

Analisis Kekuatan Struktur dengan Sambungan Las pada *Structural Profile* Penyangga Pipa Drainase di *Grouting Tunnel* Menggunakan Metode *Finite Element Analysis*

Aswin Prasetyo Nugroho⁽¹⁾, Raka Mahendra Sulisty^{(2)*}, R Faiz Listyanda⁽³⁾,
Trisma Jaya Saputra⁽⁴⁾

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Tidar
Jalan Kapten Suparman 39 Magelang, Indonesia

Email: ¹aswin.prasetyo.nugroho@students.untidar.ac.id, ²rakamahendras@untidar.ac.id

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima 14 Juni 2026
Direvisi 16 Juni 2026
Disetujui 03 Agustus 2026
Dipublikasikan 15 Agustus 2026

Keywords:

Welded joint; finite element analysis; structural profile; safety factor; drainage pipe

Kata Kunci:

Sambungan las; finite element analysis; structural profile; safety factor; pipa drainase

Corresponding Author:

Name:
Raka Mahendra Sulisty
Email:
rakamahendras@untidar.ac.id

Abstract: *Welded joints are critical components in steel structures because they experience high stress concentrations and have the potential to cause structural failure. This study aimed to analyze the strength of welded joints on the structural Profile used as a drainage pipe support in a grouting tunnel using the Finite Element Analysis (FEA) method. The study employed a quantitative experimental approach through three-dimensional modeling and simulation using ANSYS software. The analysis focused on equivalent stress, total deformation, and safety factor under static loading conditions with variations in loading point distances of 17.5 cm, 35 cm, and 67.5 cm from the support point to evaluate the effect of load distribution on structural response. The results showed that the highest stress concentration occurred in the weld toe and weld root areas, which are critical regions susceptible to structural failure. Variations in loading position significantly affected the stress distribution and deformation of the structure, where greater loading distances from the support point tended to increase stress and deformation values. However, the structure still satisfied the minimum safety factor requirements based on AWS and AISC standards. The findings demonstrate that the FEA method is capable of effectively predicting structural behavior and providing recommendations for optimizing welded joint design in drainage pipe support structures.*

Abstrak: Sambungan las merupakan komponen kritis pada struktur baja karena mengalami konsentrasi tegangan tinggi dan berpotensi mengalami kegagalan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan sambungan las pada structural Profile penyangga pipa drainase di grouting tunnel menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA). Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif melalui pemodelan tiga dimensi dan simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS. Analisis dilakukan terhadap equivalent stress, total deformation, dan safety factor pada kondisi pembebanan statis dengan variasi jarak titik pembebanan sebesar 17,5 cm, 35 cm, dan 67,5 cm dari titik tumpu untuk mengetahui pengaruh distribusi beban terhadap respons struktur. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada area weld toe dan weld root yang menjadi area kritis terhadap kegagalan struktur. Variasi posisi pembebanan memberikan pengaruh terhadap distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur, di mana semakin jauh jarak pembebanan dari titik tumpu maka nilai tegangan dan deformasi cenderung meningkat. Namun demikian, struktur masih

memenuhi persyaratan minimum safety factor berdasarkan standar AWS dan AISC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode FEA mampu memprediksi perilaku struktur secara efektif dan memberikan rekomendasi optimasi desain sambungan las pada struktur penyangga pipa drainase.

PENDAHULUAN

Perkembangan industri konstruksi dan infrastruktur mendorong penggunaan struktur baja karena memiliki kekuatan tinggi, efisiensi material, serta kemudahan dalam proses fabrikasi dan instalasi. Salah satu metode penyambungan yang paling banyak digunakan adalah sambungan las karena mampu menghasilkan ikatan permanen dengan kekuatan mekanik yang tinggi (Society, 2020). Pada struktur penyangga pipa drainase di *grouting tunnel*, sambungan las menjadi komponen kritis karena menerima beban dari berat pipa, fluida yang mengalir, serta gaya reaksi tumpuan. Kondisi tersebut dapat menimbulkan konsentrasi tegangan, deformasi berlebih, hingga kegagalan struktur apabila desain sambungan tidak sesuai dengan kapasitas pembebanan (Callister & Rethwisch, 2018).

Perkembangan teknologi simulasi numerik melalui metode *Finite Element Analysis* (FEA) memungkinkan analisis distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan dilakukan secara lebih detail dan efisien (Cook et al., 2007). Selain mengurangi biaya eksperimen, metode ini juga mampu mengidentifikasi daerah kritis yang berpotensi mengalami kegagalan sebelum struktur diaplikasikan di lapangan (Inc., 2022). Penggunaan FEA pada analisis sambungan las telah banyak dilakukan dan terbukti mampu menghasilkan prediksi distribusi tegangan yang lebih akurat dibandingkan metode analitik konvensional (Wang et al., 2020).

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa parameter pengelasan, geometri sambungan, dan konfigurasi struktur memengaruhi distribusi tegangan dan deformasi pada sambungan las (Ayof et al., 2019; Biswas & Mandal, 2010; Deshpande et al., 2011; Heinemann, 2021). Penelitian lain menunjukkan bahwa daerah *weld toe* dan *weld root* merupakan lokasi dengan konsentrasi tegangan tertinggi dan berpotensi menjadi titik awal kegagalan struktur (Jimenez Mena et al., 2021; Song et al., 2015). Selain itu, berbagai penelitian pada sambungan *pipe-flange*, sambungan tidak sejenis, dan struktur baja kompleks juga membuktikan bahwa metode FEA efektif dalam mengevaluasi perilaku sambungan las dan memprediksi kegagalan struktur (Abid & Qarni, 2010; Chen et al., 2023; Collomb, 2022; Jimenez Mena et al., 2021; Prajadhiana, 2016; Zhao et al., 2019). Di Indonesia, penelitian serupa juga menunjukkan bahwa konfigurasi sambungan las memengaruhi distribusi tegangan dan deformasi struktur baja (Efendi, 2024; Nursani & Al Huseiny, 2021; Sudarman et al., 2021).

Meskipun demikian, penelitian mengenai *structural Profile* penyangga pipa drainase di *grouting tunnel* dengan variasi posisi pembebanan masih terbatas. Selain itu, penelitian terdahulu umumnya hanya mengevaluasi nilai maksimum *equivalent stress*, *total deformation*, dan *safety factor*, tanpa mengkaji distribusi deformasi berdasarkan persentase luas area yang mengalami deformasi. Padahal, informasi tersebut penting untuk menggambarkan tingkat kekakuan dan sebaran deformasi pada struktur secara lebih komprehensif.

Berdasarkan kondisi tersebut, kebaharuan penelitian ini terletak pada penambahan parameter persentase luas area deformation dalam analisis FEA untuk mengevaluasi perilaku struktur penyangga pipa drainase di *grouting tunnel*. Pendekatan ini tidak hanya meninjau nilai deformasi maksimum, tetapi juga menganalisis sebaran area yang mengalami deformasi sehingga menghasilkan evaluasi yang lebih representatif terhadap kinerja dan keamanan struktur.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan sambungan las pada *structural Profile* penyangga pipa drainase di *grouting tunnel* menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dengan variasi jarak titik pembebanan sebesar 17,5 cm, 35 cm, dan 67,5 cm dari titik tumpu. Analisis dilakukan terhadap parameter *equivalent stress*, *total deformation*, *safety factor*, dan persentase luas area *deformation* untuk memperoleh konfigurasi struktur yang paling aman dan optimal sebagai dasar rekomendasi desain penyangga pipa drainase di lapangan.

