

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengelasan FCAW

Parameter pengelasan arus, tegangan, serta kecepatan pengelasan, ditambah parameter material dan kondisi batas termal. Di samping itu, model sumber panas juga disesuaikan guna merepresentasikan distribusi panas sepanjang proses pengelasan. Sumber panas yang digunakan adalah *heat flux*. Berikut adalah perhitungan *heat flux* pada pengelasan FCAW.

Tabel 4. 1 Parameter Pengelasan Perhitungan Heat Flux

Kuat Arus (I)	110-160 A
Tegangan (V)	26 V
Efisiensi FCAW (η)	0,75
Kecepatan Pengelasan	3,33 mm/s
Diameter Elektroda	
Luasan Weld Metal	14801 mm ³
<ul style="list-style-type: none"> • Root • Filler • Capping 	646,4
	1656,6
	2119



Gambar 4. 1 Spesimen Hasil Eksperimen

1. Perhitungan *Heat Input Root* dan *Heat Flux Root*
 - a. *Heat Input Root*

$$Q = \frac{\eta \cdot v \cdot I}{v}$$

$$Q = \frac{0,75 \times 26 \times 110}{3,33}$$

$$Q = 644,1 \text{ J/mm}$$

b. *Heat Flux Root*

$$q = \frac{Q_{net} \times \text{panjang las}}{\text{Luas weld} \times \text{Waktu per pas (Simulasi)}}$$

$$q = \frac{644,1 \times 150}{646,41 \times 75}$$

$$q = 1,9900 \text{ w/mm}$$

2. Perhitungan *heat input filler* dan *heat flux filler*

a. *Heat Input Filler*

$$Q = \frac{\eta \cdot v \cdot I}{v}$$

$$Q = \frac{0,75 \times 26 \times 125}{3,33}$$

$$Q = 731,98 \text{ J/mm}$$

b. *Heat Flux Filler*

$$q = \frac{Q_{net} \times \text{panjang las}}{\text{Luas weld} \times \text{Waktu per pas (Simulasi)}}$$

$$q = \frac{731,98 \times 150}{1685,6 \times 75}$$

$$q = 0,8700 \text{ w/mm}$$

3. Perhitungan *Heat Input Capping* dan *Heat Flux Capping*

a) *Heat Input Capping*

$$Q = \frac{\eta \cdot v \cdot I}{v}$$

$$Q = \frac{0,75 \times 26 \times 160}{3,33}$$

$$Q = 936,9 \text{ J/mm}$$

b) *Heat Flux Capping*

$$q = \frac{Q_{net} \times \text{panjang las}}{\text{Luas weld} \times \text{Waktu per pas (Simulasi)}}$$

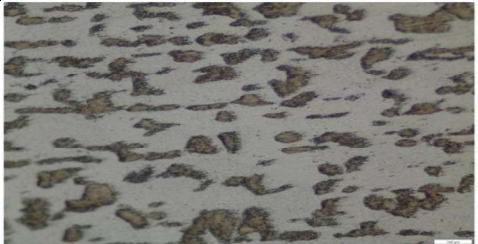

$$q = \frac{936,9 \times 150}{2119,2 \times 75}$$

$$q = 0,8840 \text{ w/mm}$$

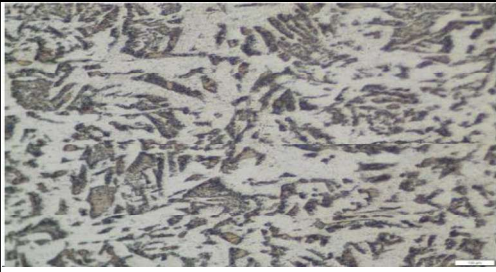

4.2 Hasil Eksperimen Pengujian Mikrografi

Tujuan pengamatan struktur mikro adalah untuk menentukan apakah ada perubahan pada lasan melalui uji struktur mikro. Uji mikro dilaksanakan untuk mengetahui morfologi butiran di base metal, zona terpengaruh panas (HAZ) dan weld area. Dan juga untuk melihat seberapa baik pola pertumbuhan butiran sesuai dengan karakteristik panas yang terjadi selama proses pengelasan. Spesimen yang akan diuji untuk uji mikro terdiri dari dua kondisi, yaitu Spesimen A dalam kondisi *as-welded* (tanpa perlakuan SRA) dan Spesimen B setelah mendapatkan perlakuan *Stress Relief Annealing* (SRA) pada suhu 700°C. Ketiga bagian tersebut dipilih karena masing-masing mengalami riwayat termal yang berbeda selama proses pengelasan FCAW. Zona base metal adalah material induk yang tidak terpengaruh langsung oleh panas pengelasan sehingga menjadi referensi kondisi awal material. Zona HAZ memiliki siklus termal tinggi tanpa mencapai titik lebur, sehingga rentan terhadap perubahan mikro besar seperti pembentukan fasa-fasa metastabil dan pertumbuhan butir. Namun zona weld area mengalami pencairan dan pembekuan kembali secara menyeluruh, menghasilkan struktur mikro yang sangat berbeda dari material awal. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan alat yang dikenal sebagai optik Olympus BX51M dengan perbesaran 500x.

