



Pengaruh Variasi Kuat Arus Pada Proses *Gouging* Pengelasan GTAW Terhadap Kekuatan Uji Tarik, Uji Tekuk, Dan Uji Impak Pada Baja ST40

Aini Shabila Tarina¹⁾, Ari Wibawa Budi Santosa²⁾, Imam Pujo Mulyatno³⁾

¹⁾ Laboratorium Material dan Produksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

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

Abstrak

Variasi kuat arus *gouging* setelah pengelasan GTAW berpotensi memengaruhi sifat mekanik baja ST40, khususnya dalam aplikasi struktural. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi arus *gouging* 160A, 180A, dan 200A terhadap kekuatan tarik, ketahanan tekuk, dan ketangguhan impak material setelah proses perbaikan las. Penelitian dimulai dengan penyambungan material menggunakan elektroda ER70S-6 2,4 mm diikuti oleh *gouging* dan pengelasan ulang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi arus *gouging* memengaruhi struktur dan kekuatan material. Nilai σ tarik maksimum tertinggi diperoleh pada arus 200 A sebesar 460 MPa. Nilai ϵ maksimum tertinggi terjadi pada arus 200 A sebesar 29.503% sedangkan nilai E tertinggi juga terdapat pada arus 200 A sebesar 199.04 GPa. Pada uji tekuk, tegangan bending rata-rata tertinggi diperoleh pada arus 200 A sebesar 582.96 MPa. Nilai energi impak menunjukkan tren fluktuatif, dengan nilai tertinggi pada arus 160 A sebesar 1,49 J/mm². Secara keseluruhan, arus *gouging* 200 A dapat dianggap sebagai arus ideal. Arus ini menawarkan kombinasi terbaik antara kekuatan, keuletan, dan kekakuan sambungan las. Hasil ini menjadi acuan dalam menentukan parameter *gouging* optimal pada perbaikan las baja ST40.

Kata Kunci : Pengelasan GTAW, *Gouging*, Uji Tarik, Uji Tekuk, Uji Impak.

1. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan proses penyambungan logam berbasis difusi yang memerlukan perhatian terhadap jenis, klasifikasi, dan karakteristiknya [1]. Namun, proses ini dapat menurunkan kualitas material, terutama setelah pengelasan ulang (*repair welding*) yang umum dilakukan pada material hasil *replating*. Tujuan utama *repair welding* adalah memulihkan bentuk dan fungsi sambungan yang rusak agar kemabli seperti semula dan memiliki fungsi yang sama sebagaimana logam pada dasarnya [2].

Baja ST40, sebagai baja karbon rendah dengan kandungan karbon <0,3%, merupakan material utama dalam konstruksi kapal karena

sifatnya yang kuat, fleksibel, dan tahan korosi [3] [4] [5]. Dalam struktur kapal, salah satu penerapan material ini adalah pada komponen *bracket*, yaitu elemen penguat yang berfungsi menahan dan mendistribusikan beban pada sambungan antar pelat maupun profil [6]. Penggunaan baja ST40 pada *bracket* didasarkan pada sifat *ductility* yang cukup tinggi, sehingga material tidak mudah mengalami retak getas saat menerima beban dinamis, getaran, maupun gaya kejut dari lingkungan operasional kapal. Selain itu, sifat las yang baik pada baja ST40 memudahkan proses fabrikasi dan pemasangan *bracket*, sehingga efisiensi konstruksi dapat tercapai [7] [8].

Salah satu metode pengelasan yang umum digunakan pada baja ini adalah *Gas Tungsten Arc*

Welding (GTAW), yang menggunakan gas mulia seperti Argon untuk melindungi daerah las dan menghasilkan sambungan berkualitas tinggi [9]. Keunggulan utama metode GTAW adalah kemampuannya menghasilkan sambungan dengan kualitas tinggi, ditandai oleh penetrasi las yang baik, cacat las yang minimal, serta hasil las yang halus [9]. Selain itu, GTAW memberikan kontrol yang lebih presisi terhadap parameter pengelasan, sehingga cocok digunakan untuk material dengan ketebalan tipis hingga sedang, termasuk baja karbon rendah seperti ST40. Dengan sifat tersebut, GTAW sering dipilih dalam aplikasi perkapalan karena mampu menghasilkan sambungan yang kuat, ulet, dan tahan terhadap beban dinamis maupun kondisi operasional laut yang menuntut [10] [11].

Kesalahan dalam proses pengelasan masih sering dijumpai di lapangan, terutama yang disebabkan oleh faktor non-teknis seperti pemilihan arus listrik, jenis elektroda, atau material *filler* yang kurang sesuai dengan spesifikasi pengelasan [12]. Kondisi ini dapat memicu terjadinya cacat las, misalnya porositas, retak, atau *incomplete fusion*, yang pada akhirnya menurunkan kualitas sambungan. Untuk memperbaiki cacat tersebut, salah satu metode yang umum digunakan adalah *arc gouging* [13] [14]. Teknik ini dilakukan dengan cara menghilangkan bagian las yang mengalami cacat menggunakan busur listrik, kemudian menggantinya dengan sambungan las baru [15]. Meskipun efektif dalam memperbaiki kualitas sambungan, penggunaan teknik *gouging* secara berulang dapat memengaruhi sifat mekanik material, seperti kekerasan dan kekuatan tarik, sehingga perlu dikaji lebih lanjut [16].

Untuk mengevaluasi sifat mekanik material hasil proses pengelasan, dilakukan serangkaian pengujian yang meliputi uji tarik, uji tekuk, dan uji dampak [17] [18]. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kekuatan material terhadap berbagai jenis beban, yaitu beban tarik, tekan, maupun tumbukan. Uji tarik merupakan pengujian yang dilakukan pada material untuk mengetahui kekuatan dan ketahanan suatu material terhadap beban tarik [19]. Uji tekuk adalah salah satu uji mekanik untuk mendapatkan kekuatan bahan terhadap gaya tekan [20]. Uji dampak merupakan uji mekanik guna mendapatkan kekuatan bahan gaya dampak [21].

Penelitian-penelitian sebelumnya pada baja ST40 umumnya melibatkan berbagai perlakuan seperti pembersihan permukaan, preheating untuk mencegah retak dingin, serta post-weld heat treatment guna mengurangi tegangan sisa dan meningkatkan keuletan sambungan [22] [23].

Selain itu, pemilihan filler yang sesuai dengan komposisi baja juga dilakukan untuk menjaga homogenitas sifat mekanik [24]. Pada proses *gouging*, variasi kuat arus terbukti berpengaruh signifikan terhadap kualitas sambungan las. Arus *gouging* yang lebih tinggi mempercepat proses penghilangan material namun menghasilkan zona pengaruh panas (HAZ) yang lebih lebar, pembesaran butir mikrostruktur, serta penurunan ketangguhan dan keuletan sambungan, sementara arus lebih rendah cenderung mempertahankan sifat mekanik meskipun prosesnya lebih lambat [16]. Dibandingkan dengan metode lain seperti grinding atau plasma *gouging*, penggunaan arus *gouging* tinggi lebih berisiko menimbulkan distorsi, tegangan sisa, serta cacat las akibat oksidasi, sehingga pemilihan parameter arus harus disesuaikan dengan tuntutan kualitas sambungan terutama pada aplikasi perkapalan yang bekerja di bawah beban dinamis.

Dalam penelitian pengaruh kuat arus *gouging* sambungan las SMAW pada baja SS400 terhadap kekuatan uji tarik, uji dampak, dan struktur mikro menunjukkan bahwa peningkatan kuat arus *gouging* cenderung meningkatkan nilai rata-rata tegangan tarik, regangan, serta ketangguhan dampak, meskipun modulus elastisitas justru menurun. Pengamatan struktur mikro memperlihatkan distribusi fasa ferit dan perlit yang semakin merata dari variasi arus rendah yaitu 100 A hingga tinggi yaitu 150 A, terutama pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal* [25].

