

Analisis Numerik Multifase Transportasi Slurry Abu Terbang Berkonsentrasi Partikel Tinggi

Farul Apriansa^{1*}, Ridwan¹, Iwan Setyawan¹, Tri Mulyanto¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma
Jl. Margonda Raya No. 100, Pondok Cina, Beji, Kota Depok, Indonesia

*Corresponding author: apriansaparul@gmail.com

Abstract

The transport of fly ash slurry experiences energy inefficiency due to high flow resistance in conventional circular pipelines, particularly at high solids concentrations. This study aims to evaluate the effect of pipe geometry, namely circular pipes, 4-lobed spiral pipes, and 6-lobed spiral pipes, on the flow characteristics of non-Newtonian fly ash slurry with solids concentrations ranging from 50% to 70%. The analysis was conducted through Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations using ANSYS 2023 R1 with the Eulerian multiphase approach and the SST $k-\omega$ turbulence model. The evaluated parameters include pressure drop (ΔP), friction factor (f), drag reduction (DR), and particle volume fraction distribution. The simulation results indicate that increasing solids concentration leads to higher ΔP and f for all pipe geometries; however, the lowest values are consistently obtained in the 6-lobed spiral pipe. At a solids concentration of 70%, ΔP decreases significantly from 47859.078 Pa in the circular pipe to 31693.792 Pa in the 6-lobed spiral pipe, while the friction factor is reduced from 0.22527 to 0.14918. The 6-lobed configuration achieves a maximum drag reduction of 33.78% at the highest solids concentration. The spiral geometry generates swirl flow and secondary flows that enhance particle distribution uniformity, thin the boundary layer near the pipe wall, and reduce the tendency for sedimentation.

Keywords: fly ash, pressure drop, slurry, spiral pipe, volume fraction.

Abstrak

Transportasi slurry abu terbang mengalami inefisiensi energi akibat tingginya resistensi aliran pada pipa konvensional berbentuk lingkaran, terutama pada konsentrasi padatan tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi geometri pipa, yaitu pipa bulat, pipa spiral 4-lobus, dan pipa spiral 6-lobus, terhadap karakteristik aliran slurry abu terbang non-Newtonian dengan konsentrasi padatan 50–70%. Analisis dilakukan melalui simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan ANSYS 2023 R1 dengan pendekatan multiphase Eulerian dan model turbulensi SST $k-\omega$. Parameter evaluasi meliputi penurunan tekanan (ΔP), koefisien gesek (f), pengurangan hambatan (DR), dan distribusi fraksi volume partikel. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi padatan menyebabkan kenaikan ΔP dan f pada seluruh geometri pipa, namun nilai terendah secara konsisten diperoleh pada pipa spiral 6-lobus. Pada konsentrasi padatan 70%, ΔP menurun signifikan dari 47859.078 Pa pada pipa bulat menjadi 31693.792 Pa pada pipa spiral 6-lobus, sementara koefisien gesek berkurang dari 0.22527 menjadi 0.14918. Konfigurasi 6-lobus menghasilkan pengurangan hambatan maksimum sebesar 33.78% pada konsentrasi padatan tertinggi. Geometri spiral menghasilkan aliran berputar (swirl flow) dan aliran sekunder yang meningkatkan pemerataan distribusi partikel, menipiskan lapisan batas di dekat dinding pipa, serta mengurangi kecenderungan sedimentasi.

Kata kunci: abu terbang, fraksi volume, penurunan tekanan, pipa spiral, slurry.

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan sistem pembangkitan listrik yang memanfaatkan energi panas hasil pembakaran batu bara untuk memanaskan air dalam boiler dan menghasilkan uap bertekanan tinggi [1]. Meskipun penggunaan energi terbarukan telah meningkat, batu bara tetap menjadi sumber energi utama karena

ketersediaannya dan biaya yang ekonomis. Namun, pembakaran batu bara menimbulkan masalah emisi gas rumah kaca dan limbah padat, terutama *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA), dengan proporsi sekitar seperlima bagian bottom ash dan sisanya fly ash [2]. *Fly ash*, yang berupa partikel halus, berpotensi mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia [2]. Salah satu metode pengelolaan

fly ash adalah transportasi dalam bentuk slurry melalui pipa [3], [4], [5].

Slurry, campuran padat-cair (*solid-liquid*) [6], digunakan untuk mengangkut partikel tersuspensi dalam cairan kontinu [7]. Namun, slurry memiliki sensitivitas tinggi terhadap segregasi partikel, yang dapat menyebabkan penyumbatan pipa atau kecelakaan pecah [8]. Viskositas tinggi dan sifat non-Newtonian slurry juga memicu konsumsi energi tinggi. Kendati demikian, transportasi slurry melalui pipa menawarkan keunggulan berupa efisiensi, polusi minimal, kecelakaan rendah, efektivitas biaya, dan pengurangan perawatan serta kebutuhan energi [9], [10].

