



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Pengaruh Variasi Waktu dan Media Pendingin Terhadap Kekuatan Tarik dan Tekuk Pengelasan SMAW Dissimilar Baja ASTM A36 dan SS304

Restu Sri Saptoaji¹⁾, Ari Wibawa Budi Santosa¹⁾, Untung Budiarto^{1)*)}

¹⁾ Laboratorium Teknologi Material, Las, dan Produksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

^{*)}e-mail : restusrisaptoaji@students.undip.ac.id

Abstrak

Pengelasan dissimilar merupakan metode penyambungan dua jenis material dengan sifat kimia dan mekanik yang berbeda, yang banyak diaplikasikan dalam industri perkapalan. Baja ASTM A36 dan SS304 merupakan material yang umum digunakan, namun perbedaan karakteristik keduanya dapat memengaruhi kualitas sambungan las. Salah satu parameter penting yang berpengaruh terhadap sifat mekanik hasil pengelasan adalah media dan waktu pendinginan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi media pendingin (air dan oli) serta waktu pendinginan (0 menit, 2 menit, dan 4 menit) terhadap kekuatan tarik dan tekuk hasil pengelasan SMAW dissimilar baja ASTM A36 dan SS304. Penelitian ini merupakan penelitian dengan metode eksperimental dengan pembuatan spesimen uji tarik dan uji tekuk sesuai standar ASTM E8 dan ASTM E290. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi media dan waktu pendinginan memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik sambungan las. Pendinginan menggunakan media oli dengan waktu 4 menit menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 426,07 MPa serta menunjukkan performa uji tekuk terbaik dengan nilai ultimate flexural strength tertinggi yaitu 754,83 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa pendinginan oli dengan waktu 4 menit mampu meningkatkan keuletan dan ketahanan deformasi plastis sambungan las dissimilar, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi struktural, khususnya pada industri perkapalan.

Kata Kunci : Pengelasan SMAW; Dissimilar Welding; Media Pendingin; Waktu Pendinginan; Uji Tarik; Uji Tekuk;

1. PENDAHULUAN

Baja ASTM A36 dan SS304 merupakan jenis baja yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi karena memiliki kekuatan dan tingkat ketahanan yang tinggi. ASTM A36 merupakan jenis baja karbon rendah yang umum digunakan karena memiliki kualitas struktural yang baik meskipun ketahanan korosinya relatif rendah, sehingga diperlukan perlakuan tambahan untuk meningkatkan performanya [1][2]. *Stainless steel* SS304 merupakan jenis material baja yang memiliki kekuatan, keuletan, ketahanan korosi, dan ketahanan terhadap lingkungan yang tinggi [3]. Baja ini umum digunakan untuk pembuatan bagian-bagian pada instalasi air seperti *valve* dan *pump shaft* [4]. Keunggulan dari baja ASTM A36 dan SS304 menjadikan keduanya sesuai untuk dikombinasikan melalui teknik pengelasan.

Pengelasan sebagai salah satu metode penyambungan logam, memiliki peranan penting dalam menunjang berbagai kegiatan industri, termasuk industri perkapalan. Salah satu metode pengelasan yang umum digunakan adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). SMAW umum digunakan karena ekonomis, peralatannya sederhana, portabel, dan mudah digunakan, sehingga cocok untuk berbagai lingkungan dan kondisi [5][6][7]. SMAW dapat mengelas berbagai macam jenis logam, termasuk material besi dan non-besi. Dalam praktiknya, pengelasan SMAW tidak hanya digunakan untuk menyambungkan logam sejenis, tetapi juga sering diaplikasikan pada logam dengan jenis yang berbeda atau dikenal dengan istilah pengelasan *dissimilar*. Pengelasan SMAW terbukti efektif untuk pengelasan *dissimilar* logam besi dan non-besi [8].

Pengelasan *dissimilar* mengacu pada teknik yang menggabungkan dua atau lebih logam atau non-logam yang berbeda jenis, untuk mengintegrasikan keunggulan masing-masing dan mencapai persyaratan performa tertentu [9][10][11]. Teknik ini banyak digunakan di berbagai industri, karena kemampuannya untuk menggabungkan sifat dari berbagai material untuk aplikasi yang hemat biaya dan performa tinggi [12][13][14]. Metode pengelasan ini bukanlah proses yang mudah dikarenakan perbedaan suhu titik lebur, perbedaan komposisi kimia material dasar, serta perbedaan sifat mekanik dan fisik, seperti konduktivitas termal, koefisien muai termal, dan juga perbedaan suhu perlakuan panas yang diperlukan oleh masing-masing material [15][16][17].

Proses pendinginan menjadi salah satu parameter penting yang mempengaruhi kualitas hasil sambungan las. Proses ini memiliki tujuan untuk mempercepat dan meningkatkan kualitas hasil sambungan pengelasan sekaligus untuk mengoptimalkan kekuatan serta efisiensi logam baja pasca pengelasan [18]. Terdapat beberapa jenis media pendinginan yang paling umum dipakai dalam pendinginan hasil pengelasan seperti udara, air, oli, air laut/air garam, es dan gas [19][20][21]. Penggunaan media pendingin seperti air dan oli telah banyak diterapkan untuk mengontrol temperatur dan distribusi setelah proses pengelasan [22][23]. Media pendingin air dapat menurunkan suhu puncak dan mempercepat laju pendinginan selama proses pengelasan, sehingga menghambat pertumbuhan butir pada daerah terpengaruh panas (*heat-affected zone*) [24]. Pendinginan dengan media air membuat spesimen memiliki nilai kekuatan tarik dan kekerasan yang tinggi, namun namun memiliki nilai keuletan dan ketangguhan yang rendah [25]. Pada pengelasan SMAW baja karbon sedang, pendinginan oli menyebabkan pembentukan lapisan karbon pada spesimen, meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik karena interaksi antara viskositas oli dan kandungan karbon material [26]. Pendinginan dengan media oli juga membantu mengurangi cacat las seperti porositas dan retakan [27].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa media pendingin berpengaruh signifikan terhadap kekuatan sambungan las. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan pendinginan dengan media air mampu meningkatkan kekuatan tarik hingga sekitar 16% dan kekerasan hingga 12,5%, namun menyebabkan penurunan elongation dari sekitar 10,46% menjadi 6,98% akibat laju pendinginan yang tinggi yang mempercepat pembentukan struktur mikro yang lebih keras [28].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perbedaan media pendingin dapat berpengaruh terhadap kekuatan sambungan las. Penelitian ini menunjukkan hasil sambungan las dengan media pendingin oli mendapatkan nilai tegangan tarik sebesar 510 MPa, media air sebesar 450 MPa, dan pendingin udara sebesar 420 MPa [29]. Penelitian lainnya menunjukkan hasil uji tegangan tekuk sambungan las dengan media pendingin oli sebesar 32118,16 N dan air sebesar 7950,92 N [30]. Hal ini menunjukkan pemilihan media pendingin yang tepat dapat meningkatkan kualitas sambungan las.