Lalu selanjutnya penelitian mengenai pengaruh variasi arus *gouging* pada material KI-A dengan metode pengelasan SMAW menunjukkan bahwa variasi arus berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik material. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa nilai ketangguhan tertinggi diperoleh pada arus 230 A sebesar 1,66 joule/mm², sedangkan nilai terendah pada arus 270 A sebesar 0,20 joule/mm². Sebaliknya, nilai kekerasan tertinggi ditemukan pada arus 270 A dengan 186,17 HVN di daerah *weld metal*, dan nilai terendah pada arus 230 A sebesar 126,47 HVN di daerah *base metal*. Perbedaan ini dipengaruhi oleh variasi masukan panas yang mengubah struktur mikro, dimana peningkatan arus menyebabkan terjadinya pengkasaran butir yang berdampak pada penurunan ketangguhan namun peningkatan kekerasan [26].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kuat arus pada proses *gouging repair* dalam pengelasan GTAW terhadap hasil uji tarik, uji tekuk, dan uji dampak pada material baja ST40.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen yang dimulai dengan mengumpulkan data dari berbagai sumber seperti buku, internet, dan jurnal terkait. Terdapat 45 Spesimen pada penelitian ini, yang terdiri dari 15 spesimen tarik, 15 spesimen tekuk, dan 15 spesimen impak yang terbuat dari baja ST40. Spesimen ini mempunyai variasi kuat arus *gouging* 160 ampere, 180 ampere, dan 200 ampere.

2.1. Objek Penelitian

2.1.1. Pemilihan dan Karakteristik Material

Material yang akan digunakan pada penelitian ini adalah baja ST40. Baja (*Stahl*) ST40 merupakan baja karbon rendah yaitu dibawah 0,30%. Baja ST40 memiliki kekuatan tarik sampai dengan 40 kg/mm², memiliki nilai renggang senilai 34% dan massa jenis di angka 7,86 g/mm³. Dalam aplikasi perkapalan, baja ST40 digunakan terutama untuk konstruksi lambung kapal. Untuk spesifikasi materila jenis ini dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 1. Komposisi kimia Baja ST40 [26].

Unsur		Kandungan (%)
Fe	Ferrum	99
C	Carbon	0,16
Si	Silicon	0,221
Mn	Mangan	0,385
P	Phospous	0,028
W	Wolfram	0,001
Co	Kobal	0,077
Cu	Cuprum	0,036

Tabel 2. Properti mekanik Baja ST40.

Properti Mekanik	Nilai
<i>Yield strength</i> (MPa)	205 – 245
<i>Tensile strength</i> (MPa)	400 – 510
<i>Elongation</i> (%)	27 – 30
<i>Hardness</i> (Hb)	160
<i>Young's modulus</i> (GPa)	190 – 210

Material selanjutnya adalah elektroda pengelasan menggunakan elektroda ER70S-6 yang memiliki kekuatan tarik minimum 70 ksi (490 MPa) sesuai dengan standar AWS A5.18. Pemilihan elektroda ini karena ER70S-6 memenuhi atau melampaui kekuatan baja ST40, dan juga komposisinya cocok untuk baja karbon rendah seperti ST40. Untuk komposisi kimia elektroda ER70S-6 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi kimia elektroda ER70S-6 [27].

Unsur		Kandungan (%)
C	Carbon	0,06 – 0,15
Si	Silicon	0,80 – 1,15
Mn	Mangan	01,40 – 1,85
P	Phospous	≤ 0,025
S	Sulfur	≤ 0,035
Cu	Copper	≤ 0,50

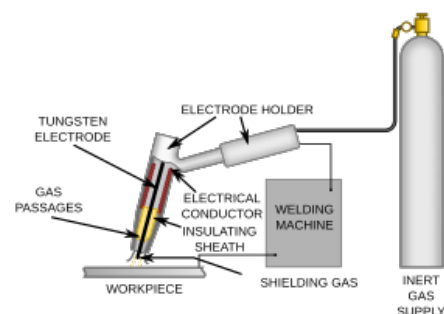
Pada proses *gouging* menggunakan elektroda *gouging* NS-8945 Nikko *Steel* berdiameter 3,2 mm, yang berfungsi untuk melelehkan logam dan membentuk alur bersih sebelum dilakukan pengelasan ulang. Untuk komposisi kimia elektroda NS-8945 Nikko *Steel* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi kimia NS-8945 Nikko *Steel*.

Unsur		Kandungan (%)
C	Fixed Carbon/Graphite	>95
Cu	Copper	<5

2.2. Pengelasan

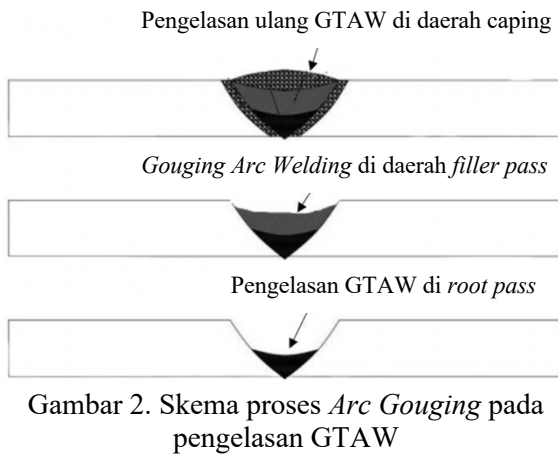
Metode pengelasan pada penelitian ini adalah GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) dengan menggunakan *bevel butt joint single V groove 45°* serta kuat arus sebesar 120 ampere untuk setiap spesimen yang digunakan. Pengelasan merupakan proses penyambungan dua atau lebih logam yang menghasilkan tiga zona utama pada daerah sambungan. Pada logam induk (*base metal*) terjadi pembekuan struktur dendritik kasar dan segregasi akibat pendinginan cepat serta penyusutan volume yang dapat menimbulkan distorsi atau retak. Di garis fusi (*fusion line*) terjadi pencampuran antara logam las dan logam induk. Sementara itu, pada *Heat Affected Zone* (HAZ) terbentuk butir-butir baru akibat suhu tinggi disertai transformasi fasa akibat panas dari proses pengelasan [28]. Pengelasan GTAW dapat diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Mesin GTAW [29].

2.3. Carbon Arc Gouging

Carbon Arc Gouging merupakan metode perbaikan logam yang umum digunakan di lapangan karena kemampuannya melelehkan dan menghilangkan logam secara efisien. Proses ini membentuk alur atau kawah pada area cacat las, mirip dengan proses pengelasan, namun disertai aliran udara bertekanan tinggi untuk menghembuskan logam cair sehingga terbentuk alur bersih yang siap untuk dilas kembali [30]. Skema proses *repair gouging* dapat dilihat pada Gambar 2.

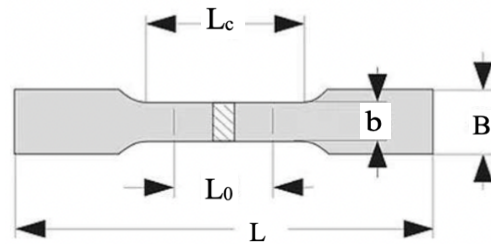


Gambar 2. Skema proses *Arc Gouging* pada pengelasan GTAW

Berdasarkan gambar diatas, proses *gouging* juga diterapkan pada tahap preparasi pengelasan spesimen penelitian ini, yang dikenal sebagai *back weld*. Pada tahap ini, *gouging* dilakukan di area *root joint*, kemudian dilanjutkan dengan pengelasan ulang untuk memastikan sambungan yang lebih rapat dan kuat.