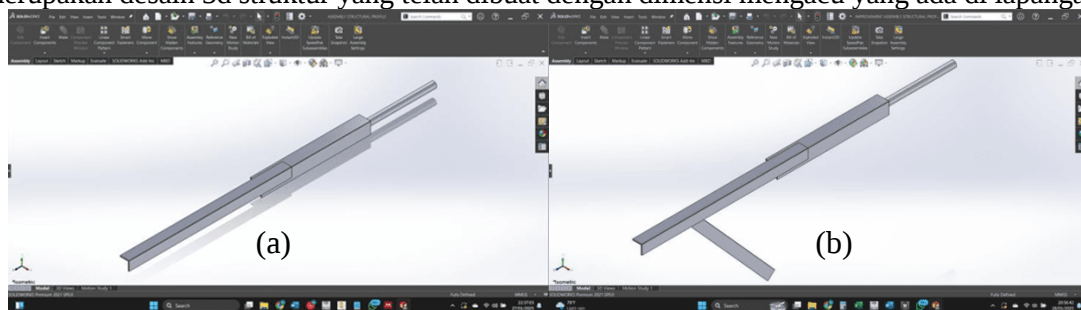
METODE

Penelitian ini dikategorikan sebagai penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif, yang dirancang untuk menganalisis kekuatan struktur dengan sambungan las pada *structuraL Profile* yang digunakan sebagai penyangga pipa drainase di *grouting tunnel*. Pendekatan kuantitatif dipilih untuk memungkinkan pengumpulan data numerik yang dapat dianalisis secara statistik, sehingga memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang perilaku struktural dengan sambungan las di bawah kondisi beban tertentu.

Metode analisis yang diterapkan pada penelitian ini adalah *Finite Element Analysis* (FEA), yang merupakan teknik analitis canggih dalam rekayasa struktur. FEA memungkinkan pemodelan dan analisis distribusi tegangan serta deformasi pada struktur dengan sambungan las dengan tingkat akurasi tinggi, serta memberikan wawasan mengenai titik-titik kritis dalam struktur yang mungkin mengalami konsentrasi tegangan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan struktur dengan sambungan las, tetapi juga untuk memberikan rekomendasi desain yang lebih baik berdasarkan hasil analisis yang diperoleh

Desain 3D struktur

Desain 3D struktur dimulai dengan pembuatan model geometris dari *structuraL Profile* penyangga pipa drainase menggunakan *software* SolidWorks. Model ini mencakup semua elemen penting dari struktur, termasuk dimensi, bentuk, dan atribut material. Proses pemodelan ini melibatkan pengaturan parameter geometris yang sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah ditentukan sebelumnya. Setiap bagian dari struktur diperhatikan dengan cermat untuk memastikan bahwa model tersebut merepresentasikan kondisi nyata di lapangan. Berikut merupakan desain 3d struktur yang telah dibuat dengan dimensi mengacu yang ada di lapangan.



Gambar 1. (a) Original Geometry; (b) Improvement Geometry

Engineering Data: Material View	
Steel ST37	
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,30000
Bulk Modulus	1,6667e+05 MPa
Shear Modulus	76923 MPa
Tensile Ultimate Strength	350,00 MPa
Tensile Yield Strength	235,00 MPa

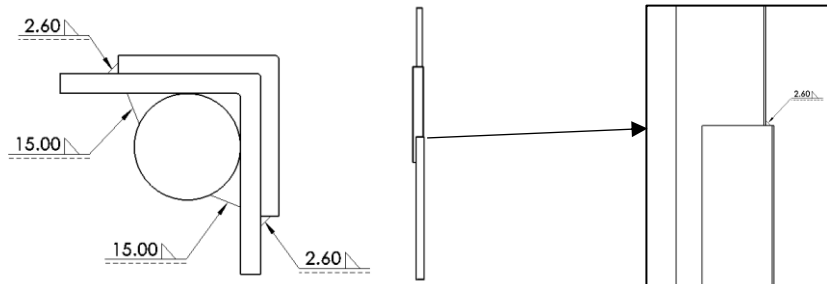
Gambar 2. Material Properties Structural Profile

Pada gambar 1 terdapat bentuk dari geometry pada penyangga pipa drainase, terdapat geometri asli dan geometri modifikasi. Pada gambar 2.2 terdapat *material properties* yang digunakan geometri pada penyangga pipa drainase.

Pemodelan sambungan las

Setelah model struktur selesai, kemudian file diunggah menggunakan format STEP dan dilakukan proses pemodelan las menggunakan *software* Inventor. Desain sambungan las merupakan aspek krusial dalam analisis kekuatan, karena sambungan ini merupakan titik kritis di mana beban diteruskan antara komponen-komponen struktural. Dalam tahap ini, jenis sambungan

las yang digunakan menggunakan *lap joint*, dan *corner joint*, berdasarkan pertimbangan kondisi yang ada di lapangan. Dimensi sambungan las menggunakan ukuran 2.6 mm dan pada sambungan las antara *Circular Profile* dengan *L Profile* menggunakan ukuran 15 mm. Elektroda yang digunakan menggunakan RB 26, dengan nilai ampere yang digunakan di rentang 55-65 A.



Gambar 1. Pemodelan pengelasan

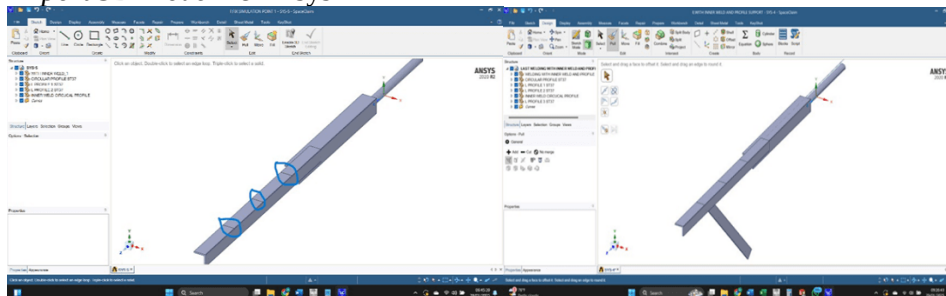
Engineering Data: Material View	
Welding Electrode RB26	
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,29000
Bulk Modulus	1,5873e+05 MPa
Shear Modulus	77519 MPa
Tensile Ultimate Strength	510,00 MPa
Tensile Yield Strength	450,00 MPa

Gambar 2. Material properties RB26 electrode

Pre-Processing

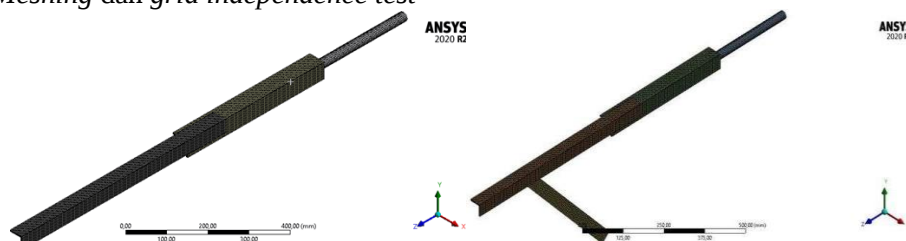
Proses *pre-processing* meliputi:

