



ISSN 2338-0322

# JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

## Pengaruh Media Pendingin dan Variasi Kecepatan Kawat Pengelasan GMAW Terhadap Kekuatan Tarik dan Impak Pada Baja ASTM A36

Muhamad Rolando Tanjung<sup>1)</sup>, Untung Budiarto<sup>1)</sup>, Parlindungan Manik<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Laboratorium Teknologi Material, Las, dan Produksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

<sup>\*</sup>e-mail : [muhammadrolandotanju@students.undip.ac.id](mailto:muhammadrolandotanju@students.undip.ac.id)

### Abstrak

Baja ASTM A36 merupakan salah satu baja karbon rendah yang sering di pakai dalam konstruksi dan manufaktur karena karakteristiknya baik dan mudah di las. Pengelasan merupakan salah satu proses fabrikasi yang sangat penting di dunia manufaktur, konstruksi dan perkapalan, Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh media pendingin dan variasi kecepatan kawat pengelasan Gas Metal Arc Welding (GMAW) terhadap sifat mekanik baja ASTM A36. Variasi parameter pengelasan seperti kecepatan kawat las dan jenis media pendingin (air, oli, dan udara) memengaruhi distribusi panas, struktur mikro, serta sifat mekanik sambungan las. Metode penelitian dilakukan dengan membuat spesimen baja ASTM A36 yang dilas menggunakan metode GMAW dengan variasi kecepatan las lalu di celupkan ke media pendingin, kemudian dilakukan uji tarik dan uji impak untuk mengetahui kekuatan, keuletan, dan ketangguhan sambungan. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa kecepatan kawat 240 IPM menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, dengan nilai maksimum 443,25 MPa pada media udara, Lalu disusul dengan media pendingin oli dan air. Regangan tertinggi sebesar 16% dicapai pada 240 IPM air, menunjukkan peningkatan keuletan akibat pendinginan cepat. Nilai modulus elastisitas tertinggi 218,08 GPa diperoleh pada 190 IPM udara, menandakan kekakuan material yang lebih tinggi. Hasil uji impak menunjukkan nilai tertinggi 2,07 J/mm<sup>2</sup> pada 240 IPM udara dan terendah 1,70 J/mm<sup>2</sup> pada 190 IPM air. Dapat disimpulkan bahwa kombinasi kecepatan kawat tinggi dan media pendingin yang sesuai mampu menghasilkan sambungan las dengan kekuatan, keuletan, dan ketangguhan optimal pada baja ASTM A36.

Kata Kunci : GMAW, Baja ASTM A 36, Kecepatan Pengelasan, Media Pendingin, Kekuatan Mekanis

### 1. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan salah satu proses fabrikasi yang sangat penting dalam industri manufaktur, konstruksi, dan perkapalan. Proses ini digunakan untuk menyatukan dua material atau lebih dengan cara melelehkan bagian yang disambung, lalu membekukannya hingga menjadi satu kesatuan yang kuat. Dari sekian banyak metode pengelasan, *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) atau *Metal Active Gas* (MAG) menjadi salah satu pilihan utama karena memiliki keunggulan dalam kecepatan pengerjaan, kemudahan pengoperasian, fleksibilitas posisi las, serta kualitas hasil yang stabil. GMAW sering dipilih dalam pengelasan baja karbon rendah seperti ASTM A36, yang digunakan secara luas

dalam konstruksi dan manufaktur karena karakteristiknya yang baik dan mudah dilas [1][2].

Baja ASTM A36 merupakan salah satu baja karbon rendah yang memiliki sifat las yang sangat baik, kekuatan tarik memadai, dan keuletan tinggi sehingga banyak digunakan dalam konstruksi kapal, jembatan, dan bangunan struktural lainnya. Material ini menjadi pilihan utama dalam dunia perkapalan karena selain mudah dikerjakan, biaya produksinya juga relatif rendah. Akan tetapi, sifat mekanik hasil sambungan las baja ASTM A36 sangat bergantung pada parameter pengelasan dan perlakuan pendinginan setelah proses pengelasan selesai. Variasi kecepatan kawat pengelasan dan penggunaan media pendingin tertentu dapat mengubah struktur mikro sambungan, sehingga memengaruhi kekuatan tarik maupun ketangguhan

impaknya. Kualitas hasil pengelasan ini sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter, di antaranya adalah kecepatan kawat las dan media pendingin yang digunakan.

Media pendingin yang digunakan dalam pengelasan juga berperan besar dalam mempengaruhi hasil pengelasan. Media pendingin digunakan untuk mengatur laju pendinginan material setelah pengelasan selesai. Media pendingin yang digunakan setelah pengelasan, seperti air, oli, dan udara, akan menentukan laju pendinginan. Pendinginan cepat dengan air dapat menghasilkan struktur yang keras namun rapuh, sementara pendinginan lambat dengan udara dapat memberikan keuletan lebih tinggi meski mengurangi kekerasan. Pendinginan menggunakan oli biasanya memberikan keseimbangan sifat mekanik di antara keduanya oleh karena itu pemilihan media pendingin yang tepat dapat menghasilkan las yang bagus [1][3].

Proses pengelasan yang tidak tepat dapat menyebabkan beberapa masalah, seperti retak pada zona las atau *Heat Affected Zone* (HAZ), yang disebabkan oleh distribusi panas yang tidak merata atau pendinginan yang terlalu cepat. Kecepatan las yang terlalu tinggi atau pengendalian media pendingin yang tidak optimal dapat memperburuk masalah tersebut, yang pada akhirnya mengurangi kekuatan tarik dan ketangguhan sambungan las. Oleh karena itu, penelitian mengenai pengaruh media pendingin dan kecepatan kawat las sangat penting untuk mendapatkan proses pengelasan yang optimal pada baja ASTM A36 [2][4]. Sejumlah penelitian sebelumnya telah membahas pengaruh kecepatan las dan media pendingin terhadap sifat mekanik baja dalam pengelasan. Namun, masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk lebih memahami interaksi antara kedua faktor tersebut, khususnya dalam pengelasan menggunakan metode GMAW pada baja ASTM A36. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat mengisi kekosongan pengetahuan dan memberikan kontribusi dalam pengembangan proses pengelasan yang lebih baik [5].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh media pendingin pada kecepatan kawat las terhadap hasil uji tarik dan uji impak pada baja ASTM A36 yang dilas menggunakan metode GMAW. Dengan memahami bagaimana variasi kecepatan kawat las dan media pendingin mempengaruhi sifat mekanik, diharapkan dapat ditemukan metode pengelasan yang optimal untuk menghasilkan sambungan las yang kuat, tahan lama, dan bebas dari cacat. Manfaat dari penelitian ini akan sangat berguna bagi industri pengelasan dalam meningkatkan kualitas sambungan las dan

memperpanjang umur pakai konstruksi yang menggunakan baja ASTM A36 [3][6].

## 2. METODE

### 2.1. Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah baja ASTM A36, yaitu baja karbon rendah yang banyak digunakan dalam industri konstruksi maupun perkapalan karena sifat lasnya yang baik, kekuatan tarik yang cukup, serta keuletannya. Material ini dipilih karena ketersediaannya luas, biaya relatif rendah, dan menjadi standar umum dalam pembuatan struktur baja kapal. Baja ASTM A36 memiliki komposisi kimia yang terdiri dari karbon, mangan, silikon, fosfor, sulfur, tembaga, serta besi sebagai unsur utama. Dalam penelitian ini digunakan baja ASTM A36 berbentuk plat dengan dimensi panjang 1240 mm, lebar 710 mm, dan tebal 10 mm. Karakteristik mekanik baja ini antara lain tensile strength sekitar 250 MPa, modulus elastisitas 200 GPa, serta elongation 20%. Komposisi kimia material mengacu pada hasil uji laboratorium yang menunjukkan kadar karbon 0,14%, silikon 0,244%, mangan 0,64%, fosfor 0,012%, sulfur 0,0066%, dan tembaga 0,01%.[7]. Adapun komposisi material, dimensi material dan *Mechanical Properties* bisa di lihat di Table 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi Baja ASTM A 36 [7]

