



Analisa Pengaruh Temperatur *Post Weld Heat Treatment* Pada Baja Astm A36 Terhadap Laju Korosi Dan Kekuatan Tarik

Adly Aland Dzakiyah¹⁾, Andi Trimulyono¹⁾, Wilma Amiruddin¹

¹⁾Laboratorium Kapal – Las dan Material Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

*e-mail : alandadly@students.undip.ac.id

Abstrak

Baja ASTM A36, material struktural populer di industri perkapalan, rentan korosi akibat perubahan mikrostruktur dan tegangan sisa pasca-pengelasan. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi temperatur *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap laju korosi dan kekuatan tarik baja ASTM A36 hasil las Gas Metal Arc Welding (GMAW). Metode eksperimental dilakukan dengan variasi suhu PWHT 0°C (tanpa perlakuan), 400°C, 500°C, 600°C, dan 700°C. Pengujian meliputi uji korosi weight loss dalam larutan NaCl 3,5% selama 28 hari dan uji tarik. Hasil menunjukkan PWHT efektif menurunkan laju korosi. Performa optimal dicapai pada suhu 500°C dengan laju korosi terendah 0,2327 mm/tahun, peningkatan Yield Strength menjadi 193,61 MPa, serta Ultimate Tensile Strength (UTS) yang stabil. Sebaliknya, suhu 700°C menyebabkan penurunan drastis UTS menjadi 323,82 MPa dan kenaikan laju korosi akibat overheating, meskipun elongasi meningkat hingga 10,83%. Disimpulkan bahwa rentang suhu 400°C–500°C adalah kondisi paling optimal untuk menyeimbangkan ketahanan korosi dan kekuatan mekanis material.

Kata Kunci : ASTM A36, Korosi, *Post Weld Heat Treatment*, Uji tarik

1. PENDAHULUAN

Baja menjadi salah satu material utama yang digunakan dalam industri perkapalan. Baja memiliki daya tahan yang sangat tinggi terhadap beban berat, tekanan, dan benturan. Baja juga memiliki sifat elastis yang memungkinkan material ini untuk menahan deformasi tanpa mudah patah[1].

Baja merupakan besi dengan kadar karbon kurang dari 2%. Baja dapat dibentuk menjadi berbagai macam bentuk sesuai dengan keperluan. Secara garis besar ada 2 jenis baja, yaitu baja karbon dan baja paduan. Baja karbon terbagi menjadi baja karbon rendah, baja karbon sedang dan baja karbon tinggi[2].

ASTM A36 merupakan baja karbon struktural yang paling umum digunakan dalam berbagai aplikasi teknik, termasuk industri perkapalan. Baja ini memiliki komposisi kimia yang terdiri dari karbon (maksimum 0,29%), mangan (0,80-1,20%), fosfor (maksimum 0,04%), dan sulfur (maksimum 0,05%)[3].

Baja ASTM A36 termasuk dalam baja karbon rendah dengan kandungan karbon kurang 0,3% dan unsur utamanya adalah besi (Fe), dan karbon (C), serta elemen tambahan seperti mangan (Mn), silikon (Si), nikel (Ni), krom (Cr), dan unsur lainnya dalam jumlah kecil. Baja karbon rendah memiliki mekanik yang baik dengan kekuatan tarik cukup tinggi antara 415-550 MPa (60.000-80.000 psi), memiliki ketangguhan dan keuletan yang relatif baik. Dengan sifat-sifat yang sangat baik, pelat baja ini dapat dibaut, dipaku keling, dan dilas dalam konstruksi bangunan, jembatan, dan gedung serta untuk keperluan struktural umum apa pun[4], [5], [6].

Dalam industri maritim, ketahanan terhadap korosi merupakan faktor penting yang perlu diperhatikan karena lingkungan laut yang agresif dapat mempercepat laju korosi material. Baja ASTM A36, meskipun memiliki ketahanan korosi yang baik, tetap memerlukan perhatian khusus agar performa material tetap optimal. Salah satu cara meningkatkan ketahanan terhadap korosi adalah

dengan penerapan metode *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) setelah proses pengelasan.

Korosi merupakan proses degradasi logam yang terjadi akibat interaksi elektrokimia antara permukaan logam dengan atmosfer atau media korosi yang ada di lingkungan. Secara umum, proses ini menyebabkan berkurangnya massa logam akibat pelepasan ion dari permukaan yang terpapar langsung oleh lingkungan sekitar. Fenomena korosi dapat muncul dalam berbagai bentuk, baik sebagai serangan merata di seluruh permukaan logam maupun sebagai kerusakan lokal yang hanya terjadi pada area-area tertentu. Proses ini menyebabkan kerugian ekonomi signifikan karena merusak infrastruktur seperti pipa, plat, dan rangka [7], [8], [9].

Mengingat eliminasi korosi secara total merupakan hal yang hampir tidak mungkin, strategi pengendalian laju korosi dipandang sebagai solusi yang paling rasional dan aplikatif [10].

Baja karbon, yang banyak digunakan dalam industri memiliki kerentanan terhadap korosi elektrokimia (korosi basah) karena adanya sel galvanik mikroskopis antara fasa ferit (katoda) dan sementit (anoda). Laju korosi pada baja karbon rendah dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti komposisi kimia, struktur mikro, dan kondisi lingkungan. Proses pengelasan juga dapat mengubah struktur mikro dan distribusi tegangan sisa, yang pada gilirannya mempengaruhi laju korosi [8], [11].

Pengelasan merupakan cara penyambungan dua benda padat melalui pencairan dan perpaduan dengan menggunakan panas [12].

Gas Metal Arc Welding (GMAW), yang juga dikenal dengan istilah *Metal Inert Gas* (MIG) atau *Metal Active Gas* (MAG), merupakan proses pengelasan busur listrik yang menggunakan busur antara elektroda kawat kontinu (filler) dengan logam induk. Proses ini memanfaatkan gas pelindung yang disuplai secara eksternal melalui nozzle untuk melindungi kolam las (*weld pool*) dan elektroda dari kontaminasi atmosfer seperti oksigen, nitrogen, dan uap air yang dapat menyebabkan cacat pada hasil lasan [12], [13].

GMAW banyak digunakan dalam industri manufaktur dan perkapalan karena memiliki produktivitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan proses manual seperti SMAW atau GTAW. Hal ini disebabkan oleh penggunaan elektroda kontinu yang meminimalkan waktu henti untuk penggantian elektroda serta kecepatan deposisi yang tinggi. Selain itu, pengoperasiannya relatif lebih mudah dipelajari dan dapat diaplikasikan pada berbagai posisi pengelasan [14].

Post-Weld Heat Treatment (PWHT) merupakan proses pemanasan yang dilakukan setelah pengelasan yang bertujuan untuk memperbaiki sifat metalurgi dan mekanik dari logam las. Tujuan utamanya adalah mengurangi tegangan sisa (residual stress) yang timbul akibat proses pengelasan, meningkatkan ketangguhan (toughness), menstabilkan struktur mikro, serta mengurangi laju korosi material [3], [15].

Tingkat relaksasi tegangan sisa tergantung pada jenis dan komposisi material, suhu PWHT, serta waktu soaking pada suhu tersebut. Proses pengelasan umumnya melibatkan pelelehan dan pendinginan berikutnya, dan hasil dari siklus termal ini adalah distorsi jika benda yang dilas dapat bergerak bebas atau tegangan sisa jika benda tersebut dipegang dengan kuat. Ada titik di mana jumlah tegangan sisa dapat menimbulkan masalah potensial, baik secara langsung maupun selama masa pakai struktur las, sehingga perlu dikurangi atau dihilangkan [6], [9].