- Import 3D Model ke Ansys

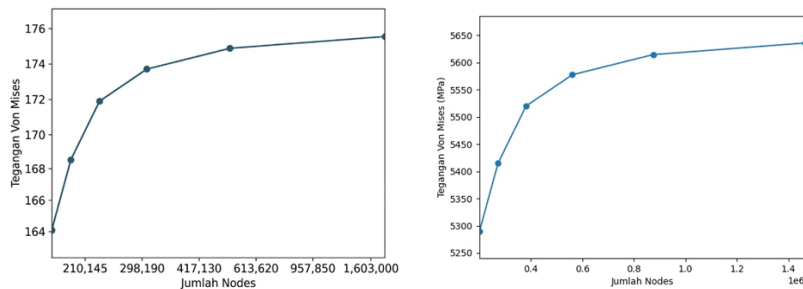


Gambar 5. Import 3D Model ke Ansys

- Meshing dan grid independence test



Gambar 3. Meshing



Gambar 4. Grid Independence Test

Tabel 1. Grid Independence Test Original Geometry

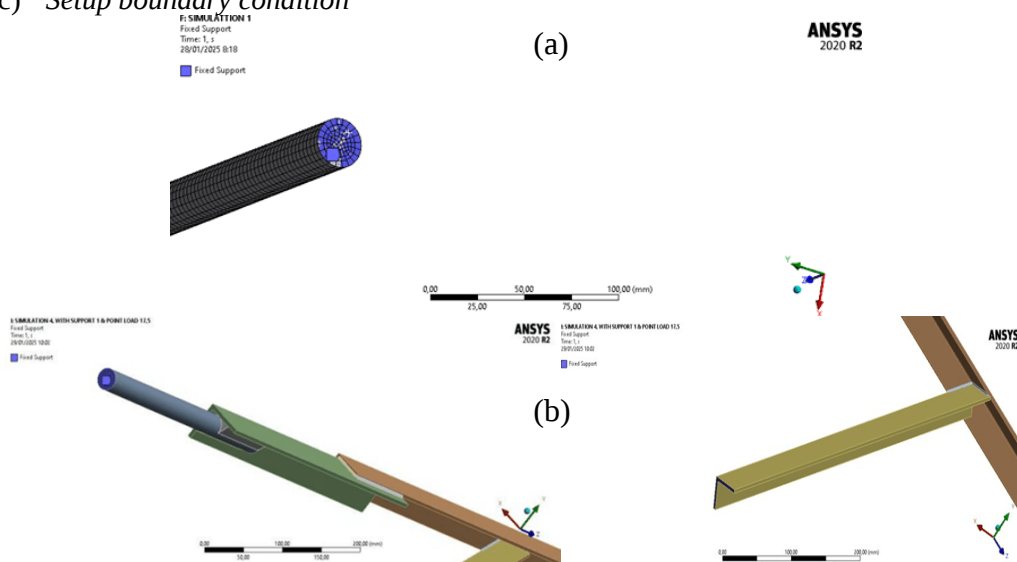
Running	Mesh Size Profil (Mm)	Mesh Size Las (Mm)	Jumlah Nodes	Jumlah Elemen	Von Mises (Mpa)	Error (%)
1	5,16	2,09	200.250	99.418	5.290,1	-
2	4,66	1,59	272.500	135.290	5.415,2	2,31%
3	4,16	1,09	381.165	189.152	5.520,1	1,90%
4	3,66	0,59	560.800	278.435	5.577,6	1,03%
5	3,16	0,09	875.400	434.630	5.614,7	0,66%
6	2,66	0,045	1.465.000	727.350	5.636,03	0,38%

Tabel 2. Grid Independence Test Improvement Geometry

Running	Mesh Size Profil (Mm)	Mesh Size Las (Mm)	Jumlah Nodes	Jumlah Elemen	Von Mises (Mpa)	Error (%)
1	5,16	2,09	210.145	104.090	168,45	-
2	4,66	1,59	298.190	141.650	171,12	1,58%
3	4,16	1,09	417.130	198.047	173,56	1,42%
4	3,66	0,59	613.620	291.530	174,88	0,76%
5	3,16	0,09	957.850	455.030	175,27	0,22%
6	2,66	0,045	1.603.000	761.500	175,45	0,10%

Pada tahap ini, geometri yang telah di-meshing diuji untuk menentukan hasil meshing yang sesuai dengan menggunakan *grid independent test*. Geometri akan dimeshing dan diuji berdasarkan tingkat ketelitian meshing sehingga diperoleh hasil yang stabil atau hasil yang memiliki perbedaan kurang dari 1%. Pada geometri asli dan *improvement geometry*, keduanya sama-sama menggunakan mesh size profil 3,16 mm dan mesh size las 0,09 mm dengan jenis elemen *hexcore*.

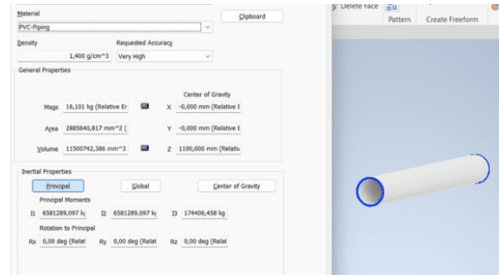
c) Setup boundary condition



Gambar 5. (a) Setup boundary Condition Original Geometry; (b) Setup Boundary Condition Improvement Geometry

Pada tahap ini, geometri didefinisikan *fixed* terhadap dinding *tunnel*. Pada gambar 2.8 (a) letak *fixed support* pada geometri terdapat pada ujung *Circular Profile* saja, sedangkan pada geometri yang telah di improvisasi terdapat 2 titik *fixed support* yang terletak pada *Circular Profile* dan juga pada ujung *L Profile* penyangga bawah.

a) Penentuan Beban dan Lokasi Pembebanan



Gambar 6. Beban

Volume Pipa

$$v = \pi \times r^2 \times h$$

$$v = 3,14 \times 0,12 \times 2,2$$

$$v = 0,06908 \text{ m}^3$$

Massa Air

$$m = \rho \times v$$

$$m = 1000 \times 0,06908$$

$$m = 69,08 \text{ kg/m}$$

Berat Air

$$w = m \times g$$

$$w = 69,08 \times 9,81$$

$$w = 677,675 \text{ N}$$

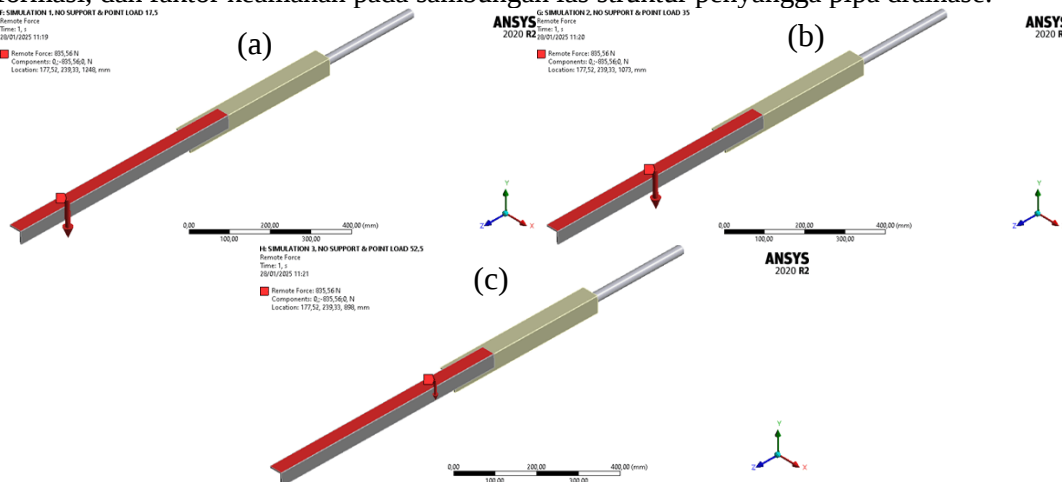
Berat Total

$$\Delta w = w_{\text{pipe}} + w_{\text{water}}$$

$$\Delta w = 157,886 + 677,675$$

$$\Delta w = 835,5612 \text{ N}$$

Pada penelitian ini, pembebanan diberikan dalam arah vertikal ke bawah (arah sumbu negatif-Y) untuk merepresentasikan kondisi aktual yang terjadi pada penyangga pipa drainase, yaitu akibat kombinasi berat pipa dan berat fluida yang mengalir di dalam pipa. Beban diterapkan secara statis pada bagian atas struktur dengan tiga variasi posisi pembebanan, yaitu pada jarak 17,5 cm, 35 cm, dan 67,5 cm dari titik tumpu (*fixed support*). Variasi jarak pembebanan tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan lengan momen terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada sambungan las struktur penyangga pipa drainase.



