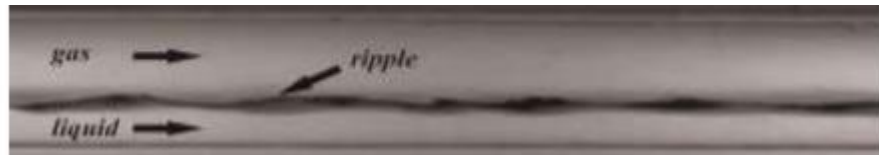


Gambar 5. Hasil Simulasi Aliran *Stratified Smooth*
($J_L = 0,025$ m/s, $J_G = 1,88$ m/s, dan $\phi = 19$ mm)

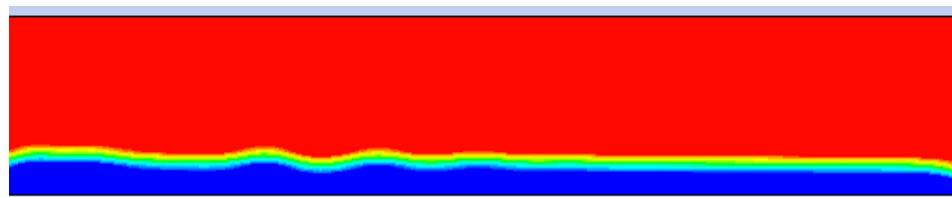
c. *Stratified ripple*

Profil antarmuka yang terbentuk karena perbedaan tekanan $J_L = 0,040$ m/s dan $J_G = 5,246$ m/s, yang mengakibatkan gaya tarik dari fase gas mengangkat permukaan antarmuka dan rendahnya nilai J_L menyebabkan permukaan antarmuka turun ke bawah atau cenderung melengkung sehingga akan membentuk gelombang kecil. Seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 7., memperlihatkan pola aliran *ripple wavy*, dimana gelombang-gelombang kecil terbentuk dengan diikuti gelombang panjang. Aliran seperti ini bisa terjadi pada perbedaan tekanan yang rendah seperti yang dikemukakan oleh Wijayanta dkk., (2023) bahwasanya pola aliran *stratified* dapat terjadi pada fluktuasi tekanan yang rendah.



Gambar 6. Contoh Visualisasi Aliran *Stratified Ripple*
($J_L = 0,040$ m/s, $J_G = 5,246$ m/s, dan $\phi = 19$ mm) Mahadiputra dkk., (2019)



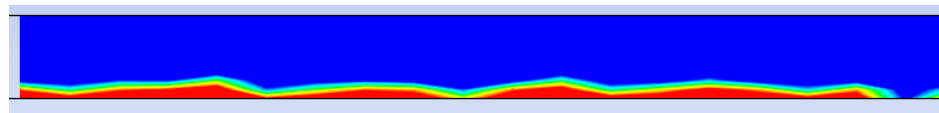
Gambar 7. Hasil Simulasi Aliran *Stratified Ripple*
($J_L = 0,040$ m/s, $J_G = 5,246$ m/s, dan $\phi = 19$ mm)

d. *Stratified roll*

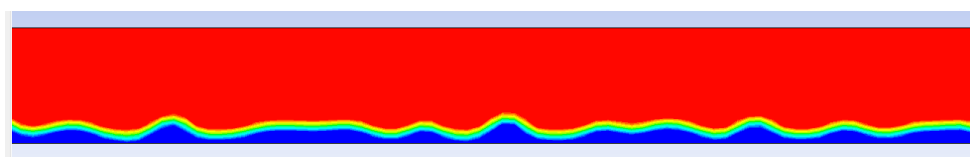
Peningkatan kecepatan J_L dari 0,040 m/s menjadi 0,050 m/s dan diikuti dari penurunan J_L dari 5.246 m/s menjadi 4,140 m/s mengakibatkan terbentuknya gelombang aliran bergulung panjang seperti pada Gambar 9. Selanjutnya saat nilai dari J_G dinaikkan menjadi 7.246 m/s aliran berubah yang dari *stratified roll* menjadi *wave roll*. Hal ini disebabkan karena perbedaan tekanan secara signifikan yang mengakibatkan gaya angkat yang kuat oleh fraksi gas dengan pemisahan antara fase yang masih jelas. Seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 8. Contoh Visualisasi Aliran *Stratified Roll*
($J_L = 0,050$ m/s, $J_G = 4,140$ m/s, dan $\phi = 19$ mm) Mahadiputra dkk., (2019)



Gambar 9. Hasil Simulasi Aliran *Stratified Roll*
($J_L = 0,050$ m/s, $J_G = 4,140$ m/s, dan $\phi = 19$ mm)



