

ANALISA PENGARUH CACAT LAS PADA PIPA *ELBOW* 45° TERHADAP ALIRAN FLUIDA MINYAK BAHAN BAKAR PADA KAPAL *TUGBOAT*

Husnul Arif Hartantio¹ Siti Adriani² Meschac Timothee Silalahi³

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: arifhusnul819@email.com

Abstrak

Pipa dan *elbow* merupakan komponen penting dalam sistem distribusi bahan bakar kapal *tugboat* yang berfungsi mengubah arah aliran fluida. Namun, proses pengelasan pada sambungan pipa berpotensi mengalami cacat seperti *misalignment*. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh cacat las terhadap karakteristik aliran fluida minyak bahan bakar menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan *SolidWorks Flow Simulation*. Hasil analisis menunjukkan bahwa cacat las *misalignment* menyebabkan perubahan pola aliran yang ditandai dengan peningkatan kecepatan aliran secara lokal serta bertambahnya rugi tekanan dibandingkan pipa tanpa cacat las. Selain itu, temperatur menunjukkan variasi yang lebih besar pada pipa dengan cacat las, terutama setelah tikungan *elbow*. Penelitian selanjutnya disarankan mengkaji jenis cacat las lainnya serta respon struktur dan umur kelelahan pipa.

Kata kunci: Cacat *misalignment*, pipa dan *elbow*, *SolidWorks*, bahan bakar, aliran fluida

Abstract

Pipes and elbow play an important role in tugboat fuel distribution systems by directing the flow of fuel. In practice, welding at pipe joints may introduce defects such as misalignment, which can affect fluid flow behavior. This study examines the impact of welding defects on the flow characteristics of fuel oil using Computational Fluid Dynamics (CFD) with SolidWorks Flow Simulation. The results show that misalignment defects alter the flow pattern, resulting in localized increases in flow velocity and higher pressure losses compared to pipes without defects. In addition, greater temperature variations are observed in pipes with welding defects, particularly downstream of the elbow. These findings suggest that welding imperfections can reduce the hydraulic performance of piping systems. Future studies are recommended to investigate other types of welding defects as well as the structural response and fatigue life of pipes due to fluid flow effects.

Keywords: weld misalignment defect, pipe and elbow, SolidWorks, fluid flow

1. Pendahuluan

Pada kapal khususnya jenis *tugboat*, sistem perpipaan memiliki peran vital dalam menyalurkan bahan bakar ke mesin utama secara aman dan efisien. Untuk mengubah arah aliran fluida digunakan pipa dengan sambungan *elbow* 45°. Oleh karena itu desain dan mutu sambungan sangat menentukan performa keseluruhan sistem bahan bakar kapal. Pengelasan pada sambungan pipa dan *elbow* 45° menjadi salah satu aspek krusial. Jika hasil las tidak memenuhi standar kualitas, maka berisiko menimbulkan cacat yang secara langsung dapat memengaruhi kelancaran aliran fluida dan kekuatan struktur perpipaan. Salah satu jenis cacat yang kerap terjadi adalah ketidaksejajaran sambungan (*misalignment*) pada PT. XYZ. Cacat semacam ini dapat mengganggu pola aliran fluida, menambah gesekan pada dinding pipa, dan dalam kondisi tertentu bisa menyebabkan kebocoran atau bahkan kegagalan sistem.