Unsur	Kandungan
Karbon	0.14%
Silikon	0.244%
Mangan	0.64%
Fosfor	0.012%
Sulfur	0.0066%
Tembaga	0.01%

Tabel 2. Dimensi Material ASTM A 36 [7]

Dimensi	Ukuran/Jumlah
Panjang	1240 mm
Lebar	710 mm
Tebal	10 mm
Jumlah	1buah

Tabel 3. *Mechanical Properties* [7]

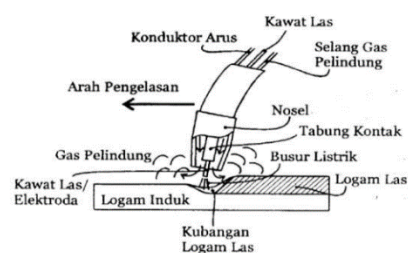
<i>Mechanical Properties</i>	Nilai
<i>Tensile Strength</i>	350 – 550 MPa
<i>Elongation</i>	20%
Modulus Elastisitas	200 GPa
Modulus Elastisitas	200 GPa

## 2.2. Pengelasan GMAW

Pengelasan adalah proses penyatuan logam melibatkan pelelehan sebagian material utama dan material tambahan, serta dengan atau tanpa penambahan material lain, untuk membentuk sambungan yang terus-menerus. Secara umum, pengelasan adalah teknik penyambungan dua atau lebih logam dengan menggunakan energi panas, tekanan, atau kombinasi keduanya sehingga tercipta ikatan permanen yang kokoh. Proses ini melibatkan pencairan sebagian material induk maupun logam pengisi, kemudian didinginkan sehingga terbentuk sambungan metalurgi yang homogen. pengelasan tidak hanya berfungsi untuk menyatukan logam, tetapi juga berpengaruh pada perubahan sifat mekanik, struktur mikro, dan ketahanan material akibat variasi masukan panas (*heat input*) serta proses pendinginan. Hal ini menjadikan pengelasan sebagai salah satu proses yang krusial karena kualitas sambungan sangat menentukan umur pakai suatu konstruksi. selain itu pengelasan berperan penting dalam menghasilkan sambungan dengan kekuatan mekanik yang optimal, khususnya pada baja struktural seperti ASTM A36 yang banyak digunakan dalam konstruksi maupun pembuatan kapal. [1][2][8].

*Gas Metal Arc Welding*(GMAW) adalah salah satu metode pengelasan busur listrik yang menggunakan elektroda berbentuk kawat logam padat yang diumpankan secara kontinu ke daerah las. Busur listrik terbentuk antara ujung kawat elektroda dengan permukaan benda kerja, sementara gas pelindung eksternal dialirkan untuk melindungi daerah pengelasan dari kontaminasi atmosfer seperti oksigen dan nitrogen yang dapat menimbulkan porositas atau cacat las. GMAW dapat menggunakan gas inert (seperti argon dan helium) maupun gas aktif (seperti CO<sub>2</sub>), yang pemilihannya disesuaikan dengan jenis material dan sifat sambungan yang diinginkan. Proses GMAW memiliki beberapa keunggulan, antara lain: kecepatan pengelasan tinggi, efisiensi deposisi besar, percikan las yang relatif sedikit, kemampuan melas pada berbagai posisi, serta

dapat diterapkan pada logam dengan ketebalan bervariasi. Oleh karena itu Pengelasan GMAW sangat sesuai untuk baja karbon rendah, termasuk ASTM A36, karena sifat lasnya yang baik serta hasil sambungan yang konsisten. Selain itu, metode ini banyak digunakan di industri perkapalan karena mampu menghasilkan sambungan yang kuat, ekonomis, dan memenuhi standar keamanan konstruksi kapal. Pada penelitian ini menggunakan MAG atau gas CO<sub>2</sub>, dengan gas pelindung CO<sub>2</sub> (*Carbon Dioxide*) memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya banyak digunakan dalam industri konstruksi baja dan perkapalan. Salah satu kelebihan utamanya adalah dari sisi ekonomi, karena CO<sub>2</sub> jauh lebih murah dibandingkan gas pelindung lain seperti Argon murni atau campuran Argon-CO<sub>2</sub>, sehingga lebih efisien dalam menekan biaya produksi. Selain itu, penggunaan CO<sub>2</sub> mampu menghasilkan busur las yang panas dan stabil, sehingga memberikan penetrasi lebih dalam pada logam induk [2][9]. Adapun sketsa dari pengelasan GMAW dapat di lihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sketsa Pengelasan GMAW

## 2.3. Media Pendingin

Media pendingin dalam pengelasan adalah suatu substansi yang berfungsi dalam menentukan kecepatan pendinginan yang dilakukan terhadap material yang telah diuji dalam perlakuan panas dari hasil pengelasan. Pendinginan menjadi salah satu alternatif untuk memperbaiki dan meningkatkan sifat mekanik pada material pasca pengelasan. Media pendingin dapat berupa air, udara, oli, coolant, atau bahkan material inovatif lainnya yang memiliki kandungan air yang tinggi dapat mengurangi keretakan atau cacat pada pengelasan. Pada penelitian ini menggunakan media pendingin 3 yaitu air (pendinginan cepat), oli (pendinginan sedang), dan udara (pendinginan lambat). Dalam proses pengelasan, pendinginan yang cepat dapat menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil dan meningkatkan kekerasan material, tetapi juga dapat menyebabkan kegetasan pada logam las dan daerah HAZ jika tidak dilakukan dengan benar, pendingin sedang Pendinginan sedang yang mampu menjaga

keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan, tetapi meninggalkan residu yang harus dibersihkan setelah proses dan Pendinginan lambat yang menghasilkan struktur mikro lebih stabil dan risiko retak lebih kecil, namun kekerasan material biasanya lebih rendah. laju pendinginan yang berbeda dapat memengaruhi kekerasan, ketangguhan, dan kekuatan tarik logam hasil las. Oleh karena itu, pemilihan media pendingin yang sesuai sangat krusial untuk mencapai hasil pengelasan yang optimal.[10][11].

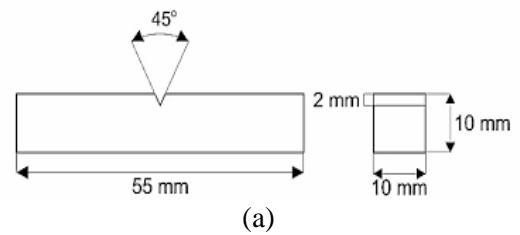
## 2.4. Uji Impak

Uji impak merupakan metode pengujian untuk mengetahui kemampuan material dalam menyerap energi pada beban kejut atau benturan. Prinsip pengujian ini adalah mematahkan spesimen dengan bandul yang dijatuhkan, lalu menghitung energi serapan material. Menurut standar ASTM E23, spesimen uji berbentuk balok dengan takikan V untuk memusatkan tegangan. Nilai energi serapan menunjukkan tingkat ketangguhan material, apakah bersifat getas (brittle) atau ulet (ductile). Pada penelitian ini, uji impak digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi media pendingin dan kecepatan las terhadap ketangguhan sambungan las baja ASTM A36. Pengujian yang dilakukan pada impak menggunakan standar ASTM E23. Dengan dimensi 55 mm x 10 mm 10 mm, dengan takikan berbentuk V yang memiliki sudut 45° dan kedalaman 2 mm di bagian tengahnya. Pengujian impak ini dilakukan di Laboratium Struktur dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro, dengan menggunakan mesin Charpy. Setelah itu spesimen di uji impak di daerah yang sudah di las, spesimen di letakan di dua tumpuan dengan posisi horizontal, kemudian beban di arahkan ke spesimen dengan arah yang berlawanan[13].

Untuk mengetahui hasil spesimen yang sudah di uji dengan mesin impak menggunakan rumus sebagai berikut

$$T = \frac{E}{A}$$

Keterangan, T merupakan ketangguhan dari material atau spesimen (J/mm), E merupakan Energi yang di serap (J), A merupakan Volume dari spesimen yang di uji (mm). Dapat di lihat dimensi dari specimen uji impak dan mesin Charpy pada gambar a dan b.



