



2580-2798 (e)
2588-6225 (p)

Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis
(Bengkalis State Polytechnic Technology Innovation Journal)

journal homepage: <https://jurnal.polbeng.ac.id/index.php/IP/index>

ANALISA KEKUATAN PIPA *ELBOW* 45⁰ TERHADAP ALIRAN FLUIDA MINYAK BAHAN BAKAR PADA KAPAL TUGBOAT

Mufti Fathonah Muvariz¹⁾, Kharisma Al Quarisbi¹⁾, Annisa Fyona¹⁾, Naufal Abdurrahman Prasetyo¹⁾, Mega Gemala¹⁾, Nurman Pamungkas¹⁾, Nur Fitria Pujoleksonowati¹⁾, Nidia Yuniarsih¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam
JL. Ahmad Yani, Kota Batam, Prov Kepulauan Riau
Indonesia, 29461

Corresponding Author: mufti@polibatam.ac.id

Article Info

Abstract

Keywords:

Pipa, *elbow*, *fluid-structure interaction*, *weld joints*, fabrikasi, respon struktur.

Article history:

Received: 07/11/24
Last revised: 08/11/24
Accepted: 26/11/24
Available online: 26/11/24
Published: 30/11/24
DOI:<https://10.35314/yvk2eh69>

Abstrak

Pipa pada kapal tugboat sangat berperan penting dalam operasinya, terutama pada pipa penyalur minyak bahan bakar ke mesin utama kapal. Dalam operasinya minyak bahan bakar disalurkan melalui pipa berbentuk *elbow* 45⁰, sehingga perlu dilakukan analisa respon struktur pada pipa tersebut. Namun berdasarkan penelitian terdahulu dan pengetahuan penulis, masih sangat jarang yang melakukan analisa respon struktur pipa *elbow* 45⁰ dengan mempertimbangkan proses fabrikasi pipa tersebut. Maka tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan respon struktur pipa akibat aliran fluida terhadap variasi diameter dalam dan proses fabrikasi pipa *elbow* 45⁰. Proses fabrikasi pipa yang dimaksud adalah proses *bending* dan proses pengelasan. Metode *fluid-structure interaction* digunakan pada penelitian ini, dimana analisa dilakukan dengan pendekatan *computational fluid dynamic* untuk mendapatkan distribusi tekanan pipa dan *static structural* untuk mendapatkan respon struktur. Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil diameter dalam pipa maka semakin besar pula respon struktur yang terjadi pada kecepatan *inlet* yang sama. Pada bagian pengelasan perlu ada perhatian khusus karena distribusi tegangan yang terjadi hanya kurang 12% dari pada bagian sekitar *elbow* pipa. Pada penelitian selanjutnya perlu dilakukan analisa respon struktur pipa akibat adanya cacat pada saat fabrikasi dan menghitung sisa umur struktur tersebut.

Abstract

The pipes on the tugboat play a crucial role in its operation, especially the fuel supply pipes to the main engine. During operation, fuel is conveyed through 45-degree elbow-shaped pipes, so it is necessary to analyze the structural response of these pipes. However, based on the previous study and the author's knowledge, very few have conducted structural response analyses of 45⁰ elbow pipes considering their fabrication process. Therefore, this study aims to determine the structural response of 45⁰ elbow pipes due to fluid flow, considering variations in diameter and the fabrication process (bending and welding). The fluid-structure interaction method is employed in this research, where computational fluid dynamics is used to obtain pipe pressure distribution, and static structural analysis is used to determine the structural response. It can be concluded that the smaller the diameter inside the pipe, the greater the structural response that occurs at the same inlet velocity. Special attention is needed in the welding section because the stress distribution is only about less than 12% of that around the pipe elbow. In further research, an analysis of the pipe's structural response due to defects during fabrication and calculation of the remaining lifespan of the structure should be conducted.

1. PENDAHULUAN

Pipa pada kapal tugboat adalah bagian penting dari sistem transfer fluida yang memungkinkan kapal untuk mengirim dan menerima bahan bakar, air, dan bahan kimia lainnya untuk keperluan operasional kapal. Pipa ini dirancang khusus untuk menahan kondisi lingkungan laut yang korosif dan tekanan tinggi akibat aliran fluida. Diletakkan dengan hati-hati di dalam struktur kapal, pipa ini mengikuti standar keselamatan yang ketat dan mematuhi regulasi industri. Terdapat 2 tipe sambungan pipa yang berbentuk lengkungan, yaitu tipe pipa yang di tekuk (*bending*) dan pipa *elbow*. Proses fabrikasi pipa *elbow* pada kapal tugboat Pipa *elbow* yang di las umumnya menggunakan siku atau *elbow* yang telah diproduksi dengan sudut lengkung tetap. Sedangkan proses fabrikasi pipa dengan *bending*, pembengkokan pipa menggunakan mesin khusus memungkinkan penyesuaian sudut lengkung sesuai desain yang diinginkan.

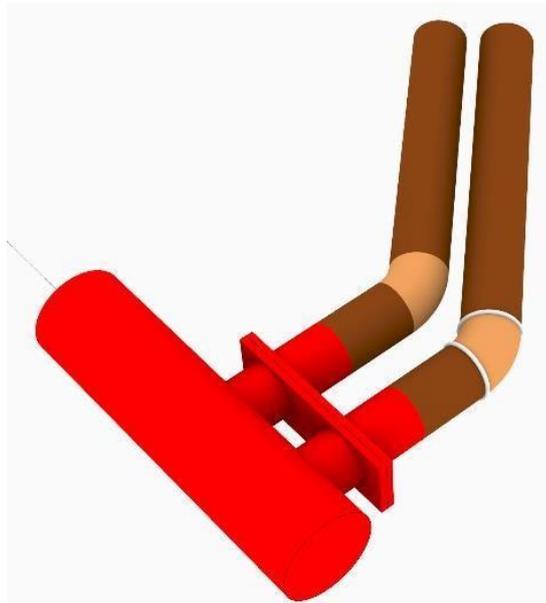
Penelitian tentang pengaruh aliran fluida pada kekuatan struktur pipa *elbow* telah banyak dilakukan oleh para peneliti terdahulu dengan berbagai variasi parameter. Faktor geometri seperti ratio diameter/tebal, kekasaran dinding, dan keterbasahan permukaan pada pipa dapat berdampak pada kekuatan dari pipa. Perubahan parameter ini berdampak pada dinamika aliran pada pipa sehingga berpengaruh terhadap kekuatan secara keseluruhan [1], [2], [3]. Fraksi air masuk (*inlet water fraction*) juga salah satu parameter kritis yang menentukan stabilitas air pada pipa. Menjaga nilai *inlet water fraction* pada rentang yang optimal sangat diperlukan untuk menyeimbangkan *volume fraction of oil* dan *pressure drop* [2], [3]. Parameter berikutnya adalah kecepatan aliran, intensitas turbulensi, dan distribusi tegangan geser pada dinding pipa juga berperan sangat signifikan dalam menentukan kekuatan pipa akibat aliran dalam. Parameter ini berpengaruh terhadap deformasi dan *erosion corrosion* pada bahan pipa, mempengaruhi kekuatan keseluruhan pipa [1] - [3].