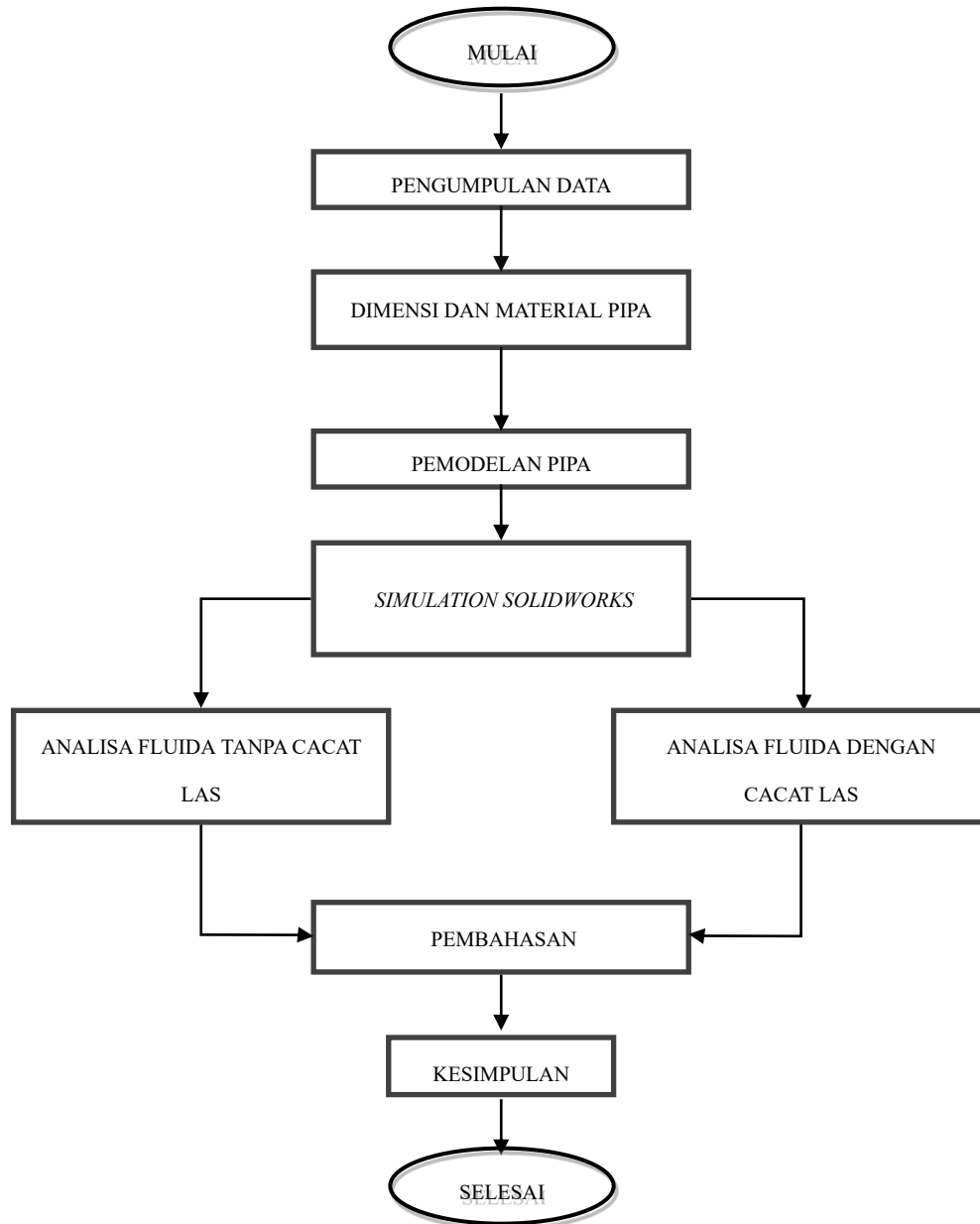
Berbagai studi telah dilakukan untuk meneliti bagaimana aliran fluida memengaruhi kekuatan struktur pada pipa dan bagian *elbow*, dengan mempertimbangkan beragam variasi parameter [1-3]. Aspek-aspek geometris seperti perbandingan antara diameter dan ketebalan pipa, tingkat kekasaran permukaan, serta kelembapan pada permukaan pipa diketahui memiliki pengaruh besar terhadap ketahanan pipa [1-3]. Perubahan pada parameter-parameter tersebut dapat mengubah karakteristik aliran fluida di dalam pipa, yang pada gilirannya berdampak pada kekuatan keseluruhan sistem [1-3]. Selain itu, fraksi air pada bagian masuk (*inlet water fraction*) merupakan salah satu parameter penting yang menentukan stabilitas aliran fluida. Menjaga nilai parameter ini dalam kisaran optimal sangat krusial untuk menjaga keseimbangan antara volume fraksi minyak dan tekanan yang terjadi di dalam pipa [2,3]. Kecepatan aliran, tingkat turbulensi, serta distribusi tegangan geser di sepanjang dinding pipa juga menjadi faktor penting yang memengaruhi kekuatan pipa. Jika tidak dikendalikan, hal-hal tersebut dapat menyebabkan deformasi hingga kerusakan akibat erosi dan korosi [1,3]. Dalam konteks analisis kekuatan pipa, perangkat lunak seperti *Ansys Fluent* dan *Ansys Workbench* memainkan peran vital. Keduanya memungkinkan simulasi yang komprehensif terhadap aliran fluida, variasi tekanan, distribusi tegangan, serta dapat digunakan untuk memprediksi potensi terjadinya erosi dan korosi pada sistem perpipaan [1,4].

