



ISSN 2338-
0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

ANALISIS PENGARUH VARIASI KUAT ARUS DAN VARIASI TEMPERATUR *PREHEAT* PADA PENGELASAN SMAW TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN KEKUATAN TEKUK BAJA ST 60

Afriando Lumban Batu¹⁾, Untung Budiarto¹⁾, Parlindungan Manik¹⁾

¹⁾Laboratorium Pengelasan

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

*e-mail : april0404april@gmail.com

Abstrak

Baja ST 60 merupakan baja jenis karbon sedang yang memiliki rata-rata tegangan 647,71 MPa, regangan 0,22% dan Modulus Young 208,99 GPa yang sering digunakan pada konstruksi kapal. Pada saat pengelasan sering kali terjadi perbedaan tegangan didaerah pengelasan yang menyebabkan kurang maksimalnya hasil pengelasan, umum nya metode pengelasan yang digunakan adalah pengelasan SMAW. Preheat merupakan metode yang dapat digunakan untuk mengurangi perbedaan tegangan antara spesimen dengan elektroda. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menginvestigasi dampak dari variasi kuat arus dan suhu preheat terhadap kekuatan tarik dan kekuatan tekuk pada baja ST 60. Standar pengujian spesimen dibuat mengikuti aturan standar uji ASTM E8. Nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 767 MPa pada spesimen preheat 250^oC dengan kuat arus pengelasan 100 A dan nilai regangan tekuk tertinggi sebesar 4,63 % terdapat pada spesimen preheat 250^oC dengan kuat arus pengelasan 100 A. Sementara untuk nilai modulus tertinggi sebesar 219,93 GPa pada spesimen preheat 250^oC dengan kuat arus pengelasan 115 A. Spesimen tanpa preheat yang memiliki nilai tegangan tekuk tertinggi sebesar 753,70 MPa dan nilai regangan tekuk tertinggi sebesar 0,86% dengan kuat arus pengelasan 100 A. Sementara itu, spesimen dengan preheat suhu 350^oC dan kuat arus pengelasan 100 A menunjukan nilai modulus elastisitas tertinggi sebesar 905,94 GPa. Dari hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penerapan perlakuan panas dan kuat arus pengelasan dapat meningkatkan kekuatan tarik, namun mengurangi kekuatan tekuk benda.

Kata Kunci : Baja ST 60, Pengelasan SMAW, Preheat, Kekuatan tarik, Kekuatan tekuk.

1. PENDAHULUAN

Dalam era globalisasi yang modern, kemajuan di bidang ilmu pengetahuan dan teknologi telah mencapai perkembangan yang berarti. Perkembangan yang pesat mendorong pelaku industri bersaing untuk menghasilkan inovasi. Seperti sektor perkapalan yang memiliki keterkaitan kuat dengan logam baja sebagai bahan baku, Sehingga dibutuhkan inovasi untuk menekan biaya pada penggunaan Baja. Baja memiliki beberapa sifat, seperti sifat fisik, mekanik, dan kimia, Sehingga diperlukan teknik khusus dalam pengolahannya. Hal ini bertujuan agar setiap unsur

baja dapat diaplikasikan dan dimanfaatkan sesuai dengan kebutuhan.

Baja ialah logam campuran yang terbuat dari unsur dasar besi. Baja dapat diproses melalui berbagai metode seperti pengecoran, pencaian, atau penempaan, dengan kandungan karbon menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi sifat kekerasan dan kekuatan baja [1]. Besi murni memiliki karakteristik yang kurang kuat dan rentan terhadap korosi, meskipun memiliki tingkat keuletan yang sangat baik. Logam besi pada material baja dicampurkan dengan sejumlah unsur lain seperti karbon, dengan tujuan mengubah karakteristiknya. Sejumlah logam yang sering

ditemukan dalam paduan baja meliputi nikel, mangan, aluminium, dan bismut. Selain itu, unsur-unsur yang lebih jarang ditemui seperti titanium, vanadium, kromium, tungsten, molibdenum, boron, dan niobium, juga turut digunakan dalam tahap pembuatan baja. Perbandingan komposisi dalam baja memiliki dampak pada sifat dan karakteristiknya. Baja sering kali mendapat tambahan unsur karbon (C) untuk meningkatkan kekuatannya. Konsentrasi karbon pada baja dapat membuat material menjadi lebih kuat, namun juga membuatnya kurang elastis. Kandungan karbon dalam baja bervariasi, dengan rentang mulai dari 0,2% hingga 2,1% dari total beratnya. Apabila persentase karbon terlalu tinggi, baja dapat menjadi rapuh dan mudah patah. Sehingga dibutuhkan teknik yang tepat untuk melakukan penyambungan atau penggabungan antar baja, proses penggabungan tersebut dilakukan dengan pengelasan.

Menurut American Welding Society (AWS), Proses penyatuan logam atau paduan logam melalui metalurgi, yang terjadi saat dalam kondisi leleh atau cair, dikenal sebagai proses pengelasan. Dengan kata lain, proses ini melibatkan pemanfaatan energi panas untuk menyatukan logam satu dengan logam lainnya [2]. Proses pengelasan menggunakan metode *electric arc welding* dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori tergantung pada jenis elektroda yang digunakan, yaitu *Consumable Electrode* dan *Non-Consumable Electrode*. Elektroda yang berfungsi sebagai pengisi logam las pada elektroda habis pakai akan terbakar habis. Sebaliknya, pengelasan elektroda non-konsumsi tidak mengakibatkan elektroda terbakar selama pengoperasian. Proses pengelasan yang termasuk dalam kategori *Consumable Electrode* melibatkan berbagai metode, Contoh metode pengelasan dengan *Consumable Electrode* meliputi *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), *Gas Metal Arc Welding* (GMAW/MIG), *Submerged Arc Welding* (SAW), dan *Flux Core Arc Welding* (FCAW). Sebaliknya, pengelasan dengan *Non-Consumable Electrode* dapat ditemukan dalam teknik *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW/TIG).