2.4. Pengujian Tarik

Material yang telah mengalami proses *gouging* kemudian dibuat menjadi spesimen uji tarik. Pengujian ini dilakukan dengan menjepit spesimen pada mesin uji dan memberikan beban tarik secara *uniaxial* yang meningkat secara kontinu hingga spesimen mengalami patah. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum material sebelum terjadi kegagalan, atau yang dikenal sebagai *Ultimate Tensile Strength (UTS)*. Untuk pemotongan spesimen uji tarik akan disesuaikan dengan standar ASTM E8 dengan dimensi yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Tabel 5.



Gambar 3. Dimensi spesimen pengujian tarik [31].

Tabel 5. Dimensi spesimen uji tarik.

Keterangan	Nilai
b (<i>Width</i>)	12.5 mm
L_0 (<i>Gauge length</i>)	50 mm
L_c (<i>Length of reduce section</i>)	60 mm
L (<i>Overall length</i>)	200 mm
B (<i>Width of grip section</i>)	20 mm
T (<i>Thickness</i>)	10 mm

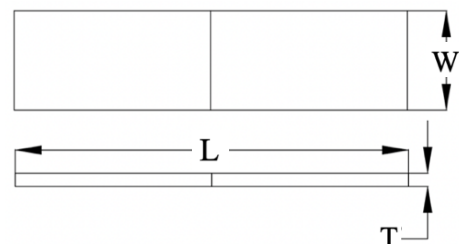
Contoh bentuk spesimen uji tarik pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Spesimen uji tarik.

2.5. Pengujian Tekuk

Pengujian tekuk merupakan salah satu metode karakterisasi mekanik yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan beban tekuk hingga terjadi deformasi plastis atau kerusakan. Proses ini dilakukan dengan meletakkan spesimen di atas dua tumpuan dan memberikan gaya tekan di tengah, sehingga dapat dianalisis sifat mekanik seperti kekuatan tekuk maksimum dan modulus elastisitas. Uji ini juga bermanfaat dalam mendeteksi cacat permukaan seperti retakan serta memastikan apakah spesimen memenuhi batas toleransi yang ditetapkan oleh standar pengujian tertentu seperti ASTM E290 [32]. Dimensi spesimen uji tekuk diilustrasikan pada Gambar 5 dan Tabel 6.



Gambar 5. Dimensi spesimen uji tekuk.

Tabel 6. Dimensi spesimen uji tekuk.

Keterangan	Nilai
L (<i>Overall length</i>)	150 mm
W (<i>Width</i>)	38 mm
T (<i>Thickness</i>)	5 mm

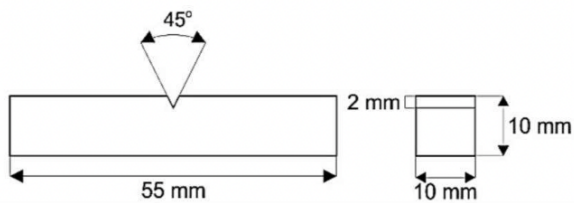
Contoh bentuk spesimen uji tekuk pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Spesimen uji tekuk.

2.6. Pengujian Impak

Uji impact digunakan untuk mengetahui ketangguhan material terhadap benturan tiba-tiba. Prinsipnya adalah mengukur energi kinetik yang diserap spesimen ketika mengalami patah akibat tumbukan cepat, biasanya dengan alat pendulum. Energi patah diukur dalam joule, dan hasilnya menunjukkan seberapa besar energi yang dapat diserap sebelum material patah. Pola patahan juga digunakan untuk menentukan sifat material, apakah ulet (*ductile*) atau getas (*brittle*), serta sensitivitas terhadap takikan. Untuk pemotongan spesimen uji impact, pemotongan akan sesuai dengan standar ASTM E23 seperti pada Gambar 7 dan Tabel 7 [33]. Contoh bentuk spesimen uji impact pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Dimensi spesimen uji impact.

Tabel 7. Dimensi spesimen uji impact.

Keterangan	Nilai
L (<i>Overall length</i>)	55 mm
W (<i>Width</i>)	10 mm
T (<i>Thickness</i>)	10 mm
N (<i>Notch Thickness</i>)	2 mm
Notched Charpy	45°

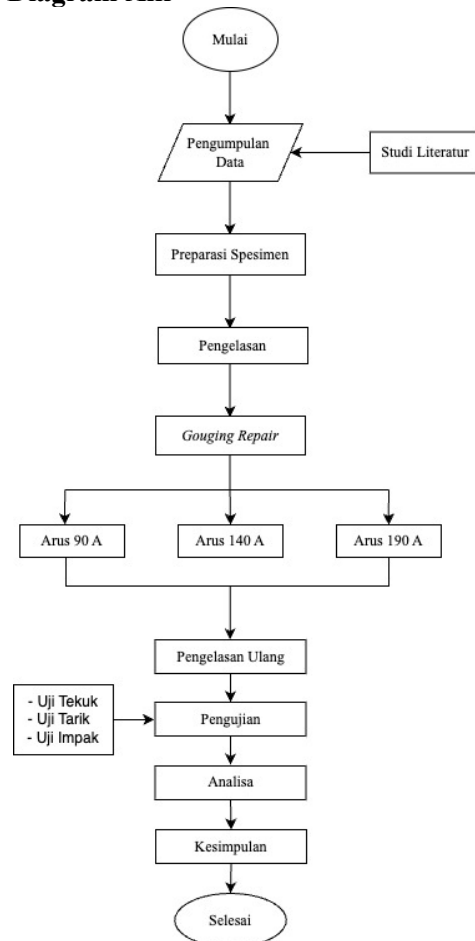


Gambar 8. Spesimen uji impact.

2.7. Lokasi Penelitian

Lokasi pembuatan spesimen dilakukan di Inlasterk Welding Institute, Surakarta. Pengujian tarik, tekuk, dan impact dilakukan di Laboratorium teknologi Material dan Produksi Kapal, Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.

2.8. Diagram Alir



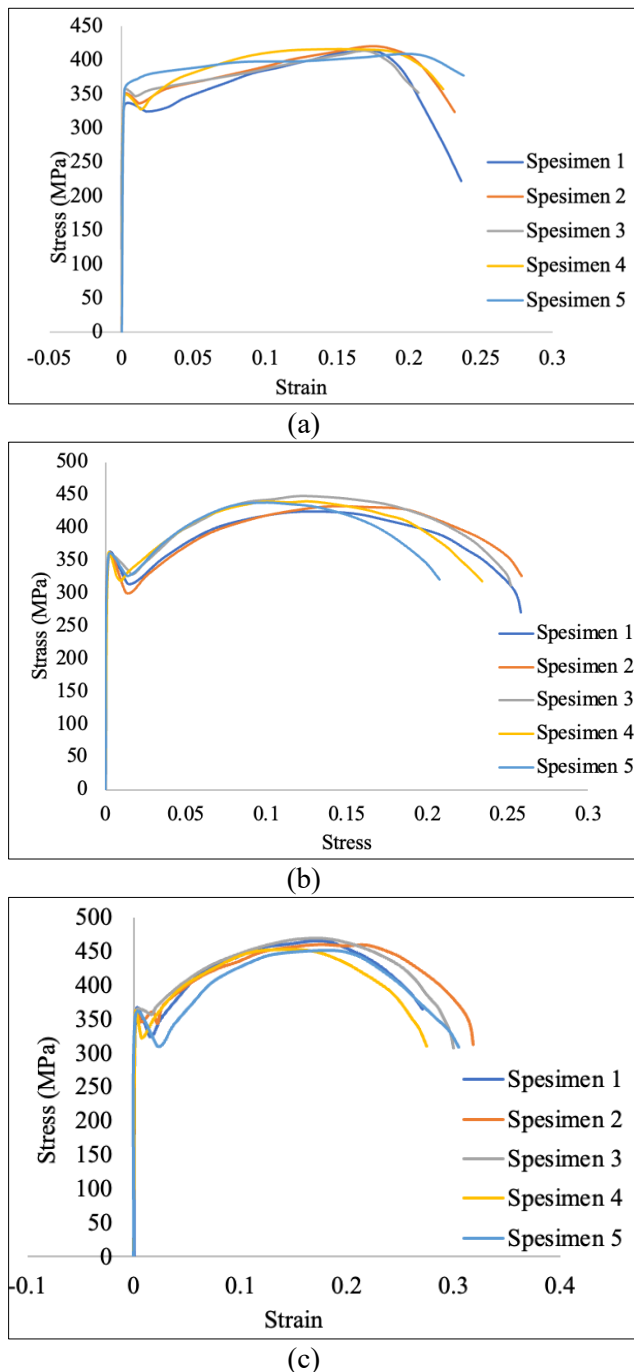
Gambar 9. Diagram alir.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data yang telah diperoleh, dilakukan serangkaian pengujian dan analisis untuk memperoleh hasil akhir penelitian ini.