(a) Dimensi Spesimen Uji Impak  
(b) Mesin Charpy

## 2.5. Uji Tarik

Uji tarik adalah metode pengujian mekanik destruktif yang bertujuan menentukan sifat tarik material seperti kekuatan tarik maksimum UTS (*Ultimate Tensile Strength*), kekuatan luluh (*yield strength*), regangan maksimum (*elongation*), modulus elastisitas, dan reduksi luas. Uji ini dilakukan dengan memberikan beban tarik secara kontinu pada spesimen hingga terjadi patah, dan mencatat kurva tegangan–regangan (*stress–strain*) yang dihasilkan. spesimen uji tarik dengan standar ASTM E8/E8M. Dengan dimensi 200 mm x 20 mm 10 mm, Uji Tarik dilakukan di impak ini dilakukan di Laboratium Struktur dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro, Dengan mesin Universal (UTM). Spesimen di uji di daerah yang sudah di las dan daerah HAZ, Setelah itu spesimen di jepit dengan keras pada grib mesin uji Tarik, kemudia spesimen di berikan beban Tarik secara perlahan dan bertahap, di mulai dari beban awal 0 KG sampai spesimen patah atau deformasi.[14]

Tegangan tarik maksimum adalah tegangan terbesar yang dapat ditahan oleh suatu bahan sebelum mengalami patah atau necking (penyempitan penampang). Nilainya diperoleh dari beban maksimum selama pengujian tarik, dibagi dengan luas penampang awal spesimen Untuk mengetahui hasil tegangan tertinggi sebelum patah (*fracture*) dengan perhitungan

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

Keterangan,  $\sigma$  ialah nilai suatu tegangan dari hasil tarik maksimum (MPa, N/mm<sup>2</sup>). P ialah beban tegangan maksimum (N), dan  $A_0$  ialah luas awalan penampang spesimen (mm<sup>2</sup>).

Regangan maksimum adalah perubahan relatif panjang spesimen pada saat sebelum patah dibandingkan dengan panjang awalnya. Nilai ini menunjukkan kemampuan bahan untuk mengalami deformasi plastis sebelum patah.

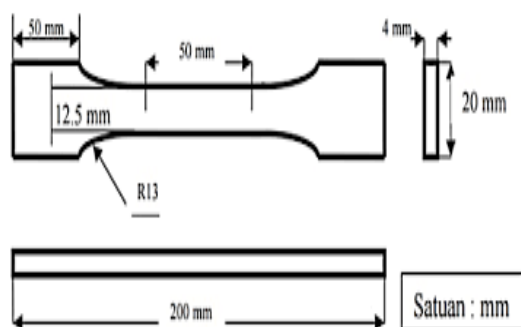
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$$

Keterangan  $\varepsilon$  adalah regangan maksimum persentase (%),  $\Delta L$  adalah pertambahan panjang dalam milimeter (mm), dan  $L_0$  merupakan panjang mula-mula spesimen dalam milimeter (mm).

Modulus maksimum atau modulus elastisitas adalah perbandingan antara tegangan dan regangan pada daerah elastis (awal kurva tegangan-regangan). Nilai ini menunjukkan kekakuan (stiffness) suatu bahan — semakin besar modulusnya, semakin kaku bahan tersebut.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Dimana E adalah modulus elastisitas dalam satuan N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma$  adalah tegangan tarik maksimum dalam satuan megapascal (MPa), dan  $\varepsilon$  merupakan regangan maksimum dalam satuan persentase (%). Berikut merupakan spesimen uji Tarik dan mesin uji Tarik pada gambar a dan b.



(a)



(b)

Gambar 3. (a) Dimensi Spesimen Uji Tarik  
(b) Universal Testing Machine (UTM)

## 2.6. Kecepatan Kawat Las

Kecepatan kawat las WFS (*Wire Feed Speed*) merupakan laju masuknya kawat elektroda ke dalam busur listrik selama proses pengelasan. Parameter ini biasanya dinyatakan dalam satuan meter per menit (m/min) atau milimeter per detik (mm/s) dan menjadi faktor utama yang mengatur jumlah logam pengisi (*filler metal*) yang dilelehkan dan disalurkan ke daerah las per satuan waktu. Dalam proses *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), kecepatan kawat berhubungan langsung dengan besarnya arus listrik yang digunakan. Ketika kecepatan kawat meningkat, lebih banyak logam pengisi yang masuk ke busur, sehingga mesin las secara otomatis meningkatkan arus untuk menjaga kestabilan pencairan kawat. Kecepatan kawat las berfungsi sebagai pengatur laju suplai logam pengisi yang dilelehkan ke dalam kolam las selama proses pengelasan berlangsung. Secara teknis, kecepatan kawat las berhubungan langsung dengan arus pengelasan, di mana semakin tinggi kecepatan kawat, semakin besar pula arus yang dibutuhkan untuk melelehkan kawat secara konstan. Hal ini menyebabkan peningkatan panas masuk (*heat input*) yang berpengaruh terhadap ukuran manik las (*weld bead size*), kedalaman penetrasi, serta kekuatan dan ketangguhan sambungan. Fungsi utama dari kecepatan kawat las adalah untuk mengontrol jumlah logam pengisi yang ditambahkan per satuan waktu, sehingga dapat memastikan sambungan las memiliki pengisian celah yang sempurna, permukaan manik yang rata, dan ikatan logam antar material yang kuat. Selain itu, kecepatan kawat juga berfungsi dalam menjaga stabilitas busur listrik dan konsistensi pengelasan, karena bila kawat diberi terlalu lambat maka busur

akan terputus, sedangkan bila terlalu cepat akan menyebabkan penumpukan logam cair berlebih yang menimbulkan cacat seperti porositas dan percikan (spatter).

Dalam konteks sifat mekanik hasil las, kecepatan kawat yang tepat berperan dalam menentukan mikrostruktur logam las serta zona pengaruh panas (HAZ). Kecepatan kawat yang tinggi menghasilkan pendinginan yang relatif cepat sehingga membentuk struktur mikro yang lebih halus dan keras, sedangkan kecepatan yang terlalu rendah dapat menghasilkan struktur kasar dan lemah terhadap beban impact. Oleh karena itu, fungsi kecepatan kawat tidak hanya terbatas pada pengaturan jumlah logam yang masuk, tetapi juga berperan dalam mengontrol energi panas, rasio leleh kawat, morfologi sambungan, hingga ketangguhan dan kekerasan hasil lasan [15][16].

## 2.7. Tahap Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan. Tahap pertama adalah pengumpulan bahan, penelitian ini menggunakan baja ASTM A36 baja ini merupakan salah satu baja karbon rendah. Material ini di siapkan dalam bentuk sebuah plat dengan dimensi panjang 800 mm, lebar 400 mm, tebal 10 mm. Kemudian plat dipotong menjadi 6 bagian untuk memudahkan proses pengelasan dengan variasi kecepatan kawat dan media pendingin yang sudah di tentukan. Plat yang sudah di potong menjadi 6 bagian di las menggunakan metode GMAW dengan gas pelindung CO<sub>2</sub>, dengan variasi kecepatan kawat las 190 IPM, 240 IPM dan di celupkan ke media pendingin air (pendinginan cepat), Oli (pendinginan sedang) dan udara (pendinginan lambat). Seluruh proses pengelasan dilaksanakan di workshop LKP INLASTEK WELDING INSTITUTE, Surakarta. Dengan standar prosedur yang sesuai dan detail sebagai berikut.

- a. Jenis Pengelasan: GMAW
- b. Mesin Las : *THERMA WELD*
- c. Jenis Elektroda : Elektroda E70S-6
- d. Logam Induk : Baja ASTM A36
- e. Voltage : 20 sampai 25 V
- f. Arus (ampere) : 150 A
- g. Posisi Pengelasan : 1G
- h. Aliran Gas : 10L/menit
- i. *Travel Speed* : 19 Cm/Menit
- j. Diameter Kawat : 0,8mm
- k. *Wire Feed Speed* : 190 IPM dan 240 IPM

Kemudian setelah material di las dan di celupkan ke media pendingin material di buat

spesimen untuk uji impact dan uji tarik dengan total jumlah spesimen 48, pembuatan spesimen impact menggunakan standar ASTM E23 dengan dimensi 55 mm x 10 mm 10 mm, dengan takikan berbentuk V yang memiliki sudut 45° dan kedalaman 2 mm di bagian tengahnya. Pembuatan spesimen uji Tarik menggunakan standar ASTM E8/E8M. Dengan dimensi 200 mm x 20 mm 10 mm.