Peran aplikasi sangat penting dalam melakukan analisa kekuatan pipa akibat dari aliran dalam dengan menghadirkan simulasi dan analisa elemen hingga secara detail. Sebagai contoh, Ansys Fluent dan Ansys Workbench dapat digunakan untuk menghasilkan pemodelan pipa secara 3D, dapat menilai karakteristik aliran, perubahan tekanan, dan distribusi tegangan dalam berbagai kondisi [1], [4], [5]. Selain itu, aplikasi ini dapat memfasilitasi evaluasi pola aliran sekunder dan distribusi tegangan geser, yang sangat penting untuk memprediksi potensi masalah erosi dan korosi dalam sistem pipa [6], [7]. Dengan demikian, alat komputasi sangat penting untuk mengoptimalkan desain pipa dan memastikan integritas struktural dalam aplikasi transportasi fluida.

Pendekatan *fluid-structure interaction* (FSI) pada pipa di tekuk dan *elbow* dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu dengan berbagai macam variable dan parameter. Pipa berbentuk *elbow* dengan 90° dianalisa dengan mengintegrasikan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dengan *Finite Element Analysis* (FEA) pada aplikasi Ansys Workbench untuk memprediksi adanya kebocoran dengan metode *Vibration-Based Leak Detection* (VBLD) [8]. Dengan membandingkan berbagai macam tipe material pada pipa, [9] melakukan analisa aliran fluida pipa LNG pada kapal didapatkan bahwa respon struktur tertinggi terletak di *elbow* pipa 90° . Penelitian yang sama juga dilakukan oleh [10] dengan pipa 90° diasumsikan proses fabrikasinya di *bending*, didapatkan respon struktur terbesar terletak di *elbow*. Pemodelan dimensi pengelasan pada sambungan pipa dianalisa dengan pendekatan FSI, dimana pipa dimodelkan lurus tanpa ada lengkungannya, didapatkan nilai respon struktur tertinggi di daerah sambungan pengelasan [11]. Namun, dari penelitian terdahulu dan pengetahuan penulis, penelitian FSI pada pipa *elbow* 45° dengan pemodelan pengelasan belum ada dilakukan. Maka dari itu penelitian ini di fokuskan pada analisa aliran dalam pipa 45° dengan metode FSI.

Penelitian ini menggunakan metode *fluid-structure interaction* (FSI), kombinasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) dengan *Static Structural*, untuk menganalisis aliran fluida, kekuatan dan kestabilan struktural pipa *elbow* 45 derajat. Simulasi komputer dilakukan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent untuk analisa aliran dan tekanan fluida dan Ansys *Static Structural*

untuk menganalisis tegangan, deformasi, dan perilaku material pada pipa dengan variasi pada dimensi pipa dan proses fabrikasinya. Perbedaan dengan penelitian lain terletak pada pemodelan pada pipa proses fabrikasi dengan pengelasan, diberikan model bentuk pengelasan pada bagian dalam dan luar sambungan pipa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi dimensi dan bentuk pemodelan pipa terhadap aliran fluida dan respon struktur pada pipa *elbow*. Hasil penelitian ini bermanfaat bagi para pemangku kepentingan agar dalam proses desain dan fabrikasi perlu mempertimbangkan dimensi sambungan pengelasan terhadap respon struktur akibat aliran dalam pada pipa elbow 45⁰.



Gambar 1. Ilustrasi pipa *elbow* dan *bending*.

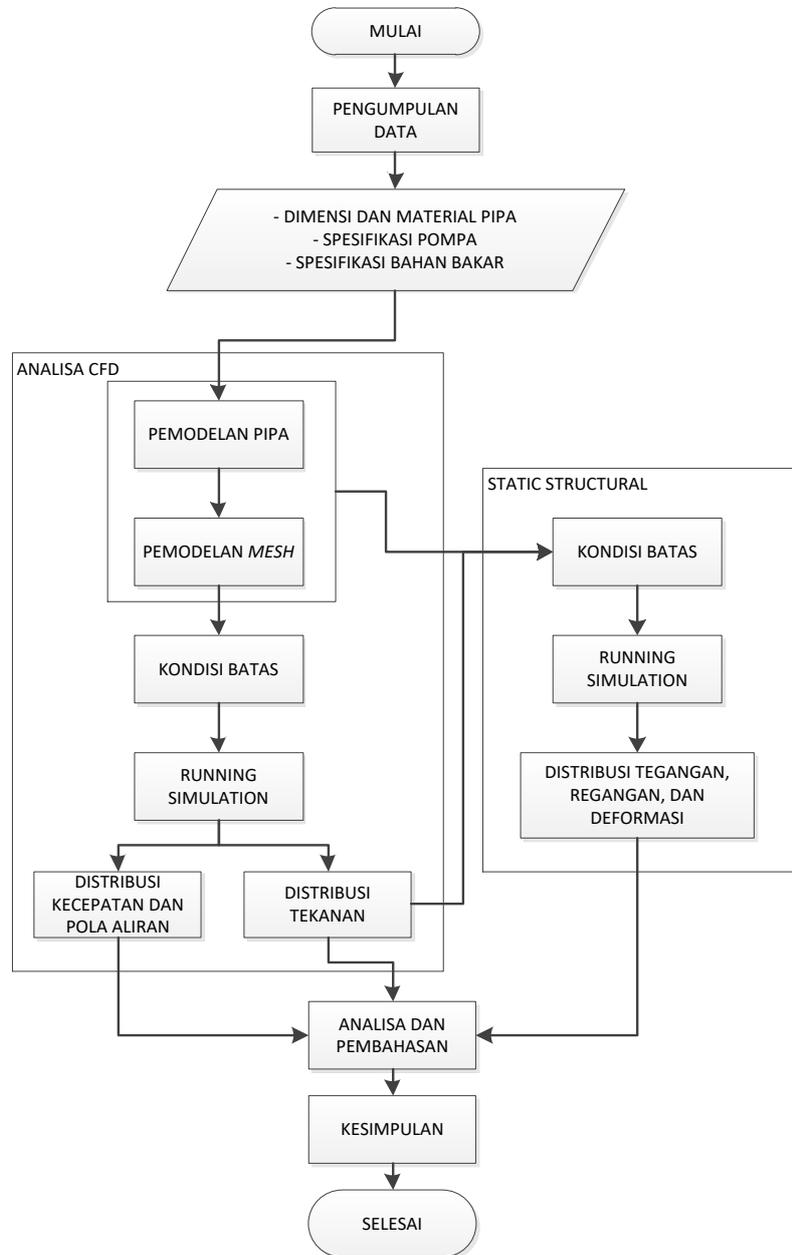
2. METODE

Metode penelitian ini dilakukan dengan pendekatan FSI. Pada metode ini akan di bagi 2 analisa pada struktur pipa. Analisa pertama adalah dengan pendekatan CFD untuk mendapatkan distribusi kecepatan aliran, pola aliran, dan tekanan pada pipa. Hasil distribusi tekanan pada analisa CFD digunakan sebagai input beban pada analisa struktural untuk mendapatkan distribusi tegangan, regangan, dan deformasi. Semua hasil kemudian di analisa dan disimpulkan, bagaimana pengaruh variasi diameter dalam dan pemodelan pengelasan pada aliran dalam pipa terhadap respon struktur. Diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.