Penelitian [4] melaporkan bahwa cacat las pada sambungan pipa dapat meningkatkan turbulensi dan menyebabkan penurunan tekanan dalam aliran fluida. Cacat las seperti retakan dan *incomplete fusion*, menyebabkan peningkatan gesekan dalam pipa yang langsung berimbas pada penurunan tekanan dan ketidakstabilan aliran fluida. Penurunan tekanan ini dapat memperlambat pengiriman bahan bakar ke mesin, mengurangi efisiensi, dan berisiko merusak komponen mesin utama [4]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *slag inclusion* yang terperangkap dalam sambungan las memperburuk aliran fluida dengan menambah turbulensi, dan meningkatkan kemungkinan kegagalan struktural pada pipa [5]. Oleh karena itu, cacat las memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja sistem bahan bakar kapal dan keseluruhan operasional kapal.

Penelitian sebelumnya [6], menggunakan *FSI* pada pipa dan *elbow* 45° dengan pemodelan pengelasan. Oleh karena itu, analisis difokuskan pada aliran fluida dan respon struktur pada pipa dan *elbow* 45° menggunakan metode *FSI*. *CFD* digunakan untuk menganalisis aliran fluida, tekanan, serta kekuatan dan kestabilan struktural pipa dan *elbow* 45° dengan memodelkan pengelasan pada bagian dalam dan luar sambungan pipa [6]. Pada Penelitian ini menggunakan *SolidWorks Simulation* dengan memodelkan pipa dan *elbow* 45°. Penelitian ini bertujuan untuk analisis *pressure*, *velocity*, dan *temperature* akibat adanya cacat las pada pipa *elbow* 45°. Oleh karena itu penelitian ini difokuskan pada analisa aliran fluida dengan membandingkan dua kondisi, yaitu kondisi pipa dengan tanpa cacat las dan kondisi pipa dengan cacat las *misalignment*

2. Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan mencakup pendekatan simulasi aliran fluida berbasis *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) dengan menggunakan *SolidWorks Simulation*. Dengan menguji cacat las yaitu *misalignment* dengan besar pergeseran 2 mm. Hasil dari tersebut kemudian dibandingkan terhadap joinan pipa dan *elbow* yang tidak memiliki cacat las. Semua hasil kemudian dianalisa dan disimpulkan, bagaimana pengaruh cacat las mempengaruhi joinan pipa dan *elbow* dapat mempengaruhi *pressure*, *velocity*, dan *temperature* akibat adanya cacat las. Diagram alir dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram penelitian dengan pendekatan *SolidWorks*

2.1 Material

Material untuk menyelesaikan penelitian ini yaitu material ASTM A36 dengan spesifikasi pada Tabel 1 dan spesifikasi pompa pada Tabel 2.

Tabel 1
Spesifikasi Material dan Geometri Pipa

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Yield Strength</i>	240	MPa
Modulus Elastisitas	200.000	MPa
<i>Poisson Ratio</i>	0,3	-
<i>Shear Modulus</i>	76.000	MPa
Diameter Dalam Pipa	26,64	mm
Diameter Luar Pipa	33,34	mm
Sudut <i>Elbow</i>	45	derajat
Tebal Pipa	3,38	mm
Panjang Pipa (dari tekukan)	100	mm

Tabel 2

Spesifikasi Performa Pompa dan Karakteristik Fluida

Parameter	Nilai	Satuan
Debit Pompa	1,21578	kg·s
Laju aliran	0,001389	m ³ /s
Tekanan Pompa	300.000	Pa / ~3 bar
Suhu Fluida	30	°C
Densitas Fluida	875	kg/m ³
Viskositas Fluida	0,0053	kg/(m·s)
Kecepatan Aliran Fluida	2,4930	m/s