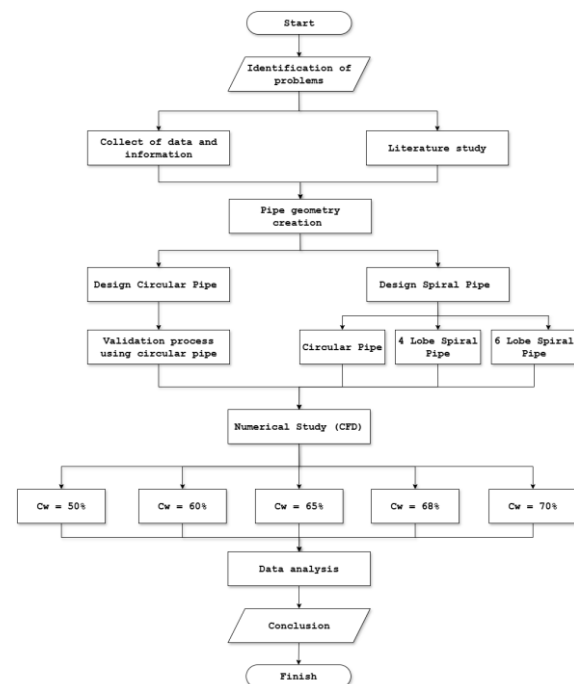
Pipa spiral diidentifikasi sebagai solusi potensial untuk meningkatkan efisiensi transportasi slurry non-Newtonian [11], [12], [13], karena geometri spiral menghasilkan aliran putar (*swirl flow*) yang membantu distribusi partikel dan mencegah sedimentasi [14]. Fenomena disipasi energi akibat gesekan antarlapisan fluida juga muncul, memunculkan tegangan geser dan drag. Geometri yang tidak optimal dapat menyebabkan tekanan aliran tinggi, turbulensi berlebih, dan penurunan efisiensi transportasi, sehingga diperlukan desain pipa yang tepat.

Penelitian ini bertujuan memperoleh pemahaman kuantitatif tentang perilaku partikel padat dalam aliran slurry di pipa spiral, serta membandingkannya dengan pipa bulat konvensional menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan dan simulasi numerik untuk menganalisis aliran fluida non-Newtonian, khususnya fly ash slurry, dalam pipa bulat dan pipa spiral. Penelitian meliputi studi literatur, perancangan model 2D dan 3D dengan Autodesk Inventor 2021, simulasi CFD menggunakan ANSYS 2023 R1, serta analisis hasil simulasi. Studi literatur memberikan dasar teoritis, sementara validasi awal dilakukan pada pipa

bulat dengan Konsentrasi Padatan (*Concentration Weight, CW*) 60% menggunakan data eksperimen sebelumnya. Uji mesh independen juga dilakukan untuk menentukan konfigurasi mesh optimal, sehingga tercapai keseimbangan antara akurasi solusi dan efisiensi komputasi. Fokus penelitian adalah mengevaluasi performa pipa dengan variasi Konsentrasi Padatan (*Concentration Weight, CW*) 50%, 60%, 65%, 68%, dan 70% berdasarkan parameter penurunan tekanan (*pressure drop*), koefisien gesek (*friction factor*), pengurangan hambatan (*drag reduction*) dan distribusi fraksi volume (*volume friction*), guna menentukan desain pipa paling efisien. Simulasi numerik memungkinkan visualisasi perilaku aliran dan evaluasi pengaruh geometri serta konsentrasi slurry terhadap kinerja sistem perpipaan.



Gambar 1. Alur Penelitian

2.1 Computational Modeling

Dalam pemodelan ini *multiphase-Eulerian* dengan model *turbulence viscous-SST k- ω mixture* dipilih sebagai model perhitungan numerik. Beberapa penelitian sebelumnya [15], [16], [17], [18], [19] telah menerapkan model ini untuk menganalisis aliran pada konsentrasi tinggi. Skema *first*

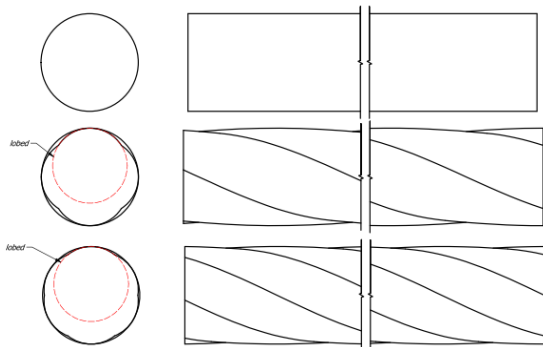
order upwind dan algoritma SIMPLE juga digunakan untuk menentukan parameter campuran aliran fluida.

2.2 Karakteristik Fluida

Fluida yang digunakan dalam penelitian ini merupakan fluida non-Newtonian berupa *slurry*, yang terdiri dari campuran *fly ash* dan *water*. Karakteristik fluida meliputi densitas *fly ash* sebesar 2270 kg/m³ [20] dengan ukuran partikel $3,0 \times 10^{-4}$ m [21], sedangkan air sebagai fluida dasar memiliki densitas 998.2 kg/m³ dan viskositas sebesar 1 cP. Laju aliran fluida dijaga konstan pada 1.5 m/s untuk seluruh konfigurasi geometri pipa yang diuji.