3.1. Hasil Pengujian Tarik

Untuk pengujian tarik, sebanyak 15 spesimen baja ST40 yang telah mengalami proses pengelasan, repair, dan diuji tarik dengan variasi kuat arus *gouging*. Masing-masing variasi arus terdiri dari 5 spesimen. Kurva *stress strain* pengujian tarik dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. (a). Kurva Stress Strain Kuat Arus 160A. (b). Kurva Stress Strain Kuat Arus 180A. (c). Kurva Kuat Arus 200A.

Berdasarkan Gambar 10, kurva *stress strain* memperlihatkan variasi respon mekanik baja ST40 setelah proses *gouging repair* dan pengelasan

GTAW dengan tiga variasi arus. Pada kuat arus *gouging* 160 A, kurva *stress-strain* menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki pola deformasi yang relatif serupa. Tegangan meningkat tajam pada daerah elastis, kemudian berlanjut ke daerah plastis hingga mencapai tegangan maksimum sekitar 405–420 MPa pada regangan $\pm 0,15-0,20$. Spesimen 2 dan 4 menunjukkan kekuatan tarik tertinggi dan penurunan tegangan yang lebih stabil setelah mencapai puncak. Hal ini mengindikasikan kemampuan deformasi plastis yang lebih baik. Sebaliknya, spesimen 1 mengalami penurunan tegangan paling tajam setelah UTS, yang dapat menunjukkan *necking* lebih cepat atau adanya konsentrasi tegangan lokal pada daerah las atau HAZ.

Selanjutnya, Berdasarkan kurva *stress-strain* hasil uji tarik pada variasi kuat arus *gouging* 180 A, seluruh spesimen menunjukkan pola deformasi yang relatif seragam dengan kemampuan menahan beban tarik yang tinggi. Tegangan meningkat secara cepat pada daerah elastis, kemudian memasuki daerah plastis hingga mencapai tegangan maksimum (UTS) pada kisaran sekitar 425–440 MPa dengan regangan $\pm 0,10-0,16$. Spesimen 2 dan spesimen 3 menunjukkan nilai tegangan maksimum yang relatif lebih tinggi dan mempertahankan tegangan lebih stabil sebelum mengalami penurunan, yang mengindikasikan kombinasi kekuatan dan keuletan yang lebih baik. Sementara itu, spesimen 1 dan spesimen 5 mengalami penurunan tegangan lebih cepat setelah mencapai UTS, yang menunjukkan terjadinya *necking* lebih awal sebelum patah. Secara umum, penggunaan arus *gouging* 180 A menghasilkan kekuatan tarik yang cenderung lebih tinggi dan kurva yang lebih konsisten dibanding variasi arus yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa masukan panas pada kondisi tersebut mampu mendukung pembentukan sambungan las GTAW yang lebih baik.

Pada variasi kuat arus *gouging* 200 A, kurva *stress-strain* menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki pola deformasi yang relatif seragam. Tegangan meningkat cepat pada fase elastis, lalu memasuki fase plastis hingga mencapai UTS sekitar 450–465 MPa pada regangan $\pm 0,15-0,22$. Spesimen 2 dan 3 menunjukkan performa terbaik karena mampu mencapai tegangan puncak tinggi dengan penurunan tegangan yang lebih bertahap. Hal ini menunjukkan kekuatan tarik dan keuletan yang baik. Sebaliknya, spesimen 4 mengalami penurunan tegangan lebih awal setelah mencapai puncak, yang mengindikasikan *necking* lebih cepat. Secara umum, penggunaan kuat arus *gouging* 200 A menghasilkan sambungan las GTAW dengan kekuatan tarik tertinggi dan

distribusi kurva yang relatif konsisten antarspesimen. Hal ini mengindikasikan bahwa masukan panas pada kondisi tersebut cukup efektif untuk menghasilkan ikatan las yang baik dan meningkatkan kemampuan material dalam menahan beban tarik. Contoh patahan spesimen tarik dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Bentuk patahan spesimen tarik.

Rata-rata bentuk patahan serta nilai kuat tarik yang dihasilkan dijelaskan pada uraian berikut.

Hasil Pengujian Tegangan Tarik

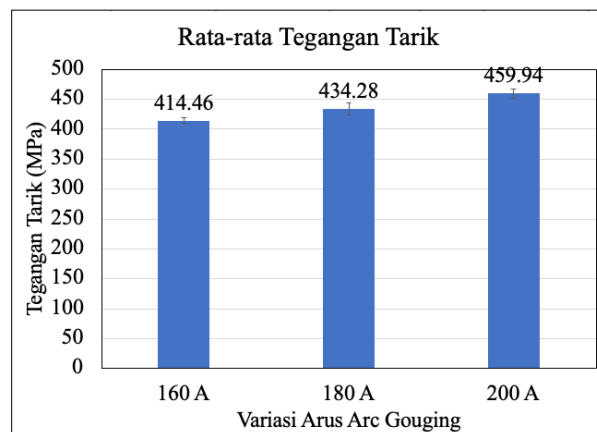
Pengujian tarik yang telah dilakukan pada spesimen 160 A, 180 A, dan 200 A, maka didapatkan rata-rata nilai tegangan tarik atau kekuatan tarik yang telah dihitung dapat dilihat pada Tabel 8 dan grafiknya dapat dilihat pada Gambar 12. Kekuatan tarik maksimal suatu material dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P_{Max}}{Area}$$

Tabel 8. Hasil Tegangan tarik baja ST40 pada pengelasan GTAW dan proses *arc gouging*.

Spesimen	Area (mm ²)	P Max (N)	σ Max (MPa)	Rata-rata (MPa)
160 A-1	125.00	51901	415	414.465
160 A-2	125.00	52482	420	
160 A-3	125.00	51654	413	
160 A-4	125.00	51013	408	
160 A-5	125.00	51992	416	
180 A-1	125.00	53000	424	434.288
180 A-2	125.00	54000	432	
180 A-3	125.00	56125	449	
180 A-4	125.00	55045	428	
180 A-5	125.00	54771	438	
200 A-1	125.00	58260	466	459.949
200 A-2	125.00	57527	460	
200 A-3	125.00	58626	469	

200 A-4	125.00	56672	453
200 A-5	125.00	56384	451



Gambar 12. Garfik rata-rata tegangan tarik baja ST 40 pada variasi arus *arc gouging*.