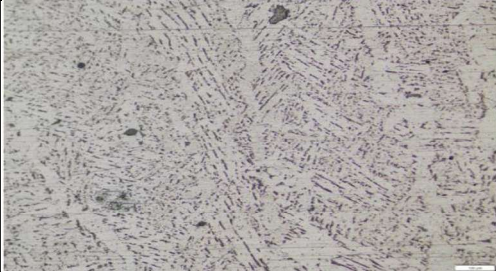

Tabel 4. 2 Perbandingan Struktur Mikro pada Base Metal

Spesimen A Tanpa SRA	Spesimen B Dengan SRA
Perbesaran 500x	
Base Metal	
	
<p>Dalam kondisi awal (tanpa perlakuan SRA), struktur mikro pada area base metal menunjukkan distribusi dua fasa utama baja karbon rendah-menengah. Fasa Ferrite menunjukkan area berwarna terang atau putih, fasa ferrite memiliki kekuatan rendah tetapi keuletan yang tinggi. Dan fasa perlaite menunjukkan area berwarna gelap.</p>	<p>Zona base metal mengalami perubahan fenomena metalurgi yang signifikan setelah spesimen diberikan perlakuan panas <i>stress relief annealing</i> (SRA) pada suhu 700°C. Proses pemulihan dan rekristalisasi parsial dimulai dengan panas yang terus menerus di dekat suhu kritis ini. Tampak bahwa butiran ferrite (terang) memperbaiki bentuknya, menjadi lebih membulat (<i>equiaxed</i>) dan rileks. Fasa perlaite (gelap) tersebar lebih seimbang tanpa konsentrasi regangan kristal yang lebih tinggi.</p>

Tabel 4. 3 Perbandingan Struktur Mikro pada HAZ

Spesimen A Tanpa SRA	Spesimen B Dengan SRA
Perbesaran 500x	
HAZ	
	
<p>Pada kondisi tanpa perlakuan SRA proses pendinginan yang cepat setelah pengelasan menyebabkan munculnya butiran kasar di area HAZ yang disebut <i>grain coarsening</i>. Selain itu, terbentuk juga fasa <i>Widmanstätten ferrite</i> dan <i>bainit</i>. Fasa ini terbentuk karena pendinginan cepat dan bersifat keras namun rapuh. Bentuknya yang tajam seperti jarum menyebabkan area ini lebih mudah mengalami keretakan terutama retak dingin (<i>cold cracking</i>).</p>	<p>Setelah spesimen dilakukan perlakuan SRA pada suhu 700°C struktur HAZ mengalami perubahan. Fasa <i>Widmanstätten ferrite</i> dan <i>bainit</i> yang muncul sebelumnya pada Spesimen A sekarang tidak ada lagi. Sebaliknya butiran <i>ferrite</i> berubah menjadi lebih bulat dan rapi (<i>ferrite polygonal</i>), dan <i>perlite</i> tersebar lebih merata. Perubahan ini menunjukkan bahwa SRA dapat menghilangkan fase berbahaya dan membuat struktur logam lebih stabil dan tidak mudah retak.</p>

Tabel 4. 4 perbandingan Struktur Mikro pada Weld Area

Spesimen A Tanpa SRA	Spesimen B Dengan SRA
Perbesaran 500x	
Weld Area	
	
<p>Akibat proses pendinginan yang sangat cepat yang terjadi setelah logam las mencair dan membeku kembali, struktur mikro di area weld didominasi oleh pola kolumnar dan dendritik, yaitu butiran yang tumbuh memanjang searah aliran panas keluar dari las mirip dengan serat kayu. Fasa <i>Acicular/Widmanstätten Ferrite</i> (berwarna terang) tumbuh dengan bentuk seperti jarum</p>	<p>Kondisi struktur logam lasan sangat berubah setelah melalui perlakuan panas Stress Relief Annealing (SRA) pada suhu 700°C. Dimana butiran yang dulunya memanjang seperti jarum tidak lagi dominan oleh struktur kolumnar dan dendritik yang kaku yaitu Fasa <i>ferrite polygonal/equiaxial</i>. Perubahan ini terjadi karena pemanasan pada suhu 700°C memberi waktu cukup bagi</p>

yang memanjang dan bersudut tajam saling bersilangan di dalam matriks fasa <i>Pearlite</i> (berwarna gelap).	atom-atom dalam material untuk menata ulang diri menjadi bentuk yang lebih stabil sehingga logam tidak perlu mencair lagi. Fasa pearlite yang gelap tersebar lebih merata di seluruh area, dan batas antar butiran menjadi jauh lebih halus.
--	--