2.1 Material

Terdapat beberapa data yang diperlukan untuk menyelesaikan penelitian ini yaitu data bahan material dari pipa, dimensi pipa, dimensi pengelasan dan data spesifikasi pompa yang digunakan untuk mengalirkan *fuel oil* ke dalam pipa *elbow*. Untuk bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah material dengan spesifikasi sebagai berikut, yield strength 240 MPa, modulus elastisitas 200.000 MPa, poisson ratio 0.3, dan shear modulus 76.000 MPa. Ukuran pipa *bending* dengan diameter dalam dan luar sebesar 20,96 mm dan 26,7 mm, sedangkan ukuran pipa dengan proses fabrikasi memiliki diameter dalam dan luar sebesar 26,64 mm dan 33,34 mm. Kedua pipa tersebut dimodelkan dengan *elbow* berukuran 45 derajat dan panjang pipa 100 mm diukur dari bagian pipa yang ditekuk. Detail pemodelan pipa ada pada Gambar 3. Pemodelan pada tipe pipa yang di proses dengan pengelasan di asumsikan berbentuk setengah oval dengan ukuran sebesar 0.1 mm untuk

ukuran radius terkecil dan 0,2 mm untuk ukuran radius terbesar untuk bagian dalam pipa. Untuk bagian luar pipa memiliki dimensi sebesar 0,2 mm dan 0,4 mm untuk ukuran radius terkecil dan terbesar.



Gambar 2. Diagram Alir penelitian dengan pendekatan FSI.

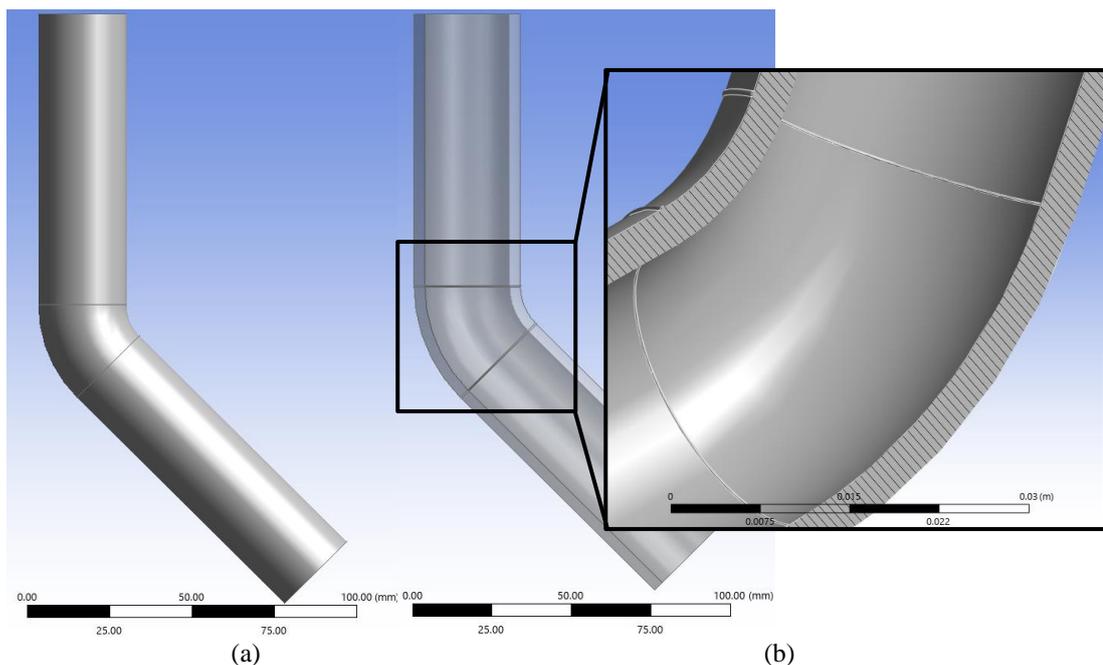
Penyajikan data spesifikasi performa pompa *fuel oil* sistem disajikan secara detail pada penelitian ini. Pada bagian input performa pompa, terdapat beberapa parameter kunci yang dicatat. Pertama, debit pompa dinyatakan dalam kilogram per detik (Kg/s) dengan nilai 1,21578, yang setara dengan laju aliran 5 meter kubik per detik (m³/s). Selanjutnya, tekanan pompa diukur dalam Pascal (Pa) dengan nilai 300,000, yang setara dengan tekanan 3 bar. Data properti fluida minyak yang digunakan dalam sistem juga disajikan, termasuk temperatur fluida yang adalah 30 derajat Celsius, densitas

fluida sebesar 875 kilogram per meter kubik (Kg/m³), dan viskositas fluida sebesar 0.0053 kilogram per meter detik (Kg/m²). Kecepatan aliran fluida pada penelitian ini adalah sebesar 2.49304 m/s.

2.2 Fluid-structure interaction

Penggunaan aplikasi Ansys pada penelitian ini menggunakan Ansys Workbench dengan mengintegrasikan Ansys Fluent dan *Static Structural*. Ansys Fluent digunakan untuk menganalisa karakteristik aliran dalam pipa berupa kecepatan aliran, pola aliran, dan distribusi tekanan. Hasil dari ansys fluent berupa distribusi tekanan digunakan untuk melakukan analisa kekuatan struktur pipa berupa distribusi tegangan, regangan, dan deformasi. Pada penelitian ini, k-omega digunakan untuk analisa aliran fluida dan kekuatan pada pipa. Ada beberapa tahapan yang perlu dilakukan pada saat melakukan simulasi menggunakan aplikasi Ansys yaitu pemodelan pipa, pemodelan *mesh*, kondisi batas, konfigurasi solver, dan analisa data [9].

Penelitian ini menggunakan 2 pemodelan pipa pada analisis fluida kapal tugboat. Pertama pemodelan pipa dengan proses *bending* pada kapal tagboat. Kedua, pemodelan pipa dengan menggunakan *elbow* pada kapal tugboat. Data pipa yang digunakan mengikuti data yang dijelaskan pada bagian sebelumnya. Pada Gambar 3 dapat dilihat bentuk pipa yang digunakan dalam pemodelan 3D dengan Gambar 3.a adalah pemodelan pipa yang di *bending* dan Gambar 3.b adalah pemodelan pipa dengan proses pengelasan. Perbedaan yang sangat jelas terletak pada Gambar 3.b dimana terdapat pemodelan pengelasan pada sambungan pipa dengan *elbow*.



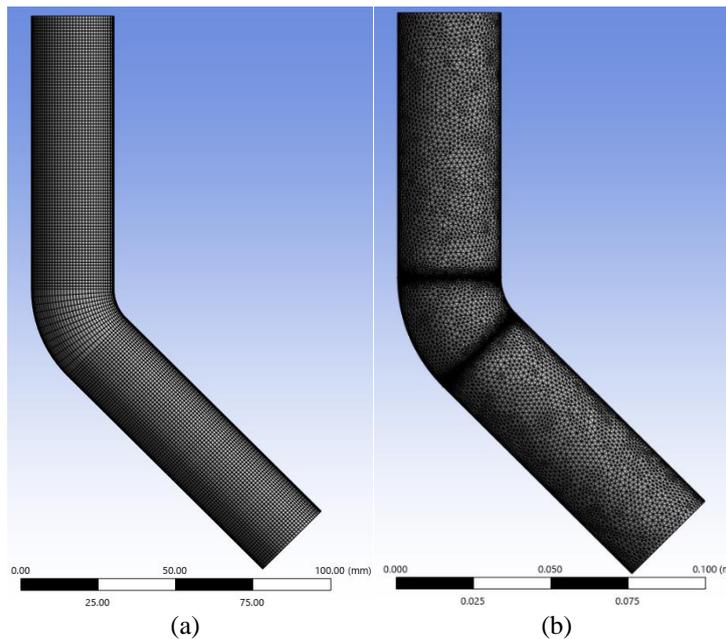
Gambar 3. Pemodelan pipa (a) proses *bending* dan (b) proses pengelasan.