Berdasarkan hasil pengujian tarik pada spesimen baja ST40 yang telah mengalami proses *gouging* dan pengelasan GTAW, diperoleh nilai rata-rata tegangan tarik. nilai rata-rata tegangan tarik untuk variasi arus 160 A diperoleh sebesar 414.47 MPa, sementara untuk arus 180 A meningkat menjadi 434.29 MPa. Variasi 200 A menunjukkan rata-rata tertinggi 459.95 MPa. Hasil ini menunjukkan adanya tren peningkatan tegangan tarik seiring bertambahnya arus *gouging*, yang menandakan masukan panas lebih besar berpengaruh pada kekuatan sambungan las baja ST40. Hasil ini menegaskan bahwa variasi arus *gouging* memengaruhi sifat mekanik suatu baja. Hasil penelitian ini juga tidak selaras dengan penelitian analisa pengaruh variasi kuat arus *gouging* sambungan las SMAW pada baja SS400 yang mengalami tren peningkatan nilai rata-rata tegangan tarik karena perlakuan terlihat ketika kuat arus semakin tinggi maka dapat menyebabkan meningkatnya nilai tegangan tarik [25].

Hasil Pengujian Regangan Tarik

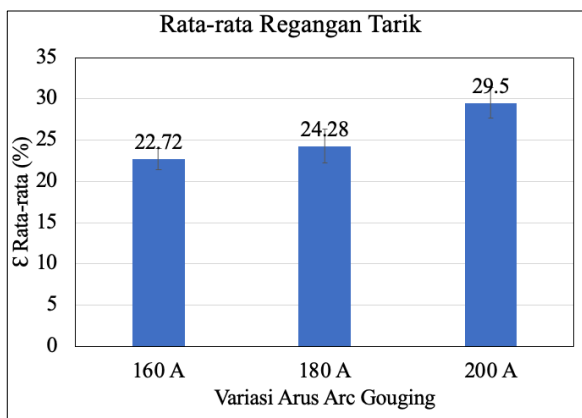
Berdasarkan hasil pengujian tarik, maka didapatkan rata-rata nilai regangan tarik pada Tabel 9 dan Gambar 13 yang menggunakan rumus regangan tarik sebagai berikut:

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

Tabel 9. Hasil regangan tarik baja ST40 pada pengelasan GTAW dan proses *arc gouging*.

Spesimen	ΔL Max (mm)	L ₀ (mm)	ε Max	Rata-rata
160 A-1	12	50	23.63	22.725
160 A-2	12	50	23.18	

160 A-3	10	50	20.64	
160 A-4	12	50	23.81	
160 A-5	11	50	22.36	
180 A-1	13	50	25.83	
180 A-2	13	50	25.84	
180 A-3	13	50	25.34	24.281
180 A-4	12	50	23.42	
180 A-5	10	50	20.98	
200 A-1	14	50	27.81	
200 A-2	16	50	31.84	
200 A-3	15	50	29.95	29.503
200 A-4	14	50	27.45	
200 A-5	15	50	30.46	



Gambar 13. Grafik rata-rata regangan tarik baja ST 40 pada variasi arus *arc gouging*.

Berdasarkan data regangan maksimum, hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata regangan tarik meningkat seiring bertambahnya arus *gouging*. Untuk arus 160 A, rata-rata regangan tarik sebesar 22,72%, sedangkan pada 180 A meningkat menjadi 24,28%, dan pada 200 A tertinggi yaitu 29,50%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa spesimen pada arus lebih tinggi mampu menahan deformasi lebih besar sebelum putus, sehingga material menunjukkan keuletan yang lebih tinggi. Hasil penelitian ini juga selaras dengan penelitian sebelumnya yang membahas analisa pengaruh variasi kuat arus *gouging* sambungan las SMAW pada baja SS400 yang mengalami nilai rata-rata regangan tarik yang meningkat [25].

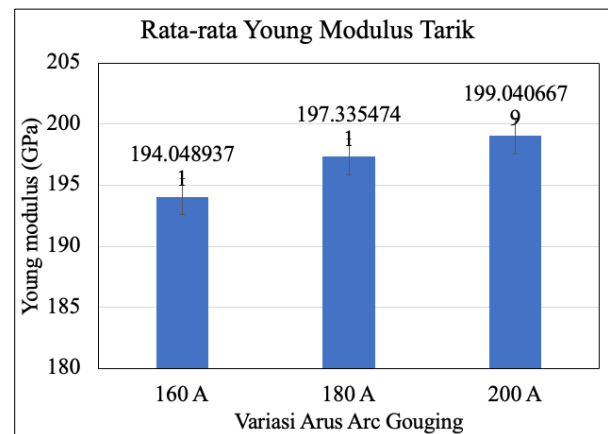
Modulus Elastisitas Tarik

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan rata-rata nilai modulus elastisitas pada Tabel 10 dan Gambar 14. Untuk rumus modulus elastisitas yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$young's\ modulus = \frac{Stress\ (MPa)}{\frac{Strain}{1000}}$$

Table 10. Hasil modulus elastisitas baja ST40 pada pengelasan GTAW dan proses *arc gouging*.

Spesimen	E (GPa)	E Rata-rata (GPa)
160 A-1	194	
160 A-2	195	
160 A-3	192	194.04
160 A-4	195	
160 A-5	194	
180 A-1	198	
180 A-2	197	
180 A-3	197	197.33
180 A-4	199	
180 A-5	197	
200 A-1	199	
200 A-2	200	
200 A-3	199	199.04
200 A-4	198	
200 A-5	199	



Gambar 14. Grafik rata-rata modulus elastisitas baja ST40 pada variasi arus *arc gouging*.

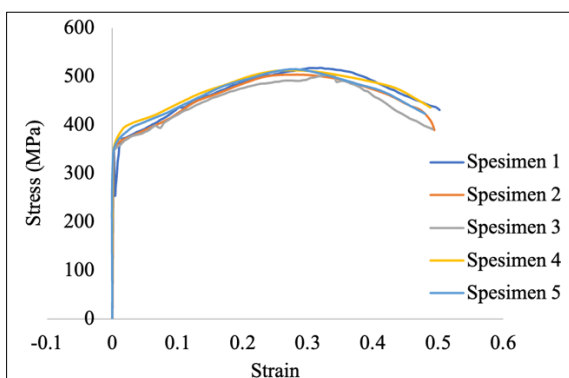
Berdasarkan hasil pengujian modulus elastisitas, terlihat adanya tren kenaikan nilai *E* rata-rata seiring bertambahnya arus *gouging* dari 160 A ke 200 A. Data ini menunjukkan bahwa peningkatan arus *gouging* memengaruhi sifat mekanik baja ST40 dengan meningkatkan kekakuan material, tanpa menurunkan kemampuan deformasi dalam batas elastis. Hal ini penting untuk menilai stabilitas dimensi sambungan las saat menerima beban tarik di aplikasi struktural, seperti pada bracket kapal atau sambungan pelat lambung.

Secara keseluruhan, hasil pengujian modulus elastisitas tarik menunjukkan bahwa semakin besar arus *gouging* yang digunakan, kekakuan sambungan las meningkat, sehingga sambungan lebih mampu menahan gaya tarik. Pola ini konsisten dengan peningkatan tegangan tarik dan regangan tarik, memberikan gambaran menyeluruh mengenai peningkatan sifat mekanik material secara kuantitatif.

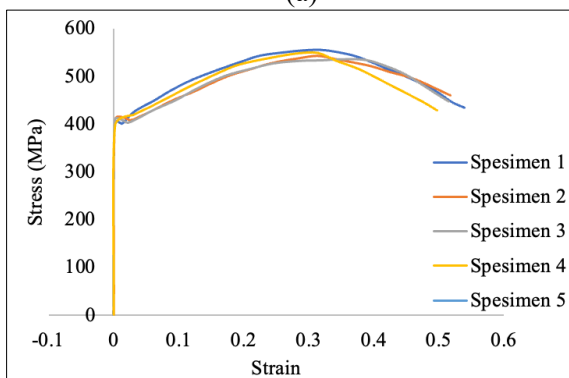
Hasil penelitian ini tidak selaras dengan jurnal sebelumnya yang membahas analisa pengaruh variasi kuat arus *gouging* sambungan las SMAW pada baja SS400 yang mengalami nilai tren rata-rata modulus elastisitas menurun, yang artinya semakin tinggi kuat arus maka semakin kaku materialnya [25].