2.3 Geometri Pipa

Pipa yang digunakan dalam penelitian ini adalah *circular pipe* dan *spiral pipe* berbahan *mild-steel* dengan nilai kekasaran (ϵ) 0,5 konstan, dengan ukuran *circular pipe* 50 NB, *lobed* 50mm, dan panjang 5m. Rasio diameter (P/D) yang digunakan sebesar 8.1, sesuai dengan geometri P/D yang telah dilakukan menghasilkan performa terbaik oleh [22]. Penelitian ini menggunakan tiga variasi desain pipa, yaitu pipa bulat, pipa spiral 4 lobus, dan pipa spiral 6 lobus.

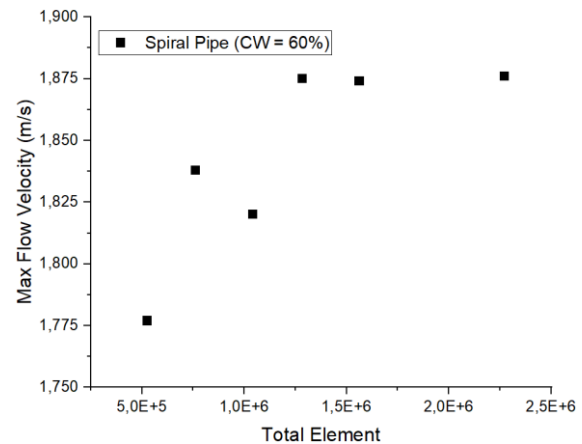


Gambar 2. Geometri Pipa

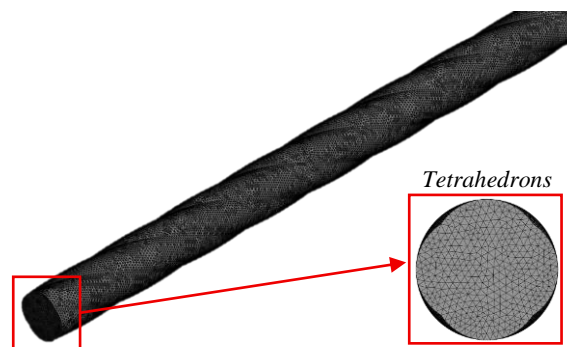
2.4 Validation dan GIT

Deviasi maksimum antara kehilangan tekanan simulasi dan eksperimen [21], diamati sebesar 5.43% dan 5.47% dengan konsentrasi padatan 60% dan kecepatan aliran 1 m/s - 3 m/s. *Grid Independent Test* (GIT) dilakukan pengujian pada model pipa spiral dengan mengatur elemen dari 0.5×10^6 hingga 2.25×10^6 . Dilakukan pengukuran *max flow velocity*

(m/s) pada variasi jumlah element dan didapatkan relatif error terkecil sebesar 0.11% dengan nilai max velocity 1.874 m/s.



Gambar 3. GIT



Gambar 4. Meshing

2.5 Persamaan

Nilai rasio konsentrasi padatan (CW) merepresentasikan perbandingan antara massa padatan terhadap massa total larutan, yang mencakup massa pelarut dan massa padatan, sebagaimana dirumuskan dalam persamaan berikut [23]:

$$CW = \frac{M_{solid}}{M_{pelarut} + M_{solid}} \times 100\% \quad (1)$$

Dalam penerapan persamaan Darcy-Weisbach, selisih tekanan antara ujung masuk (*inlet*) dan keluar (*outlet*) pipa dapat ditentukan melalui rumus berikut [24]:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (2)$$

Dimana, P_{in} merupakan tekanan fluida pada sisi masuk, dan P_{out} adalah tekanan pada sisi keluar. Koefisien gesekan akibat aliran fluida dapat ditentukan melalui modifikasi persamaan Darcy-Weisbach [25].

$$f = \frac{2}{\rho v^2} \times \frac{D}{L} \times \Delta P \quad (3)$$

Dalam hal ini, ρ menyatakan massa jenis fluida (Kg/m^3), v adalah kecepatan aliran (m/s), D merupakan diameter dalam pipa (m), dan L adalah panjang pipa (m). Sementara itu, untuk menghitung tingkat pengurangan hambatan pada pipa spiral dibandingkan dengan pipa lurus (pipa bulat), dapat digunakan rumus yang dikembangkan oleh [26], [27].

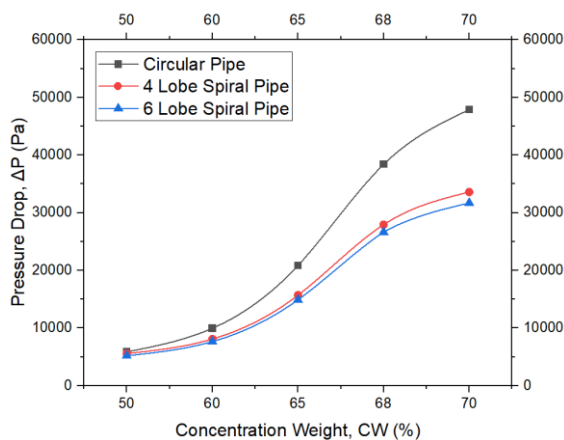
$$DR = \left| \frac{f_{PB} - f_{PS}}{f_{PB}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

Dalam persamaan tersebut, DR menggambarkan nilai *drag reduction* atau pengurangan hambatan, f_{PB} mengacu pada koefisien gesekan pipa bulat, dan f_{PS} adalah koefisien gesekan pada pipa spiral.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Penurunan Tekanan

Nilai penurunan tekanan diperoleh melalui perhitungan menggunakan Persamaan (2). Pada Gambar 5 dapat diamati bahwa geometri pipa spiral dengan konfigurasi 6 *lobe* menghasilkan nilai penurunan tekanan paling rendah dibandingkan dengan variasi geometri lainnya. Secara keseluruhan, nilai penurunan tekanan memperlihatkan pola peningkatan seiring dengan bertambahnya konsentrasi padatan. Namun, peningkatan jumlah *lobe* pada geometri pipa spiral berkontribusi terhadap penurunan nilai penurunan tekanan.



