



Analisa Pengaruh Thermal Pengelasan Metode Smaw Terhadap Deformasi dengan Variasi Elektroda E7016 dan E7018 pada Pelat A36 Untuk BBM

Arin Nadhiroh¹, Ayende²

^{1,2}Politeknik Energi dan Mineral Akamigas

Email: arinnadh@gmail.com

Abstrak

Menganalisis pengaruh variasi thermal pada proses pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW) terhadap deformasi sambungan pelat baja ASTM A36 menggunakan elektroda E7016 dan E7018. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan tahapan penyusunan dan verifikasi Welding Procedure Specification (WPS) serta Procedure Qualification Record (PQR). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa peningkatan arus dan tegangan berbanding lurus dengan kenaikan temperatur dan nilai heat input, yang kemudian memengaruhi tingkat deformasi sambungan. Nilai deformasi tertinggi diperoleh pada elektroda E7016 sebesar 1,8 mm, sedangkan deformasi terendah pada elektroda E7018 sebesar 1,2 mm dengan kekuatan tarik mencapai 438 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan elektroda E7018 menghasilkan sambungan las yang lebih kuat, homogen, dan memiliki deformasi paling rendah, sehingga lebih sesuai diterapkan pada konstruksi tangki BBM.

Kata Kunci : Deformasi, Elektroda E7016, Elektroda E7018, Heat Input, Pelat A36, Pengelasan SMAW

PENDAHULUAN

Pengelasan logam merupakan proses penyambungan dua atau lebih bagian logam dengan cara memanaskan material hingga mencapai titik leburnya, kemudian menyatukannya dengan atau tanpa logam pengisi. Salah satu metode yang paling sering digunakan adalah Shielded Metal Arc Welding (SMAW), yaitu teknik pengelasan yang memanfaatkan energi panas dari busur listrik antara elektroda dan logam dasar. Proses ini menggunakan elektroda berlapis fluks yang berfungsi melindungi logam cair dari kontaminasi udara, menstabilkan busur, dan menghasilkan slag serta gas pelindung untuk menjaga kualitas hasil lasan. Marwanto (2007) menyatakan bahwa penggunaan elektroda berlapis mampu meningkatkan kestabilan busur dan meminimalkan pengaruh lingkungan terhadap kualitas pengelasan. Dalam berbagai sektor industri seperti konstruksi, manufaktur, dan perkapalan, SMAW tetap menjadi pilihan utama karena fleksibilitas, kemampuan adaptasi terhadap berbagai posisi pengelasan, serta kekuatan sambungan yang dihasilkan. Meski demikian, proses ini sering menimbulkan permasalahan seperti retak pada logam las akibat tegangan termal ketika pendinginan berlangsung atau penyusutan material yang tidak merata (Arsyad, 2019). Variasi masukan panas (heat input), yang dipengaruhi oleh parameter seperti arus, tegangan, dan kecepatan gerak elektroda, menjadi faktor penting yang menentukan tingkat deformasi pada sambungan. Masukan panas yang terlalu tinggi dapat memperluas zona terpengaruh panas (heat affected zone/HAZ) dan meningkatkan risiko distorsi, sedangkan masukan panas yang terlalu rendah menyebabkan penetrasi tidak sempurna dan cacat sambungan. Karena itu, pengendalian termal menjadi aspek utama untuk menghasilkan kualitas pengelasan yang optimal (Bhatia, n.d.; Saha & Moitra, 2022). Kajian mengenai pengaruh variasi termal terhadap deformasi las sangat diperlukan untuk memahami mekanisme perubahan bentuk yang terjadi sehingga dapat menjadi landasan dalam penyusunan Welding Procedure Specification (WPS) yang lebih efektif. Penelitian ini juga diharapkan mendukung peningkatan keselamatan dan keandalan struktur seperti tangki BBM maupun komponen logam lainnya, sesuai dengan ketentuan standar ASME Section IX (2019).