## 2.8. Lokasi Penelitian

Lokasi pembuatan spesimen dan pengelasan dengan metode GMAW berada di workshop LKP INLASTEK WELDING INSTITUTE, Surakarta. Pengujian Impact dan Pengujian Tarik dilaksanakan di Laboratorium Las dan Material Kapal Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Heat Input

*Heat input* atau masukan panas merupakan salah satu parameter paling penting dalam proses pengelasan karena berpengaruh langsung terhadap struktur mikro, sifat mekanik, dan kualitas sambungan las. Secara umum, heat input didefinisikan sebagai jumlah energi panas yang ditransfer dari sumber panas (busur listrik, laser, gas, atau gesekan) ke logam dasar per satuan panjang sambungan las. Besarnya energi ini ditentukan oleh kombinasi antara tegangan busur (V), arus pengelasan (I), efisiensi termal proses ( $\eta$ ), dan kecepatan pengelasan (S). Berikut rumus dari *Heat Input*.

$$HI = \frac{25 \times 150 \times 60}{190 \times 1000} = 0.95 \text{ kJ/mm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai heat input pada proses pengelasan GMAW sebesar 0,95 kJ/mm, yang termasuk dalam kategori sedang. Nilai ini menunjukkan bahwa energi panas yang masuk ke logam las cukup tinggi untuk menghasilkan penetrasi yang baik, namun masih berada dalam batas aman terhadap distorsi dan perubahan struktur mikro. Pada kondisi ini, penggunaan media pendingin udara alami dianggap paling sesuai karena memberikan laju pendinginan yang moderat sehingga proses pelepasan panas terjadi secara bertahap. Hal ini mencegah terbentuknya struktur martensit yang keras dan getas pada daerah HAZ, serta menjaga sifat mekanik sambungan tetap liat dan kuat. Jika digunakan media pendingin yang lebih cepat

seperti air, laju pendinginan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan retak akibat tegangan termal dan perubahan fasa yang drastis. Oleh karena itu, kombinasi heat input 0,95 kJ/mm dengan pendinginan udara alami merupakan kondisi yang optimal untuk memperoleh hasil las dengan kekuatan dan kualitas yang baik pada proses GMAW baja karbon.

### 3.2. Uji Impak

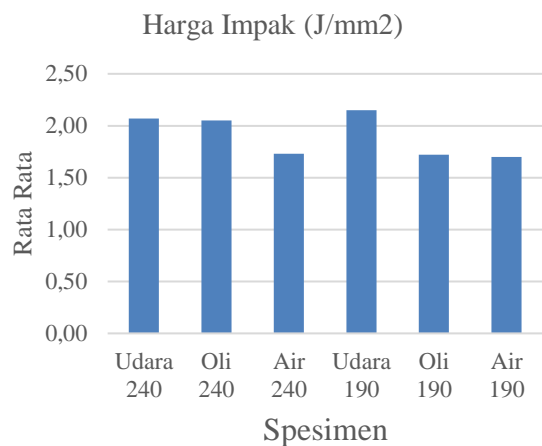
Uji impact merupakan metode pengujian untuk mengetahui seberapa besar kemampuan suatu material menahan beban kejut atau benturan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui ketangguhan pada spesimen. Berikut gambar dari spesimen sebelum di uji dan spesimen yang sudah di uji.



Gambar 4. Spesimen Sebelum Pengujian Impak



Gambar 5. Spesimen Sesudah Pengujian Impak



Gambar 6. Diagram Uji Impak

Tabel 4. Data Hasil Uji impact

Variasi	A (mm <sup>2</sup> )	Energi Impak (J)	Harga Impak (J/mm <sup>2</sup> )	Rata-rata Impak (J/mm <sup>2</sup> )
240 Udara	80	161,00	2,01	2,07
	80	165,00	2,06	
	80	170,00	2,13	
240 OLI	80	158,00	1,98	2,05
	80	160,00	2,00	
	80	173,00	2,16	
240 AIR	80	148,00	1,85	1,73
	80	126,00	1,58	
	80	142,00	1,78	
190 UDARA	80	186,00	2,33	2,15
	80	159,00	1,99	
	80	192,00	2,40	
190 OLI	80	136,00	1,70	1,72
	80	138,00	1,73	
	80	138,00	1,73	
190 AIR	80	138,00	1,73	1,70
	80	131,00	1,64	
	80	140,00	1,75	

Berdasarkan data hasil uji impact pada Tabel 4, terlihat bahwa variasi kecepatan kawat las memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai energi impact dan harga impact (J/mm<sup>2</sup>). Pada kecepatan kawat las 240 IPM, seluruh variasi media pendingin menunjukkan nilai impact yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan kawat las 190 IPM. Nilai impact tertinggi diperoleh pada variasi 240 Udara dengan rata-rata harga impact sebesar 2,07 J/mm<sup>2</sup>, diikuti oleh 240 Oli sebesar 2,05 J/mm<sup>2</sup>, dan 240 Air sebesar 1,73 J/mm<sup>2</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan kawat las meningkatkan energi panas yang dihasilkan selama proses pengelasan,

sehingga menghasilkan sambungan las yang lebih kuat dan tahan terhadap beban impact.

Pada kecepatan 240 IPM, proses pengelasan berlangsung lebih cepat sehingga logam las mengalami pemanasan yang lebih intens dan pembentukan fusi yang lebih sempurna antara logam dasar dan logam pengisi. Kondisi ini meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi impact sebelum mengalami patah. Selain itu, perbedaan media pendingin juga memengaruhi hasilnya. Pendinginan menggunakan udara menghasilkan nilai impact tertinggi karena udara memiliki konduktivitas termal rendah, sehingga laju pendinginan tidak terlalu cepat dan memungkinkan terbentuknya struktur logam yang lebih padat. Oli juga memberikan hasil yang tinggi karena mampu menyerap panas secara merata dan mengurangi tegangan sisa pada permukaan las. Sementara itu, air menghasilkan nilai impact paling rendah pada kecepatan 240 IPM ( $1,73 \text{ J/mm}^2$ ) karena pendinginan yang terlalu cepat dapat menyebabkan tegangan termal dan menurunkan ketangguhan sambungan las.

Sebaliknya, pada kecepatan kawat las 190 IPM, energi impact dan harga impact rata-rata cenderung lebih rendah. Variasi 190 Udara memiliki nilai rata-rata sebesar  $2,15 \text{ J/mm}^2$ , yang masih tergolong baik, namun sedikit lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan 240 IPM. Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun udara masih mampu menjaga ketangguhan, kecepatan pengelasan yang lebih rendah menyebabkan masukan panas (*heat input*) berkurang, sehingga ikatan antar logam menjadi kurang kuat. Pada variasi 190 Oli, harga impact rata-rata sebesar  $1,72 \text{ J/mm}^2$ , sedangkan 190 Air memiliki rata-rata terendah yaitu  $1,70 \text{ J/mm}^2$ . Pendinginan dengan oli dan air pada kecepatan ini cenderung menghasilkan sambungan dengan ketangguhan yang lebih rendah karena tidak terjadi fusi yang sempurna akibat panas yang lebih sedikit.

Temuan penelitian ini menunjukkan keselarasan dengan laporan pada studi yang berjudul "*Impact Toughness Of ASTM A36 Low Carbon Steel By Metal Active Gas (MAG) Welding Process Using Different Cooling Media*" [17]. Pada penelitian tersebut diuraikan bahwa penggunaan media pendingin air menghasilkan nilai ketangguhan impact yang paling rendah di antara seluruh variasi pendinginan yang diuji. Fenomena ini dikaitkan dengan laju perpindahan panas yang sangat tinggi selama proses quenching, sehingga material mengalami penurunan kemampuan menyerap energi sebelum patah. Hasil serupa yang diperoleh dalam penelitian ini menguatkan bahwa pendinginan berbasis air

cenderung menghasilkan struktur material yang lebih keras namun kurang ulet, sehingga ketangguhan impactnya menurun secara signifikan. Dengan demikian, karakteristik pendinginan cepat melalui media air dapat dianggap sebagai salah satu faktor dominan yang berkontribusi terhadap rendahnya nilai impact pada baja ASTM A36 pasca proses MAG welding.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa kecepatan kawat las yang lebih tinggi (240 IPM) menghasilkan nilai impact yang lebih besar dibandingkan kecepatan 190 IPM, baik pada pendinginan udara, oli, maupun air. Hal ini menegaskan bahwa peningkatan kecepatan kawat las mampu meningkatkan energi panas total selama proses pengelasan, sehingga memperbaiki fusi logam dan meningkatkan kemampuan hasil las dalam menyerap energi impact. Selain itu, pemilihan media pendingin juga berperan penting terhadap performa hasil las, di mana pendinginan dengan udara memberikan hasil paling optimal pada penelitian ini.

### 3.3. Uji Tarik

Uji tarik adalah metode pengujian mekanik destruktif yang bertujuan menentukan sifat tarik material seperti kekuatan tarik maksimum UTS (*Ultimate Tensile Strength*), kekuatan luluh (*yield strength*), regangan maksimum (*elongation*), modulus elastisitas, dan reduksi luas. Berikut gambar specimen sebelum di uji Tarik dan sesudah uji Tarik.



Gambar 7. Specimen Sebelum Pengujian Tarik

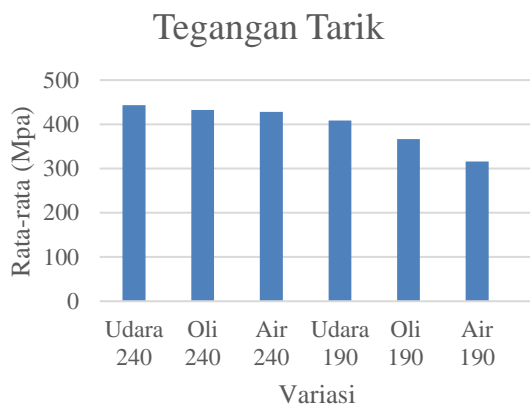


Gambar 8. Specimen Sesudah Pengujian Tarik

#### 3.3.1. Tegangan Tarik

Tabel 5. Hasil Uji Tegangan Tarik

Variasi	No	A <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	P Max (N)	$\sigma$ (Mpa)	$\sigma$ Rata- Rata (Mpa)
240 UDARA	1	118	51.000	433	443,25
	2	118	51.800	438	
	3	118	54.000	458	
240 OLI	1	118	50.100	426	432,33
	2	118	51.400	435	
	3	118	51.100	433	
240 AIR	1	118	49.800	422	428,33
	2	118	50.900	430	
	3	118	51.100	433	
190 UDARA	1	118	47.300	404	408,67
	2	118	47.100	400	
	3	118	49.800	421	
190 OLI	1	118	45.100	382	366,60
	2	118	42.100	357	
	3	118	42.000	356	
190 AIR	1	118	35.600	301	315,75
	2	118	38.500	322	
	3	118	35.800	305	



Gambar 9. Diagram Tegangan Tarik

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5 dan Gambar 9, nilai tegangan tarik maksimum bervariasi antara 301 MPa hingga 458 MPa, menunjukkan bahwa variasi kecepatan kawat las dan media pendingin berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan las. Pada kecepatan kawat las 240 ipm, nilai tegangan tarik rata-rata tertinggi diperoleh pada spesimen dengan media pendingin udara, yaitu sebesar 443,25 MPa, diikuti oleh oli sebesar 432,33 MPa, dan air sebesar 428,33 MPa. Nilai yang tinggi dan relatif seragam pada ketiga media pendingin ini menunjukkan bahwa kecepatan kawat las yang tinggi mampu menghasilkan sambungan las dengan kekuatan yang optimal. Hal ini disebabkan oleh kecepatan kawat las tinggi yang menghasilkan input panas

yang lebih besar dan stabil, sehingga proses pencairan logam induk dan logam pengisi berlangsung dengan baik, menghasilkan penetrasi yang dalam dan merata, serta membentuk ikatan metalurgi yang kuat di seluruh daerah sambungan las.

Pendinginan menggunakan udara pada kecepatan 240 ipm memberikan hasil terbaik dengan tegangan tarik rata-rata 443,25 MPa. Proses pendinginan yang berlangsung secara bertahap di udara memungkinkan material mengalami transformasi struktur secara lebih sempurna dan tegangan sisa yang terbentuk dapat terdistribusi secara merata, sehingga tidak terjadi konsentrasi tegangan lokal yang dapat menurunkan kekuatan sambungan las. Media pendingin oli menunjukkan hasil yang hampir setara dengan udara (432,33 MPa), karena laju pendinginan yang moderat pada oli mampu menghasilkan keseimbangan antara kecepatan pendinginan dan stabilitas sambungan las. Pendinginan air, meskipun menghasilkan nilai yang sedikit lebih rendah (428,33 MPa), tetap menunjukkan kekuatan tarik yang tinggi karena input panas yang besar pada kecepatan 240 ipm mampu mengompensasi efek pendinginan cepat. Sementara itu, pada kecepatan kawat las 190 ipm, nilai tegangan tarik rata-rata menunjukkan penurunan yang sangat signifikan dibandingkan dengan kecepatan 240 ipm. Nilai tertinggi diperoleh pada media pendingin udara sebesar 408,67 MPa, diikuti oleh oli sebesar 366,60 MPa, dan yang terendah pada air sebesar 315,75 MPa. Penurunan kekuatan tarik yang drastis ini disebabkan oleh kecepatan kawat las yang lebih rendah menghasilkan input panas yang lebih kecil, sehingga proses pencairan logam induk dan logam pengisi tidak berlangsung secara optimal. Akibatnya, penetrasi logam las menjadi dangkal dan tidak merata, yang dapat menyebabkan terbentuknya cacat las seperti *lack of fusion*, porositas, atau *undercut*. Cacat-cacat ini menjadi titik lemah yang menurunkan kekuatan tarik sambungan las secara keseluruhan.

Pendinginan menggunakan udara pada kecepatan 190 ipm masih memberikan hasil terbaik di antara ketiga media pendingin (408,67 MPa). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun input panas rendah, proses pendinginan yang lambat dan bertahap masih mampu mempertahankan integritas sambungan las dengan relatif baik. Pendinginan udara memberikan waktu yang cukup bagi material untuk mengalami solidifikasi secara sempurna tanpa mengalami *thermal shock*, sehingga meminimalkan pembentukan tegangan sisa yang berlebihan dan mempertahankan kekuatan sambungan las.

Media pendingin oli pada kecepatan 190 ipm menghasilkan tegangan tarik rata-rata sebesar 366,60 MPa, yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan hasil pada kecepatan 240 ipm. Penurunan ini mengindikasikan bahwa pada kondisi input panas rendah, bahkan laju pendinginan moderat seperti oli tidak mampu mengompensasi ketidaksempurnaan proses pencairan dan penetrasi logam las. Meskipun demikian, nilai ini masih lebih baik dibandingkan dengan pendinginan air, menunjukkan bahwa oli tetap memberikan perlindungan terhadap pembentukan tegangan sisa yang terlalu tinggi.

Hasil yang paling rendah terjadi pada kombinasi kecepatan kawat las 190 ipm dengan media pendingin air, yang hanya menghasilkan tegangan tarik rata-rata sebesar 315,75 MPa. Nilai ini merupakan yang terendah di antara semua variasi yang diuji, menunjukkan bahwa kombinasi input panas rendah dengan laju pendinginan sangat cepat menghasilkan kondisi yang sangat tidak menguntungkan untuk kekuatan sambungan las. Pendinginan cepat menggunakan air pada kondisi input panas rendah menyebabkan terjadinya *quench cracking* atau retak akibat *thermal shock*, pembentukan tegangan sisa yang sangat tinggi, dan struktur sambungan las yang keras namun sangat getas. Kondisi ini membuat sambungan las sangat rentan terhadap kegagalan ketika mengalami pembebanan tarik.