Gambar 5. Perbandingan nilai penurunan tekanan terhadap konsentrasi padatan di setiap variasi geometri pipa

Berdasarkan gambar 5, Pada variasi pipa spiral 6 *lobe*, tercatat nilai penurunan tekanan masing-masing sebesar 5189.217 Pa, 7662.389 Pa, 14912.682 Pa, 26652.310 Pa, dan 31693.792 Pa pada konsentrasi padatan 50% hingga 70%. Sementara itu, konfigurasi pipa bulat menunjukkan nilai penurunan tekanan tertinggi, yaitu sebesar 5873.282 Pa, 9957.948 Pa, 20856.057 Pa, 38389.913 Pa, dan 47859.078 Pa pada konsentrasi padatan yang sama. Peningkatan konsentrasi padatan berimplikasi pada meningkatnya kerugian tekanan aliran [28]. Selisih performa antara 4 lobus dan 6 lobus makin nyata pada rentang konsentrasi padatan 65 %–70 %, dengan spiral 6 lobus tercatat lebih optimal dalam penurunan tekanan dibandingkan 4 lobus, fenomena peningkatan tekanan ini disebabkan oleh adanya *friction* antara partikel-partikel padatan di dalam fluida, serta interaksi antara fluida kerja dengan permukaan bagian dalam dinding pipa. Struktur spiral dengan lobus tambahan dapat memecah lapisan batas (*boundary layer*), sehingga mengurangi gesekan pada dinding.

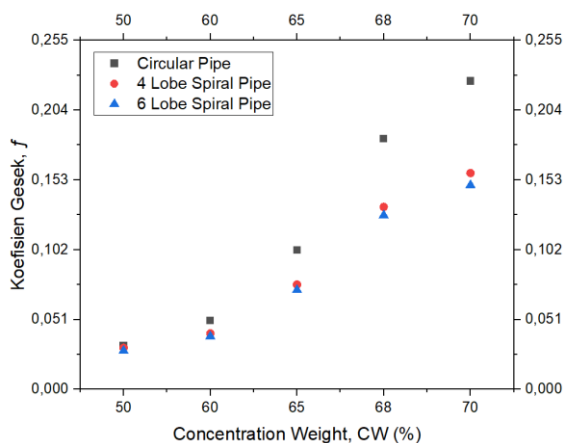
Pada aliran slurry, pipa spiral 6-lobus menunjukkan penurunan tekanan lebih rendah daripada konfigurasi 4-lobus maupun pipa bulat. Fenomena ini terkait dengan aliran sekunder dan pengadukan yang ditimbulkan oleh kontur spiral. Geometri lobus menciptakan gerakan pusaran (*swirl*) sehingga timbul gaya sentrifugal yang mengangkat partikel-partikel padat dari dasar pipa ke arah radial dan aksial [14]. Dengan lebih banyak lobus, intensitas pusaran menjadi lebih merata, sehingga distribusi kecepatan dalam aliran menjadi homogen dan mengurangi daerah berkecepatan rendah di dekat dinding. Hal ini sejalan dengan prinsip sentrifugal pada aliran spiral yang secara efektif memindahkan partikel dari dinding ke aliran pusat, menghambat pengendapan dan menurunkan resistensi total aliran [14], [29].

3.2 Koefisien Gesek

Perhitungan koefisien gesekan akibat aliran fluida dilakukan dengan memodifikasi Persamaan Darcy-Weisbach.

Seluruh nilai koefisien gesek pada berbagai variasi geometri pipa dan rasio konsentrasi padatan dihitung menggunakan Persamaan (3), dengan hasil yang ditampilkan pada Gambar 6.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa koefisien gesek f meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi padatan dari 50 % hingga 70 %, yang disebabkan oleh penyempitan ruang alir sehingga mempercepat laju aliran fluida dan memperbesar kehilangan tekanan ΔP sesuai dengan persamaan Darcy–Weisbach. Massa jenis fluida pada slurry disetiap konsentrasi padatan diperoleh melalui pendekatan linier pencampuran dua fase (*solid-liquid*) berdasarkan fraksi padatan. Semakin tinggi konsentrasi padatan maka menyebabkan kenaikan massa jenis total slurry.