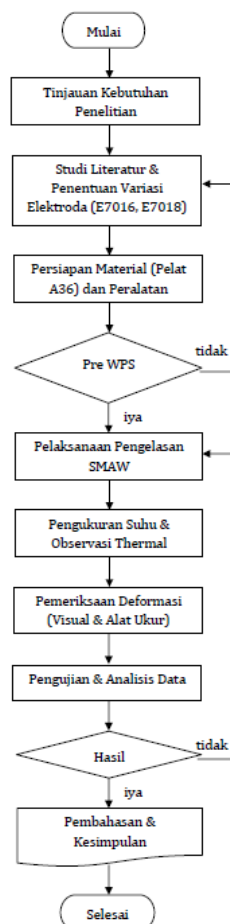
Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis mendalam mengenai pengaruh variasi masukan panas terhadap deformasi yang terjadi selama proses pengelasan SMAW, khususnya pada material baja struktural yang banyak digunakan dalam industri seperti A36. Meskipun kajian mengenai heat input dan kualitas sambungan las telah banyak dilakukan, penelitian terdahulu masih jarang membahas hubungan langsung antara parameter termal, perilaku deformasi, dan

implikasinya terhadap penyusunan Welding Procedure Specification (WPS) yang lebih presisi untuk penggunaan industri berskala besar. Urgensi penelitian ini semakin meningkat seiring perkembangan kebutuhan konstruksi dan manufaktur yang menuntut kualitas sambungan las yang stabil, minim cacat, serta memiliki toleransi deformasi rendah demi menjaga keselamatan dan umur layanan struktur. Dengan memahami karakteristik deformasi berdasarkan variasi masukan panas, penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam optimasi proses pengelasan, peningkatan reliabilitas struktur tangki BBM maupun komponen lain yang memerlukan standar keselamatan tinggi, serta membantu industri dalam menetapkan parameter pengelasan yang lebih efektif dan aman.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang bertujuan menganalisis pengaruh variasi termal pengelasan terhadap deformasi pada sambungan pelat A36 dengan proses SMAW (Shielded Metal Arc Welding). Variasi elektroda yang digunakan adalah E7016 dan E7018, yang dipilih karena memiliki karakteristik berbeda dalam hal masukan panas dan sifat mekanis hasil las. Material uji berupa pelat baja ASTM A36, yang umumnya diaplikasikan pada konstruksi BBM, sehingga hasil penelitian diharapkan relevan dengan kebutuhan industri. Proses penelitian dilaksanakan secara sistematis melalui tahapan penyusunan dan verifikasi Welding Procedure Specification (WPS) serta Procedure Qualification Record (PQR).

Diagram alir pada Gambar 1 di bawah ini, menggambarkan bahwa tahap awal dimulai dari peninjauan kebutuhan pengelasan. Jika WPS/PQR sudah tersedia, maka dilakukan penyesuaian sesuai kebutuhan, sedangkan jika belum tersedia disusun Pre-WPS yang kemudian diuji melalui pelaksanaan pengelasan, pengembangan teknik, serta pengujian hasil. Hasil pengelasan kemudian dianalisis.



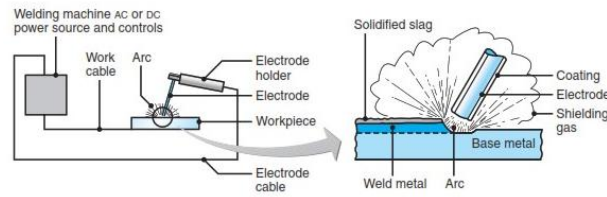
Gambar 1. Diagram Alir

A. Klasifikasi Pengelasan

Pengelasan merupakan proses penyambungan dua atau lebih logam dengan cara memanaskannya hingga mencapai titik leleh, dengan atau tanpa tekanan serta bahan tambah. Berdasarkan metode dan sumber panas yang digunakan, proses pengelasan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis utama, yaitu: (Bhatia, n.d.)