Shielded Metal Arc Welding (SMAW), yang sering dikenal sebagai pengelasan dengan elektroda terlindung, merupakan suatu metode pengelasan yang menggunakan busur listrik sebagai sumber energi panas untuk mencapai titik leleh logam. [3]. Ketika melakukan pengelasan menggunakan elektroda berlapis, terjadi pembentukan busur listrik antara ujung elektroda dan permukaan logam dasar atau objek kerja, menghasilkan panas yang menyebabkan pelarutan elektroda dan benda kerja tersebut. Proses

pembentukan busur listrik diatur oleh mesin las. Elektroda yang digunakan adalah kawat yang dilapisi dengan lapisan pelindung fluks. Dalam konteks proses pengelasan, tegangan (*voltage*) memiliki dampak yang signifikan terhadap tingkat pelelehan yang terjadi pada material yang sedang diolah.

Pemilihan intensitas arus pengelasan memiliki dampak yang signifikan terhadap karakteristik hasil pengelasan, karena hal ini berpengaruh pada kualitas sambungan seperti kekuatan geser, tingkat kekerasan, dan ketahanan terhadap dampak luar. Besar arus yang diterapkan tergantung pada jenis bahan dan dimensi material. Intensitas arus juga berperan dalam menentukan tingkat penetrasi dan laju pelelehan, jika arusnya terlalu rendah proses pelelehan dari ujung elektroda menjadi lebih lambat, sementara jika arusnya terlalu tinggi maka pelelehan dari ujung elektroda menjadi lebih cepat.

Teknik perlakuan panas diciptakan dengan tujuan untuk mengubah struktur mikro dan karakteristik logam. Hal ini dicapai dengan menerapkan panas pada fluktuasi suhu tertentu dan mengontrol laju pendinginan, tanpa perlu mengubah komposisi kimia logam [4]. Tahap pemanasan awal melibatkan kenaikan suhu logam dasar sebelum proses pengelasan, dengan maksud untuk meningkatkan suhu logam dasar dan mengubah struktur mikro sesuai kebutuhan. Proses pemanasan awal sebelum pengelasan berdampak pada laju pendinginan yang lebih lambat di wilayah logam las dan *HAZ*. *Preheat* diperlukan untuk mencegah terjadinya retakan akibat munculnya struktur martensit pada logam las dan *HAZ* yang dapat disebabkan oleh laju pendinginan yang tinggi.

Diklasifikasikan sebagai baja karbon rendah, baja ST60 memiliki kandungan karbon yang melampaui 0,3% namun kurang dari 0,6%, baja ST60 dikategorikan sebagai baja karbon sedang. Identifikasi sebagai ST60 menandakan bahwa baja ini memiliki kekuatan tarik di bawah 60 kg/mm², di mana penamaan "ST" diikuti oleh angka menunjukkan kekuatan tarik minimum dalam satuan kg/mm² [5]. Baja ST60 menunjukkan nilai kekerasan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan sifat kekerasan besi cor.

2. METODE DAN BAHAN

2.1. Pengumpulan Data

Baja seringkali menjadi material yang lazim dipakai dalam industri konstruksi karena memiliki karakteristik yang memudahkan proses pembentukan, elastisitas, kekuatan, dan ketahanan yang baik [6]. Kandungan karbon memiliki peran penting dalam menentukan sifat kekerasan dan

kekerapanan baja, sehingga karakteristik keras atau lunaknya tergantung pada persentase karbon yang ada. Kandungan karbon dalam baja bervariasi, berkisar antara 0,2% hingga 2,1%, bergantung pada kelas atau tipe baja

Baja terdiri dari tiga klasifikasi utama, yaitu baja karbon rendah (*Low Carbon Steel*), yang ditandai oleh kandungan karbon yang tidak melebihi 0,3%. Karakteristik utama dari baja ini meliputi kemampuan untuk ditempa dengan mudah, diolah dengan mesin, serta mampu menjalani proses perlakuan pengelasan dengan relatif mudah. Dibandingkan dengan baja karbon rendah, baja karbon sedang menampilkan kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi, dengan kandungan karbon berkisar antara 0,3% hingga 0,6%. Baja karbon menengah seringkali diterapkan dalam berbagai konteks, termasuk dalam pembuatan baut, mur, piston, roda gigi dan konstruksi lambung [7]. Baja karbon tinggi (*High Carbon Steel*) memiliki kandungan karbon yang bervariasi, dengan konsentrasi karbon di atas 0,3% hingga 0,6%, dan antara 0,7% hingga 1,3% untuk masing-masing kelas baja. Jenis baja ini terkenal akan kekuatan tarik yang tinggi, sehingga sering diterapkan dalam pembuatan perkakas seperti pegas, perkakas, gergaji, dan sejenisnya [8].

Dalam studi ini, bahan yang dianalisis adalah baja karbon menengah, khususnya baja ST 60 yang umumnya diterapkan dalam pembangunan struktur kapal. kandungan karbon sekitar 0,5012%, Baja ST 60 termasuk dalam kategori baja karbon menengah, di mana kemampuan beradaptasi terhadap perlakuan panas (*heat treatment*) memungkinkan untuk pembentukan baja yang telah mengalami proses pengerasan [9]. Material ST 60 menunjukkan nilai uji tarik rata-rata sekitar 647,71 kg/mm², regangan sebesar 0,22%, dan modulus young sekitar 2884,99 N/mm².

