ANALISIS PENGARUH VARIASI DIAMETER PIPA DAN POSISI TAKE-IN PROBE TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PADA SISTEM PERPIPAAN AUTOMATIC SAMPLER CRUDE OIL MENGGUNAKAN METODE CFD

Hermawan Saputra[1], Delima Yanti Sari[2], Randi Purnama Putra[3], Fitrah Qalbina[4]

[1,2,3,4]*Universitas Negeri Padang*
E-mail : hermawansaputra2704@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of pipe diameter variation and *take-in probe* position on fluid flow characteristics in a crude oil *automatic sampler* piping system using the *Computational Fluid Dynamics* (CFD) method. The *automatic sampler* system plays a critical role in obtaining representative crude oil samples; however, high-viscosity fluids often cause flow instability due to improper piping design and mismatch between pump specifications and operating conditions. This research investigates pipe diameter variations of 1 inch, 2 inches, and 3 inches, as well as pipe inclination angles of 45° and 90°. Numerical simulations were conducted using ANSYS Fluent 2025 R1 with three-dimensional modeling and boundary conditions based on actual field operating data. The analyzed parameters include velocity distribution, pressure drop, head loss, wall shear stress, and Reynolds number. The simulation results indicate that smaller pipe diameters generate higher pressure drop and wall shear stress due to increased flow velocity, while larger diameters result in lower energy losses but may create low-velocity regions that reduce flow homogeneity. Pipes with a 90° inclination exhibit greater energy loss compared to those with a 45° inclination. All flow variations remain within the laminar flow regime due to the high viscosity of the crude oil. Overall, a medium-to-large pipe diameter combined with a 45° inclination is considered the most optimal configuration for maintaining flow stability and improving crude oil sampling quality.

Keywords : *Automatic Sampler, Computational Fluid Dynamics (CFD), Pipe Diameter, Pressure Drop, Wall Shear Stress, Crude Oil, Take-In Probe, Piping System*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi diameter pipa dan posisi *take-in probe* terhadap karakteristik aliran fluida pada sistem perpipaan *automatic sampler* crude oil menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Sistem *automatic sampler* memiliki peran penting dalam menghasilkan sampel crude oil yang representatif, namun pada fluida dengan viskositas tinggi sering terjadi gangguan kestabilan aliran akibat desain perpipaan dan ketidaksesuaian spesifikasi pompa. Variasi diameter pipa yang diteliti adalah 1 inci, 2 inci, dan 3 inci, serta variasi sudut kemiringan pipa 45° dan 90°. Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent 2025 R1 dengan pemodelan tiga dimensi dan kondisi batas yang disesuaikan dengan data operasi lapangan. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi kecepatan, *pressure drop*, *head loss*, *wall shear stress*, dan bilangan Reynolds. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pipa berdiameter kecil menghasilkan *pressure drop* dan *wall shear stress* yang lebih tinggi akibat peningkatan kecepatan aliran, sedangkan pipa berdiameter besar menghasilkan kehilangan energi yang lebih rendah namun berpotensi membentuk zona aliran lambat. Sudut kemiringan 90° menyebabkan kehilangan energi lebih besar dibandingkan sudut 45°. Seluruh variasi aliran berada pada rejim laminar akibat viskositas fluida yang tinggi. Berdasarkan hasil tersebut, konfigurasi pipa berdiameter menengah hingga besar dengan sudut kemiringan 45° dinilai paling optimal dalam menjaga kestabilan aliran dan meningkatkan kualitas pengambilan sampel crude oil.

Kata Kunci : *Automatic Sampler, Computational Fluid Dynamics (CFD), Diameter Pipa, Pressure Drop, Wall Shear Stress, Crude Oil, Take-In Probe, Sistem Perpipaan*

PENDAHULUAN

Dalam industri minyak dan gas bumi, proses pengambilan sampel (*sampling*) minyak mentah (*crude oil*) merupakan tahapan penting untuk menjamin kualitas dan homogenitas *fluida* sebelum dilakukan proses pengolahan atau penjualan. Pengambilan sampel yang *representatif* sangat diperlukan agar data karakteristik *fluida* yang diperoleh mencerminkan kondisi sebenarnya dari aliran di dalam pipa. Untuk mencapai tujuan tersebut, digunakan sistem *automatic sampler*, yaitu sistem otomatis yang bekerja pada jalur perpipaan untuk mengambil sebagian kecil *fluida* secara periodik sesuai standar API MPMS *Chapter* 8.2 (API, 2003). Keandalan sistem *automatic sampler* bergantung pada stabilitas aliran *fluida,* desain sistem perpipaan, serta posisi *take-in probe* sebagai titik pengambilan sampel.

Permasalahan yang sering terjadi pada sistem *automatic sampler* adalah ketidak sesuaian antara *spesifikasi* pompa dan desain sistem perpipaan, yang menyebabkan gangguan pada kestabilan aliran. Kondisi ini juga dialami pada sistem yang diteliti, di mana pompa mengalami penurunan performa (tekor) saat beroperasi. Pompa yang terpasang saat ini memiliki kapasitas 6,15 m^3/jam dengan daya serap (*power absorbed*) sebesar 4,41 kW. Pompa tersebut bekerja pada *fluida* dengan *viskositas* tinggi, yaitu sekitar 772 cSt, yang menyebabkan peningkatan *pressure drop* dan beban kerja pompa. Kondisi ini berpotensi mengganggu laju aliran (*flow rate*) dan distribusi aliran (*flow distribution*) di dalam pipa, sehingga memengaruhi homogenitas *fluida* yang masuk ke sistem pengambilan sampel (Cengel & Cimbala, 2018).

Salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap karakteristik aliran *fluida* dalam sistem perpipaan adalah *geometri* pipa, khususnya diameter. Variasi diameter pipa akan memengaruhi kecepatan aliran, bilangan *Reynolds*, serta pola *turbulensi* yang terbentuk. Pipa dengan diameter kecil menghasilkan kecepatan aliran lebih tinggi, namun berisiko menimbulkan kerugian tekanan yang besar, sementara pipa berdiameter besar menurunkan kecepatan aliran dan memperbesar potensi *dead zone* di dalam pipa (*White*, 2011). Oleh karena itu, penelitian ini memvariasikan tiga diameter pipa, yaitu 1 inci, 2 inci, dan 3 inci, untuk menganalisis bagaimana *geometri* pipa memengaruhi *flow rate* dan *flow distribution*, serta membandingkan hasilnya dengan performa aktual pompa yang digunakan.

Selain diameter pipa, desain dan posisi *take-in probe* juga memiliki peran penting dalam menghasilkan sampel yang *representatif*. *Probe* yang dipasang terlalu dekat dengan dinding pipa cenderung hanya mengambil sebagian kecil *fluida* dengan komposisi tertentu, bukan campuran homogen dari seluruh aliran. Standar API MPMS 8.2 merekomendasikan agar *probe* ditempatkan pada area aliran *turbulen* penuh untuk memastikan sampel yang diambil mencerminkan keseluruhan aliran (Hagen & Brewer, 1983; Maulana *et al*., 2024). Oleh karena itu, penelitian ini juga melakukan modifikasi desain dan *orientasi take-in probe*, dengan membandingkan posisi atas dan samping untuk mengetahui pengaruhnya terhadap distribusi aliran dan homogenitas *fluida.*

Untuk menganalisis fenomena aliran tersebut secara menyeluruh, digunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD memungkinkan simulasi *numerik* terhadap perilaku *fluida* di dalam pipa, termasuk distribusi tekanan, kecepatan, dan pola *turbulensi*, tanpa harus melakukan uji fisik yang memerlukan biaya besar (Versteeg & Malalasekera, 2007). Melalui perangkat lunak ANSYS Fluent, karakteristik aliran dapat diamati secara visual dan kuantitatif pada berbagai konfigurasi pipa dan posisi *probe*. Analisis CFD juga memungkinkan evaluasi performa sistem terhadap parameter operasi pompa, sehingga hasil simulasi dapat

dibandingkan langsung dengan spesifikasi aktual pompa untuk mengetahui kesesuaian desain sistem terhadap kebutuhan aliran.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan sistem *automatic sampler*pada industri migas. Melalui analisis variasi diameter pipa dan posisi *take-in probe* menggunakan metode CFD, diharapkan diperoleh konfigurasi sistem perpipaan yang optimal dalam menjaga kestabilan *flow rate* dan *flow distribution* sesuai kapasitas pompa. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi acuan teknis dalam perancangan dan optimasi sistem sampling *fluida* ber-viskositas tinggi agar pengambilan sampel menjadi lebih representatif, efisien, dan sesuai dengan standar internasional yang berlaku.

Masalah utama dalam penelitian ini berkaitan dengan desain sistem perpipaan automatic sampler yang berpotensi menyebabkan ketidakhomogenan aliran, sehingga memengaruhi flow rate, distribusi aliran, dan kualitas sampel. Variasi diameter pipa (1, 2, dan 3 inch) berdampak signifikan terhadap karakteristik aliran fluida, seperti kecepatan, bilangan Reynolds, distribusi tekanan, serta potensi terbentuknya dead zone. Selain itu, spesifikasi pompa yang digunakan saat ini belum sepenuhnya sesuai untuk fluida dengan viskositas tinggi (±772 cSt) dan konfigurasi perpipaan, yang menyebabkan peningkatan pressure drop, fluktuasi laju aliran, penurunan performa pompa, serta gangguan kestabilan aliran.

Penelitian ini dibatasi pada evaluasi desain sistem perpipaan dan kesesuaian spesifikasi pompa pada automatic sampler, dengan fokus pada pengaruh variasi diameter pipa serta perubahan posisi take-in probe dari atas ke samping. Rumusan masalah menitikberatkan pada pengaruh variasi diameter dan posisi probe terhadap karakteristik aliran serta pemanfaatan simulasi CFD untuk menentukan desain yang optimal. Tujuan penelitian adalah menganalisis distribusi kecepatan, tekanan, dan pola aliran, serta menentukan konfigurasi perpipaan dan posisi probe terbaik menggunakan ANSYS Fluent. Hasil penelitian diharapkan memberi manfaat teknis sebagai solusi desain, menjadi referensi bagi perusahaan, kontribusi akademik, dan dasar bagi penelitian lanjutan terkait pengembangan teknologi automatic sampler.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian numerik yang menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan bantuan perangkat lunak ANSYS Fluent 2025 R1 Student Version. Metode CFD digunakan untuk menganalisis karakteristik aliran fluida crude oil dalam sistem perpipaan automatic sampler secara tiga dimensi, meliputi distribusi kecepatan, tekanan, dan homogenitas aliran. Simulasi numerik dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku aliran fluida secara detail dan efisien tanpa memerlukan pengujian eksperimental langsung, sehingga menghemat waktu dan biaya penelitian.

Penelitian dilaksanakan di Pertamina Gas Operasional Rokan Area, dengan data teknis diperoleh langsung dari fasilitas tersebut. Waktu pelaksanaan penelitian berlangsung selama tiga bulan, yaitu dari September hingga November 2025. Instrumen utama yang digunakan adalah perangkat lunak CFD dengan input berupa data sifat fisik fluida, geometri sistem perpipaan, serta kondisi batas seperti laju aliran, tekanan inlet–outlet, dan temperatur operasi. Proses simulasi didukung oleh perangkat komputer dengan spesifikasi yang memadai untuk mempercepat komputasi dan pengolahan data numerik.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi pustaka, pengumpulan data teknis perusahaan, penentuan boundary condition, serta validasi numerik. Studi pustaka berfungsi

sebagai dasar teoritis, sedangkan data teknis digunakan sebagai input utama simulasi CFD. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan persamaan analitik dan literatur terkait guna memastikan keakuratan dan reliabilitas hasil penelitian. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan data, pemodelan CFD, simulasi numerik, validasi hasil, hingga analisis kinerja automatic sampler.

Analisis data dilakukan secara deskriptif dan komparatif berdasarkan hasil simulasi CFD yang telah divalidasi. Data dianalisis untuk menilai pengaruh variasi diameter pipa dan posisi take-in probe terhadap karakteristik aliran fluida, serta mengevaluasi kinerja sistem automatic sampler secara keseluruhan. Hasil analisis digunakan untuk menarik kesimpulan sesuai tujuan penelitian dan memberikan rekomendasi teknis guna meningkatkan desain, keandalan, dan akurasi sistem pengambilan sampel crude oil.

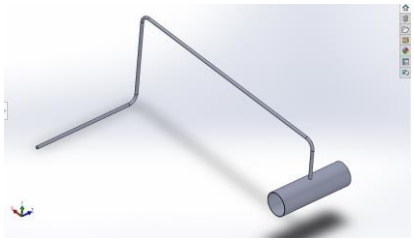
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil simulasi numerik yang diimplementasikan melalui perangkat lunak *ANSYS Fluent* 2025 R2, beserta analisis komprehensif terhadap karakteristik aliran pada sistem perpipaan. Pembahasan difokuskan pada evaluasi *pressure drop* (ΔP) pada setiap variasi diameter, *head loss* (H) terhadap *flow rate* (Q), distribusi profil kecepatan serta *shear stress* dinding, dan klasifikasi rejim aliran berdasarkan nilai *Reynolds*. Kajian dilakukan secara sistematis untuk menilai pengaruh perubahan diameter pipa (1”, 2”, dan 3”) serta kemiringan pipa (45° dan 90°) terhadap fenomena hidrodinamika aliran fluida pada konfigurasi perpipaan yang diteliti.

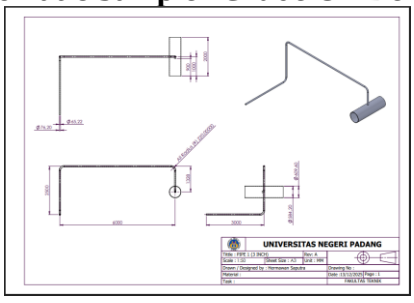
Hasil Penelitian

1. Desain Pipa *Automatic Sampler Crude Oil*

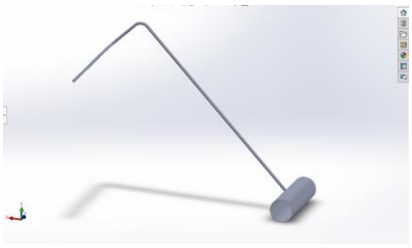
Pada penelitian ini desain Pipa *Automatic Sampler Crude Oil* dibuat mengguanakan software *Solidworks* dengan bentuk dan dimensi yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2



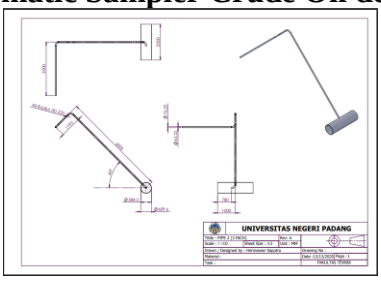
Gambar 1. Pipa Automatic Sampler Crude Oil Dengan Kemiringan 90°



Gambar 2. Dimensi Pipa Automatic Sampler Crude Oil dengan kemiringan 90°



Gambar 3. Pipa Automatic Sampler Crude Oil dengan kemiringan 45°



Gambar 4. Dimensi Pipa Automatic Sampler Crude Oil dengan kemiringan 45°

2. Hasil Simulasi *pressure drop* (ΔP)

Pressure drop (ΔP) merupakan salah satu parameter utama dalam analisis sistem perpipaan karena merepresentasikan kehilangan energi fluida akibat gesekan dengan dinding pipa, perubahan arah aliran, serta efek turbulensi. Pada penelitian ini, nilai pressure drop diperoleh dari selisih tekanan statis rata-rata antara sisi inlet dan outlet pipa.

Pressure drop (ΔP) dihitung menggunakan metode *area-weighted average* pada permukaan inlet dan outlet melalui perangkat lunak ANSYS Fluent. Setelah dilakukan tahap *solution* menggunakan *Ansys Fluent* 2025 R2 pada Pipa *Automatic Sampler Crude Oil*, diperoleh hasil simulasi berupa nilai *pressure drop* terhadap variasi diameter pipa sebesar 1", 2", dan 3" pada pipa dengan kemiringan 45° dan 90° dengan parameter sesuai tabel dibawah.

Tabel 1. Parameter Analisis

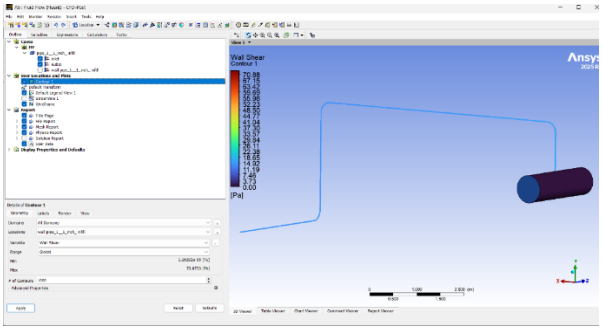
Parameter	Nilai
Aliran pipa utama	30.000 bar\day
Diameter pipa utama	24 inci
Ketebalan pipa utama	12,70 mm
Variasi pipa	1 inci, 2 inci, 3 inci
Ketebalan pipa 1 inci	3,38 mm
Ketebalan pipa 2 inci	3,91 mm
Ketebalan pipa 3 inci	5,49 mm
Density	935 kg/m^3
Pressure pipa utama	14.696 psia
Viskositas	360 cst
Kriteria konvergensi	Residual error < 10^{-4}

3. Analisis *Shear Stress* Dinding

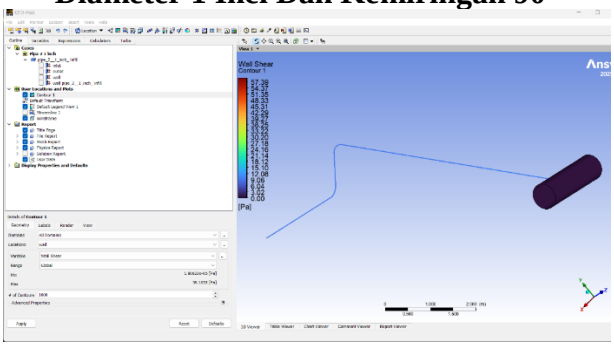
Wall shear stress (τw) merupakan tegangan geser yang timbul pada permukaan dinding pipa akibat interaksi antara fluida yang mengalir dan dinding pipa. Besarnya wall shear stress dipengaruhi oleh viskositas fluida, gradien kecepatan aliran di dekat dinding, serta kondisi geometris pipa. Dalam penelitian ini, wall shear stress dianalisis berdasarkan hasil simulasi

numerik menggunakan ANSYS Fluent untuk mengevaluasi pengaruh variasi diameter pipa dan sudut kemiringan pipa terhadap karakteristik aliran fluida.

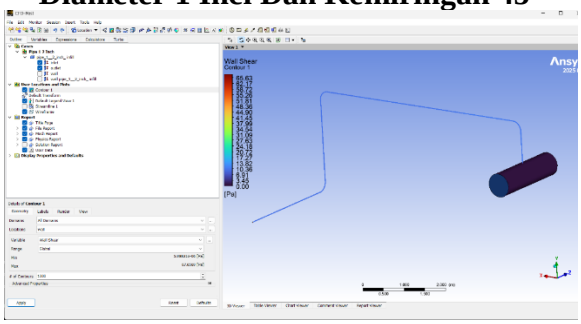
Nilai wall shear stress diperoleh dari hasil *post-processing simulasi* CFD, di mana distribusi tegangan geser pada dinding pipa divisualisasikan dalam bentuk kontur warna. Distribusi tersebut menunjukkan adanya variasi nilai *wall shear stress* sepanjang dinding pipa, terutama pada daerah perubahan arah aliran dan dekat inlet, yang merupakan area dengan gradien kecepatan tertinggi.



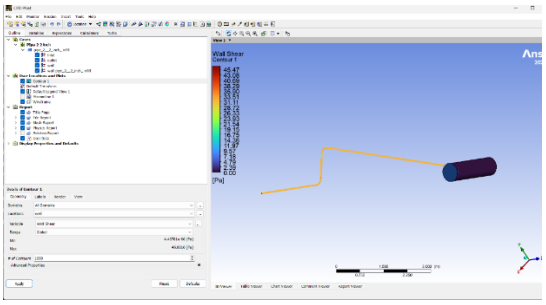
Gambar 5. Wall Shear Stress Pressure Drop Automatic Sampler Crude Oil Dengan Diameter 1 Inci Dan Kemiringan 90°



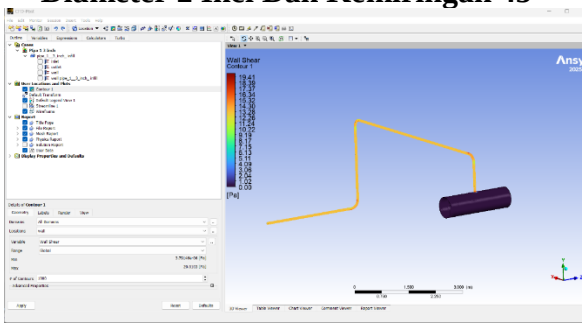
Gambar 6. Wall Shear Stress Pressure Drop Automatic Sampler Crude Oil Dengan Diameter 1 Inci Dan Kemiringan 45°



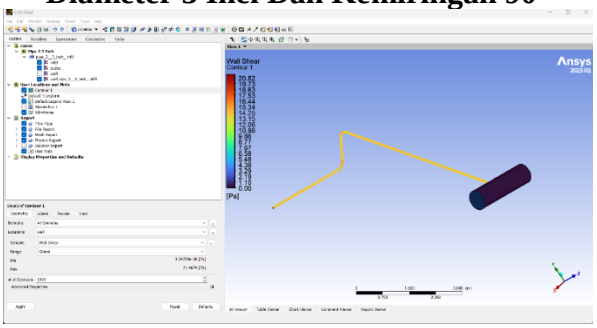
Gambar 7. Wall Shear Stress Pressure Drop Automatic Sampler Crude Oil Dengan Diameter 2 Inci Dan Kemiringan 90°



Gambar 8. Wall Shear Stress Pressure Drop Automatic Sampler Crude Oil Dengan Diameter 2 Inci Dan Kemiringan 45°



Gambar 9. Wall Shear Stress Pressure Drop Automatic Sampler Crude Oil Dengan Diameter 3 Inci Dan Kemiringan 90°



Gambar 10. Wall Shear Stress Pressure Drop Automatic Sampler Crude Oil Dengan Diameter 3 Inci Dan Kemiringan 45°

Hasil analisis menunjukkan bahwa pipa dengan diameter lebih kecil cenderung menghasilkan nilai wall shear stress yang lebih tinggi dibandingkan pipa dengan diameter yang lebih besar. Kondisi ini disebabkan oleh meningkatnya kecepatan aliran pada pipa berdiameter kecil, sehingga gradien kecepatan di dekat dinding pipa menjadi lebih besar. Gradien kecepatan yang tinggi tersebut meningkatkan gaya geser antara fluida dan dinding pipa, yang secara langsung meningkatkan nilai wall shear stress.

Selain diameter pipa, sudut kemiringan pipa juga mempengaruhi distribusi wall shear stress. Pipa dengan sudut 90° menunjukkan nilai wall shear stress yang lebih tinggi pada area belokan dibandingkan pipa dengan sudut 45°. Perubahan arah aliran yang lebih tajam pada sudut 90° menyebabkan gangguan aliran dan pembentukan vorteks, sehingga meningkatkan gradien kecepatan di dekat dinding pipa. Sebaliknya, pada pipa dengan sudut 45°, aliran cenderung lebih halus dan perubahan arah aliran berlangsung secara bertahap, sehingga nilai wall shear stress relatif lebih rendah dan lebih merata.

Tabel 2. Nilai Wall Shear Stress

Diameter Pipa	Sudut Pipa	*Wall Shear Stress* Minimum (Pa)	*Wall Shear Stress* Maksimum (Pa)
1"	90°	3,73	70,88
1"	45°	3,02	57,39
2"	90°	3,45	65,63
2"	45°	2,39	45,47
3"	90°	1,02	19,41
3"	45°	1,10	20,82

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pipa berdiameter kecil menghasilkan nilai wall shear stress maksimum yang lebih tinggi. Pipa 1 inci dengan sudut 90° memiliki wall shear stress maksimum sebesar 70,88 Pa, sedangkan pipa 3 inci dengan sudut 45° hanya sebesar 20,82 Pa. Peningkatan wall shear stress pada pipa kecil disebabkan oleh gradien kecepatan yang lebih besar di dekat dinding pipa.

Sudut kemiringan pipa juga memengaruhi distribusi wall shear stress. Pipa dengan sudut 90° menunjukkan konsentrasi tegangan geser yang lebih tinggi pada area belokan akibat gangguan aliran yang lebih intens. Nilai wall shear stress yang cukup tinggi berperan dalam mencegah terbentuknya endapan crude oil pada dinding pipa, namun nilai yang terlalu tinggi akan meningkatkan kehilangan energi. Oleh karena itu, diperlukan keseimbangan antara nilai wall shear stress dan efisiensi energi dalam perancangan sistem.