Gambar 6. Perbandingan nilai koefisien gesek (f) terhadap konsentrasi padatan di setiap variasi geometri pipa

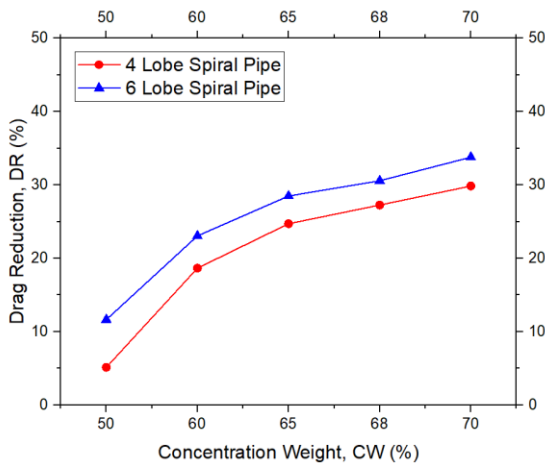
Berdasarkan Gambar 6, pada konsentrasi padatan 50 %, nilai koefisien gesek untuk pipa bulat tercatat sebesar 0.03195, sedangkan untuk spiral 4 lobus dan 6 lobus masing-masing sebesar 0.03031 dan 0.02823. Pada konsentrasi ini, spiral 6-lobus mampu mengurangi nilai f dibandingkan pipa bulat. Efek ini semakin nyata pada konsentrasi padatan 70 %, di mana f pada pipa bulat meningkat menjadi 0.22527, sementara spiral 4 lobus hanya 0.15803 dan spiral 6 lobus sebesar 0.14918. Perbandingan antara pipa bulat dengan pipa spiral (4 lobus dan 6 lobus), nilai f pada pipa konfigurasi 6 lobus lebih rendah. Geometri

spiral memicu terbentuknya aliran berputar (*swirl flow*), yang berkontribusi terhadap pemerataan distribusi partikel dan mengurangi risiko pengendapan [14]. Hal ini diakibatkan oleh terbentuknya aliran sekunder dan vorteks skala mikro akibat kontur spiral lobus, yang secara efektif menipiskan dan meratakan lapisan batas di sepanjang dinding pipa sehingga mengurangi gesekan total meski kecepatan aliran tetap konstan.

Nilai koefisien gesek (f) dalam aliran slurry sangat dipengaruhi oleh sifat viskositas campuran dan kepadatan total slurry. Seiring meningkatnya konsentrasi padatan, viskositas efektif campuran bertambah tajam karena frekuensi tumbukan antar partikel meningkat, sehingga koefisien gesek juga meningkat [30]. Selain itu, densitas campuran (*slurry*) meningkat secara proporsional dengan fraksi padatan, berdasarkan pencampuran linear komponen padat dan cair. Kenaikan densitas dan viskositas ini meningkatkan laju gesekan dasar (*shear*) antara fluida dan dinding. Dengan demikian, wilayah aliran dengan gesekan tinggi menjadi lebih kecil, meskipun kecepatan debit dijaga sama. Hasilnya, pipa 6-lobus menunjukkan nilai f lebih rendah dibanding pipa 4-lobus atau bulat pada konsentrasi padatan sama, sejalan pengamatan bahwa koefisien gesek menurun ketika distribusi partikel merata [14], [30].

3.3 Pengurangan Hambatan

Koefisien gesek memegang peranan krusial dalam menentukan besarnya pengurangan hambatan aliran di dalam pipa. Nilai pengurangan hambatan diperoleh melalui perhitungan menggunakan Persamaan (4). Peningkatan pengurangan hambatan berkorelasi kuat dengan parameter aliran lain, khususnya turunnya koefisien gesek f dan penurunan tekanan ΔP .



Gambar 7. Perbandingan nilai pengurangan hambatan (DR) dengan variasi konsentrasi padatan pada pipa spiral terhadap pipa bulat.

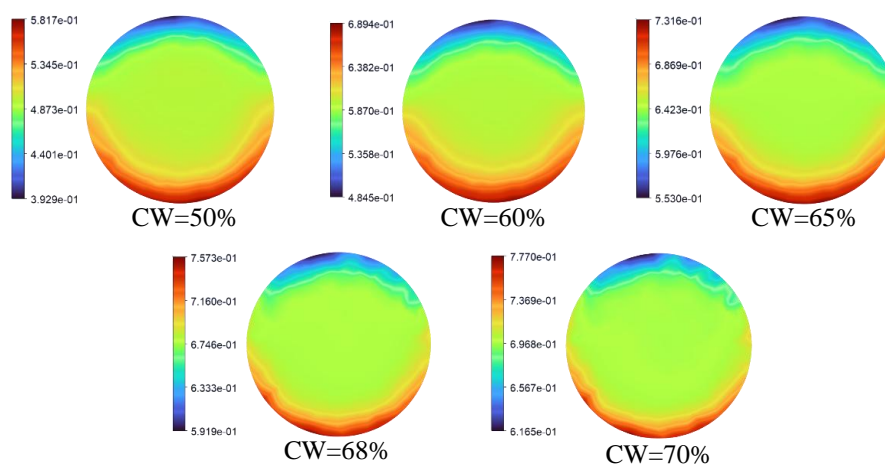
Berdasarkan Gambar 7, pada konsentrasi padatan 70 % koefisien gesek turun dari 0.22527 (pipa bulat) menjadi 0.15803 (4 lobus) dan 0.14918 (6 lobus), selaras dengan DR 29.85 % dan 33.78 %. Demikian pula, ΔP berkurang dari 47859.078 Pa (pipa bulat) menjadi 33574.395 Pa (4 lobus) dan 31693.792 Pa (6 lobus). Hubungan ini menunjukkan bahwa setiap penurunan f dan ΔP secara proporsional mengurangi hambatan. Selain itu, aliran pusaran dalam pipa spiral berperan krusial dalam memperbaiki pencampuran antara partikel padat dan fluida pembawa [11]. Fenomena ini menghasilkan penurunan hambatan yang optimal, khususnya ketika konsentrasi