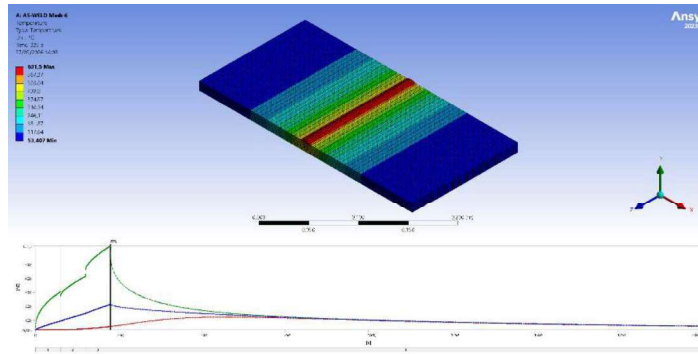
Hasil pengujian mikrografi ini mendukung dan memperkuat hasil simulasi FEM yang dilakukan menggunakan ANSYS Workbench 2023 R1 dengan model sumber panas Goldak double-ellipsoid. Simulasi yang dilakukan pada kondisi yang As-Weld menunjukkan tegangan sisa von Mises maksimum sebesar 79,154 MPa dan deformasi total 0,04787 mm. Hasil mikrografi menunjukkan grain coarsening dan terbentuknya fasa metastabil Widmanstätten ferrite serta bainit pada zona HAZ, kondisi yang menunjukkan tegangan internal tinggi yang disebabkan oleh pendinginan cepat setelah pengelasan FCAW. Simulasi menunjukkan penurunan tegangan sisa yang As-Weld signifikan 0,5819 MPa dan deformasi total 0,00032523 mm. Hasil mikrografi Spesimen B menunjukkan hilangnya fasa metastabil, penghalusan butir, dan ferit-perlite di seluruh zona sambungan las setelah diberikan perlakuan *Stress Relief Annealing* (SRA) pada suhu 700°C. Namun SRA 600°C adalah dengan nilai tegangan sisa sebesar 0,5228 MPa dan deformasi total 0,00027616 mm sedikit lebih rendah dari SRA 700°C, mengkonfirmasi bahwa SRA 600°C adalah kondisi perlakuan panas yang paling efektif.

4.3 Simulasi FEM Tegangan Sisa dan Distorsi

Distribusi suhu selama proses pengelasan merupakan faktor krusial yang sangat berpengaruh terhadap kualitas sambungan las, khususnya terkait tegangan sisa, distorsi, serta sifat mekanik di sekitar zona terpengaruh panas. Simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga *finite element method* (FEM) dilakukan melalui perangkat lunak ANSYS Workbench 2023 R1 dengan modul transient thermal dan static structural. Simulasi ini terdiri dari dua tahap yang saling terkait tahap pertama melibatkan simulasi transient thermal untuk memperoleh distribusi suhu selama proses pengelasan FCAW berlangsung. Sedangkan tahap kedua adalah simulasi static structural untuk menganalisis distribusi tegangan sisa dan distorsi akibat beban termal dari tahap pertama.

4.3.1 Distribusi Temperatur

Simulasi distribusi temperatur dilakukan pada modul transient thermal menggunakan model sumber panas volumetrik *goldak double-ellipsoid* yang dikalibrasi terhadap parameter pengelasan yang dilakukan secara eksperimen (arus 112–180 A, tegangan 26 V, kecepatan pengelasan 3,33 mm/s, efisiensi termal $\eta = 0,75$). Kondisi batas termal yang diterapkan meliputi konveksi bebas di permukaan udara ($h = 15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) dan radiasi termal (*emissivitas* $\varepsilon = 0,65$). Temperatur awal (*initial temperature*) seluruh model ditetapkan sebesar 30°C sesuai kondisi workshop tempat pengerjaan.