3.2. Hasil Pengujian Tekuk *Three Point*

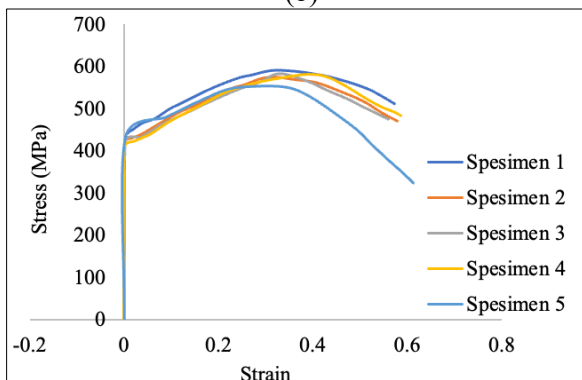
Untuk pengujian tekuk, sebanyak 15 spesimen baja ST40 yang telah mengalami proses pengelasan, *repair*, dan diuji tekuk dengan variasi kuat arus *gouging*. Masing-masing variasi arus terdiri dari 5 spesimen. Kurva *stress strain* pengujian tekuk dapat dilihat pada Gambar 15.



(a)



(b)



(c)

Gambar 15. (a). Kurva *stress strain* kuat arus 160 A. (b). Kurva *stress strain* kuat arus 180 A. (c). Kurva *stress strain* kuat arus 200 A.

Berdasarkan hasil pengujian tekuk tiga titik (*three-point bending test*) pada baja ST40 yang telah mengalami proses pengelasan GTAW dan *arc gouging* dengan variasi arus 160 A, 180 A, dan 200 A, diperoleh kurva *stress strain* seperti ditunjukkan pada Gambar 15.

Pada variasi kuat arus *gouging* 160 A kurva *stress-strain* hasil uji tekuk, seluruh spesimen menunjukkan pola deformasi yang relatif seragam dengan kemampuan menahan beban yang baik selama proses pembebanan. kurva uji tekuk menunjukkan pola deformasi yang relatif seragam. Tegangan meningkat hingga mencapai nilai maksimum sekitar 500–515 MPa pada regangan $\pm 0,25-0,35$. Setelah mencapai puncak, tegangan menurun secara bertahap. Hal ini menunjukkan bahwa sambungan masih memiliki kemampuan deformasi plastis yang baik dan tidak mengalami kegagalan mendadak.

Berdasarkan kurva *stress-strain* hasil uji tekuk pada variasi kuat arus *gouging* 180 A, seluruh spesimen menunjukkan pola deformasi yang relatif seragam dengan peningkatan tegangan hingga mencapai nilai maksimum sekitar 540–555 MPa pada regangan $\pm 0,25-0,35$. Setelah mencapai tegangan puncak, terjadi penurunan tegangan secara bertahap tanpa penurunan yang drastis, yang menunjukkan kemampuan deformasi plastis dan ketahanan tekuk yang masih baik. Spesimen 1 dan 5 menunjukkan tegangan maksimum yang sedikit lebih tinggi dibanding spesimen lainnya. Secara umum, penggunaan arus *gouging* 180 A menghasilkan kekuatan tekuk yang baik dan distribusi respons mekanik yang relatif konsisten antarspesimen, sehingga menunjukkan kualitas sambungan hasil pengelasan GTAW yang cukup stabil terhadap pembebanan tekuk.

Pada variasi kuat arus *gouging* 200 A kurva *stress-strain* hasil uji tekuk, seluruh spesimen menunjukkan peningkatan tegangan yang konsisten hingga mencapai tegangan maksimum sekitar 570–590 MPa pada regangan $\pm 0,25-0,35$. Nilai ini merupakan yang tertinggi dibanding variasi arus sebelumnya. Setelah mencapai tegangan puncak, sebagian besar spesimen mengalami penurunan tegangan secara bertahap yang menunjukkan kemampuan deformasi plastis dan ketahanan tekuk yang baik. Namun, Spesimen 5 mengalami penurunan tegangan yang lebih tajam dibanding spesimen lain, yang mengindikasikan deformasi lokal atau penurunan kemampuan menahan beban pada regangan tinggi. Secara umum, penggunaan arus *gouging* 200 A menghasilkan kekuatan tekuk tertinggi dengan respons mekanik yang relatif stabil, sehingga menunjukkan kualitas sambungan

hasil pengelasan GTAW yang lebih baik dalam menahan pembebanan tekuk.

Contoh bentuk patahan spesimen tekuk Baja ST40 dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Bentuk patahan spesimen tekuk.

Rata-rata nilai tegangan *bending* dan modulus tekuknya yang dihasilkan dijelaskan pada uraian berikut.

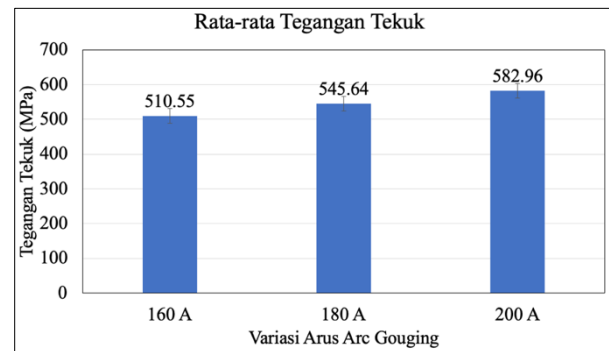
Tegangan Bending

Berdasarkan hasil pengujian tekuk, maka didapatkan rata-rata nilai tegangan tekuk pada Tabel 11 dan Gambar 17. Tegangan bending menggunakan lebar 31 mm dan tebal 5 mm dengan rumus sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2}$$

Tabel 11. Hasil pengujian regangan bending pada baja ST40.

Spesimen	Force (N)	L (mm ²)	σ Max (MPa)	Rata-rata σ (MPa)
160 A-1	4908	54.5	518	510.55
160 A-2	4776	54.5	504	
160 A-3	4776	54.5	504	
160 A-4	4860	54.5	513	
160 A-5	4881	54.5	515	
180 A-1	5258	54.5	555	545.65
180 A-2	5142	54.5	542	
180 A-3	5073	54.5	535	
180 A-4	5208	54.5	549	
180 A-5	5184	54.5	547	
200 A-1	5602	54.5	591	582.96
200 A-2	5456	54.5	576	
200 A-3	5526	54.5	583	
200 A-4	5520	54.5	582	
200 A-5	5243	54.5	583	



Gambar 17. Grafik rata-rata tegangan bending baja ST40 pada pengelasan GTAW dan proses *arc gouging*.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata tegangan lentur untuk arus 160 A adalah sekitar 504 MPa, untuk arus 180 A meningkat menjadi 540 MPa, dan untuk arus 200 A mencapai 582,96 MPa. Grafik hasil pengujian memperlihatkan tren kenaikan tegangan lentur seiring bertambahnya arus *gouging*. Tren ini menunjukkan bahwa sambungan las mampu menahan beban lentur lebih tinggi pada arus yang lebih besar, sehingga kekuatan lentur spesimen meningkat. Data uji tekuk ini menunjukkan bahwa arus *gouging* yang lebih tinggi cenderung meningkatkan kekuatan lentur baja ST40. Material pada arus tinggi menunjukkan distribusi beban yang lebih merata di seluruh penampang, sehingga kekakuan dan kekuatan lentur meningkat. Tren grafik menunjukkan kenaikan bertahap dari 160 A ke 200 A, sejalan dengan pengamatan pada tegangan dan regangan tarik. Hal ini menandakan bahwa arus yang lebih tinggi memperkuat performa sambungan las dalam menghadapi beban lentur, tanpa mengurangi keuletan material secara signifikan.