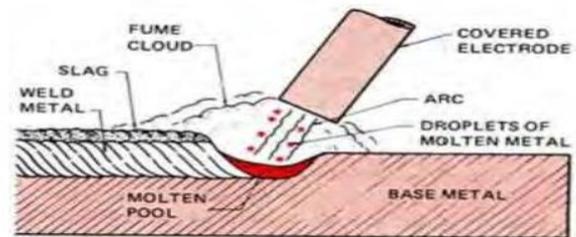


Gambar 1. Baja ST 60

Menurut *American Welding Society (AWS)*, Proses pengelasan dapat dinyatakan sebagai penyatuan metalurgi yang terjadi saat logam atau paduan logam meleleh atau cair. Dapat disimpulkan, pengelasan merujuk pada teknik penyatuan logam yang mengandalkan energi

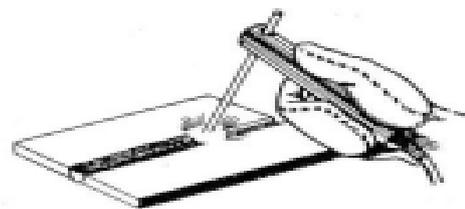
panas. Dalam konteks penelitian ini, metode pengelasan yang diterapkan adalah SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*).

Metode pengelasan logam arus terlindung (SMAW), juga dikenal sebagai pengelasan dengan elektroda terlindung, menggunakan nyala busur listrik hingga menghasilkan panas untuk mencapai titik leleh logam.



Gambar 2. Skema Pengelasan SMAW

Karakteristik arus pengelasan sangatlah vital dalam proses pengelasan, memiliki peranan yang sangat penting terhadap kedalaman penetrasi las. Kedalaman penetrasi las memiliki implikasi yang signifikan terhadap sifat mekanis dari bahan yang sedang dihubungkan. Penggunaan arus yang rendah dapat mengakibatkan penetrasi las yang kurang memadai, sementara arus yang terlalu tinggi dapat menyebabkan garis las yang terlalu lebar, yang berpotensi menyebabkan deformasi pada daerah las [10]. Dalam penelitian ini, kuat arus 110 A dan 115 A digunakan serta pada posisi pengelasan 1G. Posisi 1G atau yang sering disebut sebagai posisi bawah tangan, mengacu pada metode pengelasan yang dilakukan pada permukaan yang datar dan dilakukan di bawah posisi tangan pengelas [11]. Elektroda yang digunakan pada adalah E7018



Gambar 3. Kondisi Pengelasan 1G [11].

Preheat menurut definisi dari *American Welding Society (AWS)*, merujuk pada pemberian panas pada logam yang akan dihubungkan, dengan tujuan mencapai dan menjaga suhu *preheat*. Sementara itu, suhu *preheat* mengacu pada suhu logam dasar di sekitar zona yang akan disambung sebelum memulai proses pengelasan [12]. *Preheating* dilaksanakan dengan maksud mengurangi gradien suhu. Saat melibatkan diri

dalam pengelasan busur, digunakan sumber panas dengan suhu tinggi.

Uji tarik merupakan metode evaluasi kekuatan material yang bersifat merusak (*Destructive Testing*) yang digunakan untuk menilai karakteristik tarik suatu bahan. Melalui uji tarik, kita dapat mengamati respons material terhadap gaya tarik dan menentukan sejauh mana material tersebut dapat mengalami pertambahan panjang. Proses uji tarik melibatkan pemberian gaya tarik secara bertahap pada spesimen dengan memperhatikan parameter seperti batas mulur, perpanjangan, kekuatan tarik, dan pengecilan luas [13].

Berikut ini adalah sifat yang dihasilkan dari pengujian tarik :

1. Tegangan tarik maksimum (σ)

Tegangan tarik maksimum adalah tegangan yang dapat diatasi oleh sebuah bahan sebelum mengalami kegagalan struktural atau patah. Sebagai contoh, rumus kekuatan tarik material adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- F : Gaya (N)
 A : Luas penampang (m²)
 σ : Tegangan (N/ m² atau pa)

2. Regangan maksimum

Regangan maksimum suatu material adalah panjang yang tambah setelah patahan terhadap panjang awalnya.

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

- e : Regangan (%)
 ΔL : Pertambahan Panjang (m)
 L₀ : Panjang Awal (m)

3. Modulus elastisitas

Modulus elastisitas atau modulu young adalah ukuran kekuatan pada sebuah material.

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

- E : Modulus Elastisitas (GPa)
 σ : Tegangan Maksimum (MPa)
 e : Regangan (%)

Uji tekuk suatu bentuk evaluasi visual terhadap kualitas suatu bahan dapat dilakukan melalui pengujian tekuk, yang sering disebut sebagai pengujian lentur. Uji lentur berguna dalam menentukan kekuatan material setelah diberi beban

dan elastisitas sambungan las di zona yang terpengaruh panas (HAZ) serta wilayah las. Sifat yang dihasilkan pada pengujian tekuk sama seperti uji tarik.

2.2. Tahap Penelitian

Penelitian ini mencakup beberapa tahap, antara lain:

A. Pengumpulan Bahan

Baja ST 60 yang dipakai merupakan contoh baja karbon menengah (*Medium Carbon Steel*), dengan dimensi panjang 1240 mm, lebar 710 mm, dan ketebalan 10 mm.

B. Pemotongan Plat

Material baja ST 60 dipotong menjadi 12 bagian dari ukuran awal yang memiliki panjang 1240 mm, lebar 710 mm, dan ketebalan 10 mm.

C. Pembuatan Kampuh

Pada penelitian ini, peneliti menggunakan *Single V-Butt joint* dengan sudut 60^o.

D. Proses Heat Treatment

Sebelum masuk ke tahap pengelasan, spesimen diberikan heat treatment terlebih dahulu. Heat treatment tersebut terbagi menjadi 3 bagian yaitu, *non preheating*, *preheat 250 °C* dan *preheat 350 °C*. Perlakuan preheating dilakukan dengan cara memasukan bahan uji kedalam mesin *furnace* selama 10 menit.