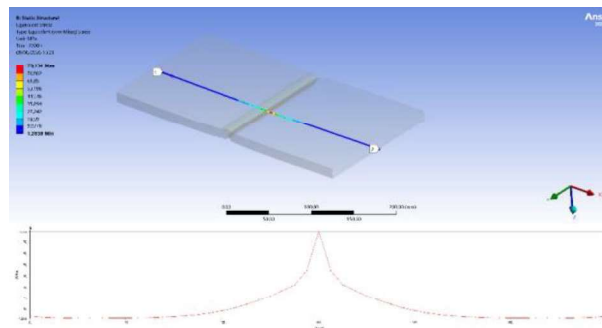


Gambar 4. 2 Hasil Simulasi Pengelasan

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan gambar 4.2 distribusi suhu untuk proses pengelasan FCAW tiga pass (*root, filler, dan capping*). Jika dilihat dari hasil kontur suhu, daerah weld area mencapai suhu maksimum sebesar $631,5^{\circ}\text{C}$, dan suhu minimum $53,407^{\circ}\text{C}$ pada bagian base metal yang jauh dari jalur las. Distribusi suhu menunjukkan pola yang terpusat pada daerah jalur pengelasan. Dalam model sumber panas *goldak double-ellipsoid*, energi panas terkonsentrasi pada volume kecil di sekitar busur las dan menyebar secara tidak simetris ke depan dan belakang jalur lasan. Terdapat gradien suhu yang tinggi di daerah transisi antara logam las dan HAZ, yang menunjukkan kecepatan tinggi pemanasan dan pendinginan selama proses pengelasan. Ini adalah penyebab utama distorsi dan tegangan sisa pada sambungan las.

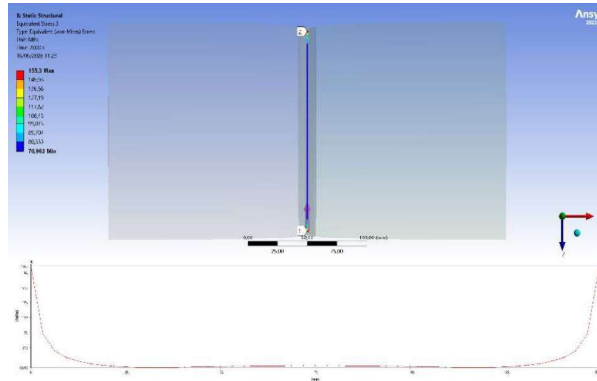
4.3.2 Distribusi Tegangan Sisa pada Kondisi As-Weld

Dalam kondisi as-welded yaitu setelah proses pengelasan FCAW tanpa perlakuan *stress relief annealing* (SRA) dihubungkan ke modul static structural untuk mengetahui tegangan sisa hasil pengelasan. Analisis ini menggunakan suhu yang diimport dari simulasi transient thermal yaitu proses pengelasan yang berlangsung selama 225 detik dan waktu pendinginan alami berlangsung selama 1775 detik. Evaluasi tegangan sisa dilakukan pada dua arah, yaitu arah transversal (path 1) dan arah longitudinal (path 2). Dalam evaluasi path transversal, yaitu garis yang ditarik melintang dari satu sisi pelat ke sisi lainnya jalur lasan dipotong tegak lurus. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 distribusi tegangan sisa maksimum sebesar $79,154\text{ MPa}$ terdapat di daerah pusat lasan (weld area). Nilai tegangan menurun secara bertahap menuju daerah yang terpengaruh oleh panas (HAZ) hingga base metal.



Gambar 4. 3 Tegangan Sisa pada Kondisi As-Weld

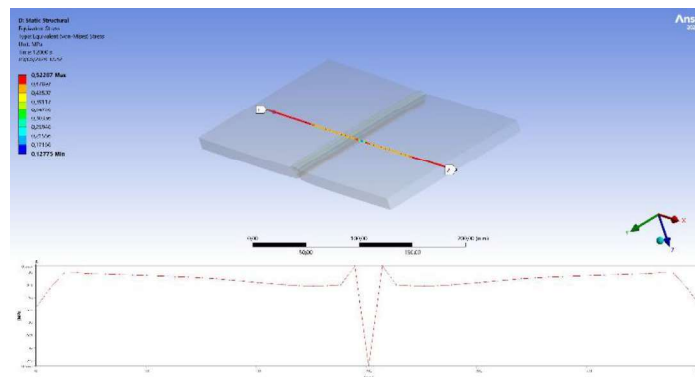
Sedangkan evaluasi menggunakan path longitudinal nilai tegangan sisa maksimum sebesar 155,3 Mpa. Berbeda dengan pola transversal distribusi tegangan pada arah longitudinal menunjukkan pola yang berkebalikan, yaitu nilai tegangan yang tinggi terjadi pada kedua ujung jalur las. Dalam proses pengelasan, efek start/stop yang terjadi saat pergerakan sumber panas dimulai dan berakhir.