Pada Bab 3 (*Chemical Reactions in Welding*) buku *welding metalurgy*, membahas bagaimana hidrogen dapat terlarut dalam logam las selama pengelasan, terutama pada baja kekuatan tinggi. Hidrogen ini berpotensi menyebabkan hydrogen cracking (retak hidrogen) di daerah HAZ (*Heat-Affected Zone*) atau logam las. PWHT berperan penting dalam mengurangi kadar hidrogen dengan memfasilitasi difusinya keluar dari logam las, sehingga menurunkan risiko retak. Selain itu, PWHT juga membantu meredam tegangan sisa yang dapat memicu retak hidrogen [16].

Selain rentan terhadap korosi, baja ASTM A36 juga perlu diperhatikan dari segi kekuatan mekanisnya, terutama setelah mengalami proses pengelasan dan perlakuan panas.

Post Weld Heat Treatment (PWHT) sering diaplikasikan untuk memulihkan sifat mekanik material, termasuk kekuatan tarik, sekaligus mengurangi tegangan sisa akibat pengelasan. Namun, variasi temperatur PWHT perlu diteliti lebih lanjut karena suhu yang terlalu tinggi atau rendah dapat memengaruhi keseimbangan antara ketahanan korosi dan kekuatan tarik. Dengan demikian, analisis pengaruh variasi temperatur PWHT terhadap kedua aspek ini menjadi penting untuk memastikan kinerja optimal baja ASTM A36 dalam aplikasi teknik [11], [17].

Uji tarik merupakan metode dasar yang digunakan untuk mengkarakterisasi sifat-sifat mekanik suatu material [18].

Pengujian tarik adalah jenis pengujian yang bersifat merusak dengan memberi gaya tarik pada suatu material dalam arah yang berlawanan, menjauh dari titik tengah hingga benda tersebut

patah. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi sifat mekanis dari sebuah logam dan panduannya[17], [19]

Tensile strength merupakan besaran yang menunjukkan seberapa besar gaya tarik yang diperlukan untuk menarik suatu material hingga putus, atau dengan kata lain, merupakan nilai tegangan tarik maksimum yang dapat ditahan material sebelum mengalami kegagalan[20].

Sifat mekanik pertama yang dapat diketahui dari kurva tegangan regangan adalah kekuatan Tarik maksimum yang diberi symbol σ_u . symbol tersebut diambil dari kata ultimate atau yang berarti puncak. Dengan demikian, nilai kekuatan Tarik diukur berdasarkan tegangan maksimum yang tampak pada kurva[17].

Uji tarik sering dilakukan untuk menambah informasi mengenai rancangan dasar kekuatan suatu material serta sebagai data pendukung untuk spesifikasi bahan[19], [21].

Penelitian mengenai *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) pada berbagai jenis material telah banyak dilakukan dengan fokus yang terpisah. Lubis et al. (2022) mengkaji pengaruh durasi PWHT pada pengelasan SMAW namun terbatas pada pengujian mekanik, sementara Moon et al. (2003) berfokus pada ketahanan korosi pada baja RE36. Di sisi lain, Arifah & Ruswanto (2020) meneliti pengaruh waktu penahanan (holding time) terhadap kekuatan mekanik baja AISI 316 menggunakan pengelasan GTAW/TIG[11], [19], [22].

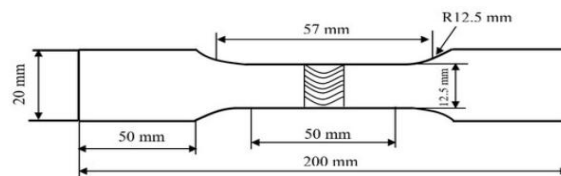
Meskipun studi-studi tersebut memberikan fondasi penting, belum ada penelitian yang secara komprehensif mengintegrasikan analisis variasi temperatur PWHT terhadap dua parameter krusial sekaligus yaitu laju korosi dan kekuatan Tarik khususnya pada baja ASTM A36 dengan metode pengelasan GMAW. Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan mengevaluasi sejauh mana temperatur PWHT dapat dioptimalkan untuk menekan laju korosi tanpa mengorbankan integritas struktural (kekuatan tarik) material.

Hipotesis penelitian ini adalah bahwa peningkatan temperatur PWHT hingga ambang batas tertentu (500°C - 600°C) akan secara simultan menurunkan laju korosi dan menjaga stabilitas kekuatan tarik melalui mekanisme reduksi tegangan sisa (stress relieving), namun temperatur yang terlalu tinggi (700°C) akan memicu degradasi mekanis akibat perubahan mikrostruktur.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Material utama yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan baja karbon rendah, yang secara kimiawi mengandung kadar dibawah 0,30%, dan diklasifikasikan dalam tipe ASTM A36 sesuai dengan standar klasifikasi material[4]. Sebanyak 15 spesimen dengan dimensi $200\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ sesuai dengan standar E8M, digunakan untuk mengkaji pengaruh dari temperatur *Post Weld Heat Treatment*. Setelah dilakukan pengelasan menggunakan jenis pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG) atau bisa juga disebut dengan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), material kemudian dipanaskan dalam mesin *Muffle Furnace* dengan variasi temperatur 0°C , 400°C , 500°C , 600°C , dan 700°C . Spesimen kemudian diuji ketahanan korosinya dengan metode *immersion* dengan larutan NaCl 3,5% selama 28 hari dan dilanjutkan dengan pengujian Tarik di Laboratorium teknik Perkapalan Universitas Diponegoro. Gambar 1 menampilkan desain spesimen uji sesuai dengan standard ASTM E8M.



Gambar 1. Rancangan Spesimen Uji

2.2. Tahapan Pengelasan

Material baja ASTM A36 yang telah dipotong sesuai ukuran yang ditetapkan kemudian dilakukan pengelasan dengan metode *Metal Inert Gas* (MIG) atau bisa juga disebut dengan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) pada posisi datar (IG). Sebelum pengelasan utama, dilakukan tack weld pada kedua ujung sambungan untuk menjaga posisi material. Selama pengelasan, teknik pengisian dilakukan secara bertahap hingga seluruh volume sambungan terisi sempurna. Setelah selesai, spesimen dibiarkan mendingin secara alami, Selanjutnya baja ASTM A36 dipotong sesuai dengan dimensi specimen uji yang sudah direncanakan sebelumnya.



Gambar 2. Hasil Pengelasan Baja ASTM A36



Gambar 3. Spesimen Uji

2.3. Tahapan PWHT

Setelah specimen uji dibuat, dilakukan pemanasan pasca pengelasan atau *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap specimen Uji dengan variasi temperatur sesuai dengan rencana awal. Proses PWHT dilakukan di Laboratorium Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro dengan menggunakan mesin *muffle furnace* dengan variasi temperatur 0°C, 400°C, 500°C, 600°C, dan 700°C dengan *Holding Time* selama ± 30 menit. PWHT dilakukan dengan tujuan mengurangi tegangan sisa (*residual stress*) yang timbul akibat proses pengelasan, meningkatkan ketangguhan (*toughness*), menstabilkan struktur mikro, serta mengurangi laju korosi material[3], [15].



(a)



(b)

Gambar 4. (a) Mesin Muffle Furnace, (b) proses PWHT

2.4. Tahapan Perendaman

Tahapan selanjutnya adalah perendaman specimen kedalam larutan NaCl 3,5% selama 28 hari atau 4 minggu. Sebelum perendaman dilakukan, specimen ditimbang terlebih dahulu untuk mendapat data berat awal yang kemudian selama proses perendaman berlangsung dilakukan penimbangan tiap 7 hari untuk mengetahui perubahan berat yang terjadi pada specimen uji

akibat terjadinya korosi. Larutan NaCl 3,5% juga diperbarui tiap dilakukannya penimbangan agar tidak mengubah komposisi kimia pada larutan akibat kontaminasi dari korosi yang terjadi pada specimen.

Setelah mendapat data berat hingga hari ke 28 maka selanjutnya dilakukan perhitungan laju korosi metode weight loss dengan menggunakan rumus:

$$\text{Laju Korosi (mm/year)} = \frac{87.6 \times W}{D \times A \times T}$$

di mana: W = kehilangan massa (mg), D = densitas logam (g/cm³), A = luas permukaan sampel (cm²), T = waktu eksposur (jam).