- a. Pengelasan Fusi (Fusion Welding)

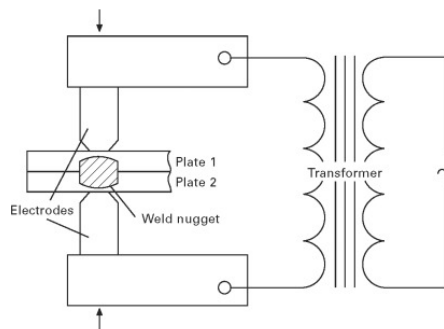
Pada metode ini, logam dasar dilelehkan untuk membentuk sambungan tanpa memerlukan tekanan. Contoh proses yang termasuk dalam kategori ini antara lain Shielded Metal Arc Welding (SMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW/TIG), Gas Metal Arc Welding (GMAW/MIG), dan Submerged Arc Welding (SAW). Proses SMAW digunakan dalam penelitian ini karena memiliki fleksibilitas tinggi, peralatan yang sederhana, serta mampu menghasilkan sambungan yang kuat dengan penetrasi yang baik seperti Gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2. Fusion Welding

b. Pengelasan Tekanan (*Pressure Welding*)

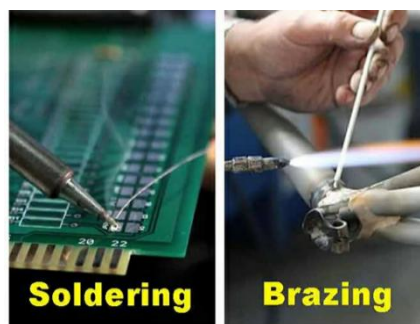
Proses ini dilakukan dengan memberikan tekanan pada logam yang disambung, dengan atau tanpa pemanasan hingga titik leleh. Contohnya meliputi *Forge Welding* (FOW), *Resistance Welding* (RW), dan *Friction Welding* (FRW). Jenis pengelasan ini umum digunakan pada proses produksi massal, seperti pada industri otomotif dan manufaktur komponen logam dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Pressure Welding

c. Pengelasan Solder dan Brazing

Kedua proses ini menggunakan bahan tambah dengan titik leleh lebih rendah dari logam dasarnya. Soldering dilakukan pada temperatur di bawah 450°C, sedangkan brazing dilakukan pada temperatur diatas 450°C. Keduanya menghasilkan sambungan tanpa melelehkan logam dasar, sehingga sering digunakan untuk penyambungan logam tipis atau material dengan sifat termal yang berbeda seperti Gambar 2.4 berikut ini.



Gambar 4. Solder dan Brazing

Dalam penelitian ini, proses yang digunakan termasuk dalam klasifikasi pengelasan fusi (fusion welding) dengan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW). Proses ini dipilih karena mampu menghasilkan sambungan logam berkualitas tinggi dengan tingkat keandalan yang baik pada material baja karbon seperti ASTM A36, yang umum digunakan dalam konstruksi tangki dan sistem perpipaan industri minyak dan gas.

d. Perancangan Persiapan Material dan Peralatan

a. Metode dan Teknik Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen yang dilakukan di Bengkel Laboratorium Mekanik. Untuk menggambarkan alur proses pelaksanaan penelitian, disusun diagram alir yang menggambarkan tahapan penyusunan dan verifikasi dokumen Welding Procedure Specification (WPS).

a. Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Waktu = Bulan Januari – Juni 2025

Tempat = Bengkel Mekanik

b. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan:

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| a. Mesin Potong Baja | i. <i>Handheld Thermal Camera</i> |
| b. Miller SRH500 | j. <i>Drying Oven</i> Elektroda |
| c. Gerinda | k. Majun |
| d. Mesin Las | l. Tang Ampere |
| e. Mesin Uji Tarik | m. <i>Bavel Universal</i> |
| f. Mesin Uji Tekuk | n. Tang Las |
| g. <i>Welding Gauge</i> | o. Stopwatch |
| h. <i>Brushing</i> / Sikat Kawat | p. Palu Las |

Bahan yang digunakan:

- Pelat Baja SA 36 (t = 7,7 mm)
- Elektroda E7018 (d = 2,6 mm)
- Elektroda E7016 (d = 2,6 mm)

c. Analisis Data

Parameter pengelasan yang digunakan sebagai acuan dalam proses pengelasan meliputi jenis proses, klasifikasi filler metal, arus, tegangan, kecepatan kawat, kecepatan pengelasan, serta nilai heat input sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Welding Parameters