Gambar 4. 4 Tegangan Sisa Longitudinal AS-Weld

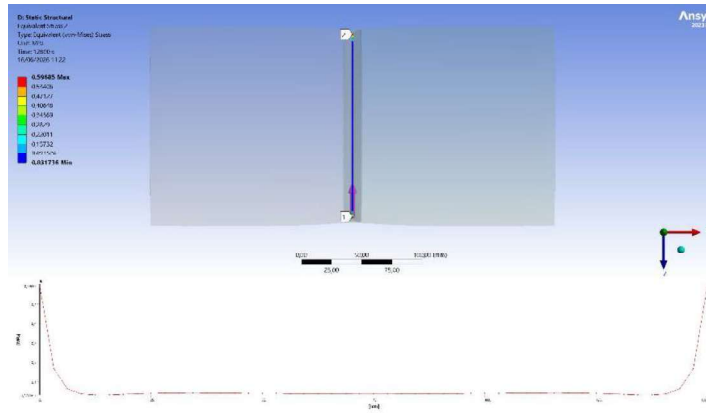
4.3.3 Pengaruh Stress Relief Annealing 600°C terhadap Tegangan Sisa

Setelah perlakuan panas pasca-las *stress relief annealing* (SRA) suhu 600°C modul transient thermal dihubungkan kembali ke modul static structural. Evaluasi tegangan sisa dilakukan pada dua arah yaitu arah transversal (Path 1) dan arah longitudinal (Path 2) untuk membandingkan dengan kondisi as-weld. Berdasarkan hasil simulasi ANSYS distribusi tegangan yang jauh lebih merata dan penurunan tegangan sisa yang signifikan pada spesimen setelah perlakuan SRA pada suhu 600°C. Perlakuan SRA pada suhu 600°C dari hasil simulasi membuktikan efektivitas dalam merelaksasi tegangan sisa akibat pengelasan, berdasarkan hasil yang ditunjukkan gambar 4.5 perlakuan SRA 600°C dapat menurunkan tegangan menjadi hanya 0,5228 Mpa atau penurunan sebesar 99,4%, dibandingkan dengan kondisi spesimen as-weld dengan tegangan sisa sebesar 79,154 Mpa. Penurunan tegangan sisa paling signifikan terlihat di daerah weld area dan HAZ, yang merupakan area dengan gradien tegangan tertinggi dalam kondisi as-welded.



Gambar 4. 5 Tegangan Sisa dengan SRA 600°C

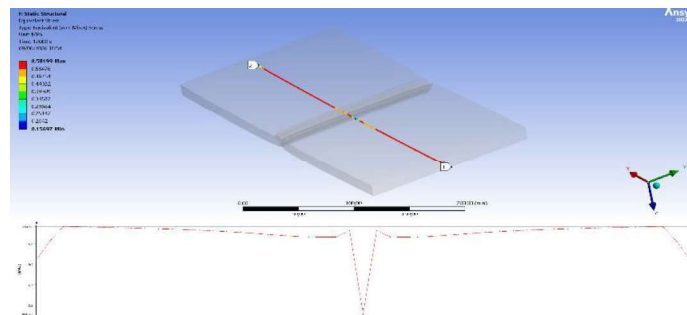
Dalam evaluasi Path 2 secara longitudinal, nilai distribusi tegangan sisa maksimum sebesar 0,59685 MPa dan nilai pola distribusi pada arah longitudinal pasca SRA 600°C menunjukkan kecenderungan nilai yang lebih tinggi pada kedua ujung jalur las dibandingkan dengan bagian tengah.



Gambar 4. 6 Tegangan Sisa Longitudinal SRA 600

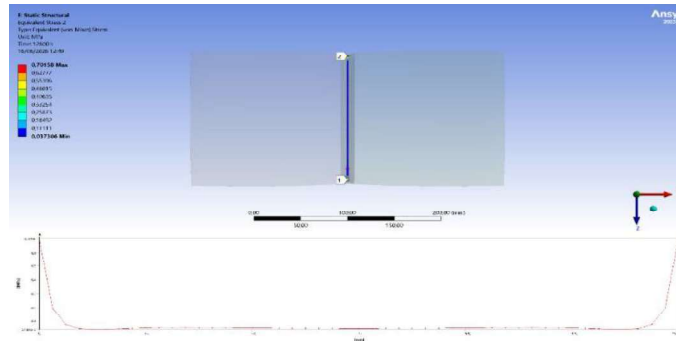
4.3.4 Pengaruh Stress Relief Annealing 700°C terhadap Tegangan Sisa

Gambar 4.7 menunjukkan hasil simulasi ANSYS perlakuan SRA 700°C menyebabkan perubahan distribusi tegangan sisa yang signifikan pada spesimen. Nilai tegangan sisa setelah perlakuan SRA 700°C 0,5819 Mpa hampir sama dengan hasil SRA 600°C. Kedua variasi suhu perlakuan ini disarankan sebagai metode PWHT yang baik, akan tetapi suhu 600°C menurunkan tegangan sisa sedikit lebih baik dari 700°C. Nilai ini sedikit lebih tinggi daripada hasil SRA 600°C sebesar 0,5228 MPa. Hal disebabkan oleh mekanisme metalurgi pada suhu 700°C, baja ABS Grade A mendekati batas bawah rentang perubahan fasa austenit. Akibatnya, terjadi perubahan struktur mikro yang dapat menghasilkan tegangan sisa baru sebagai akibat dari perubahan fasa saat baja dingin.