Gambar 7. (a) Variasi Jarak Pembebanan 17,5cm; (b) Variasi Jarak Pembebanan 35cm (c) Variasi Jarak Pembebanan 67,5cm

Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan *software* Ansys dengan jenis simulasi *Static Structural*. Hasil akhir pada simulasi ini menampilkan data hasil analisis seperti *Stress*,

Deformation, dan *Safety Factor* yang nantinya digunakan sebagai tolak ukur dalam validasi hasil analisis dalam aspek keamanan

Validasi, Improvisasi, dan Komparasi Hasil

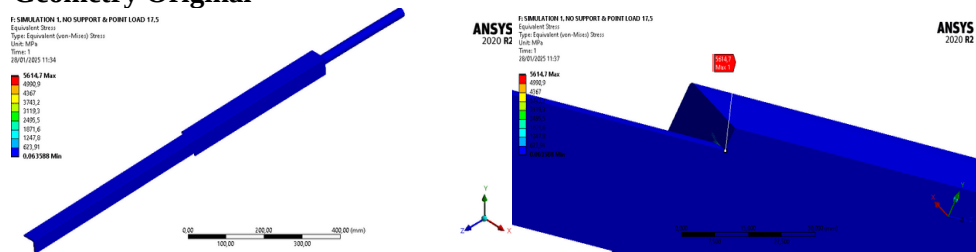
Validasi hasil penelitian merupakan langkah penting untuk memastikan keakuratan dan kredibilitas temuan yang diperoleh dari analisis simulasi. Validasi dilakukan dengan mengacu pada literatur yang digunakan untuk memastikan apakah hasil simulasi sudah sesuai dengan standar yang berlaku.

Improvisasi dalam penelitian ini merujuk pada langkah-langkah perbaikan yang diambil berdasarkan hasil analisis dan validasi. Jika hasil simulasi menunjukkan bahwa sambungan las pada *structuraL Profile* tidak memenuhi kriteria kekuatan yang diinginkan atau jika faktor keamanan berada di bawah nilai minimum yang ditetapkan, maka desain struktur dan sambungan las dapat dimodifikasi. Komparasi hasil adalah proses membandingkan hasil dari simulasi awal dengan simulasi yang telah diperbaiki dengan peningkatan. Proses komparasi ini bertujuan untuk menilai apakah hasil penelitian sejalan dengan praktik terbaik dalam industri atau terdapat perbedaan signifikan yang perlu diperhatikan. Melalui langkah-langkah validasi, improvisasi, dan komparasi hasil ini, penelitian diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pemahaman tentang kekuatan sambungan las pada *structuraL Profile* penyangga pipa drainase tetapi juga menghasilkan rekomendasi praktis yang dapat diterapkan dalam proyek-proyek konstruksi serupa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

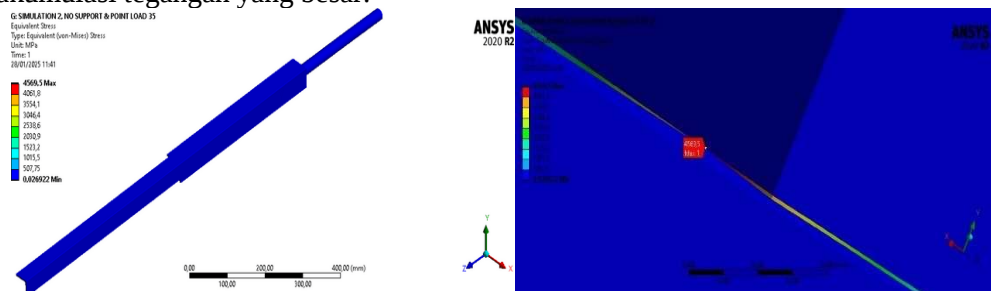
Equivalent Stress

a. Geometry Original



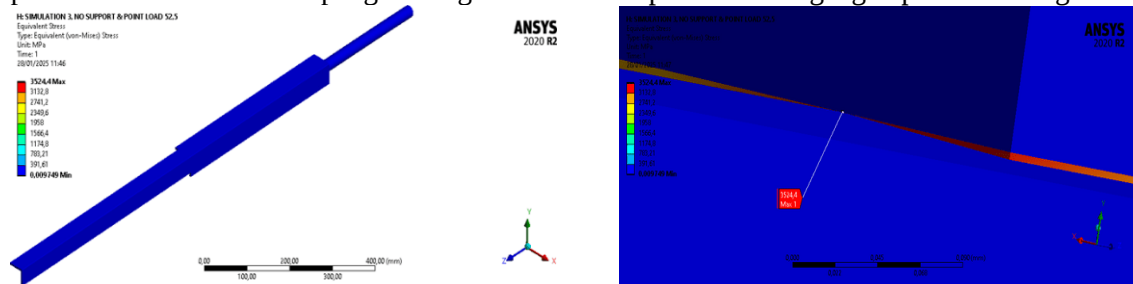
Gambar 11. *Equivalent Stress* Pembebanan jarak 17,5 cm

Berdasarkan Gambar 11, distribusi tegangan pada struktur menunjukkan adanya konsentrasi tegangan yang sangat tinggi pada daerah sambungan las antara *Circular Profile* dan *L Profile* 1 dengan nilai maksimum sebesar 5614,7 MPa. Nilai tersebut jauh melampaui *tensile strength* elektroda RB26 sebesar 510 MPa, sehingga struktur berada pada kondisi tidak aman dan berpotensi mengalami *crack* maupun *fracture* pada daerah sambungan las. Konsentrasi tegangan yang terjadi pada area sambungan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wang et al. (2020) yang menyatakan bahwa daerah sambungan las, khususnya pada *weld toe* dan *weld root*, merupakan lokasi dengan konsentrasi tegangan tertinggi dan menjadi titik awal terjadinya kegagalan struktur. Selain itu, hasil ini juga sejalan dengan penelitian oleh (Jimenez Mena et al., 2021) yang menunjukkan bahwa daerah sambungan las memiliki potensi kegagalan tertinggi akibat akumulasi tegangan yang besar.