E. Pengelasan Baja ST 60

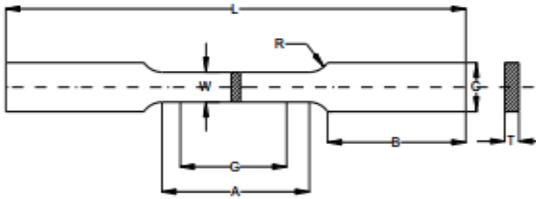
Setelah pembentukan sudut kampuh, dilakukan proses perlakuan panas dengan variasi suhu *preheating 250 °C* dan *350 °C*, Selanjutnya dilakukan proses pengelasan dengan menggunakan metode pengelasan SMAW (Shield Metal Arc Welding) di laboratorium las "POLITEKNIK NEGERI SEMARANG" dan laboratorium las "UNIVERSITAS DIPONEGORO" dengan detail sebagai berikut:

- | | |
|---------------------|--|
| a. Jenis Pengelasan | : SMAW |
| b. Mesin Las | : Krisbow 450W |
| c. Jenis Elektroda | : Elektroda E-7018 |
| d. Logam Induk | : Baja ST 60 |
| e. Voltage | : 29 V |
| f. Arus (ampere) | : 100 A dan 115 A |
| g. Heat Input | : - 10615,384 joule/cm
- 12207,692 joule/cm |

F. Pembuatan Spesimen

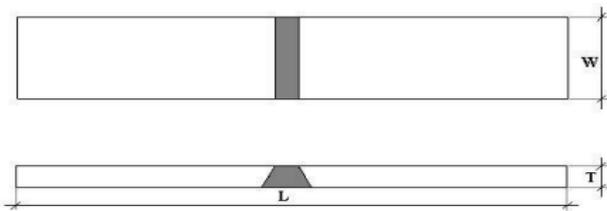
Dibuat 18 spesimen uji tarik dengan dimensi 200 mm x 20 mm x 10 mm, dan 18 spesimen uji tekuk dengan dimensi 152 mm x 38 mm x 10 mm. Proses pembuatan kedua jenis spesimen tersebut

mengikuti ketentuan yang ditetapkan dalam standar ASTM E8.



Gambar 4. Dimensi Spesimen Uji Tarik [14]

- Gage length (G) : 50 mm
- Radius of fillet (R) : 12,5 mm
- Length of reduced section (A) : 57 mm
- Overall length (L) : 200 mm
- Width (W) : 12,5 mm
- Width of grip section (C) : 20 mm
- Thickness (T) : 10 mm
- Length of grip section (B) : 50 mm



Gambar 5. Dimensi Spesimen Uji Tekuk

- Overall length (L) : 152 mm
- Width (W) : 38 mm
- Thickness (T) : 10 mm

G. Tahap Pengujian

Pengujian tarik dan tekuk dilaksanakan di Laboratorium Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro (UNDIP), yang terletak di Semarang.

2.3 Alat dan Bahan

Dalam proses penelitian, beberapa alat dan bahan digunakan untuk membuat spesimen plat baja ST 60, seperti berikut:

1. Elektorda E7018
2. Gerinda
3. Mesin Las SMAW
4. Mesin bubut
5. Mesin Uji Tarik
6. Mesin Uji Tekuk
7. Mesin Furnace
8. Ampelas
9. Peralatan Etsa
10. Jangka Sorong

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Uji Tarik

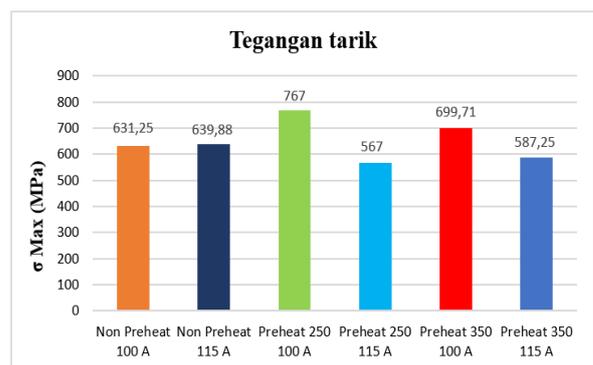
Pengujian tarik dilakukan sesuai dengan ketentuan standar ASTM E8/E8M-09. Hasil dari pengujian tersebut mencakup data mengenai tegangan tarik, regangan tarik, dan modulus elastisitas, yang menjadi dasar untuk mengevaluasi kekuatan tarik dari setiap spesimen.

1. Tegangan Tarik

Tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh material sebelum terjadi perpatahan (pecah) dikenal sebagai tegangan tarik. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai maksimum tegangan tarik dari material baja ST 60 dengan variasi temperatur heat treatment sebagai berikut:

Tabel 1. Data Hasil Tegangan Tarik

Spesimen	Area (mm)	P Max (KN)	σ Max (MPa)	Standar deviasi	σ Rata-Rata (MPa)
Non preheat, 100 A (A)	125	76,33	636,08	11,57	631,25
	125	75,17	626,42		
	125	78,52	654,33		
Non preheat, 115 A (B)	125	78,43	653,58	36,47	639,88
	125	85,62	713,50		
	125	75,14	626,17		
Preheat 250 °C, 100 A (C)	125	91,25	760,42	22,88	767
	125	86,38	719,83		
	125	92,83	773,58		
Preheat 250 °C, 115 A (D)	125	67,06	558,83	21,81	567,45
	125	69,13	576,08		
	125	73,35	611,25		
Preheat 350 °C, 100 A (E)	125	83,12	692,67	20,78	699,71
	125	84,81	706,75		
	125	78,88	657,33		
Preheat 350 °C, 115 A (F)	125	67,88	565,67	47,36	587,25
	125	73,06	608,83		
	125	81,66	680,50		