Gambar 4. 7 Tegangan Sisa Transversal dengan SRA 700°C

Dalam evaluasi Path 2 secara longitudinal, nilai distribusi tegangan sisa maksimum sebesar 0,70158 MPa dan nilai pola distribusi pada arah longitudinal masih menunjukkan kecenderungan nilai yang lebih tinggi pada kedua ujung jalur las dibandingkan dengan bagian tengah, yang sebanding dengan pola yang ditemukan pada kondisi as-weld dan SRA 600°C.



Gambar 4. 8 Tegangan Sisa Longitudinal dengan SRA 700°C

Tabel 4. 5 Perbandingan Hasil Tegangan Sisa Transversal

Parameter	As-Weld	SRA 600°C	SRA 700°C
Tegangan Sisa Max (Mpa)	79,154	0,5228	0,5819
Tegangan Sisa Min (Mpa)	1.285	0,127	0,156

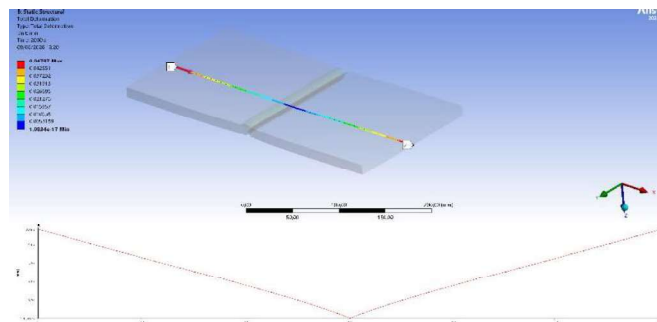
Tabel 4. 6 Perbandingan Hasil Tegangan Sisa Longitudinal

Parameter	As-Weld	SRA 600°C	SRA 700°C
Tegangan Sisa Max (Mpa)	155,3	0,5960	0,701
Tegangan Sisa Min (Mpa)	70,9	0,031	0,037

Berdasarkan hasil simulasi FEM menggunakan perangkat lunak ANSYS 2023 R1, perlakuan *stress relief annealing* (SRA) menunjukkan penurunan tegangan sisa yang signifikan baik pada arah transversal maupun longitudinal pada sambungan las FCAW plat baja ABS Grade A. Ini terbukti pada kedua variasi suhu SRA yang diuji 600°C dan 700°C. Tegangan sisa maksimum kondisi as-welded pada arah transversal adalah 79,154 MPa. Setelah perlakuan SRA 600°C tegangan sisa maksimum turun menjadi 0,5228 Mpa begitu juga dengan perlakuan SRA 700°C tegangan sisa maksimum kondisi as-welded menjadi 0,5819 MPa. Tegangan sisa maksimum kondisi as-welded lebih tinggi pada arah longitudinal yaitu sebesar 155,3 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan sisa akibat proses pengelasan FCAW lebih tinggi terbentuk pada arah memanjang sambungan las. Tegangan sisa maksimum longitudinal turun drastis menjadi 0,5960 MPa setelah perlakuan SRA 600°C dan 0,701 MPa setelah perlakuan SRA 700°C. Meskipun kedua variasi suhu SRA menunjukkan bahwa sangat efektif dalam mengurangi tegangan sisa perbandingan antara SRA 600°C dan SRA 700°C menunjukkan bahwa SRA 600°C menghasilkan tegangan sisa akhir yang lebih rendah baik dalam arah longitudinal maupun transversal.

4.3.5 Analisis Distorsi Akibat Pengelasan Pada Kondisi As-Weld

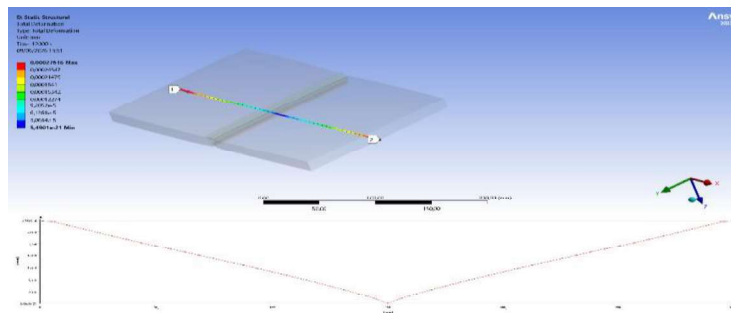
Gambar 4.9 menunjukkan hasil simulasi FEM distorsi pada kondisi as-weld. Distorsi maksimum sebesar 0,04787 mm. Selama proses pengelasan FCAW tiga pass (*root, filler, dan capping*). Karena hasil simulasi menunjukkan bentuk deformasi berbentuk V (angular) pada sambungan las butt joint analisis distorsi berkonsentrasi pada arah transversal. Kontraksi termal yang tidak seragam plat 12 mm menyebabkan distorsi ini dan merupakan distorsi yang paling sering terjadi pada pengelasan. Mekanisme ini terjadi karena pengelasan menghasilkan siklus pemanasan dan pendinginan yang berulang. Lapisan las yang mengeras lebih awal membatasi kontraksi bebas lapisan berikutnya.