Gambar 12. *Equivalent Stress* Pembebanan jarak 35 cm

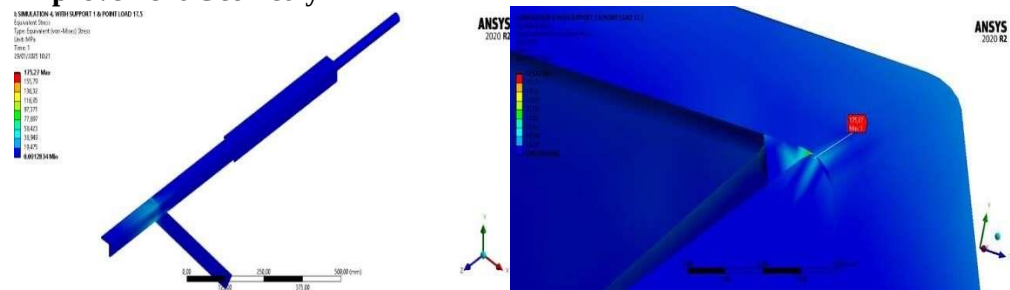
Pada Gambar 12, nilai *equivalent stress* maksimum menurun menjadi 4569,5 MPa, namun masih jauh di atas batas kekuatan material. Penurunan ini menunjukkan bahwa perubahan posisi pembebanan memengaruhi distribusi tegangan pada struktur, tetapi belum mampu menghilangkan konsentrasi tegangan pada daerah sambungan las. Hasil ini sejalan dengan penelitian Heinemann (2021) yang menyatakan bahwa perubahan geometri dan posisi pembebanan memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan pada sambungan las.



Gambar 13. *Equivalent Stress* Pembebanan jarak 67,7 cm

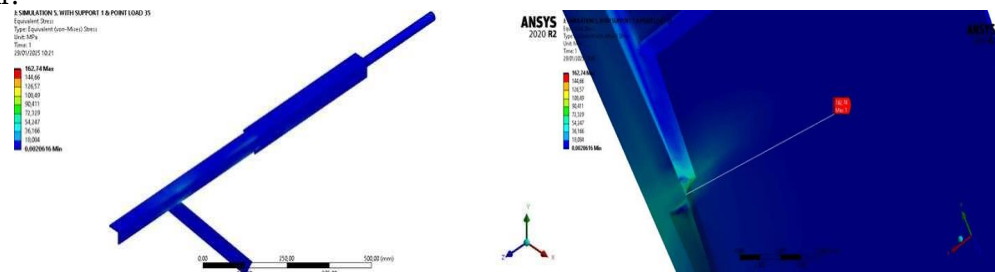
Berdasarkan Gambar 13, nilai *equivalent stress* maksimum kembali menurun menjadi 3524,4 MPa, tetapi masih melebihi batas tegangan yang diizinkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa desain awal struktur belum mampu mendistribusikan beban secara efektif. Hasil penelitian ini mendukung penelitian Chen et al. (2023) yang menyatakan bahwa metode FEA mampu mengidentifikasi daerah kritis dan memprediksi potensi kegagalan sambungan las pada struktur baja kompleks sebelum struktur diimplementasikan di lapangan.

b. Improvement Geometry



Gambar 11. *Equivalent Stress* Pembebanan jarak 17,5 cm

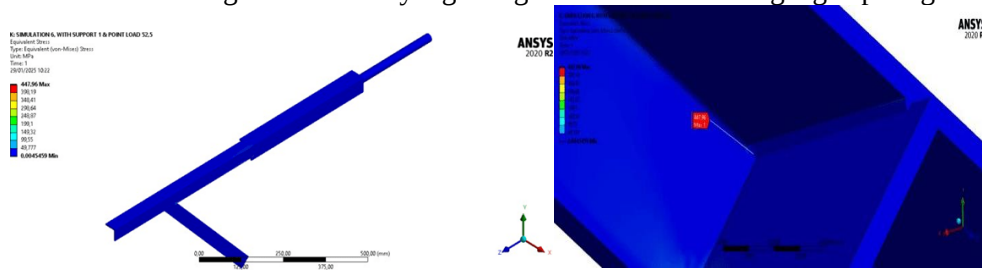
Pada Gambar 14, setelah dilakukan improvisasi desain dengan penambahan *L Profile* 3, nilai *equivalent stress* turun drastis menjadi 175,27 MPa dan berada di bawah batas kekuatan material. Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan elemen penopang mampu memperbaiki distribusi beban dan mengurangi konsentrasi tegangan pada sambungan las. Hasil ini sejalan dengan penelitian Zhao et al. (2019) yang menyatakan bahwa modifikasi geometri dan perlakuan pada sambungan las dapat menurunkan tegangan residu dan meningkatkan performa struktur.



Gambar 12. *Equivalent Stress* Pembebanan jarak 35 cm

Pada Gambar 15 diperoleh nilai *equivalent stress* terendah, yaitu sebesar 162,74 MPa. Distribusi tegangan yang lebih merata menunjukkan bahwa konfigurasi pembebanan pada jarak 35 cm menghasilkan kondisi struktur yang paling optimal. Hasil ini mendukung penelitian Song et al. (2015) yang menyatakan bahwa pemodelan elemen hingga dapat digunakan untuk

menentukan konfigurasi struktur yang menghasilkan distribusi tegangan paling efektif dan aman.

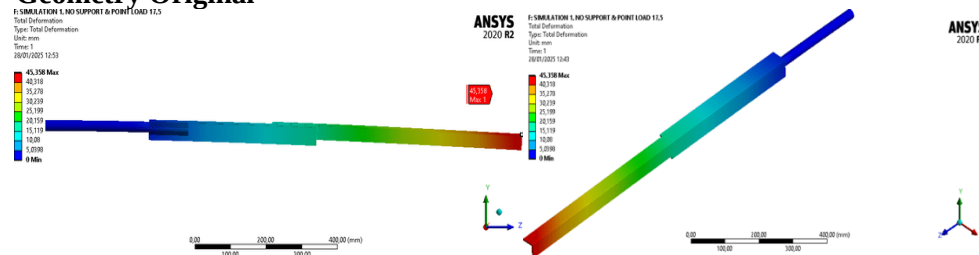


Gambar 16. *Equivalent Stress* Pembebanan jarak 67,5 cm

Pada Gambar 16, nilai *equivalent stress* meningkat menjadi 447,96 MPa akibat posisi pembebanan yang semakin jauh dari titik tumpu sehingga menghasilkan momen lentur yang lebih besar. Fenomena ini sesuai dengan penelitian Abid dan Qarni (2010) yang menunjukkan bahwa perubahan kondisi pembebanan memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan dan perilaku mekanik sambungan las.

Total Deformation

c. Geometry Original



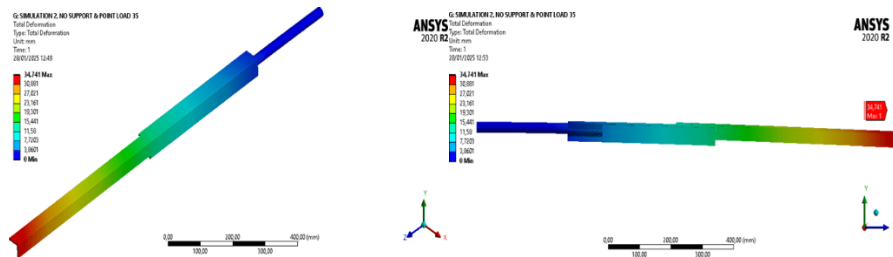
Gambar 13. *Total Deformation* Pembebanan jarak 17,5 cm

Tabel 3. *Total Deformation* Pembebanan jarak 17,5 cm

Warna	Rentang Deformasi (mm)	Presentase Luas	Jumlah Nodes	Karakteristik Wilayah
	40,318 – 45,358	8%	33.370	Area ujung bebas (beban terpusat)
	35,278 – 40,317	12%	50.056	Trasnisi deformasi tinggi
	30,239 – 35,277	15%	67.570	Area lengkungan awal
	20,159 – 30,238	20%	83.426	Bagian tengah batang (paling luas)
	10,080 – 20,158	18%	75.083	Transisi menuju kekakuan tinggi
	0 – 10,079	27%	112.625	Pangkal batang dan tumpuan

Berdasarkan Gambar 17, nilai deformasi maksimum mencapai 45,358 mm sehingga struktur mengalami kondisi *large deformation* dan tidak mampu menahan beban kerja yang diberikan. Besarnya deformasi ini menunjukkan bahwa kekakuan struktur masih rendah. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Ayof et al. (2019) yang menyatakan bahwa konfigurasi sambungan dan distribusi pembebanan sangat memengaruhi besarnya deformasi yang terjadi pada struktur las.