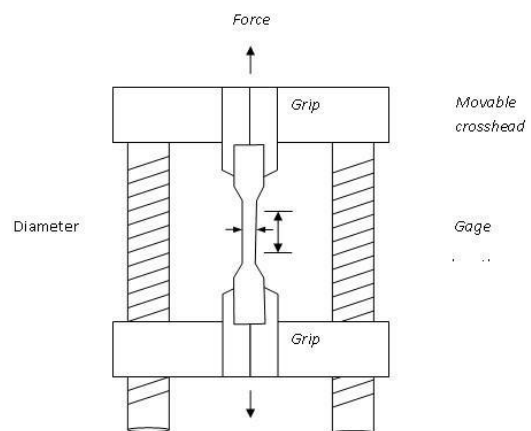
Metode ini umum digunakan dalam penelitian karena sederhana dan memberikan hasil kuantitatif yang dapat dibandingkan antar perlakuan[11].

2.5. Pengujian Tarik

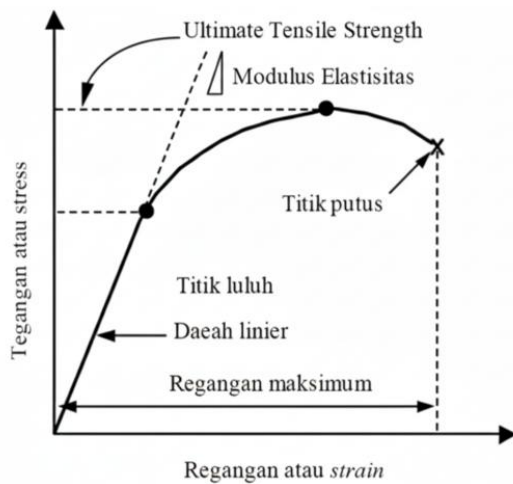
pengujian Tarik dilakukan untuk menghitung kekuatan tarik, regangan, dan modulus. Spesimen dijepit pada mesin pengujian dengan pembebanan yang meningkat secara bertahap sampai beban tertentu hingga specimen patah.

Proses diawali dengan menyiapkan komputer serta mesin uji tarik, kemudian setiap specimen diberi kode sesuai variannya. Berikutnya, specimen dipasang pada mesin hidrolik dan ditarik mulai dari beban 0 kg hingga mengalami kegagalan.

Uji Tarik merupakan dasar dari pengujian bahan yang dijadikan dasar pada studi mengenai kekuatan suatu bahan atau material, Data yang diperoleh dari pengujian ini akan menghasilkan kurva yang menunjukkan hubungan antara gaya yang diterapkan dan penambahan panjang yang dialami oleh specimen[19].



Gambar 5. Pengujian Tarik



Gambar 6. Kurva Hasil Uji Tarik

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian *Weight Loss*

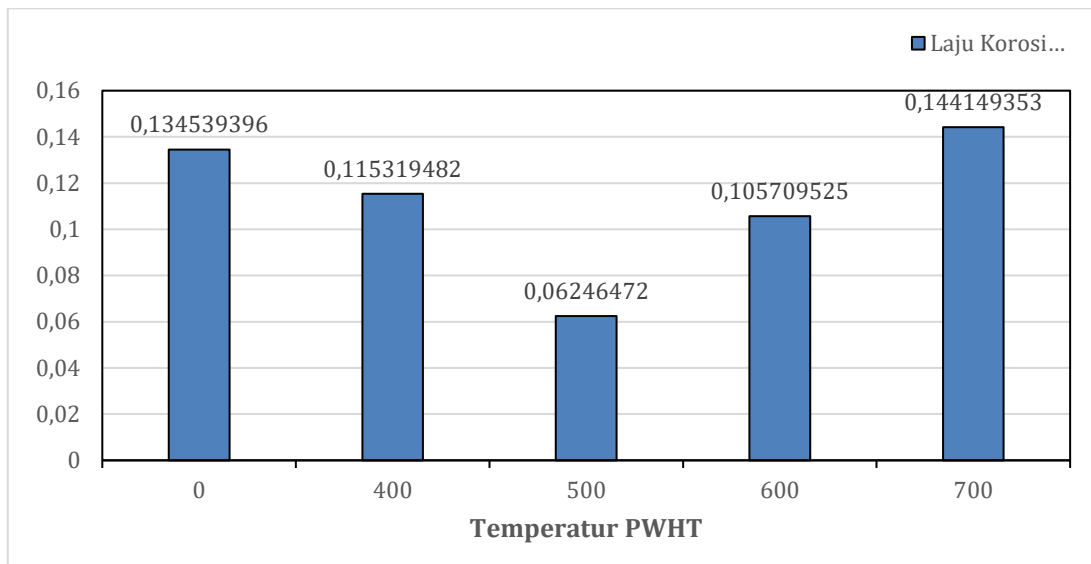
Laju korosi diperoleh dengan melakukan perhitungan weight loss, specimen ditimbang terlebih dahulu untuk mendapat data berat awal specimen yang kemudian digunakan untuk mencari perbandingan penurunan berat baja.

Specimen direndam dalam larutan NaCl 3,5% selama 28 hari untuk menciptakan korosi dan mendapatkan data perubahan berat akibat korosi. Berikutnya dilakukan penimbangan specimen secara berkala dengan interval waktu 7 hari guna mendapat data berat specimen tiap minggunya. Selama proses penimbangan, larutan NaCl sekaligus diperbarui untuk tetap menjaga konsistensi kondisi pengujian akibat dari terjadinya korosi pada specimen.

Setelah memasuki hari ke 28, proses perendaman telah selesai dilakukan, dengan demikian perhitungan laju korosi dengan metode *Weight Loss* dapat dilakukan, data lengkap perubahan data berikut laju korosi tiap specimen dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Laju Korosi Baja ASTM A36

Variasi	Kode	Minggu-1	Minggu-2	Minggu -3	Minggu-4	Laju Korosi (mm/y)	Rata-Rata (mm/y) (n=3)
PWHT 0°C	A	0,1268	0,1297	0,1268	0,1297	0,1297	0,1345
	B	0,1326	0,1297	0,1268	0,1297	0,1297	
	C	0,1384	0,1412	0,1403	0,1441	0,1441	
PWHT 400°C	A	0,1268	0,1326	0,1306	0,1297	0,1297	0,1153
	B	0,1730	0,1441	0,1345	0,1153	0,1153	
	C	0,0980	0,0980	0,1018	0,1009	0,1009	
PWHT 500°C	A	0,0692	0,0605	0,0595	0,0576	0,0576	0,0624
	B	0,0692	0,0691	0,0691	0,0720	0,0720	
	C	0,0750	0,0634	0,0615	0,0576	0,0576	
PWHT 600°C	A	0,0692	0,0980	0,0999	0,1009	0,1009	0,1057
	B	0,0807	0,1153	0,1230	0,1153	0,1153	
	C	0,0750	0,1009	0,1076	0,1009	0,1009	
PWHT 700°C	A	0,2537	0,2219	0,1902	0,1585	0,1585	0,1441
	B	0,2076	0,1816	0,1556	0,1297	0,1297	
	C	0,2306	0,1729	0,1729	0,1441	0,1441	



Gambar 7. Grafik Laju Korosi

Gambar 7 menunjukkan bahwa pada material tanpa PWHT memiliki laju korosi sebesar 0,1345%, untuk material dengan temperatur PWHT 400°C laju korosi terlihat menurun di angka 0,1153%, begitu pula dengan specimen dengan temperatur PWHT 500°C dengan laju korosi sebesar 0,0624%, penurunan juga terlihat pada suhu 600°C jika dibandingkan dengan material tanpa perlakuan PWHT dengan weight loss sebesar 0,1057%, namun pada suhu 700°C terlihat bahwa laju korosi justru mengalami sedikit kenaikan jika dibandingkan dengan specimen tanpa PWHT sebesar 0,1441%.