Penelitian sebelumnya sebagian besar berfokus pada satu media pendingin dan perbandingan media pendingin tanpa mempertimbangkan durasi pendinginan. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi media waktu dan media pendinginan terhadap kekuatan tarik dan tekuk hasil pengelasan dissimilar baja ASTM A36 dan Stainless Steel SS304 dengan variasi waktu 0 menit (celup), 2 menit dan 4 menit. Penelitian ini juga bertujuan untuk mencari media dan waktu pendinginan yang memberikan hasil kekuatan tarik dan tekuk terbaik untuk memperoleh hasil sambungan las yang maksimal.

2. METODE

2.1. Pengumpulan Data

Penelitian ini merupakan penelitian yang menggunakan metode eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi waktu dan media pendingin terhadap kekuatan tarik dan tekuk pada hasil pengelasan SMAW dissimilar baja ASTM A36 dan SS304. Terdapat beberapa tahap dalam penelitian ini meliputi, persiapan alat dan bahan, pengelasan baja, pendinginan setelah pengelasan, pembuatan spesimen uji, dan pengujian tarik dan tekuk spesimen uji.

Baja yang digunakan dalam penelitian ini adalah ASTM A36 yang merupakan kategori baja karbon rendah yang mempunyai sifat mekanik yang cukup tangguh dan kemampuan las yang baik. Baja ini memiliki kekuatan tarik sebesar 400-550 MPa, kekuatan luluh minimal 250 MPa, dan modulus elastisitas konstan sebesar 200 GPa. Komposisi dari baja ini bisa dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Baja ASTM A36

No	Unsur	Kandungan %
1	Karbon (C), maks %	0.25
2	Tembaga (Cu), min %	0.2
3	Besi, (Fe)	98
4	Mangan (Mn), min %	0.8
5	Fosfor (P), maks %	0.03
6	Silicon (Si), %	0.4
7	Sulfur (S), maks %	0.03

Selain itu penelitian ini juga menggunakan *stainless steel* SS304 merupakan baja yang termasuk dalam kategori baja tahan karat. Selain memiliki sifat tahan karat yang sangat baik, baja jenis ini juga memiliki kekuatan mekanik yang tinggi serta ketahanan terhadap suhu tinggi. Baja ini memiliki kekuatan tarik sebesar 505-700 MPa, kekuatan luluh minimal 215 MPa, dan *Modulus Of Elasticity* sebesar 190-200 GPa. Komposisi baja ini bisa dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi SS304

No	Unsur	Kandungan %
1	Karbon (C), maks %	0.08
2	Kromimum (Cr), min%	18
3	Besi, (Fe)	70
4	Mangan (Mn), min %	2
5	Fosfor (P), maks %	0.045
6	Silicon (Si), %	1
7	Sulfur (S), maks %	0.03
8	Nikel (Ni), min %	8

2.2. Tahap Penelitian

Proses awal pembuatan spesimen dilakukan dengan memotong plat baja ASTM A36 dan *stainless steel* SS304 berukuran $750 \times 100 \times 6$ mm menjadi plat berukuran $125 \times 100 \times 6$ mm, dengan jumlah total 12 plat baja.. Proses selanjutnya adalah dilakukan pengelasan dengan metode SMAW untuk menyatukan antara baja ASTM A36 dan SS304 seperti pada gambar 1.

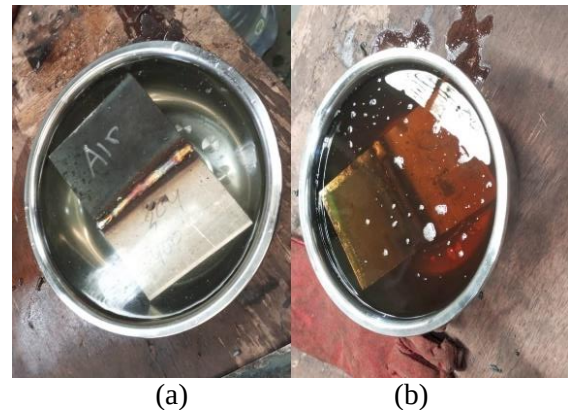


Gambar 1. Proses Pengelasan Plat

Pengelasan dilakukan di *workshop* LKP INLASTEK WELDING INSTITUTE Surakarta. Pengelasan dilakukan dengan metode SMAW, jenis sambungan V *butt joint* dan posisi pengelasan 1G. Jenis elektoda yang digunakan adalah E312-16 dan arus yang digunakan sebesar 70-100 A.

Proses selanjutnya setelah dilakukan pengelasan adalah proses pendinginan. Proses ini dilakukan dengan cara memasukkan plat yang baru saja di las kedalam wadah yang berisi media pendingin air dan oli sebanyak masing-masing 4

liter sesuai dengan variasi waktu yang telah ditentukan yaitu: 0 menit (celup), 2 menit, dan 4 menit. Proses pendinginan hasil pengelasan dilakukan seperti pada gambar 2 dan 3.



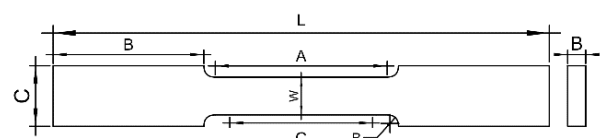
Gambar 2. Proses Pendinginan Hasil Pengelasan
(a) Media Air, (b) Media Oli



Gambar 3. Hasil Pengelasan Setelah Diberikan Media Pendingin

2.3. Tahap Pengujian

Proses selanjutnya setelah plat baja di las dan di dinginkan dengan media pendingin, plat baja dipotong sehingga didapatkan spesimen uji tarik dan uji tekuk sejumlah masing-masing 18 spesimen. Spesimen uji tarik dipotong dengan ukuran sesuai standar ASTM E8 yaitu $200 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ [31]. Sedangkan spesimen uii tekuk dipotong dengan ukuran sesuai standar ASTM E290 yaitu $200 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ [32]. Detail ukuran spesimen uji tarik dan tekuk seperti pada Gambar 2 dan Gambar 3.