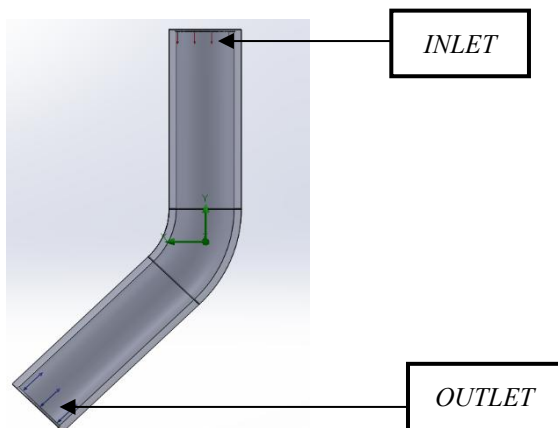
3. Analisa Data dan Pembahasan

3.1 Computational Fluid Dynamic

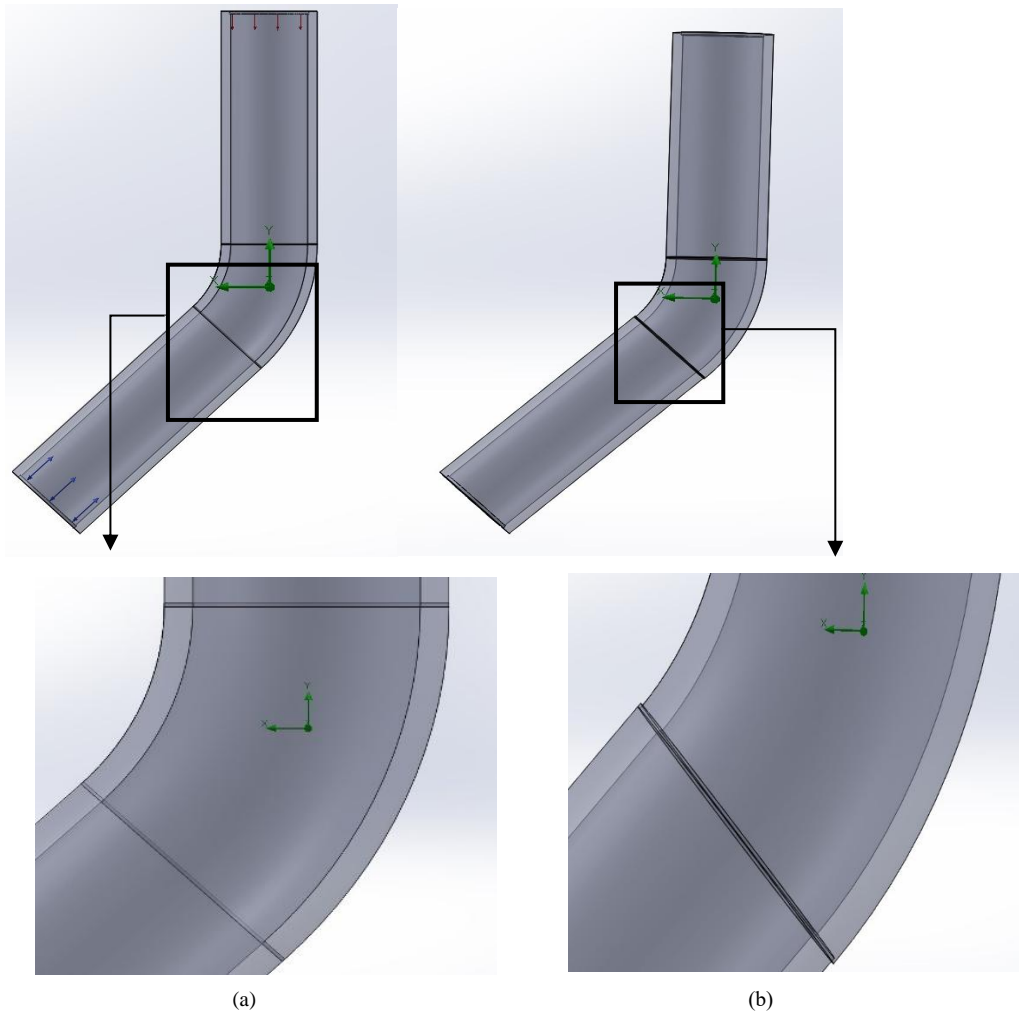
Penggunaan aplikasi pada penelitian ini adalah menggunakan *Sollidwork Simulation* yang digunakan untuk menganalisa aliran dalam pipa seperti kecepatan aliran dan tekanan. Ada beberapa tahapan pemodelan pipa, *simulation*, dan analisis data yang dilakukan pada *software SolidWorks Simulation*. Pemodelan ini menggunakan dua variasi pipa, yang pertama pemodelan pipa tanpa ada cacat las dan yang kedua pemodelan pipa dengan cacat las *misalignment*. Data yang digunakan mengikuti data yang dijelaskan sebelumnya. Pada Gambar 3 dapat dilihat pemodelan pipa 3D, Gambar 3.a adalah pemodelan pipa tanpa cacat las dan 3.b adalah pemodelan dengan cacat las *misalignment*.