Data tersebut mengindikasikan bahwa perlakuan PWHT terbukti dapat menurunkan laju korosi, ditunjukkan oleh nilai penurunan massa yang lebih kecil pada beberapa suhu PWHT dibandingkan specimen tanpa PWHT dengan presentase weight loss paling kecil ada pada variasi PWHT 500°C, namun kembali meningkat pada temperatur yang lebih tinggi dalam penelitian ini adalah pada temperatur 700°C.

Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas PWHT bergantung pada kisaran suhu tertentu, dan pemanasan berlebih justru dapat memicu perubahan mikrostruktur yang menyebabkan pertumbuhan butir berlebihan (grain growth), meningkatkan kerapuhan dan sensitivitas korosi[11].

Secara statistik, tren penurunan laju korosi pada specimen PWHT 500°C menunjukkan konsistensi data yang tinggi dibandingkan specimen *as-welded*. Penurunan laju korosi hingga 0,2498 mm/y ini sejalan dengan temuan Moon et al. (2003) yang menyatakan bahwa perlakuan panas pasca-las memperbaiki resistansi korosi dengan menggeser potensial korosi ke arah yang

lebih baik (noble). Efektivitas suhu 500°C dalam penelitian ini membuktikan bahwa pelepasan tegangan sisa akibat pengelasan GMAW berhasil meminimalisir pembentukan area anodik lokal yang biasanya menjadi pemicu utama korosi pada sambungan las baja karbon rendah[22].

3.2. Hasil Pengujian Tarik

Setelah spesimen diuji tingkat laju korosinya dengan perendaman pada larutan NaCl selama 28 hari, dilakukan pengujian tarik untuk menganalisa kekuatan mekanis specimen pasca mengalami korosi. Hasil pengujian tarik yang diperoleh selanjutnya dianalisis kemudian dilakukan perbandingan antar variasi dan dengan data penelitian sebelumnya untuk mendukung interpretasi hasil penelitian. Pengujian Tarik menggunakan *Universal Testing Machine* (UTW) yang berada di laboratorium perkapalan yang ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Proses Uji Tarik pada *Universal testing Machine*

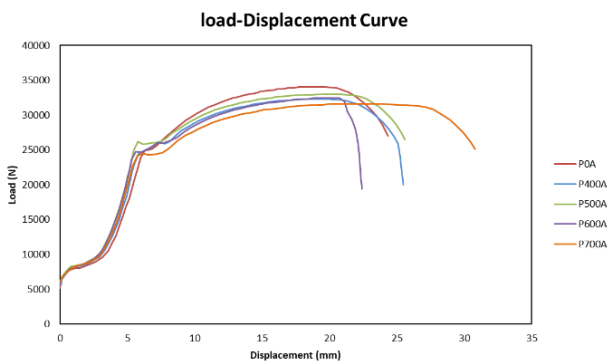
Dalam penelitian ini, kekuatan tarik ultimate didefinisikan sebagai tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh material baja saat mengalami pembebanan satu arah hingga titik sebelum patah total, yang secara grafis tercermin sebagai puncak pada kurva tegangan-regangan. Variasi suhu perlakuan panas pasca pengelasan (PWHT) terhadap baja ASTM A36 dipelajari dengan menganalisis hasil uji beban-perpindahan dan tegangan-regangan, untuk menggambarkan respons mekanik material terhadap perlakuan termal yang berbeda.

Kurva tegangan-regangan yang ditunjukkan pada Gambar 10 hingga 12 memperlihatkan adanya penyimpangan dari perilaku linier ideal pada tahap awal pengujian, khususnya pada regangan yang sangat kecil. Tahap non-linier ini, yang terjadi sebelum mencapai batas proporsional, kemungkinan bukan merupakan karakteristik material itu sendiri, melainkan disebabkan oleh faktor eksternal dalam sistem pengujian. Salah satu penyebab umum adalah terjadinya slip atau pergeseran pada grip mesin uji tarik sebelum

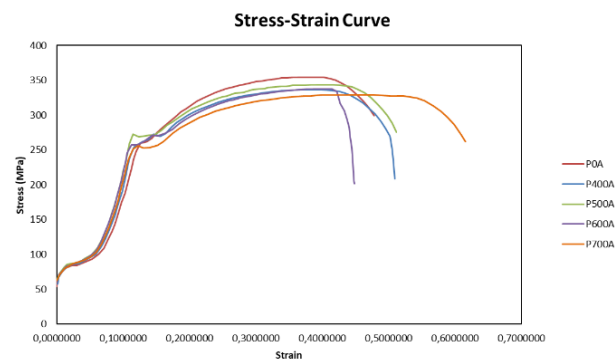
material mulai menegang secara stabil. Fenomena tersebut sering muncul dalam pengujian material dan dapat menyebabkan pembacaan regangan awal menjadi kurang akurat. Namun demikian, setelah melewati fase awal tersebut, kurva menunjukkan perilaku elastis dan plastis yang sesuai dengan dasar teori metalurgi.



Gambar 9. Spesimen Pasca Uji Tarik



(a)



(b)

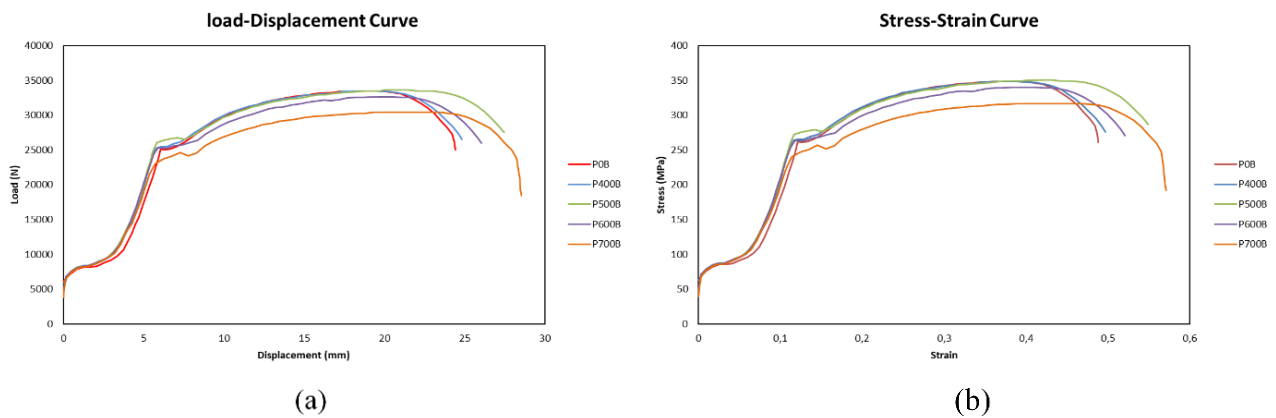
Gambar 5. (a) Grafik Load-Displacement Specimen Pertama dan (b) Grafik Strain-Stres Specimen Pertama

Hasil pengujian Tarik untuk variasi tanpa perlakuan panas (0°C atau raw material) seperti yang ditunjukkan memiliki nilai beban maksimum sebesar 34.020 N pada specimen pertama, selanjutnya mengalami penurunan pada specimen pertama variasi PWHT 400°C menjadi 32.299 N, pada specimen pertama variasi 500°C beban mengalami kenaikan menjadi 32.982 N, lalu kembali menurun hingga 32.414 N, dan beban terendah ada pada specimen pertama variasi PWHT 700°C dengan beban sebesar 31.599 N.

Tren serupa juga diilustrasikan pada gambar 10 (b) dimana tegangan maksimum mengalami penurunan dari 354 MPa pada specimen pertama variasi Non PWHT menjadi 336 MPa pada specimen pertama variasi PWHT 400°C , kemudian

mengalami sedikit kenaikan menjadi 343 MPa (PWHT 500°C), tegangan pada specimen pertama variasi 600°C menurun hingga 337 MPa, dan nilai tegangan terendah mencapai 329 MPa pada specimen pertama variasi PWHT 700°C .