Berdasarkan Tabel 3, sebagian besar area struktur berada pada rentang deformasi rendah di sekitar daerah tumpuan, sedangkan deformasi tertinggi terjadi pada ujung bebas struktur. Distribusi deformasi ini menunjukkan bahwa struktur mengalami ketidakseimbangan kekakuan sehingga sebagian area menerima deformasi yang sangat besar. Hasil ini sesuai dengan penelitian Prajadhiana (2016) yang menunjukkan bahwa model tiga dimensi mampu menggambarkan distribusi deformasi secara lebih detail pada struktur sambungan las.

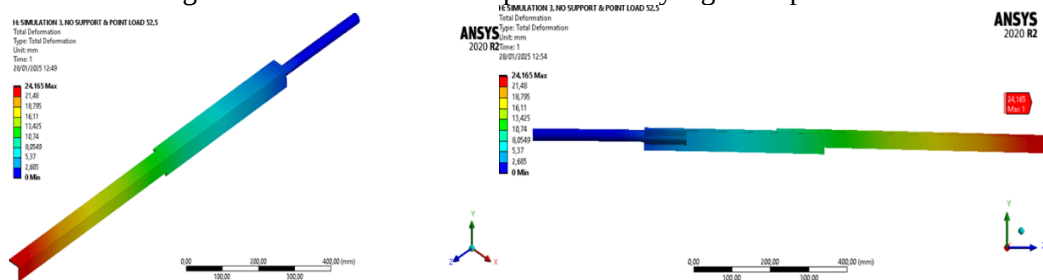


Gambar 14. Total Deformation Pembebanan jarak 35 cm

Tabel 4. Total Deformation Pembebanan jarak 35 cm

Warna	Rentang Deformasi (mm)	Presentase Luas	Jumlah Nodes	Karakteristik Wilayah
Red	30,881 – 34,741	6%	25.028	Titik kritis pembebanan maksimal
Orange	27,021 – 30,880	9%	37.542	Trasnisi deformasi tinggi
Yellow	23,161 – 27,020	12%	50.057	Area lengkungan awal
Green	20,159 – 30,238	18%	75.085	Bagian tengah batang (paling luas)
Blue	10,080 – 20,158	20%	84.424	Transisi menuju kekakuan tinggi
Dark Blue	0 – 10,079	35%	146.000	Pangkal batang dan tumpuan

Pada Gambar 18 dan tabel 4 deformasi maksimum menurun menjadi 34,741 mm. Meskipun demikian, nilai tersebut masih menunjukkan bahwa struktur belum aman untuk digunakan. Penurunan deformasi akibat perubahan posisi pembebanan sejalan dengan penelitian Biswas dan Mandal (2010) yang menyatakan bahwa distribusi deformasi pada sambungan las dipengaruhi oleh konfigurasi struktur dan kondisi pembebanan yang diterapkan.



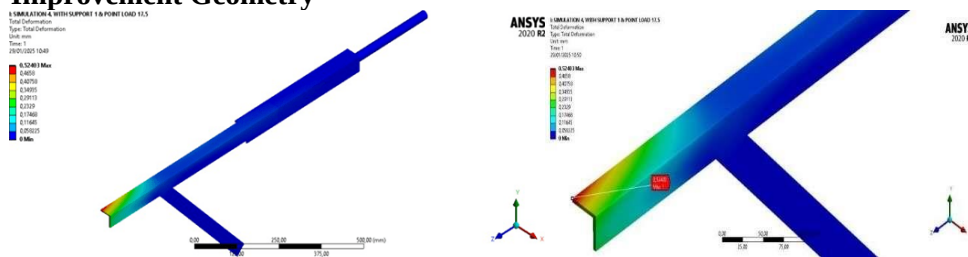
Gambar 15. Total Deformation Pembebanan jarak 67,5 cm

Tabel 5. Total Deformation Pembebanan jarak 67,5 cm

Warna	Rentang Deformasi (mm)	Presentase Luas	Jumlah Nodes	Karakteristik Wilayah
Red	21,480 – 24,165	5%	20.857	Titik kritis pembebanan maksimal
Orange	18,75 – 21,479	7%	29.199	Trasnisi deformasi tinggi
Yellow	16,110 – 18,794	10%	41.713	Area lengkungan awal
Green	10,740 – 16,109	20%	83.426	Bagian tengah batang (paling luas)
Blue	5,370 – 10,739	23%	95.940	Transisi menuju kekakuan tinggi
Dark Blue	0 – 5,369	35%	145.995	Pangkal batang dan tumpuan

Pada gambar 19 dan tabel 5 Nilai deformasi maksimum pada pengujian 3 kembali menurun menjadi 24,165 mm. Penurunan ini menunjukkan adanya pengaruh jarak pembebanan terhadap respons struktur, namun struktur masih mengalami deformasi yang berlebihan. Hasil tersebut mendukung penelitian Deshpande et al. (2011) yang menyatakan bahwa metode FEA mampu memprediksi perubahan deformasi akibat variasi konfigurasi pembebanan dengan tingkat akurasi yang baik.

d. Improvement Geometry

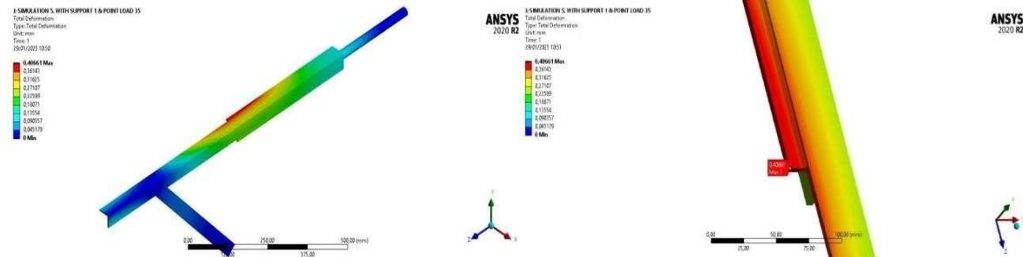


Gambar 20. Total Deformation Pembebanan jarak 17,5 cm

Tabel 6. Total Deformation Pembebanan jarak 17,5 cm

Warna	Rentang Deformasi (mm)	Presentase Luas	Jumlah Nodes	Karakteristik Wilayah
	0,465 – 0,524	2%	20.857	Titik kritis pembebanan maksimal
	0,407 – 0,464	3%	29.199	Trasnisi deformasi tinggi
	0,349 – 0,406	5%	41.713	Area lengkungan awal
	0,291 – 0,348	10%	83.426	Bagian tengah batang (paling luas)
	0,174 – 0,290	20%	95.940	Transisi menuju kekakuan tinggi
	0 – 0,116	60%	145.995	Area stabil kekakuan tertinggi

Pada Gambar 20 dan tabel 6 Setelah dilakukan improvisasi desain, deformasi maksimum turun drastis menjadi 0,52403 mm. Sebagian besar area struktur berada pada rentang deformasi yang sangat rendah sehingga menunjukkan peningkatan kekakuan yang signifikan. Hasil ini sesuai dengan penelitian Efendi (2024) dan Nursani dan Al Huseiny (2021) yang menyatakan bahwa penambahan elemen penopang dan perubahan konfigurasi sambungan dapat menurunkan deformasi dan meningkatkan performa struktur baja.