Gambar 4. 9 Distorsi As-weld

4.3.6 Pengaruh Stress Relief Annealing (SRA) 600° terhadap Distorsi

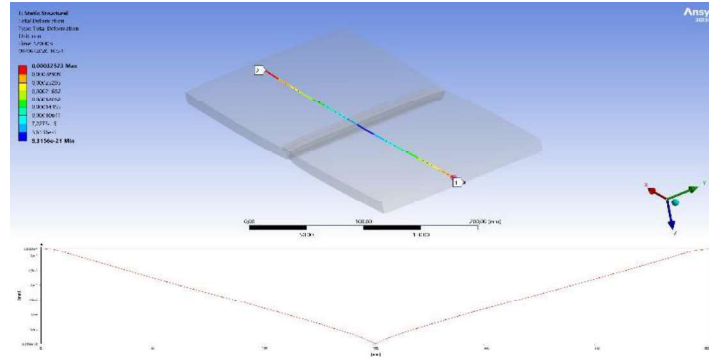
Hasil simulasi untuk mengetahui nilai distorsi pada ANSYS setelah perlakuan SRA 600°C menunjukkan penurunan yang signifikan dibandingkan dengan kondisi as-welded. Dengan perlakuan SRA 600°C deformation total maksimum turun 99,6% dari 0,04787 mm menjadi 0,00021444 mm. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan ini tidak hanya merelaksasi tegangan sisa tetapi juga mengurangi distorsi spesimen.



Gambar 4. 10 Distorsi dengan SRA 600°C

4.3.7 Pengaruh Stress relief annealing 700° terhadap distorsi

Hasil simulasi pada ANSYS setelah perlakuan SRA 700°C menunjukkan bahwa perlakuan panas pada suhu 700°C efektif dalam mengurangi distorsi las dengan mengurangi total deformation maksimum dari 0,04787 mm menjadi 0,000252 mm, atau penurunan sebesar 99,5%. Meskipun nilai deformasi maksimum lebih tinggi pada 700°C daripada pada 600°C, perbedaan yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa meningkatkan suhu dari 600°C ke 700°C tidak secara otomatis menghasilkan penurunan distorsi yang lebih besar.



Gambar 4. 11 Distorsi dengan SRA 700°C

Tabel 4. 7 Perbandingan Hasil Distorsi

Parameter	As-Weld	SRA 600°C	SRA 700°C
Distorsi Max (mm)	0,04787	0,0002761	0,0003252
Distorsi Min (mm)	0	0	0

4.4 Validasi Data

4.4.1 Validasi Independensi Ukuran Mesh

Tahap penting dalam simulasi *metode element* (FEM) adalah validasi independensi mesh ini bertujuan untuk menentukan ukuran mesh mana yang akan memberikan keseimbangan terbaik antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi. Ukuran mesh yang diuji adalah 7,5 mm, 8 mm, dan 8,5 mm. Data jumlah elemen yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan kriteria nilai perbedaan (*error*) kurang dari 2% terhadap hasil simulasi.

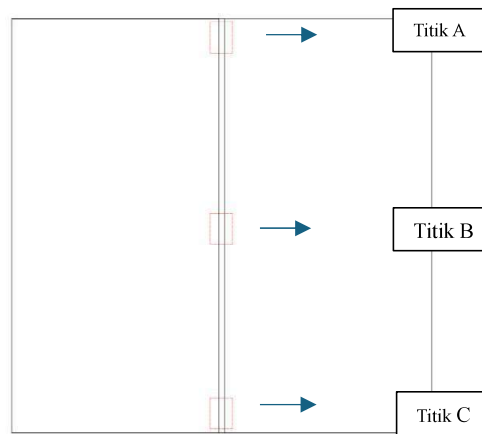
Tabel 4. 8 Independensi Grib Mesh

No	Size Mesh	Total Element	Total Nodes	Total Deformasi (mm)	Selisih (mm)	Error (%)
1.	7,5	23700	113755	0,0480	-	
2.	8	22650	109059	0,0478	0,0002	-0,42
3.	8.5	21600	104363	0,0481	0,0003	-0,63