Nilai regangan maksimum menunjukkan pola yang sebaliknya dimana mengalami peningkatan dari 0,48 untuk variasi Non PWHT menjadi 0,50 pada variasi PWHT 400°C , kemudian mengalami penurunan akibat patah terjadi pada area pengelasan pada variasi PWHT 600°C dengan regangan maksimum sebesar 0,44, dan kembali meningkat pada variasi 700°C sebesar 0,61, hasil tersebut menunjukkan bahwa kenaikan temperatur membuat kemampuan deformasi plastis material juga ikut meningkat.



Gambar 6. . (a) Grafik Load-Displacement Specimen ke-2 dan (b) Grafik Stress-Strain Specimen ke-2

Grafik 11 (a) menunjukkan hubungan antara beban tarik (*Load*) dan perpindahan (*Displacement*) untuk spesimen ke-2 baja ASTM A36 setelah perlakuan PWHT pada berbagai suhu. Semua kurva menunjukkan peningkatan beban secara linier pada awal pengujian, yang menunjukkan respons elastis material.

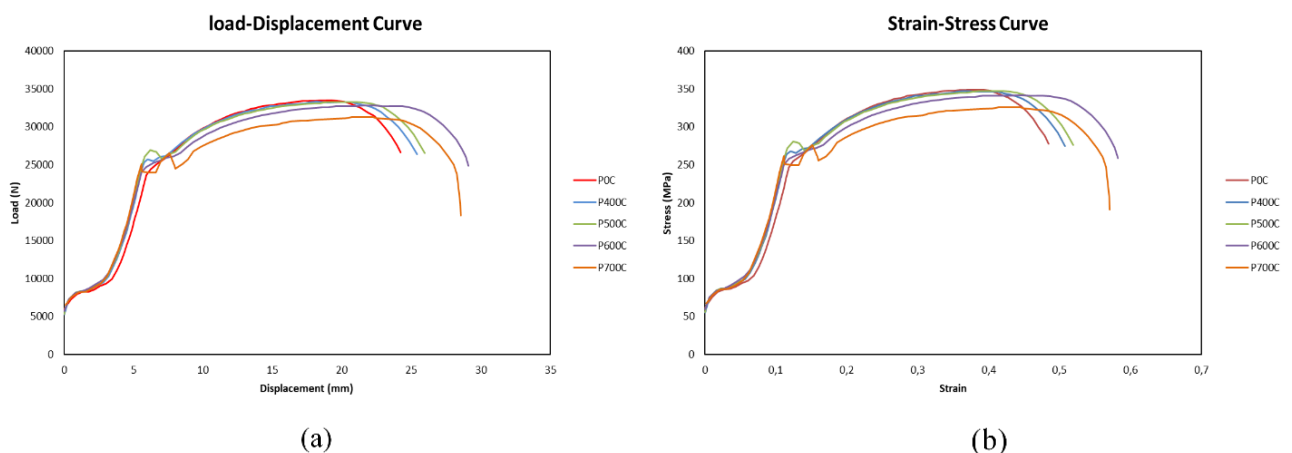
Setelah mencapai nilai beban puncak, kurva menurun tajam, menunjukkan dimulainya retak dan kegagalan material. Nilai beban maksimum yang dicapai oleh masing-masing variasi adalah sebesar 33.477N untuk variasi Non PWHT, 33.476N pada variasi PWHT 400°C, meningkat menjadi 33.648 untuk variasi PWHT 500°C, dan kembali menurun pada variasi 600°C menjadi 32.670N hingga mencapai nilai terendah sebesar 30.417N untuk variasi PWHT 700°C.

Berdasarkan data tersebut Dari data tersebut, terlihat bahwa PWHT 500–600 °C menghasilkan kemampuan menahan beban tertinggi, sedangkan PWHT 700 °C mengalami penurunan beban maksimum, yang menunjukkan penurunan kekuatan akibat *overheating* dan pertumbuhan butir. Grafik 11 (b) merupakan grafik tegangan–

regangan yang menggambarkan respons mekanik material berdasarkan perhitungan luas penampang dan perubahan panjang spesimen. Bagian awal kurva yang linier menunjukkan zona elastis, yang menjadi dasar penentuan *Modulus Young*. Setelah titik luluh, kurva masuk zona plastis dan mencapai *Ultimate Tensile strength* (UTS) sebelum gagal.

Nilai tegangan maksimum untuk masing-masing variasi adalah sebesar 348,721 MPa pada variasi Non PWHT diikuti variasi PWHT 400°C sebesar 348,709 MPa, kemudian meningkat menjadi 350,5MPa pada variasi PWHT 500°C, dan mengalami penurunan pada variasi PWHT 600°C dan 700°C sebesar 340,306 MPa dan 316,846 MPa.

Nilai regangan mengalami peningkatan secara kontinu seiring dengan meningkatnya temperatur PWHT dengan nilai terendah pada variasi Non PWHT sebesar 0,488, 0,496, 0,548, 0,52, dan nilai tertinggi pada variasi 700°C sebesar 0,57. Tren tersebut serupa dengan tren pada data spesimen pertama dan mengindikasikan bahwa kenaikan temperatur membuat kemampuan deformasi plastis material juga ikut meningkat.



Gambar 7. (a) Grafik Load-Displacement Spesimen ke-3 dan (b) Grafik Stress-Strain Specimen ke-3

Kurva beban–perpindahan pada spesimen ketiga berdasarkan gambar 12 (a) menggambarkan respons material terhadap pembebanan tarik pada variasi suhu PWHT yang berbeda. Pada fase awal pengujian, seluruh kurva menunjukkan peningkatan beban secara linier hingga mencapai kisaran 25-28 kN, yang mencerminkan perilaku elastis material baja ASTM A36. Setelah melewati batas elastis, setiap kurva mulai melandai dan memasuki daerah plastis dengan peningkatan perpindahan yang signifikan sebagai tanda deformasi permanen yang mulai terjadi.

Beban maksimum dicapai dalam rentang 30-35 kN, di mana perlakuan PWHT pada suhu 500 °C dan 600 °C menunjukkan kapasitas beban puncak tertinggi, menunjukkan peningkatan kemampuan material menahan beban maksimum. Sebaliknya, perlakuan pada suhu 700 °C menghasilkan beban puncak yang paling rendah, mengindikasikan penurunan kapasitas tahan beban pada suhu tinggi akibat perubahan mikrostruktur negatif. Setelah puncak beban, penurunan tajam pada kurva load-displacement menandai fase gagal material yang berkaitan dengan inisiasi dan propagasi retak pada spesimen.

Grafik 12 (b) merupakan grafik tegangan–regangan yang menggambarkan karakteristik deformasi material hingga mencapai kegagalan. Pada bagian awal grafik, hubungan antara tegangan dan regangan menunjukkan kenaikan linier, yang menandai zona elastis dan menjadi dasar untuk menentukan modulus elastisitas material. Setelah mencapai titik luluh, grafik bergerak ke fase plastis dengan peningkatan regangan yang signifikan hingga mencapai tegangan maksimum atau *Ultimate Tensile strength* (UTS).

Nilai *Ultimate Tensile strength* (UTS) tertinggi diperoleh pada perlakuan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) pada suhu 500 °C dan 600 °C, dengan puncak tegangan mendekati kisaran 340–350 MPa. Hal ini menunjukkan peningkatan kekuatan material yang terjadi akibat proses pengurangan tegangan sisa (stress relieving) dan penyempurnaan mikrostruktur selama perlakuan panas. Sebaliknya, kurva hasil perlakuan pada suhu 700 °C memperlihatkan penurunan tajam pada nilai tegangan maksimum, yang mengindikasikan degradasi kekuatan yang diakibatkan oleh pertumbuhan butir yang berlebihan saat suhu PWHT terlalu tinggi.