Gambar 6. Grafik rata-rata tegangan tarik

Hasil pengujian di atas menunjukkan bahwa setelah mendapatkan standart deviasi ada beberapa sampel yang tidak diinput untuk nilai rata-rata tegangan tarik, diantaranya adalah pada variasi *preheat* dan kuat arus, *non preheat* 100 A, *non preheat* 115 A, *preheat* 250 °C 100 A, *preheat* 250 °C 115 A, *preheat* 350 °C 100 A dan *preheat* 350 °C 115 A dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata

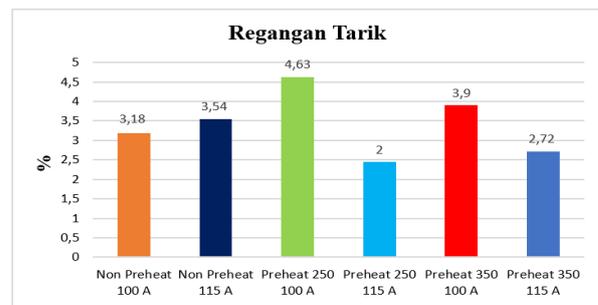
tegangan tarik paling tinggi pada spesimen dengan arus listrik 100 A dan *preheat* 250 °C sebesar 767 MPa. dengan arus listrik 100 A, memiliki penetrasi lebih rendah dibandingkan dengan arus listrik 115 A. Peningkatan arus listrik pengelasan dan suhu *preheat* dapat meningkatkan kedalaman penetrasi. Namun, terlalu tinggi arus listrik juga dapat menyebabkan masalah seperti penumpukan logam cair yang berlebihan dan pembentukan cacat. Hal ini sama halnya dengan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya yaitu pengujian tarik untuk baja ST 60 dengan variasi arus listrik 95 A, 110 A dan 130 A, pada arus listrik 95A didapatkan rata rata kekuatan tarik sebesar 467,19 MPa, variasi arus 110 A mempunyai rata-rata sebesar 455,99 MPa dan variasi arus 130 A sebesar 447,55 MPa. Dari ketiga variasi tersebut dapat dilihat bahwa variasi arus 95 A memiliki rata-rata kekuatan tarik paling tinggi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin besar arus yang digunakan dalam penelitian, semakin kecil nilai kekuatan tarik yang diperoleh. Ini karena lebih banyak arus berarti lebih banyak panas yang diterima oleh bahan mentah dan logam pengisi [15].

2. Regangan Tarik

Hasil tes menunjukkan nilai regangan tarik rata-rata sebagai berikut:

Tabel 2. Data Hasil Regangan Tarik

Spesimen	ΔL (mm)	Lo (mm)	Regangan (%)	Standar deviasi	e Rata-rata (%)
Non preheat, 100 A (A)	1,8	55	3,27	0,22	3,18
	1,7	55	3,09		
	2	55	3,63		
Non preheat, 115 A (B)	2	55	3,63	0,23	3,54
	2,2	55	4		
	1,9	55	3,45		
Preheat 250 °C, 100 A (C)	2,5	55	4,54	0,23	4,63
	2,3	55	4,18		
	2,6	55	4,72		
Preheat 250 °C, 115 A (D)	1,3	55	2,36	0,23	2,45
	1,4	55	2,54		
	1,6	55	2,90		
Preheat 350 °C, 100 A (E)	2,1	55	3,81	0,15	3,90
	2,2	55	4		
	2	55	3,63		
Preheat 350 °C, 115 A (F)	1,3	55	2,36	0,59	2,72
	1,7	55	3,09		
	2,1	55	3,81		



Gambar 7. Grafik rata-rata regangan tarik

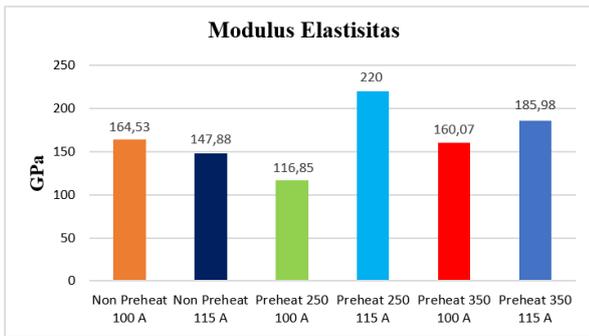
Grafik hasil pengujian menunjukkan bahwa material baja ST 60 dengan berbagai variasi arus listrik dan posisi pengelasan, sumbu x menunjukkan variasi suhu *preheat* dan kuat arus pengelasan, sumbu y menunjukkan nilai rata-rata regangan tarik. Nilai rata-rata regangan tarik paling tinggi pada spesimen dengan variasi arus listrik 100 A menggunakan suhu *preheat* 250 °C yaitu sebesar 4,63 %, nilai rata-rata regangan tarik dari spesimen yang tidak dilakukan *preheat* menunjukkan kenaikan nilai regangan, namun setelah diberi penambahan arus dan suhu *preheat* pada spesimen melebihi suhu 250 °C dan arus listrik 100 A nilai regangan nya cenderung konstan tidak begitu berbeda secara signifikan, tetapi yang paling rendah terdapat pada spesimen yang dilas menggunakan variasi arus listrik 115 A dengan suhu *preheat* 250 °C sebesar 2,45%. Didukung oleh penelitian sebelumnya yaitu uji tarik untuk baja ST 37 dengan variasi arus 80 A, 85 A dan 90 A mendapatkan nilai regangan yang hampir sama berturut-turut 4,5%, 4,3% dan 4,4% [16].