Pemodelan *meshing* dalam ANSYS adalah proses membagi domain simulasi menjadi elemen-elemen kecil untuk analisis numerik yang lebih akurat. Langkah ini dimulai dengan pembuatan geometri model pipa. Geometri tersebut kemudian di-*mesh*, menciptakan grid atau jaringan elemen-elemen yang mendiskretisasi domain (Tabel 1 dan Gambar 4). Kualitas *mesh* sangat penting karena menentukan akurasi dan stabilitas hasil simulasi [3], terutama pada area dengan perubahan geometris signifikan. Elemen *mesh* yang lebih kecil di sekitar fitur-fitur kritis dapat meningkatkan resolusi hasil, sedangkan elemen yang lebih besar dapat digunakan di area yang kurang kompleks untuk mengurangi

waktu komputasi. Pada penelitian ini bagian yang berbentuk radius atau tekuk dan pemodelan pengelasan menjadi pusat fokus kualitas *mesh* yang paling kecil.

Tabel 1. Data elemen yang digunakan pada penelitian ini.

No	Produk	Minimum Elemen Size (m)	Jumlah Node	Jumlah Elemen
1	<i>Bending</i>	0.001	203385	195358
2	<i>Elbow</i>	0.0015	152114	343824

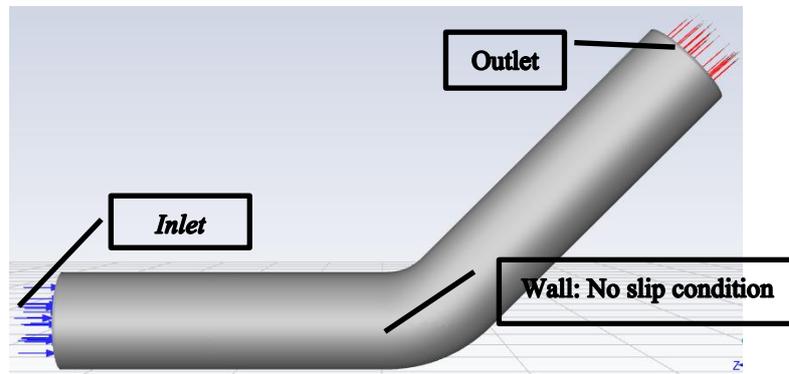


Gambar 4. Pemodelan *mesh* (a) proses *bending* dan (b) proses pengelasan.

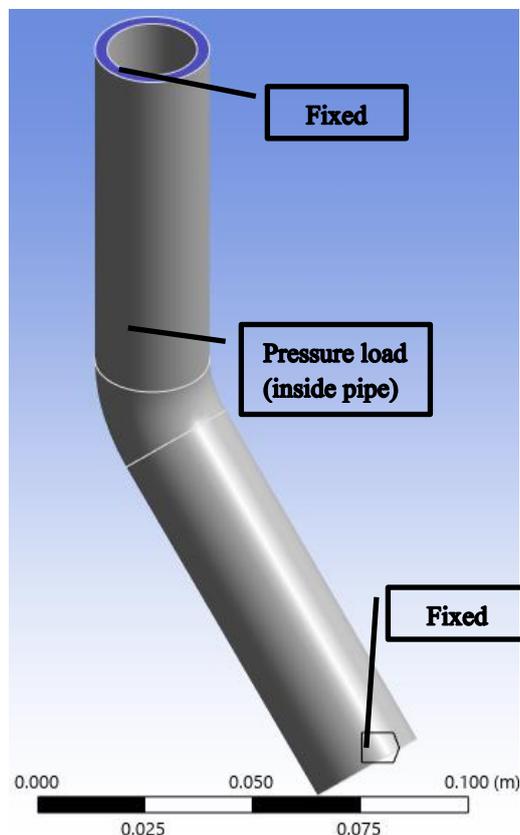
Dalam tahap penetapan kondisi batas (boundary condition) pada simulasi ANSYS, batasan fisik dan perilaku sistem yang disimulasikan ditentukan untuk menggambarkan interaksi fluida dengan batas domain simulasi. Kondisi batas ini mencakup spesifikasi pada titik masuk (*inlet*) seperti kecepatan atau debit aliran, titik keluar (*outlet*) seperti tekanan keluar, serta dinding pipa yang biasanya dianggap sebagai dinding tanpa slip (Gambar 5). Pada penelitian ini input kecepatan aliran sebesar 2.49304 m/s dan tekanan keluar sebesar 1 atm atau setara dengan 101325 Pa serta asumsi pada dinding pipa adalah tanpa slip. Penetapan kondisi batas yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa simulasi merepresentasikan kondisi nyata secara akurat, memungkinkan prediksi distribusi kecepatan, tekanan, dan parameter aliran lainnya dalam domain simulasi. Pada analisa struktur pipa akibat aliran fluida dilakukan di Ansys *Static Structural* dengan kondisi batas sebagai berikut ini: pada ujung semua pipa di asumsikan fixed support, karena struktur pipa terhubung dengan struktur lain. [1]. Data hasil CFD berupa distribusi tekanan pada dalam pipa di transfer ke Ansys *Static Structural* sebagai input beban yang digunakan. Gambar 6 merupakan gambar penentuan kondisi batas pada saat simulasi *Static Structural*.

Metode FSI ini menghasilkan data yang berbeda untuk masing-masing analisa di CFD dan *Static Structural*[15]. Hasil analisa CFD berupa kecepatan aliran, pola aliran, dan distribusi tekanan di dalam pipa. Sedangkan hasil analisa di *Static Structural* berupa distribusi tegangan, regangan, dan deformasi pada pipa. Perbandingan hasil analisa akan terlihat dari hasil simulasi yang dijelaskan secara detail pada bagian selanjutnya. Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui hasil data yang memiliki nilai yang besar. Semakin besar hasil analisa yang didapat, dapat berpengaruh terhadap

respon struktur pipa. Hasil simulasi kemudian di diskusikan untuk melihat fenomena yang terjadi akibat adanya perbedaan dimensi pipa dan pemodelan pengelasan.



Gambar 5. Kondisi batas pada simulasi aliran fluida.



Gambar 6. Kondisi batas pada simulasi kekuatan pipa.