<i>Weld Pass(es)</i>	<i>Process</i>	<i>Filler Metal</i>		<i>Current Type and Polarity</i>	<i>Current (A)</i>	<i>Voltage (V)</i>	<i>Wire Speed (mm/min)</i>	<i>Travel Speed (mm/min)</i>	<i>Heat Input (kJ/mm)</i>
		<i>Class.</i>	<i>Dia. (mm)</i>						
<i>Root Pass</i>	SMAW	E7016	2,6	DCEN	60-70	20-28	N.A	35,71	2,06
<i>Hot Pass</i>	SMAW	E7016	2,6	DCEN	70-80	20-28	N.A	31,25	3,11
<i>Capping</i>	SMAW	E7018	2,6	DCEP	80-90	20-35	N.A	25,00	5,85

1) Heat Input

Masukan panas (heat input) merupakan jumlah energi panas yang diterima oleh logam selama proses pengelasan berlangsung. Nilai ini sangat berpengaruh terhadap struktur mikro, luas daerah Heat Affected Zone (HAZ), serta tingkat deformasi pada hasil lasan. Semakin tinggi nilai heat input, semakin besar panas yang terserap oleh logam, yang dapat menyebabkan butir logam membesar dan potensi deformasi meningkat. Sebaliknya, heat input yang terlalu rendah dapat menghasilkan penetrasi las yang kurang sempurna.

Perhitungan heat input pada proses pengelasan dapat ditentukan dengan Persamaan 2.1 berikut ini.

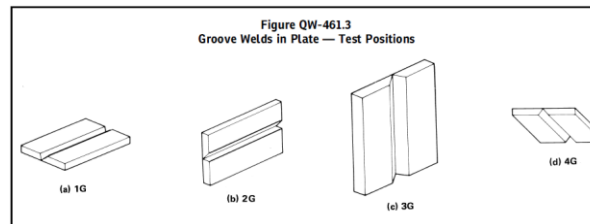
$$H = \frac{V \times I \times 60}{(1000 \times S)}$$

Keterangan:

- H = Heat Input (kJ/mm)
V = Tegangan pengelasan (Volt)
I = Arus pengelasan (Ampere)
S = Kecepatan gerak las (travel speed) (mm/menit)

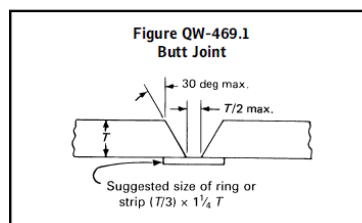
2) Base metal

Spesimen uji berbentuk pelat datar dengan ukuran 200 mm × 100 mm × 7,7 mm. Proses pengelasan dilakukan pada posisi datar (1G) sesuai standar ASME Section IX. Kampuh berbentuk V dengan sudut 60° dan celah akar 2 mm. Setelah pengelasan selesai, spesimen dipotong menjadi beberapa bagian untuk uji tarik, uji tekuk, dan pengamatan deformasi visual. Pada proses pengujian kualifikasi prosedur pengelasan, base metal yang digunakan berupa pelat baja ASTM A36 dibentuk menjadi potongan uji dengan kampuh las sesuai posisi pengelasan yang ditetapkan berdasarkan ASME Section IX [Figure QW-461.3] yang dapat dilihat pada Gambar 2.5. Kampuh tersebut dibuat untuk mempermudah proses penyambungan pada posisi 1G, 2G, 3G, atau 4G, sehingga representatif terhadap kondisi pengelasan sebenarnya di lapangan. Bentuk kampuh pada pelat A36 ini berfungsi untuk memastikan penetrasi penuh pada sambungan, sekaligus memudahkan pengujian mekanis seperti uji tarik dan uji tekuk setelah pengelasan selesai dilakukan seperti pada Gambar 5 di bawah ini (ASME Section X, 2019).



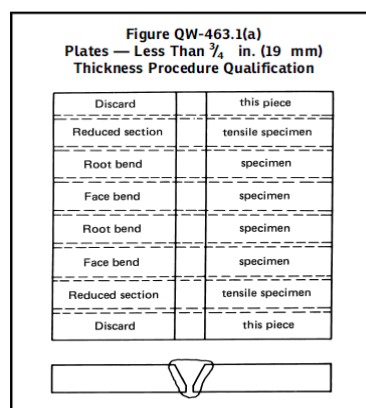
Gambar 5. Groove Welds

Perancangan uji kualifikasi prosedur pengelasan dilakukan dengan menggunakan spesimen uji dan perlengkapan yang dirancang sesuai standar ASME Section IX [Figure QW-463.1(a)] seperti pada Gambar 6 sebagai berikut (ASME Section X, 2019).