Dalam tahapan analisa perlu ditentukan penetapan kondisi pada simulasi *SolidWorks*. Pada titik masuk (*inlet*) seperti kecepatan atau debit aliran, titik keluar (*outlet*) untuk tekanan keluar pada Gambar 2. Pada penelitian ini input kecepatan aliran sebesar 2.4930 m/s dan tekanan keluar sebesar 101325 Pa serta dinding pipa tanpa *slip*. Hasil analisa *CFD* berupa kecepatan aliran, pola aliran, dan distribusi tekanan di dalam pipa. Perbandingan hasil analisa akan terlihat pada hasil simulasi yang akan dijelaskan pada bagian selanjutnya. Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui hasil data, semakin besar data hasil analisa yang didapat dapat berpengaruh terhadap respon pipa. Hasil simulasi didiskusikan untuk melihat akibat terjadinya perbedaan pemodelan pipa dengan cacat las dan tanpa cacat las.

Visualisasi kecepatan aliran memperlihatkan bagaimana distribusi kecepatan aliran fluida terjadi di sepanjang pipa. Saat fluida mengalir melalui pipa dengan *elbow* 45°, terjadi perubahan kecepatan aliran. Pada Gambar 4 terjadi perubahan kecepatan aliran pada pipa dengan masing masing 4.801 m/s tanpa cacat las dan 4.815 m/s dengan cacat las *misalignment*. Cacat las *misalignment* meningkatkan kecepatan aliran sebesar 0.29%. Perbedaan terjadi dikarenakan adanya cacat las.



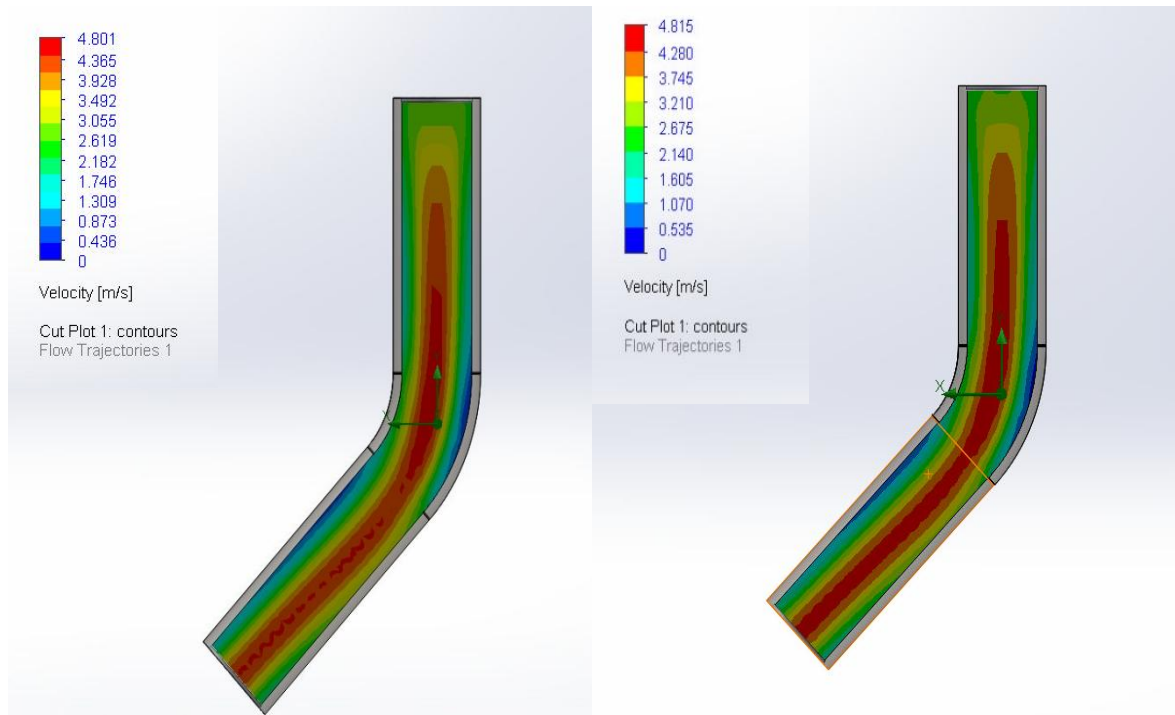
Gambar 2. Kondisi batas simulasi aliran fluida