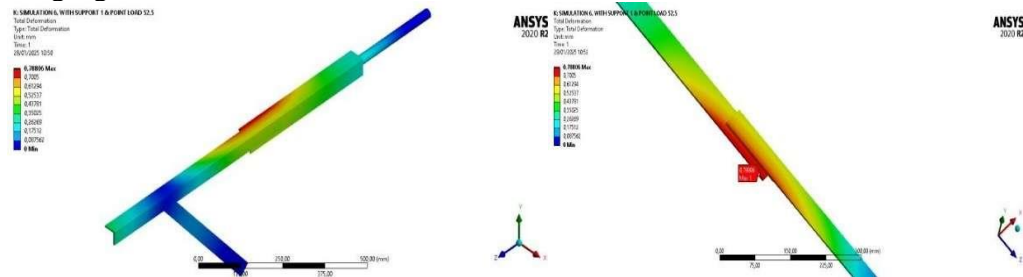


Gambar 21. Total Deformation Pembebanan jarak 35 cm

Tabel 7. Total Deformation Pembebanan jarak 35 cm

Warna	Rentang Deformasi (mm)	Presentase Luas	Jumlah Nodes	Karakteristik Wilayah
	0,361 – 0,406	3%	28.735	Titik kritis pembebanan maksimal
	0,316 – 0,360	5%	47.892	Trasnisi deformasi tinggi
	0,271 – 0,315	8%	76.628	Area lengkungan awal
	0,135 – 0,270	12%	114.942	Bagian tengah batang (paling luas)
	0,045 - 0,134	22%	210.727	Transisi menuju kekakuan tinggi
	0 – 0,044	50%	478.926	Area stabil kekakuan tertinggi

Pada gambar 21 dan tabel 7 diperoleh nilai deformasi terkecil, yaitu sebesar 0,40661 mm. Sebanyak 50% area struktur berada pada rentang deformasi 0–0,044 mm, menunjukkan bahwa distribusi deformasi menjadi lebih merata dan struktur memiliki tingkat kekakuan yang tinggi. Temuan ini memperkuat penelitian Chen et al. (2023) yang menyatakan bahwa simulasi numerik mampu digunakan untuk menentukan konfigurasi struktur yang paling optimal berdasarkan distribusi tegangan dan deformasi.



Gambar 22. Total Deformation Pembebanan jarak 67,5 cm

Tabel 8. Total Deformation Pembebanan jarak 67,5 cm

Warna	Rentang Deformasi (mm)	Presentase Luas	Jumlah Nodes	Karakteristik Wilayah
	0,700 – 0,788	4%	38.314	Titik kritis pembebanan maksimal
	0,612 – 0,699	6%	57.471	Trasnisi deformasi tinggi
	0,525 – 0,611	8%	76.628	Area lengkungan awal
	0,262 – 0,524	15%	143.677	Bagian tengah batang (paling luas)
	0,087 – 0,261	22%	210.727	Transisi menuju kekakuan tinggi
	0 – 0,086	45%	431.033	Area stabil kekakuan tertinggi

Pada gambar 22 dan tabel 8 deformasi meningkat menjadi 0,78806 mm akibat bertambahnya jarak pembebanan dari titik tumpu. Meskipun nilai deformasi masih relatif kecil dibandingkan desain awal, peningkatan tersebut menunjukkan bahwa momen lentur yang lebih besar menyebabkan respons deformasi struktur ikut meningkat. Hasil ini sesuai dengan penelitian Ayof et al. (2019) dan Abid dan Qarni (2010) yang menyatakan bahwa perubahan konfigurasi pembebanan secara langsung memengaruhi deformasi dan perilaku mekanik sambungan las.

Berdasarkan gambar dan tabel diatas, Hasil Total Deformation dinyatakan cukup aman karena nilai deformasi di rentang 0 – 0,78806 mm. Adapun titik kritis dengan nilai deformasi yang tinggi, yakni 0,52403 mm di ujung sisi luar *L Profile* 2 pada simulasi 4; 0,40661 mm di ujung sisi *L Profile* 1 dengan nilai sebaran merata di area sambungan las *L Profile* 1 dengan *L Profile* 2 pada pengujian 5; dan 0,78806 mm pada pengujian 6, dengan konsentrasi titik kritisnya sama seperti kondisi konsentrasi titik kritis pada pengujian 5.

Komparasi Hasil

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh rekap hasil sebagai berikut:

Tabel 9. Komparasi Hasil

Uji Desain Struktur Sebelum Diimprovisasi				
No.	Output	Pengujian 1 (titik beban 17,5 cm)	Pengujian 2 (titik beban 35 cm)	Pengujian 3 (titik beban 62,5 cm)
1.	<i>Equivalent Stress</i> (MPa)	5614,7	4569,5	3524,4
2.	<i>Total Deformation</i> (mm)	45,358	34,741	24,165
3.	<i>Safety Factor</i>	0,0801	0,0984	0,1276
	Keterangan Uji	Tidak Aman	Tidak Aman	Tidak Aman
Uji Desain Struktur Sesudah Diimprovisasi				
No.	Output	Pengujian 4 (titik beban 17,5 cm)	Pengujian 5 (titik beban 35 cm)	Pengujian 6 (titik beban 62,5 cm)
1.	<i>Equivalent Stress</i> (MPa)	175,27	162,74	447,96
2.	<i>Total Deformation</i> (mm)	0,52403	0,40661	0,78806
3.	<i>Safety Factor</i>	2,5674	2,7651	1,0045
	Keterangan Uji	Aman	Aman	Tidak Aman

Pada uji desain struktur sebelum diimprovisasi, didapatkan hasil uji simulasi bahwa pada desain tersebut nilai *Equivalent Stress* pada bagian sambungan las melebihi batas maksimal dari nilai *Tensile Strength* yang ditetapkan, yakni 510 MPa sehingga pada kondisi aktual objek sambungan las yang mengalami *stress* melebihi nilai *Tensile Strength* akan mengalami *crack* atau *fracture* dikarenakan mengalami tegangan melebihi tegangan yang diizinkan akibat beban kerja. Deformasi yang didapatkan sangat besar sehingga bisa disebut dengan *Large Deformation* dimana struktur tidak dapat menahan beban kerja. Kemudian nilai *Safety Factor* yang didapatkan dari ketiga uji tersebut tidak memenuhi standar minimal yang ditetapkan, sehingga didapatkan kesimpulan bahwa uji desain struktur pada simulasi 1, 2, dan 3 dinyatakan tidak aman untuk diaplikasikan sebagai penopang beban kerja.

Setelah mendapatkan masalah di atas, kemudian dibuat improvisasi pada desain struktur dengan menambahkan struktur penopang. Pada uji tersebut, didapatkan hasil uji simulasi bahwa pada desain tersebut pada uji simulasi 4 dan 5 memenuhi kriteria nilai *Equivalent Stress*, nilai *Total Deformation*, dan nilai *Safety Factor* yang telah ditetapkan. Untuk simulasi 6 nilai *Equivalent Stress* hampir mendekati batas nilai *Yield Strength* dan nilai *Safety Factor* belum memenuhi standar minimal yang ditetapkan. Sehingga uji desain struktur pada simulasi 6 dinyatakan belum aman untuk diaplikasikan, sedangkan uji desain struktur pada simulasi 4 dan 5 dinyatakan untuk diaplikasikan untuk penopang beban kerja.