3. Modulus Elastisitas

Hasil pengujian menunjukkan rata-rata nilai modulus elastisitas sebagai berikut :

Tabel 3. Data Hasil Modulus Elastisitas

Spesimen	σ pro (MPa)	e pro (%)	E (GPa)	Standar deviasi	e Rata-rata (GPa)
Non preheat, 100 A (A)	520,63	3,27	159,21	14,40	164,53
	524,79	3,09	169,84		
	491,47	3,63	135,39		
Non preheat, 115 A (B)	516,46	3,63	142,27	7,39	147,88
	528,95	4	132,23		
	512,29	3,45	148,49		
Preheat 250 °C, 100 A (C)	541,03	4,54	119,17	5,20	116,85
	531,45	4,18	127,14		
	540,61	4,72	114,54		
Preheat 250 °C, 115 A (D)	545,62	2,36	231,19	18,16	219,93
	530,06	2,54	208,68		
	541,45	2,90	186,70		
Preheat 350 °C, 100 A (E)	540,00	3,81	141,73	8,95	160,07
	628,91	4	157,22		
	591,43	3,63	162,92		
Preheat 350 °C, 115 A (F)	478,97	2,36	202,95	29,49	185,98
	522,29	3,09	169,02		
	498,13	3,81	130,74		



Gambar 8. Grafik rata-rata modulus elastisitas

Menurut perhitungan, terlihat bahwa nilai rata-rata *modulus elastisitas* tertinggi ada pada pengelasan material baja ST 60 dengan variasi arus listrik 115 A dan suhu *preheat* 250 °C, hal ini berarti hasil uji tarik pengelasan baja ST B60 dengan variasi arus listrik dan variasi *preheat* spesimen tersebut dapat diartikan bahwa baja tersebut memiliki sifat kekakuan yang tinggi, semakin tinggi nilai modulus elastisitas, semakin kaku dan kurang elastis suatu bahan. sebaliknya, nilai modulus elastisitas yang lebih rendah menunjukkan keelastisan yang lebih baik dalam merespons deformasi. Terdapat perbedaan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan pengujian tarik baja SS 400 dengan variasi arus 100 A, 120 A dan 140 A yang memperoleh hasil pengujian nilai modulus elastisitas tertinggi pada arus 100 A yaitu sebesar 57,35 Gpa, kemudian pada arus 140 menunjukkan nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 48,81 GPa, pada arus 120 A menunjukkan nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 31,41GPa [17].

3.2. Hasil Uji Tekuk

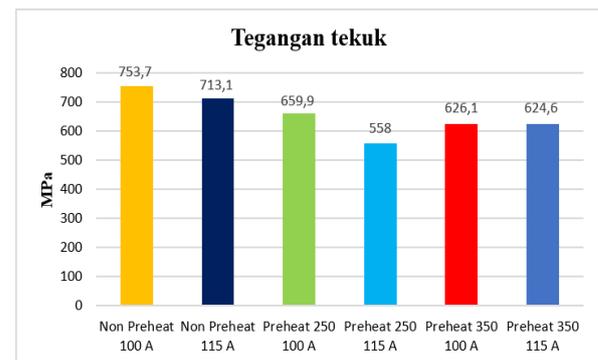
Pengujian tekuk baja ST 60 ini mengacu pada standar ASTM E19014, pengujian dilakukan pada dua variasi kuat arus dan tiga suhu *preheat* yang berbeda menggunakan sebanyak 18 spesimen, dimana masing-masing spesimen memiliki dimensi pengujian yang sama.

1. Tegangan Tekuk

Nilai tegangan tekuk rata-rata berikut diperoleh berdasarkan hasil tes sebelumnya :

Tabel 4 Data Hasil Tegangan Tekuk

Spesimen	P Max (KN)	σ Max (Mpa)	Standar deviasi	σ Rata-Rata (Mpa)
Non preheat, 100 A (A)	42,47 36,77 38,60	849,40 735,40 772,00	47,52	753,70
Non preheat, 115 A (B)	37,24 29,51 34,07	744,80 590,20 681,40	63,45	713,10
Preheat 250 °C, 100 A (C)	33,77 27,21 32,22	675,40 544,20 644,40	55,99	659,90
Preheat 250 °C, 115 A (D)	26,98 28,82 38,39	539,60 576,40 767,80	100,03	558,00
Preheat 350 °C, 100 A (E)	41,62 32,09 30,52	832,40 641,80 610,40	98,09	626,10
Preheat 350 °C, 115 A (F)	30,58 31,88 41,54	611,60 637,60 830,80	97,78	624,60



Gambar 9. Grafik rata-rata tegangan tekuk

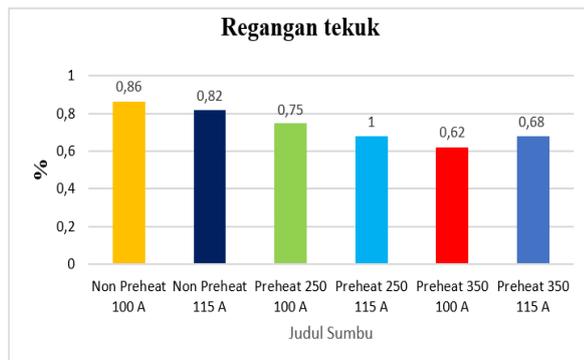
Dari hasil pengujian tekuk baja ST 60, didapati bahwa nilai rata-rata tegangan tekuk tertinggi terdapat pada spesimen tanpa *preheat*, dengan kuat arus pengelasan sebesar 100 A, mencapai 753,70 N/mm². Nilai rata-rata tegangan tekuk terbesar untuk spesimen yang dilakukan *preheat* yaitu sebesar 659,90 N/mm² pada spesimen yang mendapat suhu *preheat* sebesar 250 °C dengan kuat arus 100 A. Nilai tegangan tekuk pada setiap variasi spesimen tidak terlalu jauh berbeda, namun untuk nilai tegangan tekuk terendah terdapat pada spesimen *preheat* 250 °C dengan kuat arus pengelasan 115 A sebesar 558,00 N/mm². Hal tersebut didukung oleh peraturan yang menyatakan bahwa nilai kekuatan tekuk pada baja ST 60 \geq 400 Mpa [18].