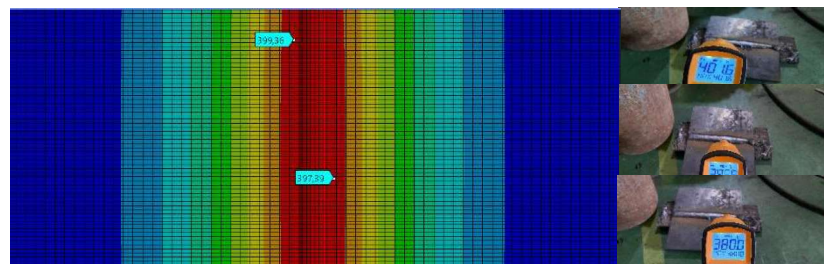
Hasil simulasi dari beberapa jumlah mesh, yang ditunjukkan pada tabel 4.8, menunjukkan nilai selisih dan error yang tidak melebihi 2%. Hasil ini menunjukkan bahwa hasil deformasi belum mengalami perubahan yang signifikan. Pada simulasi pengelasan plat baja ABS Grade A ukuran mesh yang digunakan pada pengelasan sambungan butt joint adalah 8 mm.

4.4.2 Validasi Temperatur Simulasi dan Eksperimen Pengukuran Thermogun

Untuk memastikan bahwa model simulasi termal yang dibuat dalam ANSYS Workbench 2023 R1 dapat secara akurat memperlihatkan kondisi nyata proses pengelasan, validasi temperatur dilakukan dengan membandingkan nilai temperatur pada permukaan spesimen yang diperoleh dari simulasi dengan hasil pengukuran langsung yang dilakukan pada proses pengelasan secara eksperimen. Ini dilakukan dengan memanfaatkan termometer inframerah (*thermogun*) pada tiga titik pengukuran (A, B, dan C). Tujuan penempatan titik pengukuran pada tiga tempat ini adalah untuk menguji kemampuan model untuk menggambarkan perubahan temperatur yang terjadi secara spasial di sekitar lasan. Setelah proses pengelasan FCAW dan spesimen mengalami pendinginan suhu diukur menggunakan thermogun. Nilai suhu pada masing-masing titik dicatat secara bersamaan dengan kondisi simulasi yang ditinjau. Nilai suhu yang diperoleh dari kondisi simulasi diekstrak dari kontur distribusi suhu ANSYS Mechanical pada langkah waktu yang sesuai dengan waktu pengukuran eksperimen.



Gambar 4. 12 Titik Validasi Temperatur



Gambar 4. 13 Validasi Temperatur Simulasi dan Eksperimen

Tabel 4.9 Validasi Menggunakan Temperatur

Titik Pengukuran	Temperatur Simulasi (°C)	Temperatur Eksperimen(°C)	Selisih (°C)	Error (%)
A	399,36	401,6	2,24	0,56
B	397,39	395,5	1,89	0,48
C	382,39	380,0	2,39	0,63

Berdasarkan hasil perbandingan yang ditunjukkan pada tabel 4.9 di atas, nilai suhu simulasi dan eksperimen menunjukkan kesesuaian yang sangat baik pada ketiga titik pengukuran. Titik C memiliki perbedaan terbesar sebesar 2,39°C dan Titik B memiliki perbedaan terkecil sebesar 1,89°C. Nilai error persentase masing-masing titik berkisar dari 0,48% hingga 0,63%, dan ini jauh di bawah batas toleransi yang biasa digunakan dalam penelitian simulasi numerik.

Berdasarkan hasil analisis hipotesis penelitian ini terbukti benar di mana perlakuan *Stress Relief Annealing* (SRA) mampu mengurangi tegangan sisa dan distorsi secara signifikan dibandingkan kondisi *as-welded*. Evaluasi path transversal, yaitu garis yang ditarik melintang dari satu sisi pelat ke sisi lainnya jalur lasan dipotong tegak lurus. Dengan tegangan sisa maksimum sebesar 79,154 MPa menjadi di bawah 0,5228 Mpa. Dan evaluasi menggunakan path longitudinal nilai tegangan sisa maksimum sebesar 155,3MPa menjadi sebesar 0,59685 Mpa. Namun, pernyataan yang memprediksi bahwa suhu 700°C akan menghasilkan reduksi yang lebih baik daripada 600°C terbukti tidak benar, karena temperatur 600°C justru menjadi suhu optimal dengan nilai tegangan sisa akhir terendah. Hal ini disebabkan karena temperatur 700°C sudah terlalu mendekati batas fasa kritis bawah A1.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan