



Analisis Pengaruh Variasi Kuat Arus dan Normalizing pada Pengelasan FCAW Menggunakan Elektroda E81T-Ni1C terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Baja ASTM A36

Muhammad Irfan¹⁾, Wilma Amiruddin¹⁾, Ari Wibawa Budi Santosa¹⁾

¹⁾Laboratorium Pengelasan

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

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

Abstrak

Studi ini menganalisis kekuatan tarik, dampak, dan struktur mikro pada pengelasan FCAW baja ASTM A36 dengan variasi arus dan perlakuan PWHT. Baja ASTM A36 adalah baja karbon rendah dengan kandungan karbon sekitar 0.25% yang banyak digunakan di berbagai industri termasuk perkapalan, namun dalam prosesnya sering terjadi masalah struktural dan sifat mekanis karena perubahan suhu yang cepat dan distribusi panas yang tidak merata. Solusi dari permasalahan tersebut adalah dengan PWHT dengan pendinginan udara yang bertujuan untuk menghasilkan material yang kuat, lunak, ulet, dan menghilangkan tegangan sisa. Hasil penelitian menunjukkan tegangan tarik maksimum tertinggi pada 569.3 MPa dengan PWHT 850°C arus 125A, modulus elastisitas tertinggi 34.2 GPa dengan PWHT 850 arus 125A, serta pada kurva stress-strain didapatkan ductility terbesar yaitu 0.44 pada kondisi suhu 900°C 175 A dan ductility terkecil yaitu 0.24 pada kondisi suhu 850°C 125 A. Pengujian dampak didapatkan spesimen dengan nilai ketangguhan dampak tertinggi yakni oleh spesimen dengan perlakuan PWHT 900°C 125 A dengan nilai rata-rata 3.4 J/mm². Hal tersebut didukung pengamatan struktur mikrografi pada proses normalizing variasi arus 125A dan 175A serta suhu 800°C, 850°C, dan 900°C menunjukkan fasa ferrite dan fasa pearlit membentuk butiran kecil yang rapat dan teratur dibandingkan dengan tanpa PWHT dengan arus 125A dan 175A.

Kata Kunci : Welding, FCAW, Normalizing, ASTM A36, Struktur Mikro

1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri dan teknologi pengelasan saat ini semakin berkembang pesat dan memberikan kontribusi dalam ruang lingkup meliputi bidang otomotif, pesawat terbang, rangka baja khususnya industri perkapalan. Struktur atau konstruksi kapal memiliki peranan untuk memastikan keselamatan dan efisiensi operasional kapal. Hal tersebut menuntut manusia untuk mempelajari lebih dalam ilmu pengelasan. Pengelasan merupakan proses penyambungan bahan logam yang satu dengan yang lain dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair sehingga membentuk sesuai ukuran yang dibutuhkan. Pengelasan juga dapat dijadikan sarana untuk mencapai ekonomi pembuatan yang lebih baik bukan tujuan utama dari konstruksi [1]. Teknologi pengelasan banyak dijumpai pada proses pembuatan ataupun perbaikan konstruksi

kapal, salah satu material utamanya adalah baja karbon rendah yang memiliki kadar karbon yang kurang dari 0.3% [2]. Baja karbon rendah memiliki sifat-sifat seperti kelembutan dan kekuatan yang terbatas, tetapi memiliki Tingkat keuletan dan ketangguhan yang sangat baik [3]. Baja karbon rendah kurang *responsive* terhadap perlakuan panas untuk mencapai struktur mikro martensit. Baja ASTM A36 merupakan contoh jenis baja karbon yang memiliki kadar karbon rendah sekitar 0.25% dengan komposisi kimia terdapat Carbon (C), Manganese (Mn), Silikon (Si), Sulfur (S) dan Fosfor (P) [4].

Proses fabrikasi material baja perlu dilakukan pengelasan. Pengelasan memiliki beberapa metode yang dapat digunakan, yaitu SMAW (Shield Metal Arc Welding), GMAW (Gas Metal Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), FCAW (Flux Cored Arc Welding)

dan lain-lain. Las FCAW merupakan pengelasan fusi yang memanfaatkan busur listrik yang terbentuk antara elektroda logam pengisi yang beroperasi secara terus-menerus [5]. Bentuk elektroda pada FCAW berupa gulungan kawat (Rol) yang gerakannya diatur oleh motor listrik dan pada pengelasan ini yang bertugas sebagai pelindung busur yaitu argon [6]. Pengelasan FCAW mempunyai beberapa keunggulan dimulai dari wujud permukaan yang bagus, tingkat deposisi yang tinggi, produktivitas yang tinggi dibanding dengan SMAW, lebih sederhana dari SAW dan tidak membutuhkan skill operator yang tinggi seperti GMAW [7].