Gambar 10. Hasil Simulasi Aliran *Stratified Roll*
($J_L = 0,050$ m/s, $J_G = 7,246$ m/s, dan $\phi = 19$ mm)

e. *Pseudo slug*

Pada kecepatan $J_G = 5.246$ m/s dan $J_L = 0.076$ m/s terjadinya aliran mendekati kondisi *pseudo slug*. Hal ini bisa terjadi karena bertambahnya kecepatan dari fase air yang menyebabkan tidak stabilnya fase gas sehingga terbentuk *bubble* di dalam cairan. Pada Gambar 11-16 menunjukkan bahwasanya aliran terbentuk dari mulai aliran *roll* menuju ke *ripple* lalu membentk *pesudo slug* kemudian pecahnya gelombang *peseudo slug* menghasilkan *droplet* atau gelembung.



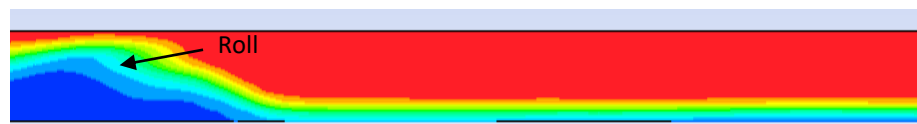
Gambar 11. Contoh Visualisasi Aliran *Pseudo Slug* pada 0.79s
($J_L = 0,076$ m/s, $J_G = 5,246$ m/s, dan $\phi = 19$ mm) Mahadiputra dkk., (2019)



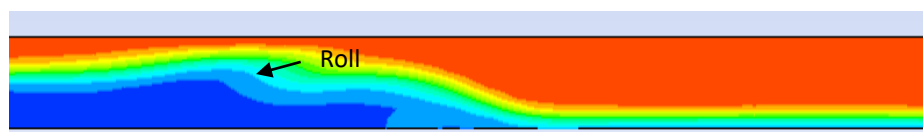
Gambar 12. Contoh Visualisasi Aliran *Pseudo Slug* pada 0.81s
($J_L = 0,076$ m/s, $J_G = 5,246$ m/s, dan $\phi = 19$ mm) Mahadiputra dkk., (2019)



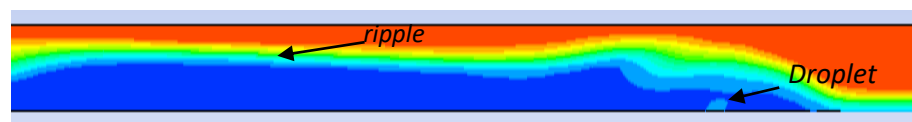
Gambar 13. Contoh Visualisasi Aliran *Pseudo Slug* pada 0.92s
($J_L = 0,076$ m/s, $J_G = 5,246$ m/s, dan $\phi = 19$ mm) Mahadiputra dkk., (2019)



Gambar 14. Hasil Simulasi Aliran *Pseudo Slug* pada 0.79s
($J_L = 0,076$ m/s, $J_G = 5,246$ m/s, dan $\phi = 19$ mm)



Gambar 15. Hasil Simulasi Aliran *Pseudo Slug* pada 0.81s
($J_L = 0,076$ m/s, $J_G = 5,246$ m/s, dan $\phi = 19$ mm)



Gambar 16. Hasil Simulasi Aliran *Pseudo Slug* pada 0.92s
($J_L = 0,076$ m/s, $J_G = 5,246$ m/s, dan $\phi = 19$ mm)

Perbandingan hasil dari simulasi menunjukkan kesesuaian dengan hasil dari eksperimen yang pernah dilakukan Mahadiputra dkk., (2019). Dimana fenomena aliran pada kondisi berkembang

penyuh (*fully developed*) pada aliran *pseudo slug* terbentuk dimulai dari pola aliran aliran *ripple* yang kemudian membesar menjadi aliran *roll* pada waktu 0,81s seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15. Pada Gambar 16, mempertlihatkan fenomena fase dari air menyentuh dinding pipa dan kemudian bertabrakan dengan fase gas sehingga membentuk *droplet* seperti yang terlihat pada Gambar 16. Pola-pola aliran antarmuka yang terbentuk dari hasil simulasi mempunyai kesesuaian dengan beberapa peneliti sebelumnya (Kuntoro dkk (2015), Widyatama dkk (2018), Hudaya, dkk (2016), Hudaya dkk (2019)) dan dapat dikelompokkan menjadi *Stratified smooth*, *Stratified ripple wave*, *roll wave*, dan *pseudo slug*.

KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan penggunaan metode *volume of fluid* dan model turbulensi sst $k-\epsilon$ adalah pemodelan yang cocok terhadap simulasi aliran *stratified* berdasarkan perbedaan fluktuasi-nya. Perubahan kecepatan superfisial liquid (J_L) dan kecepatan superfisial gas (J_G) akan berpengaruh pada karakteristik profil antarmuka pola aliran. Dengan melakukan simulasi pada perbedaan fluktuasi maka mendapatkan pola-pola aliran antarmuka dapat dikelompokkan menjadi *Stratified smooth*, *Stratified ripple wave*, *roll wave*, dan *pseudo slug*.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhlaghi, M., Mohammadi, V., Nouri, N. M., Taherkhani, M., & Karimi, M. (2019). Multi-Fluid VoF model assessment to simulate the horizontal air–water intermittent flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 152, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.09.001>
- Bhaskara, V. S., & Bhattacharyya, D. (2018). *Emulating malware authors for proactive protection using GANs over a distributed image visualization of dynamic file behavior*. Proceedings of the IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 1, 867–872.
- Deendarlianto, Andrianto, M., Widyaparaga, A., Dinaryanto, O., Khasani, & Indarto. (2016). CFD studies on the gas-liquid plug two-phase flow in a horizontal pipe. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 147(2), 779–787. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.08.046>
- Dinaryanto, O. (2018). Studi eksperimen mengenai mekanisme aliran slug pada aliran dua fase adiabatik searah dalam pipa horizontal. *Disertasi*.
- Hanif, M. A., & Widyaparaga, A. (2018). Studi eksperimen perubahan frekuensi aliran dua fase campuran air-minyak tanah dengan pola stratified wavy pada pipa horizontal LLCC dan pengaruhnya terhadap panjang pipa menggunakan metode image processing. *Jurnal Inovasi Mesin*, 2019.
- Hudaya, A. Z., Kuntoro, H. Y., Dinaryanto, O., Deendarlianto, D., & Indarto, I. (2016, June). *Experimental investigation on the interfacial characteristics of stratified air-water two-phase flow in a horizontal pipe*. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1737, No. 1). AIP Publishing.
- Hudaya, A. Z., Widyatama, A., Dinaryanto, O., Juwana, W. E., Indarto, & Deendarlianto. (2019). The liquid wave characteristics during the transportation of air-water stratified co-current two-phase flow in a horizontal pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 103, 304–317. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.02.023>
- Korawan, A. D. (2015). Pola aliran dua fase (air+udara) pada pipa horisontal dengan variasi kecepatan superfisial air. *Mekanika*, 14(1), 57–63.
- Kuntoro, H. Y., Hudaya, A. Z., & Dinaryanto, O. (2015). Experimental study of the interfacial waves in horizontal stratified gas-liquid two-phase flows by using the developed image processing technique. *arXiv preprint arXiv:1511.06087*.
- Mahadiputra, A. A., Karnowo, K., & Anis, S. (2019). Studi eksperimental pengaruh kecepatan superfisial aliran searah terhadap karakteristik dan parameter aliran stratified pada pipa horizontal. *Jurnal Inovasi Mesin*, 1(2), 1–10.

- Mahmuddin, I., & Habiba, M. S. (2023). Analisis pola aliran dan perubahan beda tekanan pada aliran dua fase searah dalam pipa horisontal. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, 9(2), 155–161.
- Mazumder, Q. H. (2012). CFD analysis of the effect of elbow radius on pressure drop in multiphase flow. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/235354>
- Shi, J., Gourma, M., & Yeung, H. (2017). CFD simulation of horizontal oil-water flow with matched density and medium viscosity ratio in different flow regimes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 151, 373–383. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.027>
- Sugianto, Dewi P., Indarto, & Khasani. (2018). Simulasi numerik pemisahan aliran dua fase liquid-liquid di dalam T-junction. *Jurnal Inovasi Mesin*, 2, 32.
- Sukamta, S., Thoharudin, T., & Melianto Nugroho, D. (2018). Simulasi CFD aliran stratified air-udara pada pipa horisontal. *Semesta Teknik*, 21(2), 206–215.
- Wibowo, R., Hudaya, A. Z., & Kabib, M. (2015). Studi eksperimen mengenai sub-sub pola aliran stratified pada aliran dua fase searah berdasar fluktuasi beda tekanan pada pipa horisontal. *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, 6(2), 385.
- Widyatama, A., Majid, A. I., & Hudaya, A. Z. (2018, August). The Implementation of Image Processing Technique to Analyze the Air-Water Stratified Flow Characteristics in a Horizontal Pipe. In *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)* (pp. 1-6). IEEE.
- Wijayanta, S., Deendarlianto, Indarto, Prasetyo, A., & Hudaya, A. Z. (2023). The effect of the liquid physical properties on the wave frequency and wave velocity of co-current gas-liquid stratified two-phase flow in a horizontal pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, 158(2), 104300. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104300>