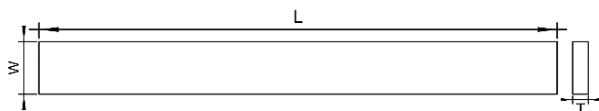


Gambar 4. Spesimen Uji Tarik

Keterangan :

Panjang pengukuran (G) : 50 mm

Panjang bagian yang dikurangi (A) : 57 mm
 Lebar spesimen (W) : 12,5 mm
 Tebal spesimen (T) : 5 mm
 Radius (R) : 12,5 mm
 Panjang total (L) : 200 mm
 Lebar bagian genggam (C) : 20 mm
 Panjang bagian genggam (B) : 50 mm



Gambar 5. Spesimen Uji Tekuk

Keterangan:

Panjang total (L) : 200 mm
 Lebar (W) : 20 mm
 Tebal spesimen (T) : 6 mm

Proses pengujian tarik dan tekuk spesimen dilakukan di Laboratorium Struktur dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro, Semarang. Pengujian tarik bertujuan untuk menguji sifat mekanis dari sambungan las meliputi kekuatan tarik, kekuatan lentur, pemanjangan dan pengurangan material. Terdapat beberapa parameter yang dihasilkan dari uji tarik meliputi, tegangan tarik maksimum (σ), regangan maksimum (ϵ), dan modulus elastisitas (E). Besarnya tegangan tarik maksimum pada pengujian dinyatakan dengan rumus persamaan 1:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \dots\dots\dots (1)$$

σ merupakan tegangan tarik maksimum yang dinyatakan dalam satuan MPa atau N/mm². Besarnya tegangan diperoleh dari perbandingan antara beban maksimum (P) terhadap luas penampang awal spesimen (A_0). Sementara itu, regangan (e) merupakan perbandingan antara pertambahan panjang spesimen akibat pembebanan dengan panjang awal daerah ukur (*gage length*). Nilai regangan tersebut diperoleh berdasarkan hubungan tegangan-regangan yang dihasilkan dari pengujian tarik. Nilai regangan dinyatakan dalam rumus persamaan 2:

$$\epsilon = \frac{L_i - L_0}{L_0} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

ϵ menunjukkan nilai regangan maksimum sebelum spesimen patah (%), L_i merupakan panjang spesimen setelah patah (mm) dan L_0 merupakan panjang spesimen awal (mm). Adapun modulus elastisitas yang juga merupakan nilai perbandingan antara tegangan dengan regangan pada daerah proporsional dapat dihitung dengan persamaan 3:

$$E = \frac{\sigma_y}{\epsilon} \dots\dots\dots (3)$$

E menunjukkan modulus elastisitas yang dinyatakan dalam satuan GPa, σ_y menunjukkan nilai tegangan luluh yang dinyatakan dalam satuan MPa atau N/mm², dan e menunjukkan nilai regangan dalam %. *Fracture Energy* merupakan besarnya energi yang mampu diserap material selama proses deformasi hingga terjadi patah (*fracture*). Pada pengujian tarik, *fracture energy* menunjukkan tingkat ketangguhan (*toughness*) material terhadap pembebanan. Secara umum, *fracture energy* diperoleh dari luas daerah di bawah kurva *stress-strain*. *Fracture energy* dinyatakan dengan persamaan 4:

$$U = \int \sigma d\epsilon \dots\dots\dots (4)$$

U menunjukkan nilai *fracture energy* per satuan volume, σ menunjukkan nilai tegangan (*stress*), ϵ menunjukkan nilai regangan (*strain*).

Pengujian *bending* atau tekuk digunakan untuk mengetahui nilai tegangan maksimum pada setiap variasi material yang sudah dilas dan diberi media pendingin. Tegangan tekuk maksimum dinyatakan dengan persamaan 5:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \dots\dots\dots (5)$$

σ menunjukkan kekuatan tekuk maksimum yang dinyatakan dalam satuan Mpa, P merupakan nilai beban dalam satuan N, L merupakan panjang span (mm), b merupakan lebar batang uji (mm), dan d merupakan tebal batang uji (mm). Selain tegangan tekuk maksimum terdapat beberapa sifat yang dihasilkan pada uji tekuk, seperti *yield flexural strength*, *Tangent MOE (Modulus of Elasticity)*, *fracture strain*, dan *fracture energy*. *Fracture strain* dinyatakan dalam persamaan 6:

$$\epsilon_f = \frac{6t\delta_f}{L^2} \dots\dots\dots (6)$$

ϵ_f menunjukkan nilai regangan patah, t merupakan tebal spesimen (mm), δ merupakan nilai defleksi maksimum (mm), dan L merupakan panjang span (mm). *Fracture energy* merupakan jumlah energi yang diserap spesimen sampai terjadi patah selama proses pembebanan tekuk. *Fracture energy* dinyatakan dalam persamaan 7:

$$U = \int \sigma d\epsilon \dots\dots\dots (7)$$

U menunjukkan nilai *fracture energy* per satuan volume, σ menunjukkan nilai tegangan (*stress*), ε menunjukkan nilai regangan (*strain*).

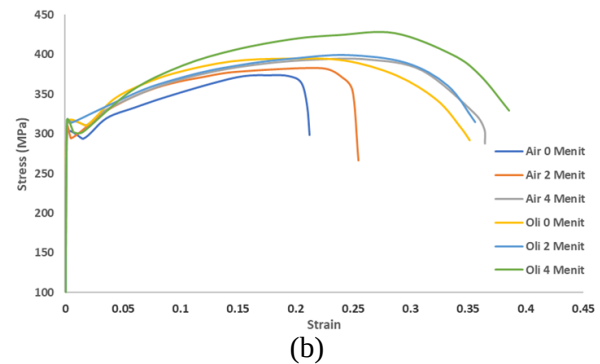
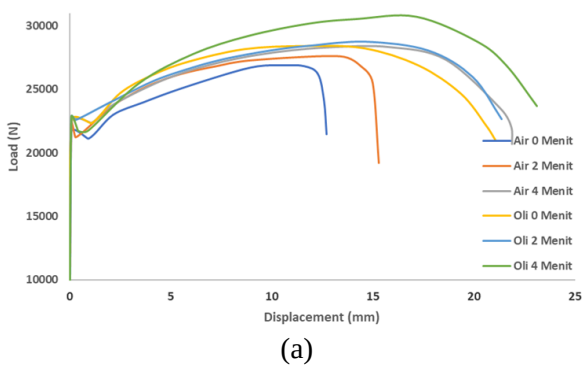
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian Tarik