Selain itu, pada temperatur 600 °C dan 700 °C, material menunjukkan regangan maksimum yang lebih besar, menandai peningkatan keuletan meskipun kekuatan tarik menurun. Fenomena ini mencerminkan kompromi klasik antara kekuatan (*strength*) dan keuletan (*ductility*) di mana peningkatan keuletan biasanya diiringi dengan penurunan kekuatan, sesuai dengan prinsip hubungan invers antara keduanya dalam sifat mekanik logam.

Penjelasan ini mengilustrasikan bagaimana variasi suhu PWHT mempengaruhi keseimbangan antara kekuatan dan keuletan pada baja ASTM A36, yang penting untuk pengoptimalan proses perlakuan panas guna mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan.

Data lengkap hasil pengujian tarik disajikan pada Tabel 2. Hasil Pengujian Tarik dengan menampilkan data *Yield Strength*, kekuatan tarik maksimum, dan *Elongation* pada tiap specimen.

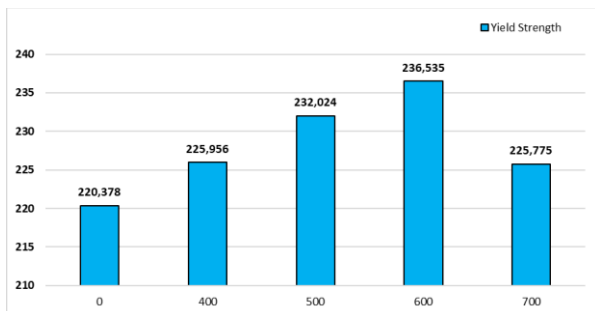
Tabel 2. Hasil Pengujian Tarik

Variasi	Kode	<i>Yield Strength</i> (MPa)	<i>Ultimate Tensile strength</i> (MPa)	Modulus Young (GPa)	Regangan (%)
PWHT 0°C	A	222,729	354,382	196,792	8,50
	B	219,184	348,721	190,198	8,00
	C	219,223	348,527	185,917	7,00
PWHT 400°C	A	227,593	336,451	200,562	9,00
	B	224,402	348,709	199,620	8,75
	C	225,873	346,964	200,241	8,75
PWHT 500°C	A	231,509	343,567	203,747	9,25
	B	232,008	350,501	200,321	9,50
	C	232,556	346,767	200,321	9,75
PWHT 600°C	A	232,838	337,646	186,214	8,00
	B	239,185	340,306	193,102	10,50
	C	237,580	341,756	184,264	10,50

PWHT 700°C	A	226,549	329,156	158,869	10,50
	B	224,377	316,846	159,733	11,50
	C	226,400	325,458	156,122	10,50

Pengujian tarik pada baja ASTM A36 dengan variasi suhu dalam proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) mengindikasikan perubahan yang signifikan pada sifat mekanik material akibat perlakuan panas yang berbeda. Analisis difokuskan pada beberapa parameter utama, yaitu *Yield Strength*, *ultimate Tensile strength* (UTS), *modulus Young*, serta regangan (%) atau *Elongation*. Untuk setiap tingkat suhu PWHT, dilakukan pengujian pada tiga spesimen guna mendapatkan nilai rata-rata ($n=3$) pada karakteristik mekanik material secara representative.

Untuk melihat tren perubahan sifat mekanik material, dilakukan pemetaan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 8 sampai dengan Gambar 11, dimana grafik yang ditunjukkan secara berurutan adalah grafik hubungan temperatur PWHT terhadap kekuatan luluh baja, hubungan temperatur PWHT terhadap *Ultimate Tensile strength*, hubungan temperatur PWHT terhadap *modulus young*, serta hubungan temperatur PWHT terhadap *Elongation*.



Gambar 8. Grafik Hubungan Suhu PWHT dengan *Yield Strength*

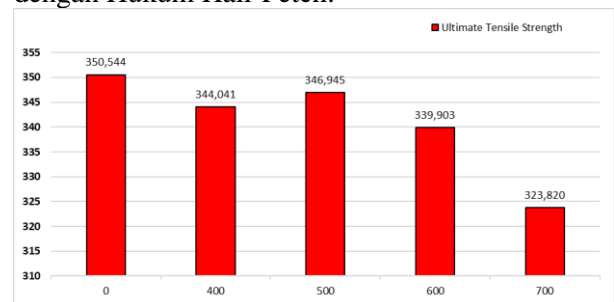
Gambar 8 mengilustrasikan hubungan antara variasi temperatur pada proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) dengan nilai *Yield Strength* atau kekuatan leleh baja ASTM A36 setelah melalui tahap perendaman dan pengujian Tarik. Secara umum, grafik yang dihasilkan menunjukkan bahwa perlakuan PWHT berperan dalam mempengaruhi kapasitas material untuk menahan deformasi plastis sebelum mencapai titik leleh.

Pada spesimen as-welded (tanpa perlakuan/0°C), nilai rata-rata kekuatan luluh tercatat sebesar 220,38 MPa. Nilai ini menjadi baseline untuk mengevaluasi efektivitas perlakuan panas. Ketika dilakukan PWHT pada suhu 400°C, terjadi peningkatan kekuatan luluh sebesar sekitar 2,5% menjadi 225,96 MPa, Tren positif berlanjut pada suhu 500°C dengan nilai 232,02 MPa.

Peningkatan ini secara teoritis dapat dikaitkan dengan mekanisme stress relieving. Proses pengelasan awal memicu tegangan sisa (residual stress) yang tinggi di area lasan. Secara teoritis, PWHT pada rentang suhu ini berpotensi mereduksi tegangan sisa akibat pengelasan, yang konsisten dengan peningkatan kekuatan luluh yang teramati pada data, sehingga material memiliki kapasitas yang lebih baik dalam menahan beban deformasi plastis awal.

Spesimen dengan suhu PWHT 600°C memiliki nilai kekuatan leleh yang meningkat secara signifikan sebesar 236,535 MPa (meningkat sekitar 7,3% dari spesimen as-welded), ini menjadi nilai tertinggi pada rentang variasi suhu PWHT.

Namun, penurunan kekuatan luluh kembali terjadi pada suhu 700°C menjadi 225,78 MPa. Meskipun pengamatan struktur mikro tidak dilakukan dalam penelitian ini, fenomena penurunan kekuatan pada suhu tinggi ini konsisten dengan Hukum Hall-Petch.



Gambar 9. Grafik Hubungan Suhu PWHT dengan *Ultimate Tensile strength*

Grafik pada gambar 9 menunjukkan pengaruh dari variasi temperatur PWHT terhadap nilai *Ultimate Tensile strength* (UTS) baja ASTM A36. Secara umum, dapat dilihat bahwa perlakuan PWHT memberikan perubahan yang cukup signifikan pada kekuatan Tarik maksimum material setelah mengalami proses korosi dan pengujian Tarik.

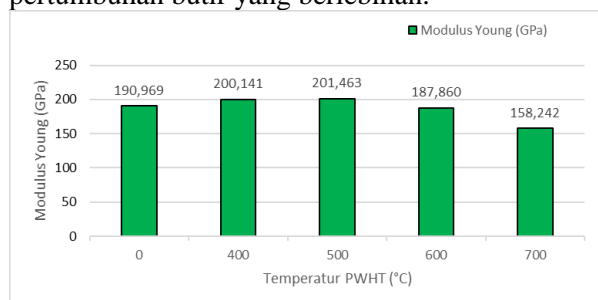
Pada kondisi tanpa perlakuan PWHT (0°C), nilai rata-rata kekuatan Tarik maksimum (UTS) tercatat sebesar 350,54 MPa. Nilai ini akan menjadi acuan untuk tahap evaluasi pengaruh pada variasi temperatur selanjutnya. Setelah perlakuan PWHT pada suhu 400°C, terjadi penurunan UTS menjadi 344,04 MPa, kemudian kembali mengalami peningkatan pada variasi suhu 500°C dengan nilai UTS sebesar 346,95 MPa. Peningkatan tersebut menunjukkan adanya

penyempurnaan struktur mikro akibat dari proses *stress relieving* dan tahap awal rekristalisasi yang mampu meningkatkan kekuatan Tarik material.