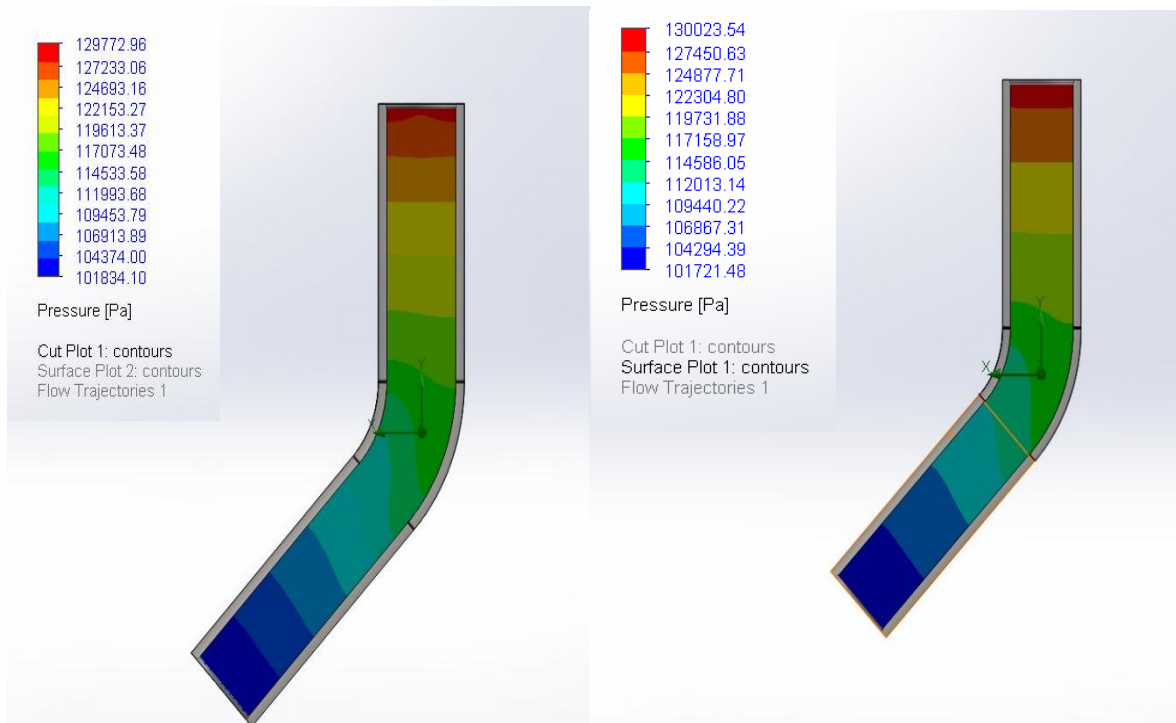
Gambar 3. Pemodelan pipa (a) tanpa cacat las (b) cacat las *misalignment*

Hasil dari distribusi tekanan dimana aliran fluida masuk dari *inlet* dan keluar dari *outlet*, dimana dapat dilihat tekanan tertinggi terlihat pada bagian *inlet* dan tekanan paling kecil terletak pada *outlet* pipa. Pada Gambar 5 tekanan minimum yang dihasilkan sebesar 101834 Pa untuk pipa tanpa cacat las dan 101721 Pa untuk pipa dengan cacat las *misalignment*. Distribusi tekanan cacat las *misalignment* turun sebesar 0.11%. Pada pipa dengan cacat las tekanan fluida setelah melewati tikungan *elbow* mengalami penurunan secara merata. Pola aliran relatif stabil karena tidak adanya gangguan geometri tambahan, sehingga rugi tekanan yang terjadi terutama disebabkan oleh perubahan arah aliran pada *elbow*. Pada pipa dengan cacat las *misalignment*, terjadi peningkatan tekanan lokal di sekitar sambungan las dan setelah tikungan *elbow*. Ketidaksejajaran sambungan menyebabkan penyempitan dan gangguan aliran. Setelah melewati daerah cacat las, tekanan fluida pada pipa dengan cacat las menurun lebih tajam menuju *outlet* dibandingkan pipa tanpa cacat las.