Bagian ini menyajikan hasil uji sambungan pengelasan dissimilar dengan variasi media dan waktu pendinginan untuk mengetahui pengaruh perlakuan pendinginan terhadap kekuatan tarik. Uji tarik ini dilakukan berdasarkan ketentuan standar ASTM E8. Perbandingan hasil uji tarik untuk setiap variasi media dan waktu pendinginan ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Tarik

Variasi	A ₀ (mm ²)	P Max (MPa)	σ Max (MPa)	σ Rata- rata	St. dev
Air 0 menit	72	26897	373.57	377.01	4,52
	72	27024	375.34		
	72	27514	382.13		
Air 2 menit	72	27790	385.98	383,94	1,80
	72	27545	382.57		
	72	27595	383.26		
Air 4 menit	72	28150	390.97	393,06	1,88
	72	28338	393.58		
	72	28413	394.63		
Oli 0 menit	72	28496	395.78	395,21	0,51
	72	28427	394.82		
	72	28442	395.02		
Oli 2 menit	72	28997	402.74	400,31	2,15
	72	28766	399.53		
	72	28703	398.66		
Oli 4 menit	72	31002	430,59	426,07	4,99
	72	30736	426,89		
	72	30292	420,72		

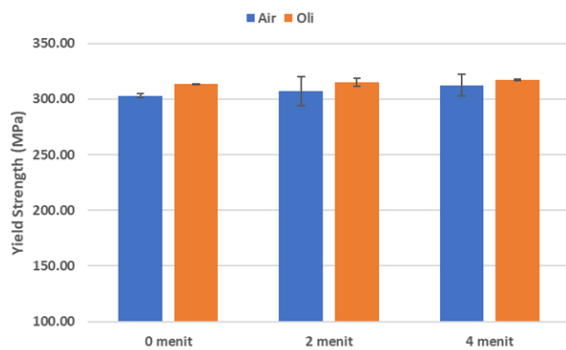


Gambar 6. Hasil uji tarik (a) Kurva Load-Displacement, (b) Kurva *Strain-Stress*

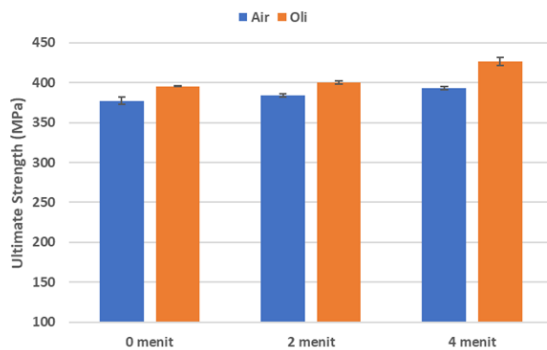
Kurva *load-displacement* dan *stress-strain* pada Gambar 6 menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki pola respons mekanik yang serupa, yaitu melalui daerah elastis, daerah plastis, mencapai beban dan tegangan maksimum, kemudian mengalami patah. Kemiringan kurva pada daerah elastis relatif sama, menunjukkan bahwa variasi media dan waktu pendinginan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekakuan elastis sambungan las. Perbedaan mulai terlihat pada daerah plastis, di mana spesimen dengan media pendingin oli selama 4 menit menunjukkan deformasi plastis yang lebih besar sebelum patah. Selain itu, spesimen ini memiliki puncak kurva tertinggi pada *load-displacement* dan *stress-strain*, yang mengindikasikan kemampuan menahan beban dan tegangan maksimum paling tinggi. Luas area di bawah kurva yang paling besar juga menunjukkan bahwa spesimen oli 4 menit memiliki kemampuan menyerap energi atau ketangguhan (*toughness*) terbaik dibandingkan variasi lainnya.

Berdasarkan tabel 3, dapat dilihat bahwa uji tarik sambungan las dengan media pendingin oli dengan variasi waktu 4 menit mendapatkan hasil rata-rata kekuatan tarik maksimum (*ultimate strength*) tertinggi sebesar 426,07 MPa. Sedangkan untuk rata-rata nilai kekuatan tarik paling rendah ada pada spesimen air 0 menit dan air 2 menit dengan nilai masing-masing 376,89 dan 384,32. Selain itu pada setiap variasi waktu pendinginan spesimen dengan waktu 4 menit pada media air dan oli mendapatkan hasil rata-rata kekuatan tarik maksimum tertinggi. Pada pendinginan dengan media air 4 menit mendapatkan nilai kekuatan tarik maksimum sebesar 393,06 MPa, dimana hasil ini lebih besar dibandingkan air 0 menit dan 2 menit. Pada pendinginan dengan media oli 4 menit mendapatkan nilai kekuatan tarik maksimum sebesar 426,07 MPa, dimana hasil ini lebih besar dibandingkan oli 0 menit dan oli 2 menit. Hasil ini

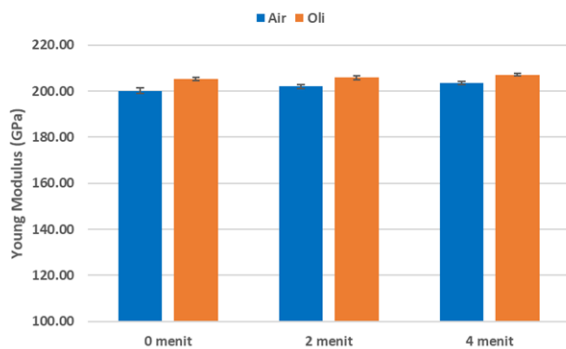
menunjukkan bahwa waktu perendaman yang lebih lama memberikan kesempatan bagi panas untuk dilepaskan secara lebih merata sehingga kondisi sambungan menjadi lebih stabil ketika menerima pembebanan Tarik. Hasil pengujian tarik ini menunjukkan bahwa variasi media dan waktu pendinginan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik pada sambungan las *dissimilar* baja ASTM A36 dan SS304. Hal ini sejalan dengan penelitian terdahulu, dimana hasil sambungan las dengan media pendingin oli mendapatkan nilai tegangan tarik sebesar 510 MPa, media air sebesar 450 MPa, dan pendingin udara sebesar 420 MPa [29].