Namun, peningkatan suhu PWHT lebih lanjut memberikan penurunan pada nilai UTS. Pada suhu 600°C, UTS menurun menjadi 339,90 MPa, dan penurunan yang cukup drasitis terjadi pada suhu 700°C, dengan nilai terendah sebesar 323,82 MPa. Penurunan nilai UTS yang signifikan pada 700°C mengindikasikan terjadinya *softening* termal, yang konsisten secara teoritis dengan fenomena pertumbuhan butir berdasarkan hukum Hall-Petch.

Tren ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang berjudul “Analisa pengaruh variasi waktu post weld heat treatment pada pengelasan smaw baja A36 terhadap kekuatan uji tarik, uji impak dan struktur mikro”, di mana variasi waktu PWHT juga menunjukkan penurunan kekuatan tarik seiring lamanya perlakuan panas: nilai UTS tertinggi terdapat pada kondisi Non PWHT sebesar 467,01 MPa, sementara nilai terendah terdapat pada PWHT 3 jam sebesar 455,80 MPa[19].

Perbandingan ini menunjukkan bahwa baik peningkatan suhu maupun peningkatan waktu PWHT sama-sama memicu *softening* akibat pertumbuhan butir yang berlebihan.



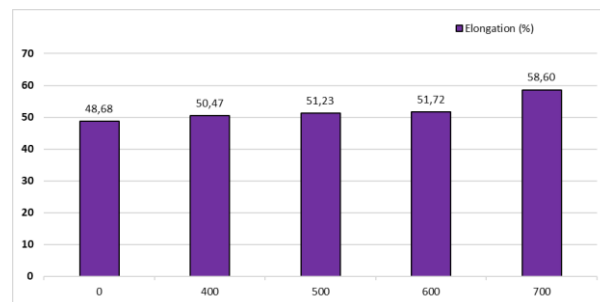
Gambar 10. Grafik Hubungan Suhu PWHT dengan *Modulus Young*

Pada kondisi tanpa PWHT (0°C), material menunjukkan nilai Modulus Young sebesar 190,969. Nilai ini merepresentasikan kondisi material setelah pengelasan tanpa perlakuan panas tambahan.

Ketika material diberi perlakuan PWHT pada temperatur 400°C dan 500°C, Modulus Young meningkat menjadi 200,141 GPa dan 201,463 Gpa, menunjukkan bahwa 500°C adalah temperatur optimal dalam rentang yang diuji untuk mencapai kekakuan maksimum material.

Setelah mencapai puncaknya, Modulus Young mulai menurun pada temperatur PWHT 600°C, dengan nilai 187,860. Penurunan Modulus Young semakin signifikan pada temperatur PWHT 700°C, mencapai nilai terendah 158,242 dalam rentang pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa

temperatur PWHT yang terlalu tinggi dapat berdampak negatif pada kekakuan material.



Gambar 11. Grafik Hubungan Suhu PWHT dengan *Elongation*.

Berdasarkan gambar 11 pengaruh variasi suhu PWHT terhadap *Elongation* pada baja ASTM A36 mengalami peningkatan bertahap yang sejalan dengan peningkatan suhu PWHT.

Dapat dilihat pada kondisi 0°C rata-rata nilai *Elongation* tercatat sebesar 7,83%, menggambarkan kemampuan deformasi plastis awal material. Peningkatan suhu PWHT 400°C hingga 600°C, nilai elongasi meningkat secara bertahap (8,83% hingga 9,67%). Secara deduktif, fenomena ini menandai terjadinya fase pemulihan (*recovery*) dan rekristalisasi. Energi termal yang diberikan memungkinkan atom-atom untuk berdifusi, mengurangi cacat kristal, dan menata ulang dislokasi menjadi konfigurasi yang lebih stabil. Relaksasi tegangan internal ini menurunkan hambatan gerakan dislokasi, sehingga material menjadi lebih "lunak" dan mampu meregang lebih panjang sebelum mengalami kegagalan.

Peningkatan elongasi pada suhu 700°C (10,8%) konsisten dengan teori bahwa suhu tinggi meningkatkan daktilitas kemungkinan melalui mekanisme pertumbuhan butir, meskipun konfirmasi metalografi tidak dilakukan.. Mengacu pada hukum Hall-Petch Dimana penurunan kekuatan luluh (σ_y) berbanding terbalik dengan peningkatan diameter butir (d).

Hal tersebut juga sesuai dengan penelitian terdahulu yang berjudul “*Relationship between strength and univorm Elongation of metals based on an exponential hardening law*” dimana Secara umum, terdapat hubungan *trade-off* antara kekuatan tarik (UTS) dan keuletan (*Elongation* atau *uniform Elongation*, UE) pada logam. Biasanya, saat kekuatan meningkat, keuletan cenderung menurun karena material menjadi lebih keras namun kurang mampu berdeformasi plastis secara signifikan. Sebaliknya, penurunan kekuatan biasanya diikuti dengan peningkatan keuletan, sehingga material menjadi lebih lentur[23].

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa rentang suhu PWHT antara 400 °C hingga 500 °C merupakan kondisi optimal untuk meningkatkan sifat mekanik baja ASTM A36, yang ditandai oleh peningkatan simultan pada kekuatan tarik dan keuletan. Sebaliknya, perlakuan PWHT pada suhu yang lebih tinggi ($\geq 600^\circ\text{C}$) berkontribusi pada penurunan performa mekanik, sehingga menghasilkan sifat material yang lebih buruk dibandingkan kondisi awal (0°C).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data mengenai pengaruh temperatur Post Weld Heat Treatment (PWHT) terhadap laju korosi dan sifat mekanik baja ASTM A36 pasca pengelasan GMAW, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Penerapan PWHT secara signifikan memodifikasi ketahanan korosi baja ASTM A36. Secara umum, PWHT efektif dalam mengurangi laju korosi dibandingkan kondisi as-welded. Hal ini terutama disebabkan oleh relaksasi tegangan sisa dan homogenisasi mikrostruktur yang mengurangi area anodik lokal, sehingga menghambat inisiasi dan propagasi korosi. Namun, efektivitas ini sangat bergantung pada parameter temperatur.

2. Post Weld Heat Treatment (PWHT) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik mekanis, khususnya kekuatan tarik pada baja ASTM A36 pasca pengelasan GMAW. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat pola hubungan non-linear antara temperatur PWHT dengan kekuatan tarik yang dihasilkan. Peningkatan temperatur PWHT hingga titik tertentu memberikan efek positif yang berimplikasi pada optimalisasi kekuatan tarik. Namun, pemberian temperatur PWHT yang melebihi batas termal kritis material memicu penurunan kekuatan tarik secara signifikan. Dengan demikian, efektivitas PWHT sangat bergantung pada ketepatan pemilihan rentang temperatur agar dapat mencapai keseimbangan antara penghilangan tegangan sisa tanpa mengorbankan integritas mekanis material.

3. Variasi temperatur PWHT menunjukkan dampak yang berbeda terhadap laju korosi. Temperatur PWHT 500°C terbukti paling optimal, menghasilkan laju korosi terendah sebesar 0,0624 mm/tahun. Kondisi ini mengindikasikan tercapainya keseimbangan antara relaksasi tegangan dan stabilitas mikrostruktur. Sebaliknya,

perlakuan pada temperatur yang lebih tinggi, seperti 700°C , justru meningkatkan laju korosi menjadi 0,1441 mm/tahun. Peningkatan ini diatributkan pada fenomena overheating yang memicu pertumbuhan butir (grain growth) berlebihan, mengurangi luas batas butir yang berfungsi sebagai penghambat korosi, serta berpotensi membentuk fasa-fasa yang kurang stabil secara elektrokimiawi.