Uji simulasi 4 dan 5 memiliki selisih nilai sedikit terhadap nilai *Equivalent Stress*, *Total Deformation*, dan *Safety Factor*. Akan tetapi, uji simulasi 5 memiliki tingkat kelayakan lebih tinggi dibandingkan dengan uji simulasi 4, di mana nilai *Equivalent Stress* simulasi 4 di angka

175,27 MPa, sedangkan pada simulasi 5 di angka 162,74 MPa, dimana uji simulasi 5 mendapatkan penurunan nilai *Equivalent Stress* sebesar 7,7% terhadap uji simulasi 4. Untuk nilai *Total Deformation* simulasi 4 di angka 0,52403 mm, sedangkan pada simulasi 5 di angka 0,40061, dimana uji simulasi 5 mendapatkan penurunan *Total Deformation* sebesar 28,9% terhadap uji simulasi 4. Untuk nilai *Safety Factor* simulasi 4 di angka 2,5674, sedangkan pada simulasi 5 di angka 2,7651, dimana uji simulasi 5 mendapatkan peningkatan nilai *Safety Factor* sebesar 7,15% terhadap uji simulasi 4. Maka dapat disimpulkan, uji simulasi 5 memiliki tingkat keamanan paling tinggi untuk diaplikasikan dalam beban operasional. Dalam hal ini, desain *Structural L Profile* yang telah diimprovisasi dengan penambahan *L Profile* 3 sebagai penopang *L Profile* 2 dapat diaplikasikan dalam kondisi aktual di lapangan, dengan kriteria titik beban berjarak 35 cm dari sisi luar *L Profile* 2 dengan definisi beban berupa gabungan beban pipa dan beban air yang mengalir pada pipa dengan total sebesar 835,5612 N.

SIMPULAN

Hasil simulasi pada desain awal menunjukkan bahwa nilai *Equivalent Stress* pada sambungan las melebihi batas *Tensile Strength* elektroda RB26 sebesar 510 MPa, sehingga struktur berpotensi mengalami retak atau patah. Selain itu, nilai *Total Deformation* yang tinggi menunjukkan bahwa struktur mengalami *large deformation*, sedangkan nilai *Safety Factor* pada ketiga pengujian berada di bawah batas minimum sehingga desain awal dinyatakan tidak aman untuk digunakan sebagai penyangga pipa drainase. Setelah dilakukan improvisasi dengan menambahkan *L Profile* 3 sebagai struktur penopang, kinerja struktur mengalami peningkatan yang signifikan. Hasil simulasi 4 dan 5 memenuhi kriteria keamanan berdasarkan nilai *Equivalent Stress*, *Total Deformation*, dan *Safety Factor*, sedangkan simulasi 6 masih belum memenuhi persyaratan keamanan.

Berdasarkan hasil analisis, simulasi 5 merupakan konfigurasi terbaik dengan nilai *Equivalent Stress* sebesar 162,74 MPa, *Total Deformation* sebesar 0,40661 mm, dan *Safety Factor* sebesar 2,7651. Selain itu, analisis persentase luas area deformasi menunjukkan bahwa sebagian besar area struktur berada pada rentang deformasi rendah, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan dan distribusi beban yang lebih merata. Dengan demikian, desain *Structural Profile* hasil improvisasi dengan penempatan titik beban pada jarak 35 cm dari sisi luar *L Profile* 2 dan total beban sebesar 835,5612 N dinyatakan sebagai desain yang paling aman dan layak diaplikasikan sebagai penyangga pipa drainase pada *grouting tunnel*.

DAFTAR RUJUKAN

- Abid, M., & Qarni, M. J. (2010). Numerical Investigation of Residual Stresses and Distortions due to Multi-Pass Welding in a Pipe-Flange Joint. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E*, 224(4), 285–294. <https://doi.org/10.1243/09544089JPME314>
- Ayof, M. N., Nawi, R. M., Hussein, N. I. S., & Zainol, N. Z. (2019). Distortion Prediction of Welded Thin Plate Lap Joints by Finite Element Analysis and Experiment. *Key Engineering Materials*, 796, 175–182. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.796.175>
- Biswas, P., & Mandal, N. R. (2010). Thermomechanical finite element analysis and experimental investigation of single-pass single-sided submerged arc welding of C–Mn steel plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224(4), 841–857. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1624>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10, Ed.). John Wiley & Sons.
- Chen, Y., Liu, Z., & Zhang, H. (2023). Numerical investigation of welded joint behavior using finite element analysis. *Engineering Failure Analysis*, 145, 107071. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107071>

- Collomb, S. (2022). Internal stresses analysis on welded joint in Grade 91 steel under creep test: synchrotron DRX tests and modelling. *Materials Science and Engineering A*.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2007). *Concepts and applications of finite element analysis* (4, Ed.). John Wiley & Sons.
- Deshpande, A. A., Xu, L., Sun, W., McCartney, D. G., & Hyde, T. H. (2011). Finite-element-based parametric study on welding-induced distortion of TIG-welded stainless steel 304 sheets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B*, 225(4), 519–532. <https://doi.org/10.1177/0309324711398763>
- Efendi, A. W. (2024). Behavior of welded joints on the roof truss of KOJK Office using LISA V.8 FEA. *Journal of Metallurgical Engineering and Processing Technology*, 5(1), 12020. <https://doi.org/10.31315/jmept.v5i1.12020>
- Heinemann, P. (2021). Case studies on finite element modeling of welded joints. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași, Construction & Architecture*, 67(2), 79–94. <https://doi.org/10.2478/bipca-2021-0017>
- Inc., A. (2022). *ANSYS Mechanical user's guide*. ANSYS Inc.
- Jimenez Mena, N., Sapanathan, T., Jacques, P. J., & Simar, A. (2021). Combined numerical and experimental estimation of the fracture toughness and failure analysis of single lap shear test for dissimilar welds. *Engineering Fracture Mechanics*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107925>
- Nursani, R., & Al Huseiny, M. S. (2021). Analisis numerik sambungan las struktur baja dengan variasi layout las. *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 3(2), 85–93.
- Prajadhiana, K. P. (2016). Comparative distortion analysis of welded T-Joint between 2D-shell and 3D-solid element using FEA with experimental verification. *International Journal of Technology*, 7(6), 1048–1057.
- Society, A. W. (2020). *Welding handbook* (11, Ed.; Vol. 1). AWS.
- Song, S. I., Ahn, S. W., Kim, Y. G., & Kim, H. G. (2015). Development of simplified finite element models for welded joints. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 39(11), 1191–1198. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.11.1191>
- Sudarman, S., Guszolil, W., Daryono, D., & Lukman, M. (2021). Feasibility Study on a Micro Hydro Power Plant at Coban Jahe Waterfall, Jabung, Malang Regency. *Journal of Energy Mechanical Material and Manufacturing Engineering*, 6(1), 41–52. <https://doi.org/10.22219/jemmme.v6i1.16433>
- Wang, X., Zhao, Y., & Chen, H. (2020). Finite element analysis of stress concentration in welded T-joints under static loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 168, 105980. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105980>
- Zhao, H., Li, J., & Sun, Y. (2019). Effect of weld material properties on stress distribution in welded steel joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(6), 3456–3465.