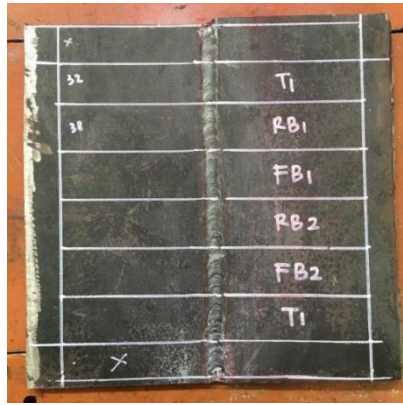
Gambar 6. Butt Joint

Setelah proses pengelasan selesai, sambungan hasil las pada spesimen tersebut dipersiapkan untuk dilakukan pengujian mekanis guna memastikan kelayakan prosedur pengelasan. Spesimen hasil las kemudian dipotong dan dibentuk menjadi beberapa bagian uji, yaitu spesimen uji tekuk (bend test) dan spesimen uji tarik (tensile test). Uji tekuk bertujuan untuk menilai keuletan serta kontinuitas logam las dan daerah Heat Affected



Gambar 7. Thickness Procedure Qualification

Zone (HAZ), sedangkan uji tarik digunakan untuk mengetahui kekuatan sambungan terhadap beban tarik hingga putus. Kedua jenis pengujian ini merupakan persyaratan utama dalam kualifikasi prosedur pengelasan (Welding Procedure Qualification Test) sesuai standar ASME Section IX, seperti dijelaskan pada Gambar 7 dan hasil penerapan seperti pada Gambar 8 di bawah ini (ASME Section X, 2019).



Gambar 8. Spesimen Pengujian

Lapisan pengelasan terdiri dari tiga tahap utama, yaitu Root Pass, Hot Pass, dan Capping. Pada tahap Root Pass, digunakan arus sebesar 61,4 A dan tegangan 20 V dengan kecepatan pengelasan 35,71 mm/min untuk membentuk dasar sambungan yang kuat. Tahap Hot Pass dilakukan dengan arus 77,2 A dan tegangan 21 V guna memperbaiki penetrasi serta menghilangkan cacat pada lapisan dasar. Terakhir, Capping menggunakan arus 89,3 A dan tegangan 24 V dengan kecepatan 25,00 mm/min untuk menghasilkan lapisan akhir yang rapi dan melindungi sambungan dari cacat permukaan, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Pengecekan temperatur dapat dilihat pada Gambar 9. di bawah ini .



Gambar 9. Thermal Camera

Tabel 2. Data Parameter Pengelasan dan Temperatur

<i>No. of Layers</i>	<i>Root Pass</i>	<i>Hot Pass</i>	<i>Capping</i>
<i>Type Size of Filler Metals (mm)</i>	E7016	E7016	E7018
<i>Ampere, A</i>	60-70	70-80	80-90
<i>Volt, V</i>	22	25	30
<i>Duration Time/Layer (min)</i>	7	8	10
<i>Travel Speed, mm/min</i>	35,71	31,25	25,00
<i>Welding (Start-Finish)</i>	08:00 – 09:00	10:00 – 11:00	12:00 – 13:00
<i>Heat Input, kJ/mm</i>	2,06	3,11	5,85
<i>Temperature °C</i>	139	232	355
<i>Times Laps Between Pass, mnt</i>	40	40	40

a. Pengujian Mekanis

Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji tarik dan uji tekuk di laboratorium mekanik. Uji tarik dilakukan sesuai standar ASTM E8/E8M untuk mengetahui kekuatan sambungan, sedangkan uji tekuk menggunakan metode guided bend test sesuai ASME Section IX QW-160 untuk menilai keuletan sambungan dan kemungkinan cacat pada HAZ.