Pembahasan

Berdasarkan hasil simulasi CFD menggunakan *ANSYS Fluent*, variasi diameter pipa memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai pressure drop pada sistem perpipaan automatic sampler crude oil. Pipa dengan diameter 1 inci menunjukkan nilai pressure drop tertinggi, sedangkan pipa dengan diameter 3 inci menghasilkan pressure drop terendah, baik pada kemiringan 45° maupun 90°. Fenomena ini terjadi karena pada pipa berdiameter kecil, luas penampang aliran menjadi lebih sempit sehingga kecepatan aliran meningkat. Peningkatan kecepatan aliran tersebut menyebabkan gaya gesek antara fluida dan dinding pipa semakin besar, yang pada akhirnya meningkatkan kehilangan energi aliran dalam bentuk pressure drop. Sebaliknya, pipa dengan diameter lebih besar memiliki luas penampang yang lebih besar sehingga kecepatan aliran menurun dan gaya gesek relatif berkurang.

Selain diameter pipa, sudut kemiringan pipa juga memengaruhi besarnya pressure drop. Pipa dengan sudut kemiringan 90° menunjukkan pressure drop yang lebih besar dibandingkan pipa dengan sudut 45°. Hal ini disebabkan oleh perubahan arah aliran yang lebih tajam pada pipa 90°, yang memicu terbentuknya vorteks dan daerah recirculation sehingga meningkatkan kehilangan energi aliran. Hasil ini sejalan dengan teori mekanika fluida yang menyatakan bahwa kehilangan tekanan dipengaruhi oleh kecepatan aliran, karakteristik fluida, serta geometri sistem perpipaan.

Head loss merupakan representasi kehilangan energi fluida sepanjang sistem perpipaan yang dihitung dari nilai pressure drop hasil simulasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa head loss berbanding lurus dengan pressure drop, di mana pipa dengan diameter lebih kecil menghasilkan nilai head loss yang lebih besar.

Pipa dengan diameter 1 inci menghasilkan head loss tertinggi karena kecepatan aliran yang tinggi meningkatkan gaya gesek fluida terhadap dinding pipa. Sebaliknya, pipa dengan diameter

3 inci menunjukkan nilai head loss yang lebih rendah akibat berkurangnya gaya gesek dan turbulensi aliran.

Pengaruh sudut kemiringan pipa terhadap head loss juga terlihat jelas. Pipa dengan sudut 90° memiliki nilai head loss lebih besar dibandingkan sudut 45°, karena perubahan arah aliran yang lebih tajam meningkatkan gangguan aliran dan turbulensi. Dengan demikian, pemilihan sudut pipa yang lebih landai dapat mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan efisiensi sistem. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi diameter dan sudut pipa sangat menentukan kebutuhan energi pompa dalam sistem automatic sampler crude oil.

Distribusi wall shear stress memberikan gambaran mengenai interaksi antara fluida dan dinding pipa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pipa dengan diameter lebih kecil menghasilkan nilai wall shear stress yang lebih tinggi, terutama pada daerah inlet dan belokan pipa.

Peningkatan wall shear stress pada pipa kecil disebabkan oleh gradien kecepatan yang lebih besar di dekat dinding pipa akibat kecepatan aliran yang tinggi. Pada pipa dengan sudut kemiringan 90°, nilai wall shear stress maksimum cenderung lebih besar dibandingkan pipa dengan sudut 45°, karena perubahan arah aliran yang lebih tajam meningkatkan gangguan aliran di sekitar dinding pipa. Namun demikian, nilai wall shear stress yang terlalu rendah pada pipa berdiameter besar berpotensi menyebabkan terbentuknya zona aliran lambat (*low velocity region*) yang dapat memicu pengendapan fluida berat. Oleh karena itu, diperlukan keseimbangan antara diameter pipa dan nilai wall shear stress agar aliran tetap stabil dan homogen tanpa menimbulkan kehilangan energi yang berlebihan.

Perhitungan bilangan Reynolds menunjukkan bahwa variasi diameter pipa berpengaruh langsung terhadap karakteristik rejim aliran. Pipa dengan diameter kecil cenderung menghasilkan nilai Reynolds yang lebih tinggi karena kecepatan aliran meningkat, sehingga aliran mendekati atau memasuki rejim turbulen. Aliran turbulen memiliki keunggulan dalam menjaga homogenitas fluida, yang sangat penting untuk sistem automatic sampler agar sampel yang diambil bersifat representatif. Namun, aliran turbulen juga menyebabkan peningkatan kehilangan energi, yang tercermin dari nilai pressure drop dan head loss yang lebih besar.

Sebaliknya, pipa dengan diameter lebih besar menghasilkan nilai Reynolds yang lebih rendah dan mendekati rejim transisi atau laminar. Meskipun kehilangan energi lebih kecil, aliran pada kondisi ini berpotensi kurang homogen, sehingga dapat memengaruhi kualitas pengambilan sampel. Pengaruh sudut kemiringan pipa terhadap nilai Reynolds bersifat tidak langsung, namun sudut 90° cenderung meningkatkan turbulensi lokal akibat gangguan aliran, meskipun nilai Reynolds global relatif sama.

Validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan nilai pressure drop dan head loss hasil CFD dengan pendekatan teoritis menggunakan persamaan Darcy–Weisbach untuk aliran laminar di dalam pipa. Persamaan Darcy–Weisbach dinyatakan sebagai:

$$\Delta P = f \cdot (L/D) \cdot (\rho v^2/2)$$

Untuk aliran laminar, faktor gesek (f) ditentukan berdasarkan hubungan $f = 64/Re$. Dengan menggunakan nilai Reynolds, densitas, viskositas, diameter pipa, serta kecepatan aliran yang sama dengan parameter simulasi CFD, diperoleh nilai pressure drop teoritis untuk masing-masing variasi diameter pipa.

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai pressure drop hasil simulasi CFD memiliki selisih relatif kurang dari 10% terhadap hasil perhitungan teoritis. Perbedaan ini masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk simulasi numerik dan disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain asumsi aliran berkembang sempurna pada pendekatan teoritis, pengaruh belokan pipa

yang tidak sepenuhnya terakomodasi dalam persamaan satu dimensi, serta pendekatan numerik dan diskretisasi mesh pada simulasi CFD.

Selain itu, validasi kualitatif juga dilakukan melalui analisis tren hasil simulasi. Tren peningkatan pressure drop dan head loss pada diameter pipa yang lebih kecil serta sudut kemiringan yang lebih besar menunjukkan kesesuaian dengan teori mekanika fluida. Dengan demikian, hasil simulasi CFD yang diperoleh dapat dinyatakan valid dan layak digunakan sebagai dasar analisis karakteristik aliran pada sistem automatic sampler crude oil. Pipa berdiameter kecil menghasilkan pressure drop, head loss, dan wall shear stress yang lebih tinggi akibat peningkatan kecepatan aliran dan gaya gesek fluida terhadap dinding pipa. Sebaliknya, pipa berdiameter besar menunjukkan kehilangan energi yang lebih kecil, namun berpotensi membentuk zona aliran lambat yang dapat memengaruhi homogenitas fluida.

Sudut kemiringan pipa 90° menghasilkan kehilangan energi yang lebih besar dibandingkan sudut 45° karena perubahan arah aliran yang lebih tajam. Meskipun seluruh aliran berada pada rejim laminar, efek geometri tetap berperan penting dalam meningkatkan kehilangan energi lokal. Oleh karena itu, konfigurasi pipa dengan diameter menengah dan sudut kemiringan yang lebih landai dinilai paling optimal dalam menjaga keseimbangan antara efisiensi energi dan kualitas aliran.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi CFD pada sistem perpipaan automatic sampler crude oil dengan flow rate konstan, dapat disimpulkan bahwa variasi diameter dan sudut kemiringan pipa berpengaruh signifikan terhadap karakteristik aliran fluida. Pipa berdiameter 1 inci menghasilkan pressure drop tertinggi hingga 37.084,69 Pa dan head loss sebesar 4,44 m, sedangkan pipa berdiameter 3 inci dengan sudut 45° menghasilkan pressure drop terendah sebesar 7.846,61 Pa dan head loss sebesar 0,94 m.

Nilai wall shear stress tertinggi sebesar 70,88 Pa terjadi pada pipa berdiameter kecil dengan sudut 90°, sedangkan nilai terendah terjadi pada pipa berdiameter besar dengan sudut 45°. Seluruh variasi menunjukkan nilai Reynolds di bawah 2.300, sehingga aliran berada pada rejim laminar. Kehilangan energi aliran yang terjadi lebih dipengaruhi oleh viskositas fluida dan geometri pipa dibandingkan oleh turbulensi. Secara keseluruhan, konfigurasi pipa dengan diameter menengah hingga besar dan sudut kemiringan 45° dinilai paling optimal karena mampu meminimalkan kehilangan energi sekaligus menjaga kestabilan dan homogenitas aliran dalam sistem automatic sampler crude oil.

DAFTAR PUSTAKA

Afolabi, R. O., Yusuf, E. O., Okonji, C. V., & Nwobodo, S. C. (2019). Predictive analytics for the Vipulanandan rheological model and its correlative effect for nanoparticle modification of drilling mud. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *183*(July). https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106377

Andreasen, A., Borroni, F., Nieto, M. Z., Stegelmann, C., & Nielsen, R. P. (2018). On the adequacy of API 521 relief-valve sizing method for gas-filled pressure vessels exposed to fire. *Safety*, *4*(1). https://doi.org/10.3390/safety4010011 *API 598.pdf*. (n.d.).

Api, A. M., Bartlett, A., Belsito, D., Botelho, D., Bruze, M., Bryant-Friedrich, A., Burton, G. A., Cancellieri, M. A., Chon, H., Cronin, M., Crotty, S., Dagli, M. L., Dekant, W., Deodhar, C., Farrell, K., Fryer, A. D., Jones, L., Joshi, K., Lapczynski, A., … Thakkar, Y. (2024). RIFM fragrance ingredient safety assessment, 2,6-xylenol, CAS Registry Number 576-26-1. *Food and Chemical Toxicology*, *194*(S1), 115118.https://doi.org/10.1016/j.fct.2024.115118

API Gravity. (2016). *Pollution Control Handbook for Oil and Gas Engineering*, *1*, 141–142. https://doi.org/10.1002/9781119117896.ch7

Berti, S., Fracassi, P., Mattioli, A., Potula, V. R., & Lotti, C. (2014). Design and development of a specially modified positive displacement rotary screw pump and relevant hydraulic circuit to enhance "entrained air handling" capability in a closed loop lube oil system. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *136*(7), 1–12. https://doi.org/10.1115/1.4026543

Cană, P., Ripeanu, R. G., Diniță, A., Tănase, M., Portoacă, A. I., & Pătîrnac, I. (2025). A Review of Safety Valves: Standards, Design, and Technological Advances in Industry. *Processes*, *13*(1), 1–42. https://doi.org/10.3390/pr13010105

Drews, A. (2008). Standard Practice for Automatic Sampling of Petroleum and Petroleum Products. *Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th Edition*, *5854*, 646-646–24. https://doi.org/10.1520/mnl10929m

Emerson. (2008). *Oil & Gas Custody Transfer - Crude oil*. 1–4.