2. Regangan Tekuk

Nilai tegangan tekuk rata-rata berikut didapat berdasarkan hasil tes:

Tabel 5. Data Hasil Regangan Tekuk

Spesimen	σ Max (Mpa)	e (%)	E (Gpa)	Standar deviasi	e Rata-rata (%)
Non preheat, 100 A (A)	849,40 735,40 772,00	0,98 0,84 0,88	866,73 875,47 877,27	4,60	876,37
Non preheat, 115 A (B)	744,80 590,20 681,40	0,85 0,63 0,78	876,23 936,83 873,59	29,20	874,91
Preheat 250 °C, 100 A (C)	675,40 544,20 644,40	0,76 0,56 0,75	888,68 971,78 859,20	47,66	873,94
Preheat 250 °C, 115 A (D)	539,60 576,40 767,80	0,74 0,62 0,87	729,19 929,67 882,53	85,59	906,10
Preheat 350 °C, 100 A (E)	832,40 641,80 610,40	0,97 0,59 0,64	858,14 1087,8 953,75	94,19	905,94
Preheat 350 °C, 115 A (F)	611,60 637,60 830,80	0,64 0,72 0,93	955,63 885,56 893,33	31,36	889,45



Gambar 10. Grafik rata-rata regangan tekuk

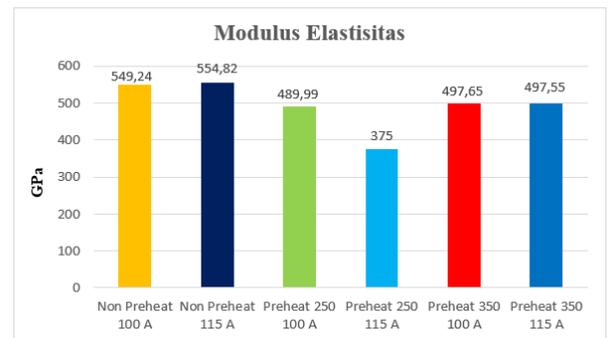
Melalui grafik yang disajikan, terlihat bahwa nilai regangan tekuk rata-rata tertinggi terdapat pada spesimen tanpa *preheat*, dengan kuat arus pengelasan 100 A, mencapai 0,86%. Sementara itu, regangan tekuk rata-rata terendah tercatat pada spesimen dengan perlakuan *preheat* pada suhu 350°C, dengan kuat arus pengelasan 100 A, sebesar 0,62%. Pada grafik menunjukkan bahwa ketika kuat arus dan temperatur *preheat* dinaikan nilai regangan tekuk nya semakin mengecil hal tersebut menunjukkan bahwa ketika diberi suhu *preheat* yang tinggi maka hal tersebut akan mempengaruhi nilai kekauan dari baja tersebut.

3. Modulus Elastisitas

Nilai modulus elastisitas rata-rata berikut ditunjukkan dalam hasil tes:

Tabel 6. Data Hasil Modulus Elastisitas

Spesimen	σ pro (MPa)	e pro (%)	E (GPa)	Standar deviasi	e Rata-rata (GPa)
Non preheat, 100 A (A)	724 610 666	0,98 0,84 0,88	709,52 512,40 586,08	81,32	549,24
Non preheat, 115 A (B)	720 555 638	0,85 0,63 0,78	612,00 349,65 497,64	107,39	554,82
Preheat 250 °C, 100 A (C)	649 520 649	0,76 0,56 0,75	493,24 291,20 486,75	93,75	489,99
Preheat 250 °C, 115 A (D)	726 522 490	0,74 0,62 0,87	537,24 323,64 426,30	87,22	374,97
Preheat 350 °C, 100 A (E)	522 586 764	0,97 0,59 0,64	506,34 345,74 488,96	71,96	497,65
Preheat 350 °C, 115 A (F)	775 620 590	0,64 0,72 0,93	496,00 446,40 548,70	41,77	497,55



Gambar 11. Grafik rata-rata modulus elastisitas

Menurut grafik hasil pengujian diatas, ditemukan bahwa spesimen yang tanpa diberi perlakuan panas memiliki nilai modulus elastisitas tertinggi yaitu pada spesimen dengan kuat arus pengelasan 115 A sebesar 554,82 GPa, namun pada spesimen yang diberi perlakuan *preheat* menunjukkan nilai modulus elastisitas yang lebih kecil dengan nilai modulus elastisitas terkecil pada spesimen yang diberi *preheat* 250 °C dengan kuat arus pengelasan 115 A sebesar 375 GPa.

4. KESIMPULAN

Baja ST 60 merupakan baja jenis karbon sedang yang memiliki rata-rata tegangan 647,71 MPa, regangan 0,22% dan Modulus Young 208,99 GPa yang sering digunakan pada konstruksi kapal. *Preheat* merupakan metode yang dapat digunakan untuk mengurangi perbedaan tegangan antara spesimen dengan elektroda. Standar pengujian spesimen dibuat mengikuti aturan standar uji ASTM E8. Nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar

767 MPa pada spesimen preheat 250 °C dengan kuat arus pengelasan 100 A dan nilai regangan tekuk tertinggi sebesar 4,63 % terdapat pada spesimen preheat 250 °C dengan kuat arus pengelasan 100 A. Sementara untuk nilai modulus tertinggi sebesar 219,93 GPa pada spesimen preheat 250 0C dengan kuat arus pengelasan 115 A. Spesimen tanpa preheat yang memiliki nilai tegangan tekuk tertinggi sebesar 753,70 MPa dan nilai regangan tekuk tertinggi sebesar 0,86% dengan kuat arus pengelasan 100 A. Sementara itu, spesimen tanpa preheat dengan kuat arus pengelasan 115 A menunjukkan nilai modulus elastisitas tertinggi sebesar 554,82 GPa. Modulus elastisitas terendah terdapat pada spesimen preheat 250 °C dengan kuat arus pengelasan 115 A. Menurut standar pengujian tarik BKI tertulis pada sambungan las baja ST 60 memiliki Standar nilai kekuatan tarik (Tensile Strength) dan kekuatan tekuk (Bend Strenght) yaitu ≥ 400 Mpa [17].