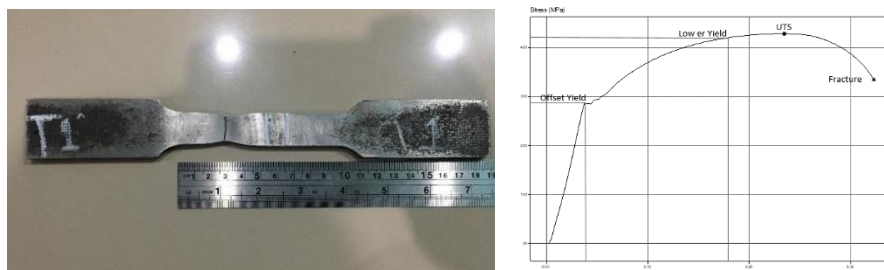
b. Pengukuran Deformasi

Deformasi diukur menggunakan mistar setelah spesimen mengalami pendinginan total. Nilai deformasi dihitung dari perbedaan tinggi permukaan antara sisi las dan sisi non-las. Pengukuran dilakukan di tiga titik sepanjang sambungan las. Dilanjutkan dengan tes PQR yang lain yaitu pengujian spesimen hasil lasan dengan metode merusak atau destructive test. Pengujian Tensile mengacu pada ASME Section X dimana minimum tensile stress material SA-36 yaitu 400 Mpa yang dapat dilihat pada Gambar 10 di bawah ini (ASME Section X, 2019).

Table QW/QB-422 Ferrous and Nonferrous P-Numbers Grouping of Base Metals for Qualification										
Spec. No.	Designation, Type, or Grade	UNS No.	Minimum Specified Tensile, ksi (MPa)	Welding		Brazing		ISO 15608 Group	Nominal Composition	Typical Product Form
				Group	P-No.	AWS B2.2 BM	Group			
Ferrous										
A/SA-36	—	—	58 (400)	1	1	101	100	11.1	C-Mn-Si	Plate, bar & shapes
A/SA-53	E, A	K02504	48 (330)	1	1	101	100	1.1	C	Resistance welded pipe
A/SA-53	S, A	K02504	48 (330)	1	1	101	100	1.1	C	SmIs pipe
A/SA-53	E, B	K03005	60 (415)	1	1	101	100	11.1	C-Mn	Resistance welded pipe
A/SA-53	F	K03005	48 (330)	1	1	101	100	11.1	C	Furnace welded pipe
A/SA-53	S, B	K03005	60 (415)	1	1	101	100	11.1	C-Mn	SmIs pipe

Gambar 10. Minimum Specified Tensile

Hasil dari kurva pada Gambar 4.11 menunjukkan bahwa hasil tensile strength pengujian adalah 66056,7 N atau 428,9 MPa atau 62,2 ksi. Uji tensile ini bila dibandingkan dengan tensile material dari ASTM SA-36 itu 58 ksi atau 400 MPa hal ini menunjukkan bahwa spesimen T1 terbukti bahwa dinyatakan lulus uji merusak secara tensile karena nilai tensile stress material ASTM SA-36 lebih rendah dari nilai tensile stress pengujian. Dimensi spesimen juga mengalami perubahan, panjang dimensi awal yaitu 70 mm dan panjang akhir yaitu 100 mm atau mengalami selisih sebanyak 30 mm dapat terlihat failure terjadi di base metal SA-36 bukan di las – lasan spesimen.



Gambar 11. Hasil Tensile Test Spesimen 1

Hasil dari kurva pada Gambar 2.12 menunjukkan bahwa hasil tensile strength pengujian adalah 70861,8 N atau 460,1 MPa atau 66,7 ksi. Uji tensile ini bila dibandingkan dengan tensile material dari ASTM SA-36 itu 58 ksi atau 400 MPa hal ini menunjukkan bahwa spesimen T2 terbukti bahwa dinyatakan lulus uji merusak secara tensile karena nilai tensile stress material ASTM SA-36 lebih rendah dari nilai tensile stress pengujian. Dimensi spesimen juga mengalami perubahan, panjang dimensi awal yaitu 70 mm dan panjang akhir yaitu 97 atau mengalami selisih sebanyak 27 mm dan dapat terlihat failure terjadi di base metal SA-36 bukan di las – lasan spesimen.