Modulus Elastisitas Bending

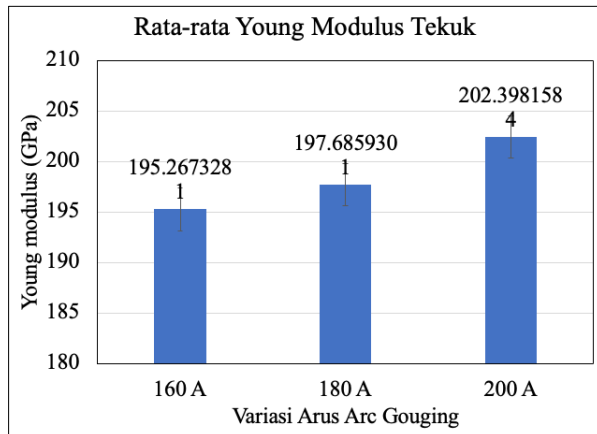
Berdasarkan hasil pengujian tekuk yang telah dilakukan didapatkan rata-rata nilai modulus elastisitas pada Tabel 12 dan Gambar 18. Untuk rumus modulus elastisitas tekuk yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$young's\ modulus = \frac{Stress\ (MPa)}{\frac{Strain}{1000}}$$

Tabel 12. Hasil pengujian modulus elastisitas tekuk baja ST40.

Spesimen	E (GPa)	Rata-rata E (GPa)
160 A-1	195	195.26
160 A-2	195	
160 A-3	197	

160 A-4	197	
160 A-5	192	
180 A-1	196	
180 A-2	199	
180 A-3	201	197.68
180 A-4	198	
180 A-5	196	
200 A-1	206	
200 A-2	199	
200 A-3	200	202.39
200 A-4	203	
200 A-5	205	



Gambar 18. Grafik rata-rata modulus elastisitas tekuk baja ST40 pada pengelasan GTAW dan proses *arc gouging*.

Berdasarkan Tabel 12, hasil pengujian menunjukkan rata-rata modulus elastisitas untuk arus *gouging* 160 A sebesar 195,27 GPa, meningkat menjadi 197,69 GPa pada 180 A, dan tertinggi 202,40 GPa pada 200 A. Lalu tren grafik memperlihatkan kenaikan yang konsisten seiring bertambahnya arus *gouging*, menandakan bahwa material menjadi semakin kaku saat arus meningkat. Kenaikan modulus elastisitas ini dapat dijelaskan secara mekanis yaitu arus *gouging* yang lebih tinggi meningkatkan energi yang diterima sambungan las, sehingga spesimen mampu menahan deformasi elastis lebih besar sebelum mengalami perubahan permanen. Dengan kata lain, sambungan las pada arus tinggi lebih stabil terhadap pembebanan lentur, menunjukkan distribusi beban yang lebih merata di seluruh penampang.

Secara keseluruhan, pengujian tekuk memperkuat kesimpulan sebelumnya pada uji tarik, yaitu bahwa peningkatan arus *gouging* meningkatkan performa mekanik sambungan las, khususnya dalam hal kekuatan lentur dan kekakuan. Tidak hanya meningkatkan tegangan lentur, tetapi juga meningkatkan kekakuan material terhadap deformasi elastis. Dengan kata lain, sambungan las pada arus tinggi mampu menahan

beban lentur lebih baik tanpa mengalami perubahan permanen yang signifikan

3.3. Hasil Pengujian Impak

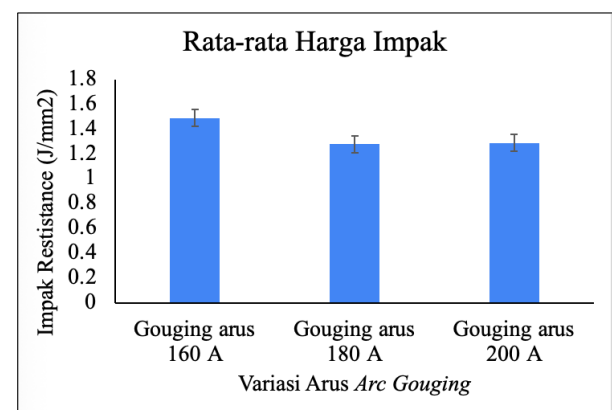
Berdasarkan hasil pengujian impak yang telah dilakukan didapatkan rata-rata harga impak pada Tabel 13, Gambar 19, dan Gambar 20.



Gambar 19. Patahan spesimen impak baja ST40.

Tabel 13. Hasil nilai uji impak baja ST40 pada pengelasan GTAW dan proses *arc gouging*.

Spesimen	Energi Impak (J)	Luas Area (mm ²)	Nilai Impak (J/mm ²)	Rata-rata Impak (J/mm ²)
160 A-1	169	109	1.55	
160 A-2	164	106	1.54	
160 A-3	148	109	1.36	1.49
160 A-4	168	111	1.52	
160 A-5	116	108	1.07	
180 A-1	160	113	1.42	
180 A-2	90	101	0.89	
180 A-3	215	109	1.97	1.28
180 A-4	171	112	1.53	
180 A-5	84	105	0.80	
200 A-1	92	110	0.84	
200 A-2	140	113	1.24	
200 A-3	102	112	0.91	1.29
200 A-4	196	107	1.83	
200 A-5	184	108	1.71	



Gambar 20. Grafik rata-rata nilai impak baja ST40.

Berdasarkan hasil uji impak terhadap spesimen baja ST40 yang telah mengalami proses pengelasan GTAW dan *arc gouging* dengan variasi arus 160A, 180A, dan 200A, diperoleh bahwa rata-rata harga impak mengalami tren naik turun. Nilai impak rata-rata tertinggi diperoleh pada spesimen *gouging* 160 A sebesar 1,49 J/mm², kemudian menurun pada arus 180 A menjadi 1,28 J/mm², dan sedikit meningkat kembali pada arus 200 A sebesar 1,29 J/mm². Lalu terdapat beberapa spesimen yang tidak memenuhi standar deviasi, yaitu spesimen 160 A-5, 180 A-3, 180 A-5, 200 A-1, dan 200 A-4 sehingga tidak dihitung dalam rata-rata harga impak. Pada arus *gouging* 160A, masukan panas relatif moderat sehingga pendinginan masih cukup cepat, menghasilkan butir lebih halus dan meningkatkan ketangguhan impak. Sedangkan pada arus ke 180A meningkatkan *heat input*, membuat pendinginan lebih lambat, butir HAZ lebih kasar, serta muncul zona getas yang menurunkan nilai impak. Pada 200A, meskipun *heat input* lebih besar, terdapat variasi mikrostruktur akibat kombinasi over-tempering dan softening lokal sehingga sebagian area menjadi lebih ulet, menyebabkan nilai impak kembali naik. Maka penggunaan arus *gouging* yang terlalu tinggi cenderung menurunkan ketangguhan baja ST40, sedangkan arus yang lebih rendah memberikan performa ketangguhan terbaik.

Hal ini tidak selaras dengan hasil penelitian yang membahas analisa pengaruh variasi kuat arus *gouging* sambungan las SMAW pada baja SS400 yang mengalami nilai tren rata-rata modulus elastisitas meningkat [25].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, variasi kuat arus arc *gouging* berpengaruh terhadap sifat mekanik baja ST40 hasil pengelasan GTAW. Pada uji tarik, peningkatan arus *gouging* cenderung meningkatkan kemampuan sambungan dalam menahan beban aksial. Arus 200 A menghasilkan rata-rata tegangan tarik, regangan, dan modulus elastisitas tertinggi, sehingga menunjukkan kekuatan dan keuletan sambungan yang lebih baik.

Pada uji tekuk three-point bending, arus 200 A juga menghasilkan tegangan lentur dan modulus elastisitas tekuk tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa sambungan las pada arus tersebut lebih kaku, stabil, dan mampu mendistribusikan beban lentur secara lebih baik.