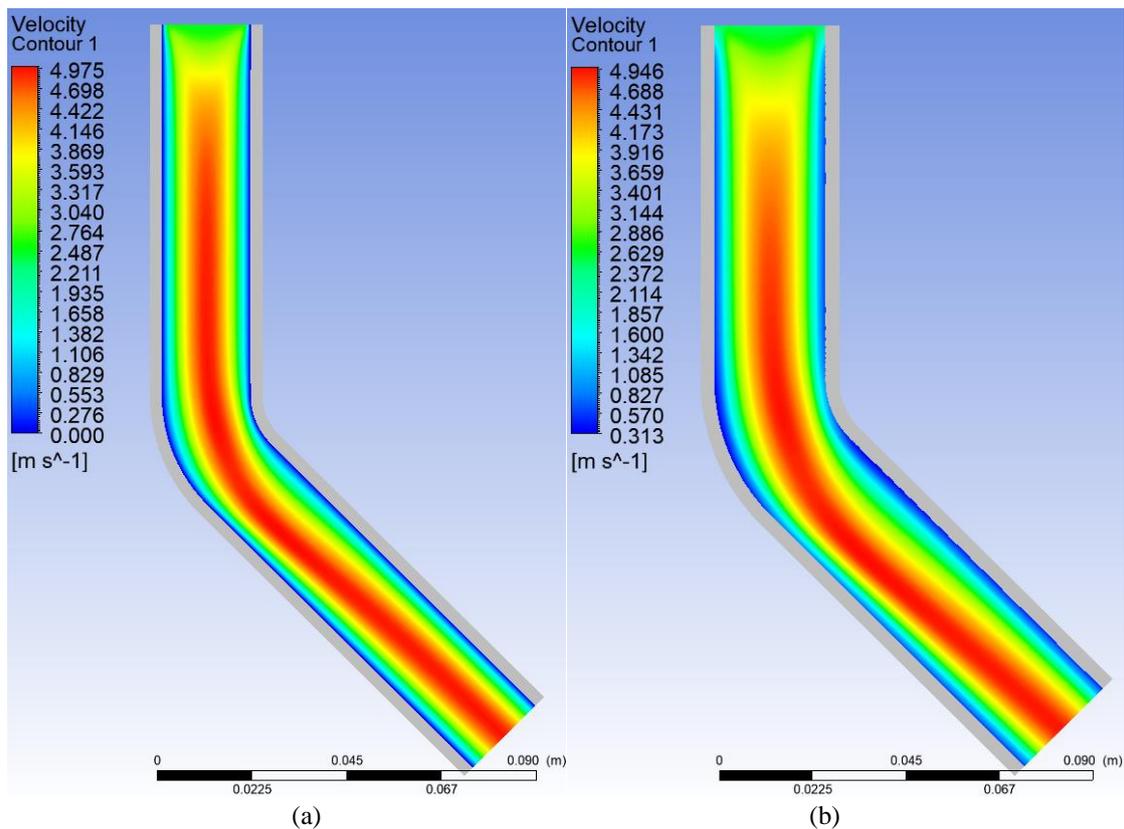
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Computational Fluid Dynamic

Kontur kecepatan dan pola aliran memberikan gambaran visual tentang distribusi kecepatan fluida di sepanjang pipa. Ketika fluida mengalir melalui pipa dengan *bending* 45 derajat, terjadi perubahan kecepatan aliran yang signifikan. Pada Gambar 7 dan Gambar 8 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan kecepatan aliran pada kedua pipa tersebut dengan kecepatan maksimal masing-masing 4,975 m/s dan 4,946 m/s pada pipa *bending* dan pengelasan. Perbedaan nilai yang didapat dikarenakan

perbedaan dimensi diameter dalam, dimana pipa *bending* diameternya lebih kecil dibandingkan dengan pipa pengelasan. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa distribusi kecepatan aliran fluida lebih besar di bagian tengah pipa daripada dinding dalam pipa, serta pada bagian *elbow* distribusi kecepatan mengalami peningkatan.

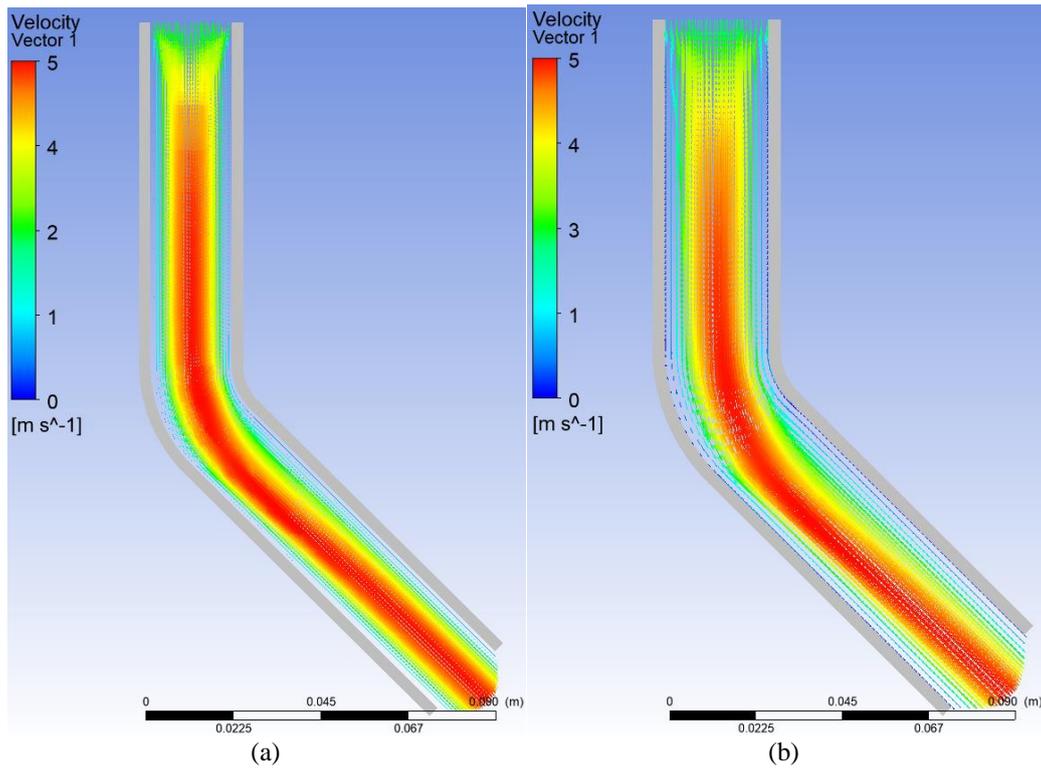
Pada hasil simulasi distribusi tekanan pada pipa, dapat dilihat bahwa tekanan yang paling besar terletak pada bagian *inlet* pipa dan tekanan yang paling kecil terletak pada *outlet* pipa (Gambar 9). Tekanan maksimal yang dihasilkan sebesar 148309 Pa untuk pipa *bending* dan 132388 Pa untuk pipa pengelasan. Hasil tekanan maksimum didapatkan karena bagian *inlet* merupakan bagian awal aliran fluida dialirkan. Pada bagian *elbow* menunjukkan bahwa tekanan masih lebih besar dibandingkan dengan tekanan pada bagian *outlet* pipa. Sehingga dari hasil ini bagian *inlet* dan *elbow* pada pipa perlu diperhatikan lebih lanjut untuk melihat respon struktur pipa tersebut.