Penurunan tekanan ΔP dan penurunan f secara proporsional mengurangi hambatan aliran [31]. Artinya, setiap konsep atau desain yang menurunkan ΔP atau f akan menghemat energi pompa (SEC). Karena hambatan aliran (dan konsumsi energi pompa) sangat bergantung pada gesekan dasar, penurunan nilai f berkontribusi langsung terhadap efisiensi aliran slurry [31].

3.4 Distribusi Fraksi Volume

Dalam analisis aliran slurry, fraksi volume merupakan parameter krusial yang sulit diukur secara langsung melalui eksperimen, dengan metode simulasi numerik kerap dimanfaatkan untuk menentukan fraksi volume pada titik-titik tertentu di penampang pipa untuk efisiensi waktu dan biaya komputasi yang lebih rendah [20].

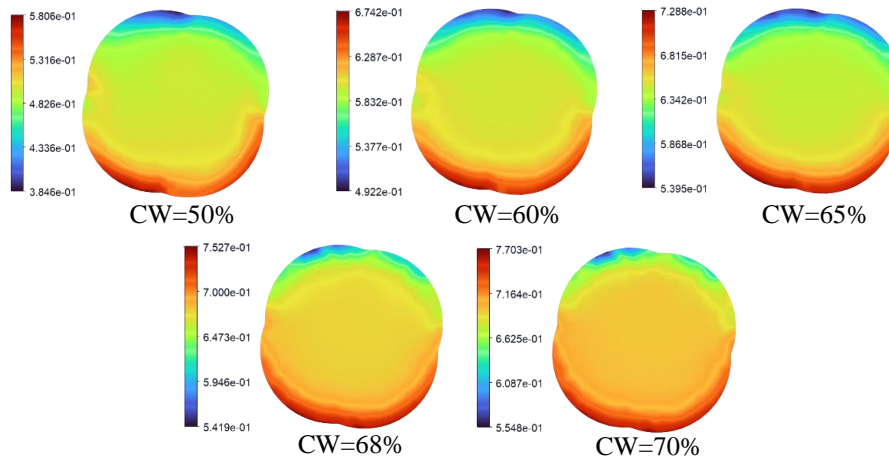
Berdasarkan Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai fraksi volume di outlet meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi padatan pada ketiga geometri pipa, hal ini merupakan pengaruh langsung dari sifat fraksi volume yang berbanding lurus dengan proporsi massa padatan dalam aliran. Semakin tinggi konsentrasi padatan, semakin besar pula jumlah partikel yang tersuspensi dalam setiap unit volume fluida. Dengan ukuran partikel *fly ash* yang



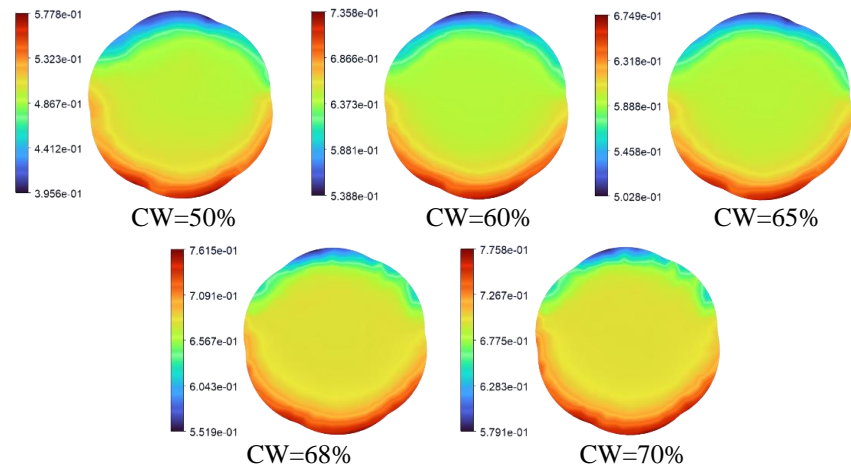
Gambar 8. Distribusi fraksi volume pada pipa bulat

partikel padat mencapai tingkat yang tinggi.

seragam tetapi jumlahnya meningkat pada



Gambar 9. Distribusi fraksi volume pada pipa spiral 4 lobus



Gambar 10. Distribusi fraksi volume pada pipa spiral 6 lobus

konsentrasi padatan tinggi, gaya gravitasi bekerja lebih signifikan menurunkan partikel ke dasar pipa, sehingga zona fraksi tertinggi selalu terletak di bagian bawah saluran.