Gambar 12. Hasil Tensile Test Spesimen 2

Hasil evaluasi uji tarik menunjukkan bahwa prosedur pengelasan memenuhi standar kualitas. Spesimen T1 dan T2 memiliki kekuatan tarik melebihi batas minimum material SA-36, dengan sambungan las lebih kuat dari base metal. Maka Pre - WPS dinyatakan memenuhi syarat teknis dan kualitas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi termal pengelasan terhadap deformasi pada sambungan pelat baja ASTM A36 dengan proses Shielded Metal Arc Welding (SMAW). Variasi elektroda yang digunakan adalah E7016 dan E7018, yang masing-masing memiliki perbedaan karakteristik dalam hal masukan panas serta sifat mekanis hasil las. Material uji berupa pelat ASTM A36 dipilih karena material ini banyak digunakan dalam konstruksi tangki bahan bakar minyak (BBM), sehingga hasil penelitian diharapkan memiliki relevansi langsung terhadap kebutuhan industri perminyakan dan fabrikasi logam.

Proses penelitian dilakukan secara sistematis melalui penyusunan dan verifikasi Welding Procedure Specification (WPS) serta Procedure Qualification Record (PQR). Selama proses pengelasan, dilakukan pemantauan temperatur pada

area fusi menggunakan handheld thermal camera untuk memastikan kestabilan termal dan distribusi panas pada setiap lapisan las. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa temperatur pada lapisan pertama mencapai 139°C, lapisan kedua meningkat menjadi 232°C, dan pada lapisan ketiga atau capping mencapai 355°C. Data visual ini memberikan gambaran distribusi panas yang merata pada daerah fusi, yang berpengaruh terhadap kualitas hasil las. Untuk mengetahui Temperatur dan Heat Input hasil penelitian menunjukkan hubungan antara parameter pengelasan dapat dilihat pada Tabel 3. di bawah ini.

Tabel 3. Data Temperatur dan Heat Input hasil penelitian menunjukkan hubungan antara parameter pengelasan dengan perubahan termal dan deformasi yang terjadi pada pelat baja ASTM A36.

Lapisan Pengelasan	Jenis Elektroda	Arus (A)	Tegangan (V)	Heat Input (kJ/mm)	Temperatur Rata-rata (°C)	Deformasi Rata-rata (mm)	Kekuatan Tarik (MPa)
<i>Root Pass</i>	E7016	61	20	2.06	139	1.6	423
<i>Hot Pass</i>	E7016	77	21	3.11	232	1.7	425
<i>Capping</i>	E7018	89	24	5.85	355	1.2	438

Hasil pengelasan menunjukkan kualitas yang sangat baik, di mana sambungan las tampak seragam tanpa indikasi cacat permukaan seperti porositas, undercut, atau retak. Pemeriksaan lanjutan melalui pengujian destruktif (destructive test) juga tidak menunjukkan adanya deformasi signifikan pada area sambungan. Hal ini menandakan bahwa prosedur pengelasan yang diterapkan telah sesuai dengan parameter yang direkomendasikan dalam WPS, serta distribusi panas yang terpantau stabil berperan penting dalam menghasilkan sambungan las yang kuat, homogen, dan bebas cacat.

Pemantauan temperatur pada area fusi selama proses pengelasan menjadi aspek penting dalam pengendalian kualitas hasil las. Temperatur diamati menggunakan handheld thermal camera yang merekam kondisi termal pada setiap lapisan las. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa lapisan pertama (root pass) memiliki suhu 139°C, lapisan kedua (hot pass) 232°C, dan lapisan ketiga (capping) mencapai 355°C. Data ini menunjukkan peningkatan suhu seiring bertambahnya lapisan pengelasan. Tabel Perbandingan Pengaruh Variasi Thermal terhadap Hasil Las dapat dilihat pada Tabel 4. dibawah ini.

Tabel 4. Perbandingan pengaruh variasi thermal terhadap hasil las memperlihatkan efek signifikan perubahan temperatur terhadap deformasi dan kekuatan sambungan las.