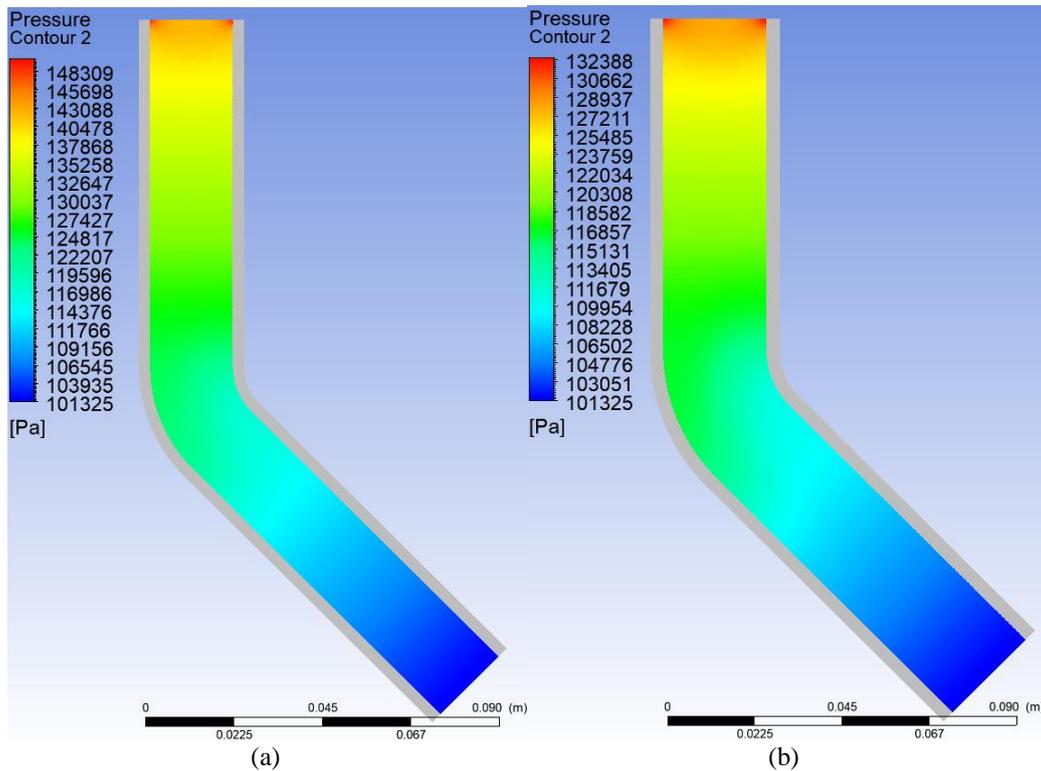
Gambar 7. Kecepatan aliran fluida pada (a) pipa *bending* dan (b) pipa pengelasan.

3.2 Static Structural

Setelah simulasi CFD di Ansys Fluent dilanjutkan dengan simulasi Ansys *Static Structural* untuk mendapatkan respon struktur pipa. Input beban yang digunakan untuk simulasi respon struktur didapatkan dari hasil CFD berupa tekanan terhadap bagian dalam pipa akibat aliran fluida. Respon struktur yang pertama adalah distribusi tegangan Von Mises di seluruh pipa. Pada penelitian ini hasil simulasi diambil dengan membelah menjadi dua pemodelan struktur pipa agar dapat melihat respon struktur pada bagian dalamnya. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa distribusi tegangan yang diterima oleh struktur paling besar terletak pada bagian *inlet* pipa dan juga bagian *elbow*. Nilai tegangan paling besar pada pipa *bending* sebesar 0,956 MPa dan pada pipa pengelasan sebesar 0,819 MPa (Lihat Gambar 10).



Gambar 8. Pola aliran fluida pada (a) pipa *bending* dan (b) pipa pengelasan.



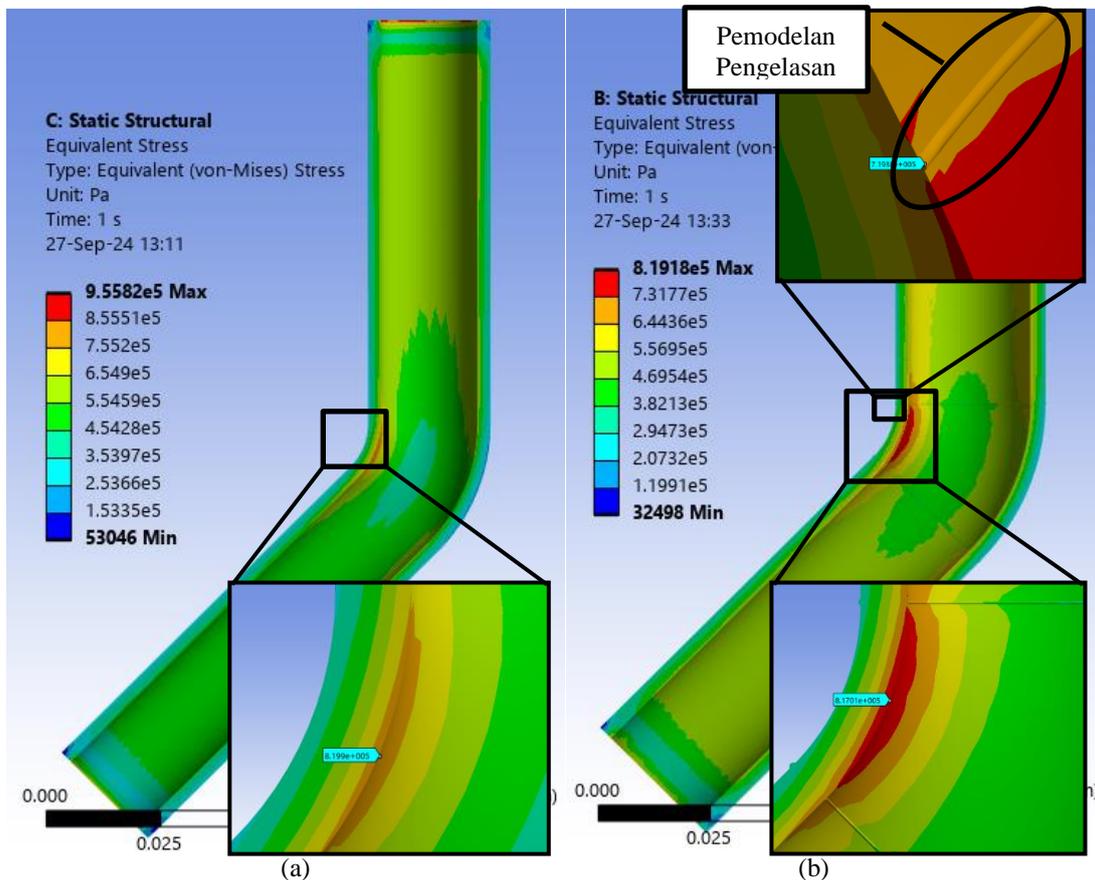
Gambar 9. Distribusi tekanan akibat aliran fluida pada (a) pipa *bending* dan (b) pipa pengelasan.

Hasil distribusi tegangan di sekitar bagian *elbow* juga menjadi fokus analisa pada penelitian ini. Pada penelitian ini bagian *elbow* di perbesar untuk mendapatkan detail hasil dari analisa simulasi yang dilakukan. Dapat dilihat pada Gambar 10 bahwa bagian *elbow* juga mendapatkan respon yang