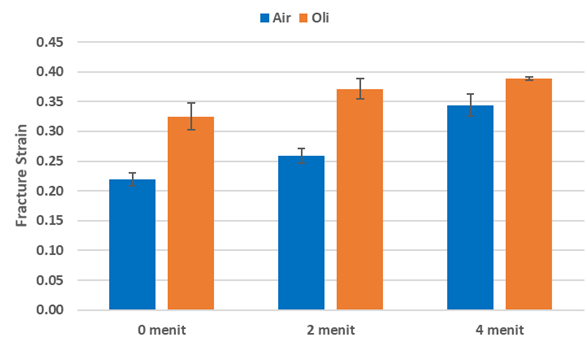
(a)



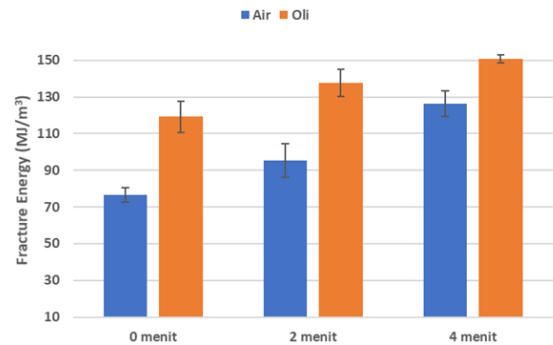
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 7. Hasil uji tarik (a) *Yield Strength*, (b) *Ultimate Strength*, (c) *Young Modulus*, (d) *Fracture Strain*, (e) *Fracture energy*



Gambar 8. Spesimen Setelah Diuji Tarik

Gambar 7 menunjukkan beberapa parameter dari hasil uji tarik berupa nilai *yield strength*, *young modulus*, *fracture strain*, dan *fracture energy*. Gambar menunjukkan peningkatan waktu perendaman dari 0 menit sampai 4 menit pada kedua media pendingin cenderung meningkatkan nilai *yield strength*, *ultimate tensile strength*, *fracture strain*, dan *fracture energy*. Pada gambar 7 (a) hasil nilai *yield strength* pada pengujian ini menunjukkan nilai terendah didapatkan oleh spesimen air 0 menit sebesar 303,08 MPa dan nilai tertinggi didapatkan oleh spesimen oli 4 menit sebesar 317,32 MPa. Hal ini menunjukkan spesimen oli 4 menit lebih tahan terhadap

deformasi plastis. Gambar 7 (c) menunjukkan nilai modulus elastisitas pada setiap spesimen berkisar antara 190-210 GPa, hal ini menunjukkan variasi media dan waktu pendinginan tidak terlalu berpengaruh terhadap kekakuan baja yang diuji. Gambar 7 (d) menunjukkan nilai *fracture strain* atau regangan patah, spesimen oli 2 menit dan 4 menit mendapatkan nilai regangan patah tertinggi masing-masing 0,39 dan 0,37, hal ini menunjukkan spesimen dengan variasi media pendingin oli 2 menit dan 4 menit memiliki keuletan yang lebih baik dibandingkan spesimen lain. Gambar 7 (e) menunjukkan nilai *fracture energy* atau energi patah, dimana nilai tersebut mengalami peningkatan pada setiap variasi spesimen. Spesimen oli 4 menit mendapatkan nilai energi patah tertinggi sebesar 150,88 MJ/m³. Nilai ini menunjukkan spesimen dengan variasi media pendingin oli 4 menit memiliki ketangguhan yang lebih baik. Gambar 8 menunjukkan spesimen yang telah diuji tarik. Gambar tersebut menunjukkan spesimen dengan media pendingin air 0 menit dan 2 menit patah pada bagian tengah sambungan las. Hal ini menunjukkan pendinginan dengan media air lebih rentan terhadap cacat dan struktur getas pada sambungan. Spesimen dengan media air 4 menit, oli 0 menit, oli, 2 menit, dan oli 4 menit semuanya patah pada bagian baja ASTM A36. Hal ini dikarenakan baja ASTM A36 secara spesifikasi lebih lemah dibandingkan dengan baja SS304. Hal ini juga menunjukkan bahwa media pendingin oli terutama dengan waktu 4 menit dapat memperkuat sambungan las sehingga tidak mengalami deformasi ketika dilakukan uji tarik.

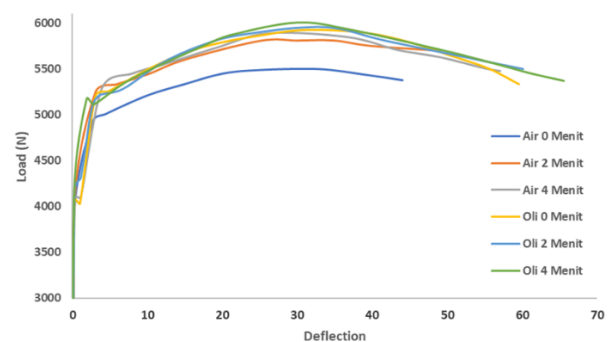
3.2. Hasil Pengujian Tekuk

Pengujian tekuk dilakukan untuk menilai kemampuan deformasi plastis dan ketahanan sambungan las dengan variasi waktu media pendingin air dan oli terhadap pembebanan lentur akibat. Pengujian ini dilakukan dengan standar ASTM E290. Hasil pengujian tekuk dapat dilihat pada tabel 4.