Fenomena ini semakin diperkuat pada geometri spiral, di mana pola *swirl flow* membantu menyebarkan partikel secara lebih merata ke seluruh penampang tetapi tidak sepenuhnya meniadakan kecenderungan sedimentasi. Oleh karena itu, meski pipa spiral multi-lobus meminimalkan sedimentasi serta perbedaan nilai fraksi antara titik minimum dan maksimum, peningkatan konsentrasi padatan tetap memicu penguatan akumulasi padatan di lapisan dasar, sehingga efek kenaikan konsentrasi padatan menjadi semakin nyata pada setiap fraksi volume.

4. Kesimpulan

Hasi penelitian menunjukkan bahwa perubahan geometri saluran memegang peranan krusial dalam memodulasi karakteristik aliran *fly ash slurry*, khususnya dalam aspek penurunan tekanan, koefisien gesekan, pengurangan hambatan, dan distribusi fraksi volume. Ketiga geometri yang dikaji pipa bulat, pipa spiral 4 lobus, dan pipa spiral 6 lobus. Konfigurasi pipa spiral 6 lobus menunjukkan pengurangan hambatan yang meningkat dari 11.64% pada konsentrasi padatan 50% menjadi 33.78% pada konsentrasi padatan 70%. Pada konsentrasi padatan tertinggi 70% penurunan tekanan dari 47859.078 Pa pada pipa bulat menjadi 31693.792 Pa pada pipa spiral 6 lobus, sementara koefisien gesek berkurang dari 0.22527 menjadi 0.14918. Peningkatan rasio konsentrasi padatan

cenderung memacu kenaikan kerugian tekanan, intensitas peningkatan tersebut relatif teredam dalam geometri saluran spiral, yang menandakan efektivitas lobus tambahan dalam mereduksi interaksi gesek dan menstabilkan profil aliran. Distribusi Fraksi volume pada outlet meningkat seiring kenaikan konsentrasi padatan karena proporsional terhadap jumlah partikel dalam sistem. Sehingga, modifikasi desain dengan tambahan lobus menjadi solusi efektif dalam meminimalisir pengendapan dan meningkatkan efisiensi energi dalam sistem perpipaan *slurry* berkonsentrasi tinggi.

Referensi

- [1] D. A. Maharani, E. Naryono, and A. Eko, "PERHITUNGAN EFISIENSI PADA BOILER di PT. PLTU TANJUNG AWAR-AWAR," *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 7, no. 2, pp. 414–420, 2023, doi: 10.33795/distilat.v7i2.232.
- [2] B. Nanda and S. Rout, "Properties of concrete containing fly ash and bottom ash mixture as fine aggregate," *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 809–819, 2021, doi: 10.1080/19397038.2021.1920641.
- [3] Y. K. Baghel and V. K. Patel, "CFD Modeling for the Influence of Fly Ash Particle Size on the Different Properties of High Concentrated Slurry Transportation in Horizontal Pipe," *TRENDS Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 1–14, 2023, doi: doi.org/10.48048/tis.2023.6431.
- [4] T. Joshi, A. Gupta, O. Parkash, R. K. B. Gallegos, N. L. Oo, and G. Krishan, "Mathematical Formulations for Predicting Pressure Drop in Solid – Liquid Slurry Flow through a Straight Pipe Using Computational Modeling," *Mathematics*, vol. 12, 2024, doi: doi.org/10.3390/math12182879.
- [5] P. Kumar, N. Kumar, and R. Krishna, "Near-wall flow characteristics in pipe bend dense slurries : Optimizing the maximum sliding frictional power," *Int. J. Sediment Res.*, vol. 39, no. 3, pp. 435–463, 2024, doi: 10.1016/j.ijsrc.2024.04.002.
- [6] G. V. Messa *et al.*, "Computational Fluid Dynamics Modelling of Liquid – Solid Slurry Flows in Pipelines : State-of-the-Art and Future Perspectives," *Processes*, vol. 9, 2021, doi: doi.org/10.3390/pr9091566.
- [7] T. Joshi, O. Parkash, and G. Krishan, "CFD modeling for slurry flow through a horizontal pipe bend at different Prandtl number," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 56, pp. 23731–23750, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.201.
- [8] T. Li, X. Chen, Z. Liu, W. Jiang, and H. Min, "Study on the suspending mechanism of gangue particle in coal-based solid waste slurry," *Alexandria Eng. J.*, vol. 107, no. April, pp. 583–590, 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.07.096.
- [9] U. Behera, S. K. Das, D. P. Mishra, P. K. Parhi, and D. Das, "Sustainable Transportation , Leaching , Stabilization , and Disposal of Fly Ash Using a Mixture of Natural Surfactant and Sodium Silicate," *ACS Omega*, vol. 6, no. 35, 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c03241.
- [10] T. Joshi, O. Parkash, A. Ananda, and G. Krishan, "Results in Engineering Numerical investigation of Bi-model slurry transportation in a straight pipe," *Results Eng.*, vol. 17, no. December 2022, p. 100858, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100858.
- [11] F. A. Rayhan and Yanuar, "Rheological behavior and drag reduction characteristics of ice slurry flow in spiral pipes," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 20, no. August, p. 100734, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100734.
- [12] Yanuar, S. Mau, Gunawan, and M. Fachreza, "Rheological Characteristics of Non-Newtonian Mud Slurry," *Recent Prog. Mech.*