4. Variasi temperatur PWHT secara signifikan memengaruhi sifat mekanik baja ASTM A36. Nilai kekuatan luluh (Yield Strength) menunjukkan peningkatan progresif dari 0°C hingga mencapai puncaknya pada 600°C (236,54 MPa), yang berkorelasi dengan teori relaksasi tegangan sisa dan perbaikan mikrostruktur berdasarkan literatur, meskipun konfirmasi langsung memerlukan pengujian metalografi. Namun, pada 700°C , Yield Strength menurun menjadi 225,78 MPa, konsisten dengan Hukum Hall-Petch akibat pertumbuhan butir berlebihan. Penting untuk dicatat bahwa seluruh nilai Yield Strength yang diperoleh berada di bawah batas minimum standar ASTM A36 (250 MPa), yang merupakan konsekuensi dari paparan lingkungan korosif yang mereduksi luas penampang efektif dan menciptakan stress raiser. Sementara itu, kekuatan tarik maksimum (Ultimate Tensile Strength - UTS) tertinggi tercatat pada kondisi as-welded (0°C) sebesar 350,54 MPa, disebabkan oleh tegangan sisa dan strain hardening. PWHT umumnya menurunkan UTS, dengan 500°C memberikan nilai yang relatif stabil (346,95 MPa). Penurunan paling drastis terjadi pada 700°C (323,82 MPa), diakibatkan oleh kombinasi pertumbuhan butir dan peningkatan laju korosi yang menggerus integritas permukaan. Seluruh nilai UTS juga berada di bawah standar minimum ASTM A36 (400 MPa) karena efek korosi. Sebaliknya, nilai elongasi menunjukkan tren yang berbanding terbalik dengan UTS, yaitu terus meningkat seiring dengan kenaikan temperatur PWHT. Kondisi as-welded (0°C) memiliki elongasi terendah (48,68%) karena kepadatan dislokasi yang tinggi (dislocation pinning), sedangkan puncaknya dicapai pada 700°C (58,60%), mengindikasikan bahwa temperatur tinggi memfasilitasi pergerakan dislokasi dan pertumbuhan butir, sehingga material menjadi lebih ulet.

5. Terdapat hubungan invers antara laju korosi dan kekuatan tarik maksimum. Spesimen dengan laju korosi yang lebih tinggi cenderung menunjukkan nilai UTS yang lebih rendah. Hal ini paling jelas terlihat pada temperatur PWHT 700°C ,

di mana laju korosi tertinggi berkorelasi dengan UTS terendah. Degradasi permukaan akibat korosi mengurangi luas penampang efektif dan berfungsi sebagai stress raiser, mempercepat kegagalan material di bawah beban tarik. Selain itu, penelitian ini mengkonfirmasi prinsip trade-off klasik antara kekuatan dan keuletan, di mana peningkatan keuletan melalui PWHT suhu tinggi seringkali diiringi dengan penurunan kekuatan tarik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Synergyjayatama, "5 Keunggulan Plat Kapal Baja Dalam Konstruksi Dan Manufaktur." Accessed: Feb. 21, 2025
- [2] A. J. Irawan, "Analisa Pengujian Kekerasan Material Baja Karbon Rendah Dan Besi Menggunakan Metode Uji Brinell". *Jitekh*, Vol. 7, No. 2, Tahun 2019
- [3] Astm International, Astm A6/A6m-21: Specification For General Requirements For Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, And Sheet Piling, Nov. 2021, Doi: 10.1520/A0006_A0006m-21.
- [4] "ASTM A36 Steel Plate – Completely Specifications," Octal. Accessed: Feb. 21, 2025
- [5] R. Muchammad, S. Jokosisworo, and A. W. B. Santosa, "Pengaruh Kuat Arus dan Jenis Elektroda dengan Kandungan Nikel Terhadap Sifat Mekanis Baja Kapal Grade A pada Pengelasan Fcaw".
- [6] Astm International, Astm A36/A36m-14: Standard Specification For Carbon Structural Steel 1, Doi: 10.1520/A0036_A0036m-1.
- [7] Darmawi, T. K. Dewi, H. Alian, And K. Ginting, *Ahli Korosi Dasar*, Upt. Penerbit Dan Percetakan Universitas Sriwijaya, 2022.
- [8] B. H. Pangaribowo, "Studi Pengaruh Pemanasan Awal Pada Pengelasan Ulang Baja Astm A36 Akibat Reparasi Terhadap Sifat Mekanis Menggunakan Proses Las Fcaw." 2018.
- [9] R. Putra, Nurhasan "Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Pengelasan Smaw Pada Baja Karbon S275j2," *Zona Mesin Issn 2087-698x*, Vol. 10 Nomor 2, 2020
- [10] R. W. Revie And H. H. Uhlig, *Corrosion And Corrosion Control An Introduction To Corrosion Science And Engineering* Fourth Edition. A John Wiley & Sons, Inc., Publication
- [11] A. Arifah and Sidiq Ruswanto, "Jurnal Mekanik Terapan Efek Post Weld Heat Treatment terhadap Sifat Mekanis AISI 316 Hasil Pengelasan GTAW," *Jurnal Mekanik Terapan*, vol. 01, pp. 81–087, 2020.
- [12] Sri Widharto, *Welding Inspection*. 2013.
- [13] D. A. Althouse, H. Carl Turnquist, A. W. Bowditch, E. K. Bowditch, And A. M. Bowditch, *Modern Welding*, 12th Ed. The Goodheart-Willcox Company, Inc, 2020.
- [14] wiryosumarto harsono and O. Toshie, *teknologi-pengelasan-logam_*. jakarta: PT. Pradnya Pramita.
- [15] I. Setiawan, M. N. Iman, "Pengaruh Post Weld Heat Treatment terhadap Sifat Mekanis Dan Korosi Sambungan Las Spiral Saw Pada Pipa Baja Astm A252." *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, Vol.5, No.1, Oktoberl 2012
- [16] S. Kou, *Welding Metallurgy* Second Edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2003.
- [17] V. B. Sardi, S. Jokosisworo, And H. Yudo, "Pengaruh Normalizing Dengan Variasi Waktu Penahanan Panas (Holding Time) Baja St 46 Terhadap Uji Kekerasan, Uji Tarik, Dan Uji Mikrografi," *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 6, No. 1, P. 142, 2018
- [18] M. Moayyedian et al., "Tensile Test Optimization Using the Design of Experiment and Soft Computing,"

Processes, vol. 11, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.3390/pr11113106.

- [19] P. C. Lubis, U. Budiarto, And S. Jokosisworo, “Jurnal Teknik Perkapalan Analisa Pengaruh Variasi Waktu Post Weld Heat Treatment Pada Pengelasan Smaw Baja A36 Terhadap Kekuatan Uji Tarik, Uji Impak Dan Struktur Mikro,” *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 10, No. 3, P. 48, 2022.
- [20] Y. Z. Ma, D. Sobernheim, And J. R. Garzon, *Glossary For Unconventional Oil And Gas Resource Evaluation And Development*. Elsevier Inc., 2016. Doi: 10.1016/B978-0-12-802238-2.00019-5.
- [21] S. A Mubarak, I. Naufal, U. Budiarto, And S. J Sisworo, “Pengaruh Variasi Arus Las Smaw Terhadap Laju Korosi Dan Kekuatan Tarik Baja St 40,” *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 09, No. 2, 2021.
- [22] M. Moon *Et Al*. “The Effect Of Post-Weld Heat Treatment Affecting Corrosion Resistance And Hydrogen Embrittlement Of Haz Part In Fcaw,” *Surface And Coatings Technology*, Vol. 169, P. 675-678, 2003.
- [23] Z. Zhang et al., “Relationship between strength and uniform elongation of metals based on an exponential hardening law,” *Acta Mater.*, vol. 231, p. 117866, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.actamat.2022.117866.