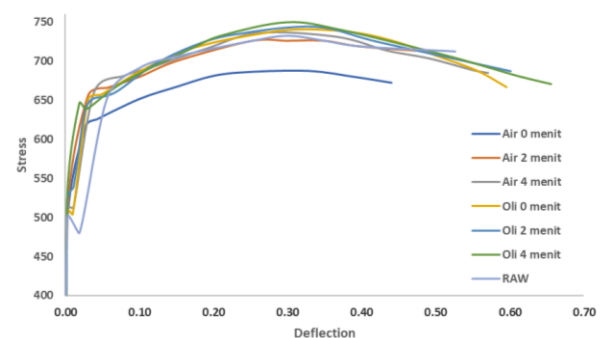
Tabel 4. Hasil Pengujian Tekuk

Variasi	L (mm)	b (mm)	d (mm)	σ_{max} (MPa)	σ Rata-rata	St. dev
Air 0 menit	60	6	20	688.25	687,00	1,67
	60	6	20	687.65		
	60	6	20	685.09		
Air 2 menit	60	6	20	723.95	725,87	1,75
	60	6	20	726.25		
	60	6	20	727.41		

Air 4 menit	60	6	20	739.50	738,25	1,64
	60	6	20	736.38		
	60	6	20	738.88		
Oli 0 menit	60	6	20	740.00	740,03	0,04
	60	6	20	740.08		
	60	6	20	740.02		
Oli 2 menit	60	6	20	744.19	744,31	1,87
	60	6	20	742.52		
	60	6	20	746.25		
Oli 4 menit	60	6	20	750.37	754,60	3,84
	60	6	20	755.56		
	60	6	20	757.88		



(a)



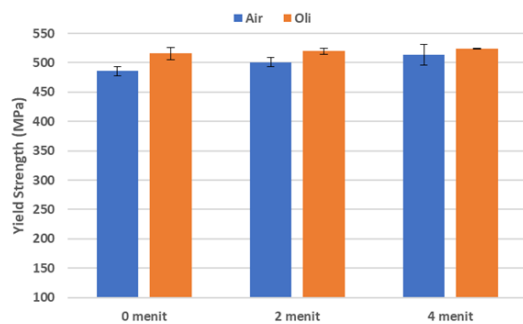
(b)

Gambar 9. Hasil uji tekuk (a) Kurva *Load-Deflection*, (b) Kurva *Stress-Deflection*

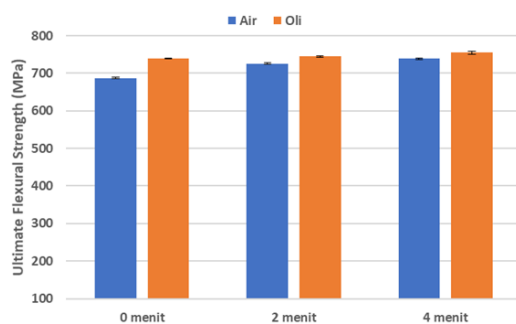
Kurva *load-deflection* dan *stress-strain* pada Gambar 9 menunjukkan bahwa seluruh spesimen mengalami respons lentur yang serupa, yaitu melalui daerah elastis, daerah plastis, mencapai beban maksimum, kemudian mengalami kegagalan. Perbedaan antar variasi mulai terlihat pada daerah plastis, di mana spesimen dengan media pendingin oli selama 4 menit menunjukkan beban maksimum, tegangan lentur maksimum, dan defleksi yang lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Selain itu, luas area di bawah kurva pada variasi ini merupakan yang terbesar, yang menunjukkan kemampuan menyerap energi (*fracture energy*) dan ketangguhan (*toughness*) yang lebih baik. Hasil tersebut konsisten dengan pengujian tarik yang menunjukkan bahwa

pendinginan menggunakan media oli selama 4 menit menghasilkan sifat mekanik sambungan las terbaik.

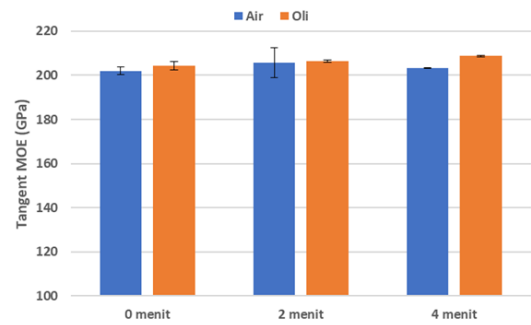
Berdasarkan tabel 4, media oli menunjukkan performa yang lebih baik daripada media air. Pada pendinginan dengan media air, waktu 0 menit mendapatkan nilai *ultimate flexural strength* terendah sebesar 687,00 MPa dan 4 menit mendapatkan nilai tertinggi sebesar 738,25 MPa. Sedangkan pada pendinginan dengan media oli, waktu 0 menit juga mendapatkan nilai *ultimate flexural strength* terendah sebesar 740,03 MPa dan pendinginan 4 menit dengan media oli mendapatkan nilai tertinggi sebesar 754,60 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan dengan menggunakan dengan waktu yang lebih lama mampu meningkatkan keuletan dan ketahanan deformasi plastis pada sambungan las secara signifikan baik pada media air maupun oli. Selain itu hasil tersebut menunjukkan bahwa media oli mendapatkan hasil rata-rata nilai *ultimate flexural strength* yang lebih tinggi dibandingkan media air. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, dimana setelah dilakukan uji bending pada pengelasan SMAW dan *heat treatment* dengan media pendingin pada spesimen pipa ASTM 106 grade B didapatkan hasil kekuatan bending media oli sebesar 1228,23 MPa, lebih tinggi dibandingkan media air yang mendapatkan kekuatan bending sebesar 1196,34 MPa [33].



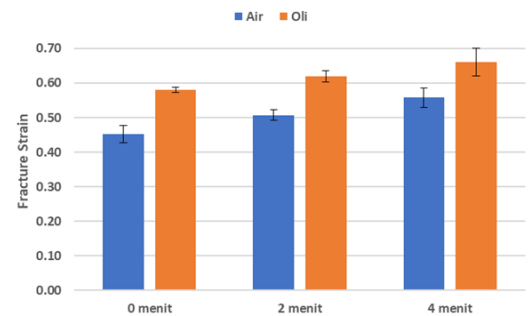
(a)



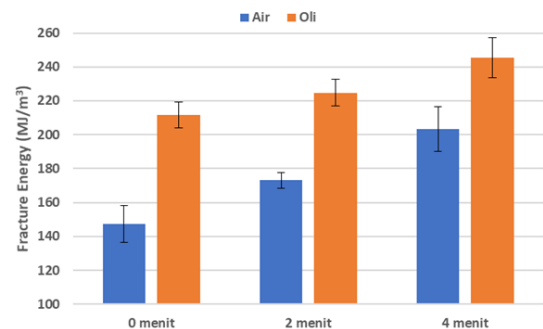
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 10. Hasil uji tekuk (a) Yield Flexural Strength, (b) Tangent MOE, (c) Fracture Strain, (d) Fracture Energy