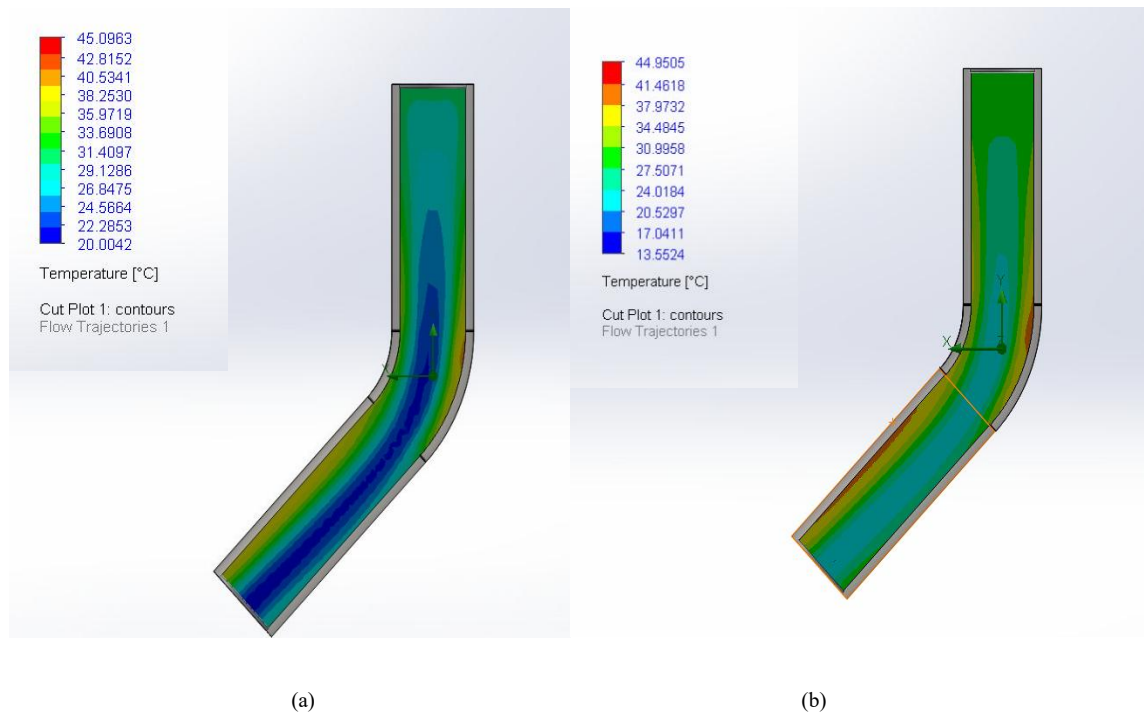
Hasil dari *temperature* fluida pada Gambar 8 terlihat pada suhu minimum yang dicapai oleh fluida di kedua model simulasi. Model dengan cacat las menunjukkan adanya pendinginan yang jauh lebih intens diangka 13.552°C yang menyebabkan suhu fluida turun drastis daripada suhu tanpa cacat las diangka 20.004°C. Penurunan temperatur pada cacat las *misalignment* sebesar 32.25%. Sementara itu, suhu puncak untuk tanpa cacat las mencapai 45.096°C dan dengan cacat las mencapai 44.950°C. Secara visual mengindikasikan bahwa suhu tertinggi (merah) terkonsentrasi di dekat dinding bagian dalam pipa, terutama setelah melewati tikungan. Sebaliknya, suhu terendah (biru tua) cenderung terlokalisasi di bagian tengah aliran, khususnya pada model pipa dengan cacat las sebelum tikungan.



(a) (b)
Gambar 4. Perubahan kecepatan (a) tanpa cacat las (b) dengan cacat las *misalignment*



(a) (b)
Gambar 5. Distribusi tekanan (a) tanpa cacat las (b) dengan cacat las *misalignment*



Gambar 8. Temperatur fluida (a) tanpa cacat las (b) dengan cacat las *misalignment*

3.2 Diskusi

Penelitian ini menganalisis pengaruh cacat las *misalignment* terhadap karakteristik aliran fluida minyak bahan bakar pada pipa *elbow* 45° menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Dalam simulasi ini, fluida minyak bahan bakar. Pengaruh tersebut dapat diamati melalui perubahan kecepatan aliran, distribusi tekanan, kepadatan fluida, serta distribusi temperatur di dalam pipa. Faktor pertama yang dibahas adalah kecepatan aliran fluida. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pipa dengan cacat las *misalignment* menghasilkan kecepatan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan pipa tanpa cacat las. Peningkatan kecepatan ini terjadi secara lokal di sekitar sambungan las dan area tikungan *elbow*. Fenomena ini disebabkan oleh perubahan geometri penampang aliran akibat *misalignment* yang berperan sebagai penyempitan lokal, sehingga fluida mengalami percepatan untuk mempertahankan kontinuitas massa. Kondisi ini sejalan dengan penelitian [4] yang menyatakan bahwa cacat las pada sambungan pipa dapat meningkatkan kecepatan lokal dan memperbesar intensitas turbulensi.