Pemeriksaan yang teliti terhadap perhitungan panas dalam pengelasan menjadi suatu keharusan agar dapat mencapai hasil las yang berkualitas tinggi. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan pada lasan yang pada akhirnya dapat mengurangi kekuatan dari sambungan las tersebut [8]. Penelitian yang dilakukan (Sianturi, et. al., 2019) [9], mengenai pengaruh kuat arus listrik pada pengelasan FCAW dengan posisi 4G telah dilakukan sebelumnya didapatkan dari variasi kuat arus 135 A, 150 A, dan 165 A tegangan tarik terbesar dihasilkan oleh kuat arus 135 A, semakin tinggi kuat arus maka tegangan tarik menurun. Begitupun sebaliknya pengujian impak arus 165 A memiliki rata-rata nilai impak terbesar dibanding dengan kuat arus 135 A dan 165 A.

Penelitian lain yang dilakukan (Widodo, et, al., 2018) [10], tentang pengelasan SMAW menggunakan *stainless steel* AISI 304 dengan variasi kuat arus 70A, 80A, dan 90A. Elektroda yang digunakan adalah AWS A5.4 E308-16 dengan diameter 2,6 mm. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa nilai arus semakin tinggi kuat arus maka tegangan yang dihasilkan semakin tinggi. Studi lain yang dilakukan (Haq, et al., 2018) [11], menyajikan variasi dalam arus pengelasan FCAW Baja ST 40 yaitu 135A dan 165A didapatkan hasil tegangan tarik yang dihasilkan paling tinggi pada kuat arus 135 A sebesar 478,15 MPa. Pengujian impak yang didapatkan berbanding terbalik dengan tegangan tarik, nilai impak tertinggi didapatkan pada kuat arus 165 A sebesar 1,6 J/mm².

Proses pengelasan tidak semuanya mempunyai hasil yang bagus, sering kali terjadi kasus penyebaran panas dan proses pendinginan yang tidak merata pada daerah las yang diakibatkan karena terjadinya tegangan dan regangan yang menimbulkan tegangan sisa mempengaruhi sifat fisis dan mekanis pada material [12]. Oleh itu, untuk mendapatkan hasil las yang baik perlu dilakukan perlakuan panas

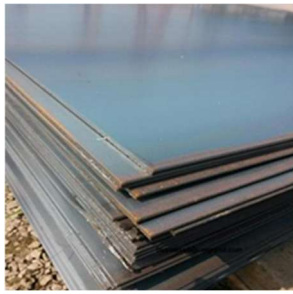
untuk meningkatkan kekerasan material, contohnya termasuk meningkatkan kemudahan pembentukan dan mengembalikan elastisitas setelah proses pendinginan [13]. Proses *normalizing* baja melibatkan pemanasan material hingga mencapai fase *austenit*, kemudian didinginkan secara alami di udara terbuka hingga mencapai suhu kamar sekitar 27°C. *Normalizing* bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa, memperbaiki sifat mekanik baja, dan mengembalikan keuletan material tersebut dengan dibuktikan perlakuan panas *normalizing holding time* 20 menit memiliki kekuatan tarik 336.53 MPa dan kekuatan luluh sebesar 241.75 MPa. Sedangkan *holding time* 40 menit memiliki kekuatan tarik 328.72 Mpa dan kekuatan luluh sebesar 235.61 MPa [14].

Penelitian sebelumnya yang dilakukan (Ramadhan, et. al., 2021) [15], spesimen yang menjalani proses *normalizing* pada suhu 850°C selama 30 menit menunjukkan keunggulan kekuatan dengan nilai ketangguhan rata-rata sebesar 3.73 J/mm², sementara yang tidak mengalami *normalizing* hanya memiliki nilai ketangguhan rata-rata sebesar 3.14 J/mm². Penelitian lainnya yang dilakukan (Wei Wu, et, al., 2018) [16], peningkatan suhu *normalizing* dari 940°C hingga 1060°C meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen pada substrat baja Gr.91, sementara waktu hingga terjadi putus pada sampel yang dipanaskan dengan inframerah lebih singkat daripada sampel tanpa pemanasan dalam setiap kelompok. Di antara sampel yang diuji dalam setiap kelompok, sampel yang mengalami perlakuan panas memiliki ketahanan terendah terhadap deformasi permanen, terutama sampel 940°C.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa sifat mekanis yaitu kekuatan Tarik dan kekuatan impak yang sesuai dengan ASME Section IX, serta bagaimana struktur mikro pada material baja ASTM A36 grade A setelah dilakukan pengelasan FCAW dan diberi perlakuan dan variasi kuat arus pengelasan dan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT).

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi arus dan perlakuan *normalizing* pada pengelasan FCAW terhadap struktur mikro dan sifat mekanis baja ASTM A36. Metode penelitian meliputi persiapan bahan, pengelasan, pembuatan kampuh las, perlakuan PWHT, uji tarik, uji impak, dan analisis struktur mikro.