Gambar 11. Spesimen Setelah Diuji tekuk

Gambar 10 menunjukkan beberapa parameter dari hasil pengujian tekuk diantaranya *Yield Flexural Strength*, *Tangent MOE*, *Fracture Strain*, *Fracture Energy*. Hasil pengujian tekuk menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil pengujian tarik, yaitu semakin lama waktu perendaman maka semakin tinggi nilai *yield flexural strength*, *ultimate flexural strength*, *fracture strain*, dan *fracture energy* yang diperoleh. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan pendinginan tidak hanya mempengaruhi kemampuan sambungan dalam menerima beban tarik, tetapi juga mempengaruhi ketahanan terhadap deformasi lentur. Pada Gambar 10 (a) menunjukkan nilai *yield flexural strength* terendah didapatkan oleh spesimen air 0 menit sebesar 485,59 MPa dan hasil nilai tertinggi didapatkan oleh spesimen oli 4 menit sebesar 523,31 MPa. Pada Gambar 10 (b) Nilai *ultimate flexural strength* tertinggi diperoleh pada spesimen oli 4 menit sebesar 754,60 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan yang lebih lambat dan terkendali mampu mengurangi tegangan sisa yang terbentuk selama proses pendinginan sehingga sambungan memiliki ketahanan deformasi lentur yang lebih baik. Pada Gambar 10 (c) nilai *Tangent MOE (modulus of elasticity)* juga tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan pada setiap spesimennya, nilainya berada pada kisaran 201-208 GPa. Pada Gambar 10 (d) dan (e) nilai *fracture strain* dan *fracture energy* yang meningkat secara konsisten pada media oli juga menunjukkan peningkatan keuletan sambungan las. Pada pengujian tekuk, kemampuan deformasi plastis sangat penting karena material harus mampu mengalami pembengkokan tanpa mengalami retak dini. Pada Gambar 10 (d) nilai *fracture strain* atau regangan patah tertinggi didapat pada spesimen oli 4 menit sebesar 0,66. Pada Gambar 10 (e) nilai *fracture energy* atau energi patah menunjukkan perbedaan pada setiap spesimennya, spesimen oli 4 menit mendapatkan nilai energi patah tertinggi sebesar 245,48 MJ/m³. Nilai *fracture energy* pada oli 4 menit menunjukkan bahwa spesimen mampu menyerap energi lentur lebih besar sebelum mengalami kegagalan. Gambar 11 menunjukkan spesimen setelah diuji tekuk. Pada gambar spesimen tersebut semuanya tertekuk kearah yang sama yaitu kearah baja ASTM A36. Hal ini dikarenakan baja ASTM A36 lebih lemah dibandingkan dengan baja SS304 dan sambungan las. Hal ini juga didukung oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa jika sambungan dengan logam dasar yang memiliki kekerasan berbeda diuji, maka logam dasar yang lebih lunak akan terlebih dahulu mengalami

pembengkokan sehingga bagian sambungan las tidak mengalami deformasi [34].

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa media dan waktu pendinginan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik dan kekuatan tekuk pada pengelasan SMAW *dissimilar* baja ASTM A36 dan SS304. Semakin lama waktu perendaman hasil pengelasan di media pendingin air dan oli maka akan berpengaruh terhadap hasil uji tarik dan uji tekuk yaitu tegangan tarik dan tegangan tekuk juga akan semakin tinggi. Pada pendinginan dengan media air, waktu 4 menit mendapatkan nilai uji tarik dan tekuk yang lebih tinggi dibandingkan media air 2 menit dan 0 menit. Pada pendinginan dengan media oli, waktu 4 menit juga mendapatkan nilai uji tarik dan tekuk yang lebih tinggi dibandingkan media oli 2 menit dan 0 menit. Pendinginan dengan media oli memberikan performa yang lebih baik dibandingkan dengan media air ditinjau dari nilai tegangan tarik, nilai tegangan tekuk, regangan patah, dan energi patah. Pendinginan dengan waktu 4 menit dan media oli menghasilkan kombinasi sifat mekanik terbaik dengan nilai tegan tarik sebesar 426,07 MPa, tegangan tekuk sebesar 754,83 MPa, sehingga kondisi pendinginan ini menjadi kondisi paling optimal dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Peasura, "Application of 23 Factorial Design Experiments for Gas Tungsten Arc Welding Parameters on ASTM A36 Steel Welds," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 246–247, pp. 707–711, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.246-247.707.
- [2] F. Herlina *et al.*, "Experimental Study of Nickel Electroplating and CuO Nanocoolant on Corrosion Rate and Hardness of ASTM A36 Steel," *SSRG Int. J. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 34–43, 2026, doi: 10.14445/23488360/IJME-V13I3P103.
- [3] S. Hastuty, B. W. Riyandwita, R. Maghriza, and F. Triawan, "Corrosion Performance of Steel and Stainless Steel for Long-Life Electric Vehicle Components in Atmospheric Conditions," *Proc. 2025 8th Int. Conf. Electr. Veh. Technol. ICEVT 2025*, pp. 116–120, 2025, doi: 10.1109/ICEVT67191.2025.11183988.
- [4] C. M. Allen and B. Boardman, "ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys Section: Publication