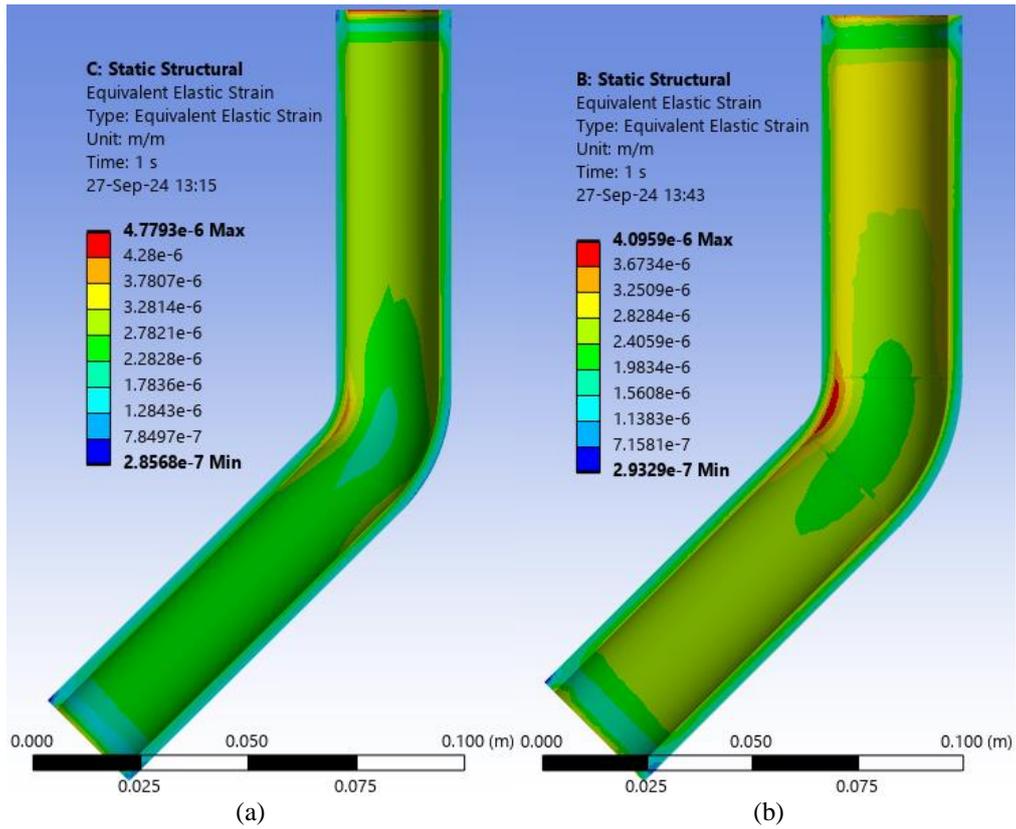
cukup besar. Pipa *bending* pada bagian *elbow* menghasilkan tegangan sebesar 0,8199 MPa (Gambar 10.a). Sedangkan pada pipa pengelasan, distribusi tegangan yang dihasilkan pada bagian *elbow* sebesar 0,817 MPa (Gambar 10.b pembesaran bawah). Penelitian ini juga memfokuskan pada bagian pemodelan pengelasan, dimana nilai distribusi tegangannya sebesar 0,719 MPa (Gambar 10.b pembesaran atas).

Respon struktur berikutnya adalah regangan, dimana distribusi yang dihasilkan akibat dari aliran fluida dapat dilihat pada Gambar 11. Lokasi regangan maksimum terdapat pada bagian *inlet* pipa dan *elbow*, sama dengan hasil tegangan maksimum. Nilai regangan maksimum untuk pipa *bending* dan *elbow* masing-masing adalah sebesar $4,7793E-6$ m/m dan $4,0959E-6$ m/m.

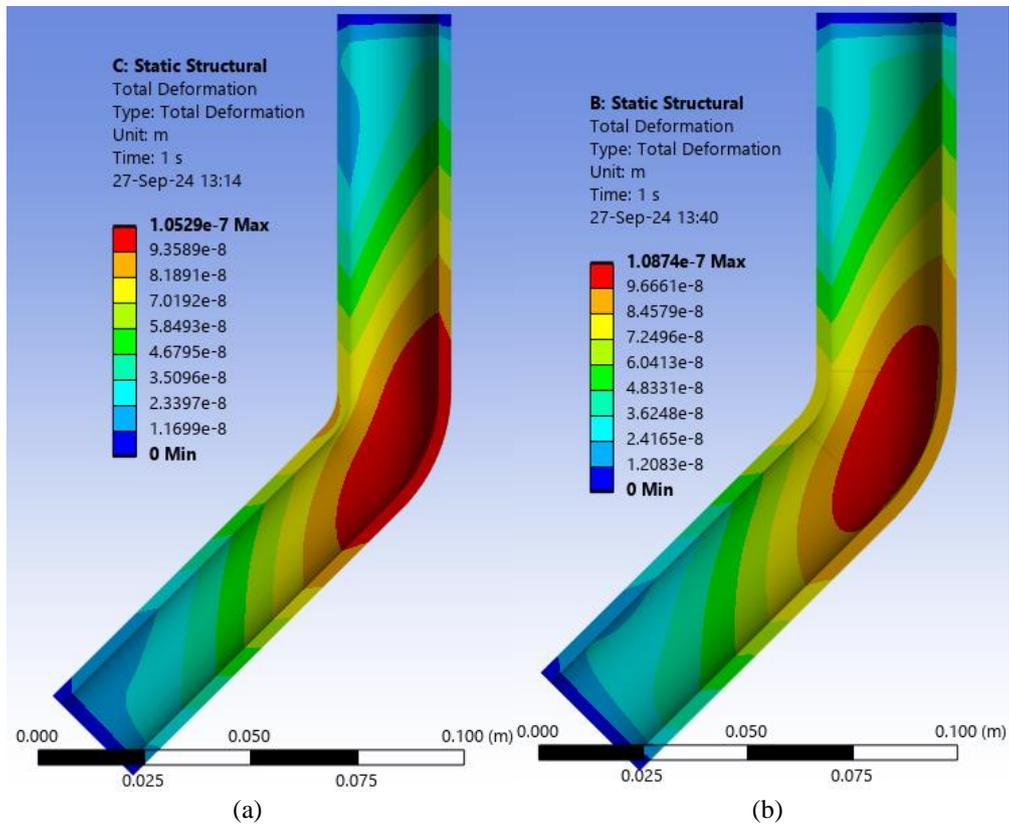
Hasil simulasi ketiga yang perlu diperhatikan adalah besarnya deformasi total yang terjadi pada struktur pipa akibat aliran fluida. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa deformasi total yang paling besar terjadi pada bagian *elbow* pipa dengan nilai sebesar 0,00010529 mm dan 0,00010874 mm untuk masing-masing pipa *bending* dan pipa *elbow* (Lihat Gambar 12). Nilai yang dihasilkan masih sangat kecil untuk memberikan dampak kepada integritas struktur. Namun, yang perlu menjadi perhatian lebih adalah lokasi terjadinya deformasi terletak di daerah *elbow*. Maka perlu dipastikan pada saat proses fabrikasi tidak terlalu banyak adanya cacat produksi pada bagian *elbow* yang dapat mengakibatkan penurunan integritas struktur.



Gambar 10. Distribusi tegangan akibat tekanan aliran fluida pada (a) pipa *bending* dan (b) pipa pengelasan.



Gambar 11. Distribusi regangan akibat tekanan aliran fluida pada (a) pipa *bending* dan (b) pipa pengelasan.



Gambar 12. Distribusi deformasi akibat tekanan aliran fluida pada (a) pipa *bending* dan (b) pipa pengelasan.

3.3 Diskusi

Pendekatan *fluid-structure interaction* pada analisa aliran fluida terhadap variable dimensi diameter dalam dan pemodelan fabrikasi pipa *elbow* berdampak pada beberapa factor. Faktor yang pertama adalah kecepatan aliran dalam pada pipa, yang mana semakin kecil diameter dalam pipa maka kecepatan aliran semakin besar dan berlaku sebaliknya untuk kecepatan *inlet* yang sama. Kecepatan aliran ini juga berdampak pada tekanan yang didapatkan pada bagian dalam pipa yang mana dengan kecepatan *inlet* yang sama, tekanan yang dihasilkan lebih besar jika diameter dalam pipa lebih kecil. Sehingga dapat dinyatakan bahwa semakin kecil diameter dalam pipa, maka kecepatan aliran dan tekanan semakin besar pada kecepatan *inlet* yang sama, ini sejalan dengan penelitian [1] - [3].