- Infrastruct. Ind. Eng. Proc. Int. Symp. Adv. Mech. Eng. Qual. Res. 2019*, vol. 020001, no. May 2020, 2020, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0001003>.
- [13] C. Sun, Z. Xu, Y. Xiao, G. Cui, and X. Zhang, “Analyze of pipeline transport characteristics and optimization method of structural parameters in slurry shield circulation system with spiral structure,” *Powder Technol.*, vol. 444, no. June, p. 120001, 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.120001.
- [14] H. Shi, J. Yuan, and Y. Li, “The Impact of Swirls on Slurry Flows in Horizontal Pipelines,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9 (11), 2021, doi: doi.org/10.3390/jmse9111201.
- [15] C. Kim and C. Han, “Numerical Simulation of Hydraulic Transport of Sand-Water Mixtures in Pipelines,” *Open J. Fluid Dyn.*, vol. 03, no. 04, pp. 266–270, 2013, doi: 10.4236/ojfd.2013.34033.
- [16] T. Nabil, I. El-Sawaf, and K. El-Nahhas, “Computational Fluid Dynamics Simulation of the Solid-Liquid Slurry Flow in a Pipeline,” *IWTC 17 Istanbul*, no. November, pp. 5–7, 2013.
- [17] M. K. Gopaliya and D. R. Kaushal, “Analysis of effect of grain size on various parameters of slurry flow through pipeline using CFD,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 4, pp. 369–384, 2015, doi: 10.1080/02726351.2014.971988.
- [18] T. Joshi, O. Parkash, R. K. B. Gallegos, and G. Krishan, “Computational investigation of transportation and thermal characteristics in a bi-modal slurry flow through a horizontally placed pipe bend,” *Powder Technol.*, vol. 442, no. December 2023, p. 119879, 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.119879.
- [19] T. Joshi, O. Parkash, A. A. Murthy, and G. Krishan, “Numerical investigation of Bi-model slurry transportation in a straight pipe,” *Results Eng.*, vol. 17, no. September 2022, p. 100858, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100858.
- [20] B. B. Nayak and D. Chatterjee, “Numerical investigation of convective heat transfer in pipeline flow of multi-sized mono dispersed fly ash-water slurry,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 108, pp. 1802–1818, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.057.
- [21] S. Chandel, V. Seshadri, and S. N. Singh, “Effect of additive on pressure drop and rheological characteristics of fly ash slurry at high concentration,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 271–284, 2009, doi: 10.1080/02726350902922036.
- [22] Gunawan, Yanuar, M. R. Setiawan, and A. Arianda, “Numerical analysis of calcium carbonate (CaCO₃) suspension flow in pentagon spiral pipe with pitch variation,” *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 67, no. 2, pp. 40–46, 2020.
- [23] Ridwan, “Karakteristik Aliran Lumpur Dalam Pipa Spiral,” Universitas Indonesia, 2012. [Online]. Available: <https://lib.ui.ac.id/detail?id=20305816&lokasi=lokal>
- [24] K. M. Vafaeva *et al.*, “Experimental Investigation of Liquid Pressure in a Straight Circular Cross-Section Pipeline,” *E3S Web Conf.*, vol. 581, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202458101048.
- [25] N. Hafsa, S. Rushd, H. Alzoubi, and M. Al-Faiad, “Accurate prediction of pressure losses using machine learning for the pipeline transportation of emulsions,” *Heliyon*, vol. 10, no. 1, p. e23591, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23591.
- [26] K. Watanabe and H. Udagawa, “Drag reduction of non-Newtonian fluids in

- a circular pipe with a highly water-repellent wall,” *AICHE J.*, vol. 47, no. 2, pp. 256–262, 2001, doi: 10.1002/aic.690470204.
- [27] Yanuar, Ridwan, Budiarto, and R. A. Koestoer, “Hydraulics conveyances of mud slurry by a spiral pipe,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 7, pp. 1835–1839, 2009, doi: 10.1007/s12206-009-0611-1.
- [28] R. Ridwan, A. Bondan, and I. Setyawan, “Pengaruh Bentuk Saluran Terhadap Kerugian Tekanan pada Aliran Fluida Lumpur,” *AME (Aplikasi Mek. dan Energi) J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2, pp. 125–129, 2024, doi: 10.32832/ame.v10i2.1084.
- [29] D. Jenkins, “Slurry behaviour in separation devices. MISG 1992,” 2015. [Online]. Available: <https://miis.maths.ox.ac.uk/458/index.html>
- [30] C. Zeng, A. Xiao, K. Liu, H. Ai, Z. Chen, and P. Zhang, “Experimental Study on the Influence of Slurry Concentration and Standing Time on the Friction Characteristics of a Steel Pipe-Soil Interface,” *Appl. Sci.*, vol. 12 (7), 2022.
- [31] R. K. Rathore, N. Kumar, and P. K. Gupta, “Enhanced slurry transport efficiency and energy reduction through swirl-inducing pipes,” *Powder Technol.*, vol. 450, no. October 2024, p. 120441, 2025, doi: 10.1016/j.powtec.2024.120441.