Graham, E., Yang, M., Barton, N., Harvey, R., Paton, R., Mills, C., Learmonth, D., Mark Jiskoot, & Gordon, A. (2012). Issues and challenges with pipeline sampling. *30th International North Sea Flow Measurement Workshop, NSFMW 2012*, *October*, 1–29.

Hagen, I., & Brewer, D. (1983). Seed Production Research Usda-Ars Cooperating. *Seed Production Research at Oregon State University USDA-ARS Cooperating*, *Ext/CrS 50*, 9.

High, U., Performance, A., Heavy, S., & Sampler, D. (n.d.). *Auto Sampling*. Indra, Z. (2019). *APLIKASI FLOW SWITCH PADA RANCANG BANGUN SIRKULASI AIR RUMAH TINGGAL Abstrak Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro Volume 4 Tahun 2019*. *4*, 2–6. *ISO INTERNATIONAL STANDARD 3171 Second edition 1988-12-01*. (1988). *1988*.

Jalal, N. I., Ibrahim, R. I., & Oudah, M. K. (2022). Experimental investigation and optimization process for viscosity reduction in *crude oil* pipelines using dilution and electrical field. *AIP Conference Proceedings*, *2415*(January), 66–75. https://doi.org/10.1063/5.0093833

Kasim, M., & Arife, W. (2021). Performance analysis of cavitation flow pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1090*(1), 012044. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1090/1/012044

Maulana, A., Sarungu, S., & Syamtinningrum, M. D. P. (2024). Analisis Penerapan Sistem Otomasi dengan Menggunakan Automatic Inline Sampler dalam Pengambilan Sampel pada PT. XYZ. *Indonesian Research Journal on Education*, *4*(1), 358–365. https://doi.org/10.31004/irje.v4i1.1198

Meškuotienė, A., Kaškonas, P., Urbonavičius, B. G., Dobilienė, J., & Raudienė, E. (2025). Ensuring Measurement Integrity in Petroleum Logistics: Applying Standardized Methods, Protocols, and Corrections. *Applied Sciences (Switzerland)*, *15*(12), 1–22. https://doi.org/10.3390/app15126886

Mpms, U. A. P. I. (2017). *Best Practices for Custody Transfer Using API MPMS 18.2*.

Muñoz, J. A. D., Ancheyta, J., & Castañeda, L. C. (2016). Required Viscosity Values to Ensure Proper Transportation of *Crude oil* by Pipeline. *Energy and Fuels*, *30*(11), 8850–8854. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01908

Oliveira, G. P., Santos, M. D., & Roque, W. L. (2020). Constrained clustering approaches to identify hydraulic flow units in petroleum reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *186*(December 2019), 106732. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106732

Pedersen, K. S., Fredenslund, A., Christensen, P. L., & Thomassen, P. (1984). Viscosity of *crude oil*s. *Chemical Engineering Science*, *39*(6), 1011–1016. https://doi.org/10.1016/0009-2509(84)87009-8

Saadat, M., Vikse, N. B., Øye, G., & Dudek, M. (2021). A microfluidic study of oil displacement in porous media at elevated temperature and pressure. *Scientific Reports*, *11*(1), 1–12. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99796-7

Supendi, A., & Fitri, M. (2022). Pemilihan Spesifikasi Komponen Alat Uji Prestasi Pompa Menggunakan Metode Analisis Persamaan Bernoulli Jurnal

Teknik Mesin : Vol . 11 , No . 1 , Februari 2022 ISSN 2549-2888. *Jurnal Teknik Mesin*, *11*(1).

Teknis, K., & Pompa, P. (2025). *FEED PUMP REPLACEMENT BATANG PSO Issued for Review*.

Tim Independen Pengendalian Keselamatan Migas. (2020). Zero Unplanned Shutdown Zero Fatality. *Atlas Keselamatan Migas*, *3*, 55–60.

Wang, J. (2011). Theory of *flow distribution* in manifolds. *Chemical Engineering Journal*, *168*(3), 1331–1345. https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.050

Wilson, T. P., Miller, C. V., & Lechner, E. A. (2024). Guidelines for the use of *automatic sampler*s in collecting surface-water quality and sediment data. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, *2024*. https://doi.org/10.3133/tm1D12

Wong, B., & McCann, J. A. (2021). Failure detection methods for pipeline networks: From acoustic sensing to cyber-physical systems†. *Sensors*, *21*(15). https://doi.org/10.3390/s21154959