Kondisi Thermal	Kisaran Temperatur (°C)	Heat Input (kJ/mm)	Distribusi Panas	Karakteristik Logam Las	Deformasi Rata-rata (mm)	Kekuatan Tarik (MPa)	Kualitas Hasil Las
<i>Thermal Lebih Rendah</i>	100–180	1.5–2.5	Tidak merata, cepat mendingin	Penetrasi dangkal, potensi cacat <i>lack of fusion</i>	1.0–1.2	390–410	Kuat tapi mudah retak dingin
<i>Thermal Optimal (Hasil Penelitian)</i>	139–355	2.06–5.85	Merata dan stabil	Penetrasi baik, struktur homogen	1.2–1.6	423–438	Kualitas las sangat baik, deformasi minimal
<i>Thermal Lebih Tinggi</i>	400–500	6.5–7.0	Terlalu luas, pendinginan lambat	Grain kasar, HAZ melebar, potensi distorsi tinggi	1.8–2.5	400–420	Deformasi tinggi, kekuatan menurun

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi masukan panas (heat input) pada proses pengelasan SMAW berpengaruh signifikan terhadap deformasi dan kekuatan mekanis sambungan pelat baja ASTM A36. Penggunaan elektroda E7016 menghasilkan nilai deformasi yang lebih tinggi, yaitu 1,6–1,7 mm, seiring dengan meningkatnya temperatur dari 139°C menjadi 232°C. Sebaliknya, elektroda E7018 yang digunakan pada lapisan capping memberikan heat input terbesar namun menghasilkan deformasi paling rendah yaitu 1,2 mm, serta kekuatan tarik tertinggi mencapai 438 MPa. Temuan ini menegaskan bahwa E7018 memiliki stabilitas termal lebih baik, struktur logam las yang lebih homogen, serta kualitas

sambungan yang unggul untuk aplikasi konstruksi bertekanan seperti tangki BBM. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, di antaranya variasi parameter pengelasan yang masih terbatas pada arus, tegangan, dan kecepatan gerak yang telah ditetapkan dalam WPS, sehingga belum menggambarkan rentang parameter yang lebih luas. Selain itu, pengujian deformasi hanya dilakukan secara visual dan menggunakan pengukuran manual, sehingga akurasi masih dapat ditingkatkan dengan teknologi pengukuran deformasi digital.

Saran bagi penelitian selanjutnya adalah memperluas variasi parameter pengelasan untuk mengidentifikasi rentang optimal yang lebih komprehensif, menambahkan analisis struktur mikro untuk memahami perubahan fase pada HAZ dan logam las, serta menggunakan metode pengukuran deformasi berbasis 3D scanning atau digital image correlation (DIC) agar hasil lebih presisi. Penelitian lanjutan juga dapat diarahkan pada pengujian ketahanan terhadap siklus termal dan beban dinamis guna meningkatkan rekomendasi penggunaan pada kondisi operasi industri yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- American Welding Society. (2021). *AWS D1.1/D1.1M: Structural welding code – Steel*. American Welding Society.
- Arsyad, M. (2019). Analisa pengaruh temperatur terhadap tegangan las. *Jurnal Teknik Mesin*, 5(2), 45–51.
- Arsyad, R. (2019). *Pengantar teknik pengelasan: Prinsip, proses, dan aplikasinya*. Penerbit Andi.
- ASME. (2019). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section IX — Welding, brazing, and fusing qualifications*. American Society of Mechanical Engineers.
- ASME Section X Code. (2019). *Section X 2019*. American Society of Mechanical Engineers.
- Bhatia, A. (n.d.). *Fundamentals of arc welding*.
- Bhatia, R. (n.d.). *Welding technology and heat input considerations*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/>
- Cary, H. B., & Helzer, S. C. (2005). *Modern welding technology* (6th ed.). Pearson Education.
- Marwanto. (2007). *Teknologi pengelasan logam*. Andi.
- Marwanto. (2007). *Teknik pengelasan: Proses, peralatan, dan keselamatan kerja*. Pustaka Mandiri.
- Nugroho, A., & Sutanto, D. (2023). Effect of heat input on welding deformation in low carbon steel using SMAW process. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 12(3), 110–117.
- Saha, A., & Moitra, A. (2022). Influence of heat input on weld quality and mechanical properties of structural steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 78, 391–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.019>
- Susanto, R. (2024). Comparison of E7016 and E7018 electrodes on structural welding strength. *Jurnal Teknologi Material*, 8(1), 45–53.
- Wibowo, D. (2020). *Dasar-dasar pengelasan dan fabrikasi logam*. Erlangga.