Sementara itu, uji impak menunjukkan bahwa arus 160 A memiliki nilai ketangguhan rata-rata sedikit lebih tinggi secara deskriptif dibandingkan 180 A dan 200 A. Namun, perbedaan

tersebut tidak signifikan secara statistik. Dengan mempertimbangkan hasil uji tarik, uji tekuk, dan uji impak, arus *gouging* 200 A dapat dinilai sebagai kondisi paling optimal karena memberikan kombinasi terbaik antara kekuatan, keuletan, dan kekakuan sambungan las.

Secara keseluruhan, arus *gouging* merupakan parameter penting dalam *repair welding* baja ST40. Penggunaan arus 200 A direkomendasikan untuk aplikasi struktural, termasuk konstruksi kapal, dengan tetap memperhatikan pengendalian proses agar tidak muncul cacat lokal yang dapat menurunkan kualitas sambungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. G. Brandt and H. Weiler, "Welding and Cutting," 2000, doi: 10.1002/14356007.A28_203.
- [2] H. Wirjosumarto and Okumura Toshi *Teknologi pengelasan logam*, Cet. ke-7. Pradnya Paramita, 1996. Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000797322910848.bib?lang=en>
- [3] M. T. I. Sianturi, U. Budiarto, and I. P. Mulyatno, "JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisa Kekuatan Tarik dan Impak Baja ST 40 Pengelasan Flux-Cored Arc Welding (FCAW) Posisi 4G dengan Variasi Arus Pengelasan," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 7, no. 4, 2019, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [4] Z. Wang, J. Liu, Y. Zhou, M. Liu, and J. Wang, "The Corrosion Resistance of Weathering Steels in Atmospheric Exposure and Laboratory-accelerated Corrosion Tests," John Wiley & Sons, Inc., 2013, pp. 651–656. doi: 10.1007/978-3-319-48764-9_81.
- [5] J. Tolloczko, "Bi-Steel in tall buildings," *New steel construction*, vol. 9, no. 6, pp. 34–35, 2001.
- [6] W. Liu, "Development status and application prospect of non-quenched tempered steel," *Heat Treatment of Metals*, 2011, [Online]. Available: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTO TAL-JSRC201103017.htm
- [7] J. Tolloczko, "Bi-Steel in tall buildings," *New steel construction*, vol. 9, no. 6, pp. 34–35, 2001.
- [8] M. Ma and H. Yi, "Lightweight Car Body and Application of High Strength Steels,"

- Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 187–198. doi: 10.1007/978-3-642-17665-4_20.
- [9] J. S. Jensen, “Maritime Welding Handbook Welding and Related Processes for Repair and Maintenance Onboard 10th edition,” 2009.
- [10] Dadang, Tarkina, and Sukaini, “Kelas-11-Edisi-2013-Teknik-Las-GTAW-Semester-3-52667”.
- [11] DSc Dževad Hadžihafizović, “Welding handbook,” 2023.
- [12] S. / Mak, K. X. Kementarian, D. Teknologi, K. Susanta, and K. Syauqi, *DASAR-DASAR TEKNIK PENGELASAN DAN FABRIKASI LOGAM*. 2023. [Online]. Available: <https://buku.kemdikbud.go.id>
- [13] H. Thielsch, “When are weld defects rejectable,” *Mater Eval*, 1969, [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=110267>
- [14] J. R. Matthews, C. V Hyatt, and J. F. Porter, “Future treatment of weld acceptance : The significance of incomplete fusion discontinuities in low structural transition temperature gas metal arc weldments,” *Mater Eval*, vol. 59, no. 4, pp. 523–530, 2001, [Online]. Available: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=943817>
- [15] S. A. David and J. M. Vitek, “Principles of weld solidification and microstructures,” 1992, [Online]. Available: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/6907344-principles-weld-solidification-microstructures>
- [16] D. Schröpfer, J. Witte, A. Kromm, and T. Kannengiesser, “Stresses in repair welding of high-strength steels—part 2: heat control and stress optimization,” *Welding in the World*, vol. 68, no. 10, pp. 2537–2551, Oct. 2024, doi: 10.1007/s40194-024-01731-7.
- [17] N. Brown, A. Radin, and X. Lu, “Notching machine and method for mechanical testing specimens,” 1992. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US5319983A/en>
- [18] J. Cornu, “Mechanical Testing of Welds,” Springer Berlin Heidelberg, 1988, pp. 35–48. doi: 10.1007/978-3-662-11049-2_5.
- [19] L. P. Ketaren, U. Budiario, and A. W. B. Santosa, “JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisa Pengaruh Variasi Kampuh Las dan Arus Listrik Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Sambungan Las GMAW (Gas Metal ARC Welding) Pada Aluminium 6061,” *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 7, no. 4, 2019, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [20] H. Jelitto, F. Hackbarth, and G. A. Schneider, “Method for determining cracking resistance of material samples, involves inserting material sample into measuring device and applying bending force at material sample,” 2010. [Online]. Available: <https://www.freepatentsonline.com/DE102009034188.html>
- [21] D. G. Maylano, U. Budiarto, and A. W. B. Santosa, “JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisis Pengaruh Variasi Sudut Kampuh Double V Pada Sambungan Las SMAW (Shield Metal Arc Welding) Baja St 37 Terhadap Kekuatan Tarik, Tekuk dan Impact,” *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 10, no. 1, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [22] H. Adhyawantara and N. Y. Nugroho, “PENGARUH HOLDING TIME PADA BAJA ST 40 DENGAN PENGELASAN FCAW TERHADAP UJI TARIK DAN KEKERASAN”.
- [23] S. A. Saputro, A. Andoko, and P. Puspitasari, “Evolution of Residual Stress, Crystal Orientation, and Texture on Preheating Weld Treatment of Low Carbon Steel ASTM A572 Grade 42,” *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology (JMEST)*, vol. 8, no. 1, p. 15, Feb. 2024, doi: 10.17977/um016v8i12024p015.
- [24] M. M. Jafari, A. Afsari, A. Behgozin, and S. Heidari, “Journal of Welding Science and Technology of Iran The effect of filler metal on the mechanical and tribological properties of AISI 1.6959 steel joint using TIG welding process و م ان ا كاری و نوری و م . Downloaded from *jwsti.iut.ac.ir on*, vol,” 8, no. 2, pp. 2025–2034, 2023.
- [25] D. S. Taruna, U. Budiarto, and Rindo. Good, “Analisa Pengaruh Variasi Kuat Arus Gouging Sambungan Pengelasan SMAW Pada Baja SS400 Terhadap Kekuatan Uji Tarik, Impak, Dan Struktur Mikro”.
- [26] E. N. Laksono, A. W. B. Santosa, and S. Jokosisworo, “JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Pada Sambungan Las Baja ST 40 Akibat Pengelasan Flux-Cored Arc Welding (FCAW) Dengan Variasi Suhu Normalizing,” *Jurnal Teknik Perkapalan*,

vol. 8, no. 4, p. 520, 2020, [Online].
Available:
<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>

- [27] “AWS-A5-18-Carbon-Steel-Electrodes-Rods-for-Gas-Shielded-Arc-Welding”.
- [28] S. Kou, “Frontmatter,” in *Welding Metallurgy*, Wiley, 2002. doi: 10.1002/0471434027.fmatter.
- [29] Muhammad Tedy, “Proses Pengelasan GTAW.” Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://muhamadtedy.blogspot.com/2015/10/pengelasan-gtaw.html>
- [30] “Repair and Maintenance Welding Handbook Second Edition XA00086820.”
- [31] “Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,” Feb. 01, 2008, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/E0008_E0008M-08.
- [32] “Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility,” Apr. 01, 2009, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/E0290-09.
- [33] “Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials,” Apr. 01, 2024, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/E0023-24.
- [34] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, “Materials Science and Engineering An Introduction,” Jan. 2018.
-