Faktor kedua adalah distribusi tekanan fluida. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tekanan maksimum terjadi pada bagian *inlet* dan menurun ke arah *outlet*, baik pada pipa tanpa cacat las maupun pipa dengan cacat las. Namun demikian, tekanan maksimum pada pipa dengan cacat las *misalignment* tercatat lebih tinggi dibandingkan pipa tanpa cacat las. Pada bagian *outlet* pipa dengan cacat las, tekanan fluida turun lebih tajam menuju *outlet* dibandingkan pipa tanpa cacat las karena ketidaksejajaran sambungan menyebabkan penyempitan penampang dan gangguan aliran. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan cacat las menyebabkan peningkatan rugi tekanan (*pressure loss*) akibat bertambahnya hambatan aliran dan ketidakstabilan pola aliran. Fenomena ini sesuai dengan penelitian sebelumnya [5] yang menyatakan bahwa cacat las meningkatkan gesekan fluida dan menurunkan efisiensi aliran pada sistem perpipaan bahan bakar kapal.

Faktor terakhir yang dibahas adalah distribusi temperatur fluida. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pipa dengan cacat las *misalignment* mengalami penurunan temperatur minimum yang lebih signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan turbulensi akibat cacat las mempercepat proses perpindahan panas antara fluida dan dinding pipa. Selain itu, temperatur maksimum yang terlokalisasi di dekat dinding bagian dalam pipa setelah tikungan menunjukkan bahwa area *elbow* merupakan zona kritis terjadinya interaksi termal. Fenomena ini sejalan dengan penelitian [6] yang menyatakan bahwa perubahan pola aliran pada pipa *elbow* berkontribusi terhadap peningkatan gradien temperatur dan berpotensi memengaruhi keandalan sistem perpipaan. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan analisis terhadap cacat las *root undercut*, *root concave*, *incomplete penetration* serta penggunaan kondisi operasi yang berbeda guna mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik aliran fluida secara lebih komprehensif. Selain itu, penelitian lanjutan dapat dikembangkan dengan mengombinasikan analisis aliran fluida dan respon struktur pipa untuk mengevaluasi dampak aliran terhadap sistem perpipaan.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* pada aliran fluida minyak bahan bakar di pipa *elbow* 45° dapat disimpulkan bahwa keberadaan cacat las *misalignment* memengaruhi karakteristik aliran fluida di dalam pipa. Cacat las menyebabkan perubahan pola aliran yang ditandai dengan peningkatan kecepatan aliran secara lokal serta bertambahnya rugi tekanan dibandingkan pipa tanpa cacat las. Hal ini menunjukkan bahwa gangguan geometri pada sambungan pipa dan tikungan *elbow* meningkatkan hambatan aliran dan menurunkan performa sistem perpipaan. Selain itu, hasil simulasi temperatur menunjukkan variasi temperatur yang lebih besar pada pipa dengan cacat las, terutama di area setelah tikungan *elbow*. Secara keseluruhan, cacat las *misalignment* berpengaruh terhadap kecepatan, tekanan, dan temperatur aliran fluida. Untuk penelitian selanjutnya, perlu dilakukan analisis terhadap jenis cacat las pengkajian respon struktur dan umur kelelahan pipa akibat pengaruh aliran fluida.

5 Daftar Pustaka

- [1] K. Gök, M. Danişmaz, L. Urtekin, H. D. Ada, and A. Gök, 'Investigation of the effect of elbow pipes of Ti6Al4V, 304 stainless steel, AZ91 materials on erosion-corrosion by finite element analysis', *Acta Polytech*, vol. 64, no. 4, pp. 360–367, Sep. 2024, doi 10.14311/AP.2024.64.0360.
- [2] T. Xu, R. Zhang, and X. Si, 'Effects of fluid dynamics parameters on flow-accelerated corrosion at the elbow of carbon steel pipeline', *Mater. Res. Express*, vol. 11, no. 5, p. 056520, May 2024, doi: 10.1088/2053-1591/ad4c3c.
- [3] X. Yin et al., 'Study on the Hydrodynamic Performance and Stability Characteristics of Oil Water Annular Flow through a 90° Elbow Pipe', *Sustainability*, vol. 15, no. 8, p. 6785, Apr. 2023, doi: 10.3390/su15086785.
- [4] Zhang, H., Li, Y., & Chen, X. (2023). Impact of welding defects on the flow characteristics of fuel pipelines in ships. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 31(2), 101-112.
- [5] Li, J., Zhang, S., & Zhao, T. (2023). *Effect of welding defects on fuel flow stability and pipe integrity in marine fuel systems*. *Marine Technology Society Journal*, 57(5), 85-95.
- [6] Muvariz, M. F. (2024). Analisa kekuatan pipa elbow 45° terhadap aliran fluida minyak bahan bakar pada kapal tugboat. *Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis*, 14(2), 117–129.