- Information and Contributors Publication Information and Contributors,” *Fonderie*, vol. 1, p. 1618, 2005.
- [5] R. Pratap Singh, A. Mishra, A. Chauhan, and A. K. Verma, “A Review of Effect of Welding Parameters on the Structure and Properties of the Weld in Shielded Metal Arc Welding Process,” *Lect. Notes Mech. Eng.*, pp. 229–237, 2021, doi: 10.1007/978-981-33-6029-7_22.
 - [6] “SMAW: Best practices,” *Weld. J. (Miami, Fla)*, 2006, Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www-scopus-com.proxy.undip.ac.id/pages/publications/33646751861?origin=document-preview-flyout>.
 - [7] D. Pathak, R. P. Singh, S. Gaur, and V. Balu, “Experimental investigation of effects of welding current and electrode angle on tensile strength of shielded metal arc welded low carbon steel plates,” *Mater. Today Proc.*, vol. 26, pp. 929–931, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.146.
 - [8] P. K. Baghel, “Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: An overview,” *Heliyon*, vol. 8, no. 12, pp. 1–14, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12161.
 - [9] X. He *et al.*, “Laser surface texturing for enhancing wettability and mechanical properties in dissimilar material welding: A review,” *J. Manuf. Process.*, vol. 150, no. April, pp. 357–377, 2025, doi: 10.1016/j.jmapro.2025.06.077.
 - [10] H. Jadav, V. Badheka, G. Upadhyay, and K. Mehta, “Dissimilar welding of magnesium alloy to aluminium alloy: a review,” *Adv. Mater. Process. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 3794–3821, 2022, doi: 10.1080/2374068X.2021.2016564.
 - [11] E. M. Anawa and A. G. Olabi, “Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 204, no. 1–3, pp. 22–33, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.047.
 - [12] S. Ganguly, “Welding of dissimilar metals,” in *Welding of Metallic Materials: Methods, Metallurgy, and Performance*, Elsevier, 2023, pp. 317–365.
 - [13] R. Chaudhari, P. K. Loharkar, and A. Ingle, “Applications and challenges of arc welding methods in dissimilar metal joining,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 810, no. 1, Apr. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/810/1/012006.
 - [14] S. Bhat and Y. Khedkar, “Latest Developments in Welding of Common Dissimilar Metals: A Literature Review,” *Recent Patents Eng.*, vol. 19, Oct. 2026, doi: 10.2174/0118722121310074240927143045.
 - [15] G. Dak and C. Pandey, “A critical review on dissimilar welds joint between martensitic and austenitic steel for power plant application,” *J. Manuf. Process.*, vol. 58, no. July, pp. 377–406, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.08.019.
 - [16] S. Paddea, F. Masuyama, and A. Shibli, *T23 and T24 - new generation low alloyed steels*. Woodhead Publishing Limited, 2014.
 - [17] M. Shakil *et al.*, “Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel 625 and stainless steel 304L,” *Vacuum*, vol. 110, pp. 121–126, 2014, doi: 10.1016/j.vacuum.2014.08.016.
 - [18] A. M. Sayed and H. Alanazi, “Case Studies in Construction Materials Performance of steel metal prepared using different welding cooling methods,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, no. November 2021, p. e00953, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00953.
 - [19] Akhyar, A. Farhan, Azwinur, Syukran, and T. A. Fadhilah, “Impact Toughness of Astm a36 Low Carbon Steel By Metal Active Gas (Mag) Welding Process Using Different Cooling Media,” *Metallurgija*, vol. 61, no. 3–4, pp. 641–644, 2022.
 - [20] N. Hasanah, R. R. Hendaryatu, Budiono, and B. S. A. Pradana, “The effect of cooling media on mechanical properties of welded ST37 steel,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2453, no. 1, Jul. 2022, doi: 10.1063/5.0095215/2824928.
 - [21] D. Hadryś, “Welding with micro-jet cooling as a way to improve the mechanical properties of mode of transportation shaft surface,” *Transp. Probl.*, vol. 13, no. 4, pp. 65–76, 2018, doi: 10.20858/tp.2018.13.4.7.
 - [22] R. P. Singh, M. A. Raza, M. Mallick, and M. K. Verma, “Effect on microstructure of TMT welded bar under different cooling media,” *J. Mines, Met. Fuels*, vol. 66, no. 6, pp. 354–362, 2018.
 - [23] A. Abdulah *et al.*, “Friction Welding Analysis: The Impact of Coolant Variation on Hardness and Tensile Strength of ST 37 Carbon Steel and SS 304 Stainless Steel,” *Springer Proc. Mater.*, vol. 40, pp. 3–12, 2024, doi: 10.1007/978-981-99-9848-7_1.
 - [24] R. Kosturek, J. Torzewski, D. Klápště, and

- J. Moravec, "Influence of cooling medium on mechanical properties of AA7075-T651 submerged friction stir welded joints," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 19, no. 12, pp. 56–66, 2025, doi: 10.12913/22998624/209706.
- [25] B. C. Kandpal *et al.*, "Materials Today : Proceedings Effect of heat treatment on properties and microstructure of steels," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 199–205, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.556.
- [26] H. Hendaryati, A. F. H. Soegiharto, R. D. Virdianto, and A. Saifullah, "Analysis of the effect of cooling media variations on tensile strength of electrical welding results of S45C steel," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2453, no. 1, Jul. 2022, doi: 10.1063/5.0094602/2824629.
- [27] M. A. S. Sultoni, Nurida Finahari, "Analisa Pengaruh Variasi Media Pendingin Air Dan Oli Pada Sambungan Lap Joint Terhadap Sifat Mekanik Menggunakan Las SMAW," *Proton*, vol. 11, no. 1, pp. 35–42, 2019.
- [28] J. Fathi, P. Ebrahimzadeh, R. Farasati, and R. Teimouri, "Friction stir welding of aluminum 6061-T6 in presence of watercooling: Analyzing mechanical properties and residual stress distribution," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 2, no. 2, pp. 107–115, 2019, doi: 10.1016/j.ijlmm.2019.04.007.
- [29] A. Shazad and M. Uzair, "Impact of Quenching Medium on Tensile Properties and Hardness of 15CDV6 TIG Welded Joints," *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 66, no. 11, pp. 701–707, 2025, doi: 10.1007/s11041-025-01106-9.
- [30] L. Triawan, M. Thohirin, and A. Apriyanto, "Pengaruh Variasi Media Pendingin Pada Material Baja Karbon Rendah Terhadap Kekuatan Pengelasan Posisi 1G," *Pros. Semin. Nas. Penelit. dan Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 2, no. 1, pp. 51–56, 2022, doi: 10.24967/psn.v2i1.1473.
- [31] ASTM International, "ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," West Conshohocken, PA, 2013. doi: 10.1520/E0008_E0008M-13A.
- [32] A. International, "ASTM E290-09 Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility," West Conshohocken, PA, 2009. doi: 10.1520/E0290-09.
- [33] G. Y. Pratama, "Pengaruh Post Weld Heat Treatment (PWHT) Dengan Variasi Media Pendinginan Hasil Pengelasan SMAW Pada Pipa Kilang ASTM a 106 Grade B Terhadap Kekuatan Bending Dan Struktur Mikro," *JTM*, vol. 10 No 03, pp. 69–76, 2022.
- [34] J. Matsumoto, "Wrap bend test for butt-welded joint of the dissimilar aluminium alloys," *Weld. Int.*, vol. 5, no. 7, pp. 509–513, 1991, doi: 10.1080/09507119109447830.