Faktor ketiga yang dapat dibahas adalah respon struktur berupa distribusi tegangan, distribusi regangan, dan distribusi deformasi pada struktur pipa *elbow*. Sejalan dengan pembahasan pada paragraph sebelumnya bahwa jika diameter dalam pipa semakin kecil maka distribusi tegangan dan regangan yang dihasilkan semakin besar jika dibandingkan dengan ukuran diameter dalam pipa yang lebih besar. Ini karena kecepatan aliran dan distribusi tekanan meningkat jika diameter dalam pipa lebih kecil, pada kecepatan *inlet* yang sama. Selain itu juga dikarenakan adanya jalur pipa yang berbelok pada bagian *elbow*, pola aliran dan tekanan terjadi perubahan, sehingga dapat meningkatkan respon struktur. Hasil dari penelitian ini juga sejalan dengan penelitian terdahulu oleh [9] - [11].

Respon struktur pada bagian pengelasan juga perlu diperhatikan karena bagian ini cukup rentan dalam mengurangi integritas struktur [12]. Jika pada bagian ini terdapat cacat pada saat proses pengelasan maka dapat berdampak pada penurunan kekuatan struktur sehingga dapat mengakibatkan umur struktur jadi berkurang [13]. Hasil simulasi distribusi tegangan pada sambungan pengelasan didapatkan nilai yang tidak jauh berbeda dengan di sekitar *elbow*, hanya kurang 12% dari nilai tegangan maksimum. Maka perlu dipertimbangkan pengaruh sambungan pengelasan pada saat proses desain dan fabrikasi pipa *elbow* terhadap aliran dalam fluida, karena dapat berdampak pada penurunan integritas struktur yang berakibat pada umur pakai struktur menjadi berkurang. Oleh karena itu pada penelitian selanjutnya perlu dibahas akibat adanya cacat pada sambungan pengelasan (*root undercut, root concave, incomplete penetration, lack of root fusion, misalignment*) terhadap respon struktur serta menentukan umur kelelahan struktur pipa tersebut.

4. KESIMPULAN

Analisa aliran fluida minyak bahan bakar pada pipa *elbow* 45 derajat kapal tugboat telah dilakukan dengan metode pendekatan *fluid-structure interaction* (FSI). Hasil dari simulasi didapatkan bahwa respon struktur yang dialami oleh pipa berbeda berdasarkan variable diameter pipa. Semakin kecil diameter dalam pipa maka semakin besar pula respon struktur pada kecepatan *inlet* yang sama. Dari penelitian ini juga dapat ditemukan bahwa selain di area *inlet* aliran fluida, pada bagian *elbow* mendapatkan respon struktur yang besar. Ini dikarenakan terjadi adanya perubahan bentuk dan dimensi dari pipa sehingga pola aliran dan tekanan terjadi perubahan pula. Selain itu, pada bagian sambungan pengelasan perlu perhatian khusus karena distribusi tegangan yang terjadi hanya kurang 12% dari tegangan maksimum pada *elbow*. Area pada pengelasan jika terdapat adanya cacat fabrikasi maka dapat berdampak pada semakin meningkatnya respon struktur. Maka dari itu untuk penelitian selanjutnya dapat di fokuskan pada bagian pengelasan dan juga analisa umur kelelahan struktur dengan memperhitungkan adanya cacat fabrikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima Kasih kepada PT. XYZ yang telah memberikan data untuk penelitian ini. Ucapan juga disampaikan kepada Laboratorium Komputer Jurusan Teknik Mesin dan Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Politeknik Negeri Batam sehingga penelitian ini terlaksana dengan baik.

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] D. Pratama, K. Hadiningrum, and R. F. Muldiani, ‘Studi Awal Pengaruh Temperatur terhadap Karakteristik Aliran Fluida Pada Belokan Pipa 90° melalui Simulasi’, *JM*, vol. 11, no. 2, p. 68, Jul. 2022, doi: 10.35799/jm.v11i2.41826.
- [5] C. Gong, S. Guo, R. Zhang, and D. M. Frangopol, ‘Prediction of burst pressure of corroded thin-walled pipeline elbows subjected to internal pressure’, *Thin-Walled Structures*, vol. 199, p. 111861, Jun. 2024, doi 10.1016/j.tws.2024.111861.
- [6] L. R. Krisnanda, A. Santoso, and T. F. Nugroho, ‘Analisa Laju Erosi pada Elbow Pipa Karena Partikel Pasir Dalam Aliran Fluida Gas Menggunakan Simulasi CFD’, *JTITS*, vol. 8, no. 2, pp. B57–B62, Jan. 2020, doi: 10.12962/j23373539.v8i2.48218.
- [7] E. Smyk, M. Stopel, and M. Szyca, ‘Simulation of Flow and Pressure Loss in the Example of the Elbow’, *Water*, vol. 16, no. 13, p. 1875, Jun. 2024, doi 10.3390/w16131875.
- [8] A. A. Abuhatira, S. M. Salim, and J. B. Vorstius, ‘CFD-FEA based model to predict leak-points in a 90-degree pipe elbow’, *Engineering with Computers*, vol. 39, no. 6, pp. 3941–3954, Dec. 2023, doi: 10.1007/s00366-023-01853-4.
- [9] A. Cambaz, Y. Furkan Gorgulu, and H. Arat, ‘Analysing fluid-structure interaction with CFD and FEA on a marine double-wall LNG piping system’, *Pomorstvo (Online)*, vol. 36, no. 1, pp. 51–60, Jun. 2022, doi: 10.31217/p.36.1.6.
- [10] S. Simandjuntak, B. Lin, B. Affendy, and F. Akther, ‘Combined residual stresses and fluid-structure interaction finite element analysis on bent pipes’, *Materials at High Temperatures*, vol. 38, no. 5, pp. 351–357, Sep. 2021, doi 10.1080/09603409.2021.1971358.
- [11] L. Sun and Y. Ding, ‘FLUID–STRUCTURE-INTERACTION ANALYSIS FOR WELDED PIPES WITH FLOW-ACCELERATED CORROSION WALL THINNING’, *CNL Nuclear Review*, vol. 5, no. 1, pp. 49–65, Jun. 2016, doi: 10.12943/CNR.2015.00055.
- [12] J. Baumgartner, A. Hobbacher, and F. Lefebvre, ‘Recent update of the IIW-recommendations for the fatigue assessment of welded joints and components’, *Procedia Structural Integrity*, vol. 57, pp. 618–624, 2024, doi: 10.1016/j.prostr.2024.03.068.
- [13] H. Bartsch and M. Feldmann, ‘Fatigue class combination model to quantify the influence of multiple weld imperfections on fatigue strength’, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 222, p. 108930, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jcsr.2024.108930.
- [14] Lee, K., Cho, J., & Kim, J. (2023). Force/Moment-Conserving Pressure Mapping Scheme for Fluid/Structure Interaction Analysis. *AIAA Journal*. <https://doi.org/10.2514/1.j062519>.

- [15] Sun, H., Sze, K., Chow, K., & Tsang, A. (2022). A comparative study on computational fluid dynamic, fluid-structure interaction, and static structural analyses of cerebral aneurysm. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 16, 262 - 278. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.2013322>.