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa syukur, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkah dan rahmat-Nya sehingga Penelitian ini dapat diselesaikan. Penulis sangat mengakui bahwa berhasilnya penelitian ini tidak terlepas dari bantuan yang diberikan oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan penghargaan yang tulus kepada semua yang telah memberikan bantuan, baik secara formal maupun substansial, dalam penyusunan penelitian ini. Secara khusus, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada orang tua yang telah mendukung penulis dengan penuh kasih sayang selama proses pendidikan, serta kepada teman-teman sejawat S1 Teknik Perkapalan 2020."

DAFTAR PUSTAKA

[1] Alwie, rahayu deny danar dan alvi furwanti et al. 2020. "Pengaruh Post Weld Heat Treatment (Pwht) Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Pegas Daun Yang Dilas Dengan Pengelasan Smaw." Jurnal Ekonomi Volume 18, Nomor 1 Maret 201 2(1): 41–49

[2] Nugroho, A., & Setiawan, E. (2018). Pengaruh Variasi Kuat Arus Pengelasan Terhadap Kekuatan Tarik Dan Kekerasan Sambungan Las Plate Carbon Steel ASTM 36. Jurnal Rekayasa Sistem Industri, 3(2), 134–142.

[3] A. Syahrani, Naharuddin, and M. Nur, "Analisis Kekuatan Tarik, Kekerasan, Dan Struktur Mikro Pada Pengelasan Smaw Stainless Steel 312 Dengan Variasi Arus Listrik," Mekanikal, vol. 9, no. 1, pp. 814–822, 2018.

[4] Saefuloh. I., Haryadi, A. Zahrawan., dan B. Adjiantoro. 2018. Pengaruh Proses Quenching dan Tempering terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah dengan Paduan Laterit. Jurnal Teknik Mesin UNTIRTA, 4(1): 56-64.

[5] A. N. Akhmadi, T. Qurohman, P. Harapan, and B. Tegal, "Pengujian Struktur Mikro Besi Pejal Baja St41 Dengan Mikroskop Digital 16Mp_Asmuni," pp. 1–11, 2017.

[6] Ambar Isworo, dkk. Universitas Diponegoro Semarang, 2020. 2020. "Analisis Perbandingan Kekuatan Impak, Tarik, Tekuk Dan Mikrogafi Pada Alumunium 606." Teknik Perkapalan 5(2): 421–30.

[7] A. Z. Sastal, Y. Gunawan, and B. Sudia, "Pengaruh Kecepatan Potong Terhadap Perubahan Temperatur Pahat Dan Keausan Pahat Bubut Pada Proses Pembubutan Baja Karbon Sedang," Enthalpy, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, 2018.

[8] M. Nasution, "Karakteristik Baja Karbon Terkorosi," Bul. Utama Tek., vol. 14, no. 1, pp. 68–76, 2018.

[9] A. W. B. Ridwan Redi Putra, Sarjito Jokosisworo, "Analisa Kekuatan Puntir, Kekuatan Tarik dan Kekerasan Baja ST 60 sebagai Bahan Poros Baling-baling Kapal (Propeller Shaft) setelah Proses Tempering," Tek. Perkapalan, vol. 8, no. 3, pp. 368–374, 2020. Configuration," in The 9 th International Conference on Marine Technology, Surabaya, 2014.

[10] A. Rahmatika, S. Ibrahim, M. Hersaputri, and E. Aprilia, "Studi Pengaruh Variasi Kuat Arus terhadap Sifat Mekanik Hasil Pengelasan GTAW Alumunium 1050 dengan Filler ER 4043," J. Polimesin, vol. 17, no. 1, pp. 47–54, 2019.

- [11] A. N. Akhmadi, T. Qurohman, P. Harapan, and B. Tegal, "Saefuloh. I., Haryadi, A. Zahrawan., dan B. Adjiantoro. 2018. Pengaruh Proses Quenching dan Tempering terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah dengan Paduan Laterit. *Jurnal Teknik Mesin UNTIRTA*, 4(1): 56-64.
- [12] F. T. Industri, "Pengaruh Variasi Suhu Preheat Terhadap Sifat Mekanis Material Sa 516 Grade 70 Yang Disambung Dengan the Effect of Preheat Temperatur Variation on the Mechanical Properties of the Material Sa 516 Gr 70 Which Are Connected By Butt Joint Smaw Welding Method," 2015.
- [13] Fernando, Yogi, Rodesri Mulyadi, and Ambiyar Ambiyar. 2020. "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* 3(2): 43–49
- [14] ASTM International, 2016. *ASTM E8/E8M-16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Volume 03.01.*
- [15] Arfiansyah, Andika Ferdi, and Akhmad Hafizh Ainur Rasyid. "ANALISIS PENGARUH VARIASI ARUS PADA PENGELASAN SMAW BAJA ST 60 TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN POROSITAS." *Jurnal Teknik Mesin* 11.03 (2023): 53-58.
- [16] Gusti R. F. Syahrillah, M. Firman, and M. A. Sugeng .P, "Analisa Uji Kekerasan pada Poros Baja ST 60 dengan Media Pendingin yang Berbeda," *Al-Jazari J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 01, no. 02, pp. 21–26, 2016.
- [17] C. Panggabeh, U. Budiarto, and A. Santosa, "Pengaruh Variasi Arus listrik Dan Polaritas Terhadap Kekuatan Tarik, Tekuk dan Kekerasan Hasil Las SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Pada Baja SS 400," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 4, p. 785, 2017, [Online]. Available: <http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>.
- [18] BKI (Vol VI), 2019 Rules for Welding, terbaru.pdf