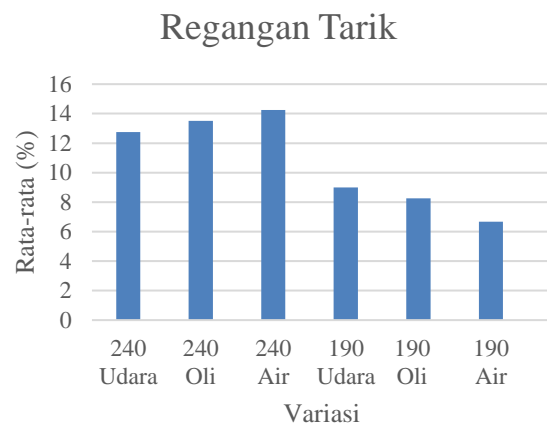
Kemiripan nilai kekuatan tarik antara penelitian ini dan jurnal "Pengaruh Variasi Cooling pada Pengelasan GMAW Terhadap Uji Tarik dan Uji Kekerasan pada Baja ST 60" [18]. pada variasi media pendingin udara dapat dijelaskan melalui karakteristik pendinginan udara yang secara fundamental memberikan laju pendinginan paling stabil bagi baja karbon rendah. Pendinginan udara berlangsung secara alami dan bertahap, sehingga tidak menimbulkan gradien temperatur yang ekstrem pada logam las maupun zona HAZ. Kondisi ini memungkinkan terjadinya relaksasi tegangan sisa secara perlahan dan memberikan waktu yang cukup bagi atom-atom untuk berdifusi menuju kondisi yang lebih stabil. Akibatnya, struktur ferit-perlit yang merupakan ciri khas baja karbon rendah, baik ASTM A36 maupun ST 60, tetap terjaga tanpa pembentukan fasa keras akibat pendinginan cepat. Media pendingin udara juga tidak memicu percepatan pendinginan secara drastis yang dapat menghasilkan tegangan termal tinggi atau deformasi lokal, sehingga kekuatan tarik yang dihasilkan menjadi lebih konsisten. Oleh karena itu, meskipun material dasar pada kedua penelitian berbeda, kesamaan laju dan mekanisme pelepasan panas melalui pendinginan udara

menghasilkan respons mekanik yang hampir identik, terutama pada parameter kekuatan tarik."

### 3.3.2. Regangan Tarik

Tabel 6. Hasil Regangan Tarik

Variasi	No	L (mm)	Lo (mm)	$\epsilon$ Max (%)	$\epsilon$ Rata-Rata (%)
240 Udara	1	5,5	50	11	13,67
	2	8,0	50	16	
	3	7,0	50	14	
240 Oli	1	7,5	50	15	15,00%
	2	7,5	50	15	
	3	7,5	50	15	
240 Air	1	8,0	50	16	16,00%
	2	8,0	50	16	
	3	8,0	50	16	
190 Udara	1	4,5	50	9	9,33%
	2	5,0	50	10	
	3	4,5	50	9	
190 Oli	1	4,5	50	9	8,33%
	2	4,0	50	8	
	3	4,0	50	8	
190 Air	1	6,0	50	6	6,67%
	2	3,0	50	7	
	3	3,5	50	7	



Gambar 10. Diagram Regangan Tarik

Regangan maksimum ( $\epsilon$  max) merupakan besaran yang menunjukkan kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis sebelum mengalami patah akibat beban tarik. Nilai regangan ini menggambarkan keuletan (*ductility*) material, di mana semakin besar nilai  $\epsilon$  max, maka material tersebut semakin ulet dan mampu meregang lebih panjang sebelum patah. Dalam penelitian ini, nilai  $\epsilon$  max diperoleh dari hasil pengujian tarik menggunakan spesimen dengan panjang awal ( $L_0$ ) 50 mm, dan penambahan

panjang ( $\Delta L$ ) yang bervariasi pada setiap kondisi pengelasan serta media pendingin yang digunakan.

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 6 dan Gambar 10, nilai regangan maksimum rata-rata tertinggi diperoleh pada variasi kecepatan kawat las 240 Air, yaitu sebesar 16,00%, diikuti oleh 240 Oli sebesar 15,00% dan 240 Udara sebesar 13,67%. Ketiga variasi pada kecepatan 240 menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan kawat las menghasilkan regangan yang lebih tinggi, yang menandakan peningkatan keuletan sambungan las. Hal ini disebabkan oleh kecepatan kawat yang lebih tinggi menghasilkan input panas yang lebih besar dan stabil, sehingga menghasilkan penetrasi las yang lebih dalam dan merata. Distribusi panas yang merata ini menyebabkan daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) dan daerah fusi memiliki transisi yang lebih halus, mengurangi konsentrasi tegangan lokal, dan meningkatkan kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis sebelum patah. Sebaliknya, pada kecepatan kawat las 190, nilai regangan maksimum rata-rata lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan 240. Variasi 190 Udara menunjukkan nilai  $\epsilon$  max rata-rata sebesar 9,33%, 190 Oli sebesar 8,33%, dan 190 Air sebesar 6,67%. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa semakin rendah kecepatan kawat las, maka regangan maksimum juga menurun. Kondisi ini terjadi karena kecepatan kawat yang lebih rendah menghasilkan input panas yang lebih kecil dan kurang stabil, sehingga penetrasi las menjadi dangkal dan tidak merata. Akibatnya, sambungan las memiliki potensi cacat seperti *lack of fusion*, porositas, atau *undercut* yang dapat menjadi titik konsentrasi tegangan, sehingga material lebih mudah patah dengan deformasi plastis yang minimal.

Pengaruh media pendingin pada kecepatan kawat las 240 menunjukkan tren yang konsisten, di mana pendinginan menggunakan air memberikan nilai  $\epsilon$  max tertinggi (16,00%), diikuti oli (15,00%), dan udara (13,67%). Pada kecepatan kawat las tinggi, input panas yang besar menghasilkan kolam las (*weld pool*) yang cukup besar dan waktu pemadatan yang lebih lama. Pendinginan cepat menggunakan air pada kondisi ini efektif dalam mengurangi waktu berada pada suhu kritis, sehingga meminimalkan pertumbuhan butir yang berlebihan dan menghasilkan sambungan las dengan keuletan yang lebih baik. Media oli dengan laju pendinginan sedang tetap memberikan hasil yang baik karena mampu mendinginkan sambungan las secara terkontrol tanpa *thermal shock* yang berlebihan. Sementara itu, pendinginan udara yang lambat menyebabkan sambungan las berada lebih lama pada rentang suhu kritis, yang dapat menyebabkan sedikit penurunan keuletan.

Namun, pada kecepatan kawat las 190, tren ini berbalik. Pendinginan udara menghasilkan nilai  $\epsilon$  max tertinggi (9,33%), diikuti oli (8,33%), dan air justru memberikan nilai terendah (6,67%). Fenomena ini dapat dijelaskan karena pada kecepatan kawat rendah, input panas yang dihasilkan tidak cukup besar untuk membentuk kolam las yang optimal. Ketika sambungan las dengan input panas rendah ini langsung didinginkan secara cepat menggunakan air, terjadi perbedaan laju pendinginan yang ekstrem antara bagian permukaan dan bagian dalam sambungan las. Kondisi ini menyebabkan terbentuknya tegangan sisa (*residual stress*) yang sangat tinggi akibat kontraksi yang tidak seragam, serta meningkatkan risiko terjadinya *quench cracking* atau *crack* yang disebabkan oleh pendinginan terlalu cepat. Tegangan sisa yang tinggi ini membuat material kehilangan kemampuan untuk berdeformasi secara plastis dan cenderung patah getas. Sebaliknya, pendinginan lambat dengan udara memberikan waktu yang cukup bagi sambungan las untuk mengalami proses pendinginan yang lebih seragam dari permukaan hingga bagian dalam, sehingga tegangan sisa yang terbentuk lebih rendah dan material tetap mempertahankan keuletannya.

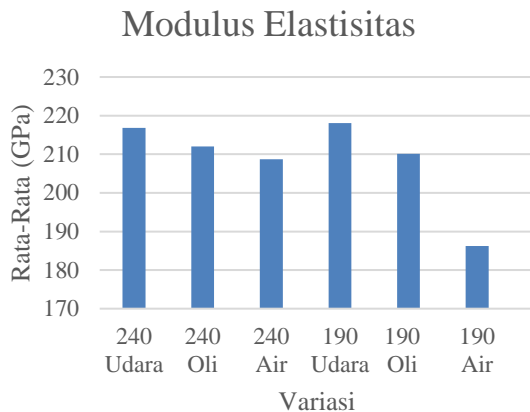
Dari keseluruhan data, dapat disimpulkan bahwa kecepatan kawat las dan media pendingin memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap regangan maksimum material hasil pengelasan, serta terdapat interaksi yang kompleks antara kedua parameter tersebut.

### 3.3.3. Modulus Elastisitas

Tabel 7. Hasil Modulus Elastisitas

Variasi	No	$\sigma$ Yield (MPa)	$\epsilon$ Max	E (GPa)	E Rata-Rata (GPa)
240 Udara	1	336,615	0,11	210,278	216.83
	2	341,689	0,16	211,462	
	3	314,280	0,14	228,682	
240 Oli	1	328,745	0,15	236,776	212.04
	2	349,130	0,15	205,278	
	3	343,541	0,15	196,546	
240 Air	1	349,817	0,16	217,275	208.68
	2	350,539	0,16	216,501	
	3	346,192	0,16	192,125	
190 Udara	1	326,435	0,09	228,776	218.08
	2	313,710	0,10	216,298	
	3	319,792	0,09	209,177	
190 Oli	1	338,278	0,09	219,686	210.13
	2	307,775	0,8	211,608	
	3	302,557	0,8	199,106	
190 Air	1	196,275	0,6	194,194	186.27

2	250,683	0,7	182,873
3	218,021	0,7	178,823



Gambar 11. Diagram Modulus Elastisitas

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 7 dan Gambar 11, kecepatan kawat las 190 ipm menghasilkan nilai modulus elastisitas yang secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan kawat las 240 ipm. Pada kecepatan kawat 190 ipm, nilai modulus elastisitas rata-rata tertinggi diperoleh pada media pendingin udara sebesar 218,08 GPa, diikuti oleh oli sebesar 210,13 GPa, dan terendah pada air sebesar 186,27 GPa. Nilai yang tinggi pada pendinginan udara menunjukkan bahwa proses pendinginan yang berlangsung secara perlahan memberikan waktu yang cukup bagi logam hasil las untuk mengalami transformasi struktur yang lebih stabil. Pendinginan bertahap ini menghasilkan sambungan las dengan tegangan sisa yang rendah, sehingga material memiliki kemampuan yang lebih baik untuk menahan deformasi elastis dan kembali ke bentuk semula setelah pembebanan.

Sebaliknya, pendinginan menggunakan air pada kecepatan kawat 190 ipm menghasilkan nilai modulus elastisitas terendah (186,27 GPa). Hal ini disebabkan oleh laju pendinginan yang sangat cepat pada media air yang menyebabkan terjadinya kontraksi material secara mendadak dan tidak seragam. Kondisi ini mengakibatkan pembentukan tegangan sisa yang sangat tinggi dan material yang cenderung keras namun getas, sehingga mengurangi kemampuan material untuk menahan beban elastis secara efektif. Pendinginan dengan oli menunjukkan nilai yang berada di antara udara dan air (210,13 GPa), karena laju pendinginan yang moderat memungkinkan terjadinya proses transformasi struktur yang lebih terkontrol, menghasilkan keseimbangan antara kekuatan dan stabilitas elastis material.

Pada kecepatan kawat las 240 ipm, terjadi perubahan tren yang menarik. Nilai modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada media pendingin udara sebesar 216,83 GPa, diikuti oleh oli sebesar 212,04 GPa, dan air sebesar 208,68 GPa. Meskipun urutan tetap sama dengan kecepatan 190 ipm, namun perbedaan nilai antar media pendingin menjadi lebih kecil dan cenderung lebih seragam. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan kawat yang lebih tinggi, masukan panas per satuan panjang sambungan las menjadi lebih besar dan waktu interaksi panas dengan material meningkat. Kondisi ini menyebabkan laju pembekuan logam las berlangsung lebih cepat setelah proses pengelasan selesai, sehingga pengaruh perbedaan laju pendinginan dari ketiga media menjadi berkurang.

Pendinginan dengan oli pada kecepatan 240 ipm tetap menunjukkan kestabilan nilai modulus elastisitas yang baik (212,04 GPa). Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik pendinginan oli yang tidak terlalu cepat mampu mengurangi pembentukan struktur yang terlalu keras dan getas, sekaligus meminimalkan tegangan termal yang dapat menurunkan stabilitas elastis material. Pendinginan air pada variasi kecepatan 240 ipm menunjukkan peningkatan nilai modulus elastisitas dibandingkan pada kecepatan 190 ipm. Peningkatan ini terjadi karena masukan panas yang lebih besar pada kecepatan tinggi mengurangi efek negatif dari pendinginan cepat, sehingga risiko pembentukan tegangan sisa berlebih dapat diminimalkan. Meskipun demikian, nilai modulus elastisitas pada pendinginan air tetap lebih rendah dibandingkan dengan udara dan oli.

Perbandingan nilai modulus elastisitas antara kedua kecepatan kawat las menunjukkan bahwa kecepatan kawat 190 ipm menghasilkan nilai modulus yang lebih tinggi pada media pendingin udara dan oli dibandingkan dengan kecepatan 240 ipm. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan kawat yang lebih rendah dengan masukan panas yang lebih kecil dan terkontrol dapat menghasilkan sambungan las dengan sifat elastis yang lebih stabil, terutama ketika dikombinasikan dengan pendinginan yang tidak terlalu cepat. Pada kecepatan rendah, material memiliki waktu yang lebih lama untuk mengalami proses pembekuan dan transformasi struktur secara bertahap, sehingga distribusi tegangan internal lebih merata dan kemampuan material untuk menahan deformasi elastis meningkat. Sebaliknya, pada kecepatan kawat 240 ipm, masukan panas yang lebih besar dan waktu siklus termal yang lebih singkat menyebabkan material mengalami pembekuan

yang lebih cepat. Kondisi ini dapat menghasilkan struktur yang kurang homogen dengan distribusi tegangan sisa yang tidak merata, sehingga sedikit menurunkan nilai modulus elastisitas dibandingkan dengan kecepatan rendah. Namun, perbedaan ini tidak terlalu signifikan pada pendinginan oli dan air, yang menunjukkan bahwa pada kecepatan tinggi, efek pendinginan eksternal menjadi kurang dominan karena laju pembekuan material yang sudah cukup cepat akibat masukan panas yang besar.

Perspektif media pendingin, udara secara konsisten memberikan hasil modulus elastisitas tertinggi pada kedua kecepatan kawat las (218,08 GPa pada 190 ipm dan 216,83 GPa pada 240 ipm). Hal ini mengkonfirmasi bahwa proses pendinginan yang berlangsung secara natural dan perlahan di udara merupakan metode yang paling efektif untuk menghasilkan sambungan las dengan stabilitas elastis yang tinggi. Pendinginan bertahap ini memungkinkan material untuk mengalami relaksasi tegangan secara alami dan menghindari pembentukan tegangan sisa yang berlebihan, sehingga menghasilkan material dengan kemampuan deformasi elastis yang optimal.

Media pendingin oli menunjukkan performa yang stabil pada berbagai variasi kecepatan kawat las, dengan nilai modulus elastisitas berkisar antara 210,13 GPa hingga 212,04 GPa. Konsistensi nilai ini menunjukkan bahwa oli memiliki kemampuan yang baik dalam menjaga keseimbangan proses pendinginan pada berbagai kondisi masukan panas. Karakteristik pendinginan oli yang moderat mampu mengakomodasi variasi kecepatan kawat las tanpa menyebabkan perubahan sifat elastis yang drastis, menjadikannya pilihan yang fleksibel untuk berbagai parameter pengelasan.

Pendinginan menggunakan air secara konsisten menghasilkan nilai modulus elastisitas yang lebih rendah dibandingkan dengan udara dan oli pada kedua kecepatan kawat las. Nilai terendah terjadi pada kecepatan 190 ipm (186,27 GPa), yang menunjukkan bahwa kombinasi antara masukan panas rendah dan laju pendinginan sangat cepat menghasilkan kondisi yang paling tidak menguntungkan untuk stabilitas elastis material. Pada kecepatan 240 ipm, meskipun terjadi peningkatan menjadi 208,68 GPa, nilai ini tetap lebih rendah dibandingkan dengan media pendingin lainnya.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh variasi kecepatan kawat las dan media pendingin terhadap sifat mekanik baja ASTM A36 dengan metode Gas Metal Arc Welding (GMAW), diperoleh bahwa perubahan kecepatan kawat dan jenis media pendingin berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik, regangan, modulus elastisitas, dan ketangguhan dampak hasil sambungan. Pada pengujian tarik, variasi kecepatan kawat 240 IPM menghasilkan nilai tegangan tarik rata-rata tertinggi dibandingkan 190 IPM, dengan nilai maksimum tertinggi pada media pendingin udara sebesar 443,25 MPa, diikuti oleh 240 oli sebesar 432,33 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada 190 air sebesar 315,75 MPa.

Hasil regangan menunjukkan bahwa kecepatan kawat tinggi juga meningkatkan keuletan material, dengan nilai regangan rata-rata tertinggi pada 240 air sebesar 16%, sedangkan terendah pada 190 air sebesar 6,67%. Nilai modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada 190 udara sebesar 218,08 GPa, menandakan sambungan yang lebih kaku, sedangkan nilai terendah terdapat pada 190 air sebesar 186,27 GPa, menunjukkan penurunan kekakuan akibat pendinginan cepat. Hasil uji dampak memperlihatkan kecenderungan yang sama, di mana 240 udara menghasilkan energi serapan tertinggi sebesar 2,07 J/mm<sup>2</sup>, diikuti oleh 240 oli sebesar 2,05 J/mm<sup>2</sup>, dan nilai terendah terdapat pada 190 air sebesar 1,70 J/mm<sup>2</sup>.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa peningkatan kecepatan kawat las meningkatkan kekuatan dan ketangguhan sambungan, sementara pemilihan media pendingin menentukan keseimbangan antara kekuatan, keuletan, dan ketahanan terhadap dampak. Kombinasi kecepatan kawat 240 IPM dengan media udara memberikan hasil paling optimal. Media pendingin udara menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi karena mekanisme pendinginannya berlangsung secara bertahap dengan laju penurunan temperatur yang moderat. Kondisi ini memberikan waktu yang cukup bagi material untuk mengalami relaksasi tegangan sisa secara alami, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan termal yang umumnya memicu penurunan kekuatan tarik pada pendinginan cepat, sedangkan media air memberikan regangan tertinggi yang menunjukkan peningkatan keuletan material, pemilihan media pendingin seperti air dengan kecepatan kawat 190 justru memberikan tegangan yang rendah karena energi panas tidak cukup untuk menghasilkan sambungan yang

homogen. Saat media pendingin air digunakan, efek pendinginan cepat justru memperburuk kondisi karena mempercepat pembentukan struktur getas, sehingga menurunkan kekuatan tarik hasil las.

Secara keseluruhan, kombinasi kecepatan kawat tinggi dan media pendingin cepat seperti air, oli dan udara mampu menghasilkan sambungan las dengan kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang optimal, di mana peningkatan kecepatan kawat memberikan efek positif terhadap fusi logam dan ketahanan material terhadap beban tarik maupun impak.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Inlastek Welding Institute Solo, Laboratorium Teknik Perkapalan, serta Laboratorium Teknik Mesin Universitas Diponegoro atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. R. Maghfiroh, G. Soebiyakto, and A. Farid, "Analisa Pengaruh Penggunaan Media Pendingin Udara Dan Air Garam Pada Sambungan Lap Joint Terhadap Sifat Mekanik Menggunakan Las SMAW," *J. Tek. Mesin Univ. Widyagama Malang*, 2014.
- [2] A. T. A. Nurudin, I. Salim, A. Yuwono, Rahmatika, and Suparman, "Analisis Sambungan Las GMAW Baja ASTM A36 Yang Terpapar Panas Tinggi Dan Pendinginan Cepat," *J. Teknol. Politeknik Negeri Madiun*, 2022.
- [3] Zulkifli et al., "Pengaruh Media Pendingin Pada Kekuatan Tarik Sambungan Las SMAW," *Penelitian Serupa*, 2019.
- [4] A. Kamet and A. A. Sulistiawan, "Analisis Kekerasan Dan Cacat Pengelasan Terhadap Variasi Arus Dan Kecepatan Pengelasan Tungsten Inert Pada Material Baja SS 400," *J. ...*, vol. 4, no. 1, pp. 15–22, 2023.
- [5] L. Van Gunawan, "Analisis Pengaruh Variasi Suhu Tempering Pada Sifat Mekanik Baja ASTM A36 Setelah Pengelasan SMAW," *J. Infotek Mesin Politeknik Negeri Cilacap*, 2022.
- [6] A. Siti et al., "Analisa Pengaruh Variasi Polaritas, Elektroda, Dan Media Pendingin Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Material Baja ASTM A36," *AC Open Univ. Muhammadiyah Sidoarjo*, 2023.
- [7] ASTM International, *Specification for Carbon Structural Steel*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, May 15, 2008, doi: 10.1520/A0036\_A0036M-08.
- [8] Z. Zulfadly and M. A. Ghony, "Variasi Ampere Terhadap Kekuatan Tarik Pada Hasil Pengelasan Dengan Posisi Down Hand," *Hexatech: J. Ilmiah Tek.*, vol. 1, no. 1, pp. 39–50, 2022, doi: 10.55904/hexatech.v1i01.75.
- [9] D. Ratnasari, "Pengaruh Voltage Pada Gas Metal Arc Welding (GMAW) Terhadap Struktur Mikro Dan Tegangan Lentur (Face And Root) EMS 45 Dengan Sambungan Kampuh V," Undergraduate thesis, Universitas Negeri Semarang, Semarang, 2016.
- [10] I. Yuwono, A. T. A. Salim, C. C. A. Nurudin, R. Rosallino, S. R. Nugroho, D. E. Febrianti, and R. Aditama, "Analysis of GMAW Welding Connections on A36 Material with a Heat Treatment and Rapid Cooling Process," unpublished.
- [11] Akhyar et al., "Evaluation of welding distortion and hardness in the A36 steel plate joints using different cooling media," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1405, 2022.
- [12] Y. Fernando, R. Mulyadi, and A. Ambiyar, "The Effect on Using Different Types of Electrodes Toward the Tensile Strength of the Welding Joints Groove V Low Carbon Steel Type DIN 1.0038," *Teknomekanik*, vol. 3, no. 2, pp. 43–49, 2020.
- [13] Z. H. Mohsein, "Improvement of bending strength for inert gas weld joint aluminum alloys 6061-T6 using shot peening," *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 27–40, 2015.

[14] ASTM International, *ASTM E8/E8M-16a, Standard Test Methods For Tension Testing Of Metallic Materials*, vol. 03.01. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016.

[15] A. M. Milani, M. Paidar, A. Khodabandeh, et al., "Influence of filler wire and wire feed speed on metallurgical and mechanical properties of MIG welding– brazing of automotive galvanized steel/5754 aluminum alloy in a lap joint configuration," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 82, pp. 1495–1506, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7505-4.

[16] E. Arslan, E. Karadeniz, and E. Feyzullahoğlu, "Effect of wire feed speed and arc length on weld bead geometry in synergistic controlled pulsed MIG/MAG welding," *Mater. Test.*, vol. 67, no. 1, pp. 78-86, 2025, doi: 10.1515/mt-2024-0194.

[17] A. 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," *Metalurgija*, vol. 61, no. 3–4, pp. 641–644, 2022.

[18] W. Warso, T. N. Wibowo, dan Y. D. Pratiwi, "Pengaruh Variasi Colling pada Pengelasan GMAW Terhadap Uji Tarik dan Uji Kekerasan pada Baja ST 60," *Accurate: Journal of Mechanical Engineering and Science*, vol. 2, no. 1, pp. 22–26, 2021, doi: 10.35970/accurate.v2i1.578