Gambar 1. Baja ASTM A36

Objek penelitian pada kali ini merupakan material baja ASTM A36, yang dikenal sebagai baja dengan kandungan karbon rendah. Baja ini sering digunakan dalam pembuatan rangka kapal dan lambung kapal. Baja ASTM A36 ini memiliki kekuatan tarik sebesar 250 MPa, nilai regangan sebesar 23%, dan massa jenis sebesar 7.85 gr/cm³. Baja ASTM A36 merupakan gabungan antara karbon dan besi dengan kandungan karbon hingga 2%.

Tabel 1. Komposisi Baja ASTM A36 [17]

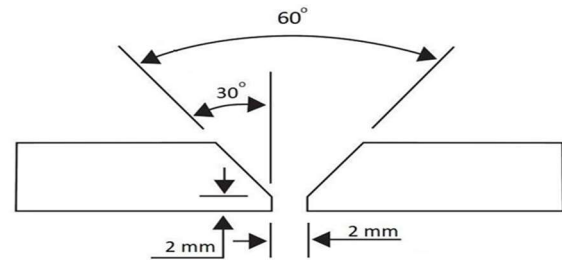
Unsur	Nilai (%)
Karbon (C)	0.25
Silikon (Si)	0.28
Mangan (Mn)	1.03
Fosfor (P)	0.04
Belerang (S)	0.05
Tembaga (Cu)	0.20

2.1. Pengelasan

Pengelasan merupakan proses penyambungan bahan logam yang satu dengan yang lain dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair sehingga membentuk sesuai ukuran yang dibutuhkan [18].

Pengelasan FCAW metode pengelasan busur listrik yang memanfaatkan gulungan kawat las sebagai elektroda. Metode pengelasan ini memiliki beberapa kelebihan, dengan yang paling mencolok adalah efisiensi produksi yang tinggi karena menggunakan gulungan kawat, memungkinkan proses pengelasan berlangsung secara berkelanjutan. Ketika digunakan dalam proses yang sepenuhnya otomatis, FCAW juga dapat menghasilkan keuntungan biaya yang lebih baik dibandingkan dengan metode pengelasan lainnya secara umum [19].

Tahap berikutnya adalah pembuatan kampuh, yang bertujuan mempersiapkan spesimen uji agar hasil lasan memiliki bentuk dan sudut yang diinginkan. Kampuh las digunakan untuk mengarahkan panas dan arus listrik selama proses pengelasan. Dalam penelitian ini, digunakan kampuh atau *bevel single v-groove* dengan kemiringan 60 derajat sesuai dengan aturan AWS D1.1/D1.1M-2020.



Gambar 2. Sambungan Las Single V-Butt Joint sudut 60°

Spesimen yang telah dibuat kampuh nya, selanjutnya masuk tahap perlakuan panas. *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) merupakan proses pemanasan yang diterapkan pada material setelah proses pengelasan untuk meningkatkan sifat mekanik dan struktur mikro pada daerah yang terkena panas dan logam las. Awalnya baja dipanaskan diatas suhu kritis (800-950°C), kemudian setelah mencapai suhu kritisnya baja ditahan (*holding*) pada suhu tersebut, dan yang terakhir baja didinginkan, pendinginannya sesuai dengan suhu kamar, yaitu didinginkan hingga suhu kurang lebih 27°C, lama pendinginan inilah yang sangat mempengaruhi sifat mekanik dari baja, semakin cepat pendinginannya maka akan menghasilkan baja dengan sifat mekanik berupa kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi, dan jika pendinginannya lambat maka akan terjadi hal yang sebaliknya [20]. Dalam penelitian ini, suhu yang digunakan adalah 800°C, 850°C dan 900°C serta tanpa PWHT selama 60 menit.

2.2. Pengujian Mekanis dan Struktur Mikro

Spesimen yang telah di PWHT, setelahnya dilakukan pengujian mekanis yaitu uji tarik dan uji impak. Uji tarik adalah jenis pengujian merusak yang dilakukan dengan memberikan gaya tarik yang berlawanan arah menjauhi titik tengah benda, atau dengan mengikat salah satu ujung benda dan menarik ujung lainnya hingga benda tersebut patah. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui sifat-sifat mekanis logam dan paduannya, terutama kekuatan tarik material tersebut. Selama pengujian tarik, fenomena perpatahan ulet dan getas dapat diamati dengan jelas oleh mata telanjang [21]. Pembuatan spesimen tersebut mengikuti ketentuan yang telah ditetapkan dalam standar ASTM E8.

Berikut ini adalah sifat yang dihasilkan dari pengujian tarik :

1. Tegangan tarik maksimum (σ)

Tegangan tarik maksimum yang dapat ditahan oleh sebuah material sebelum patah disebut tegangan tarik. Sebagai contoh, rumus kekuatan tarik material adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

Dimana, P_{\max} merupakan beban maksimum (KN), A merupakan luas penampang (mm^2) dan σ merupakan tegangan (N/mm^2 atau MPa).

2. Regangan maksimum

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

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

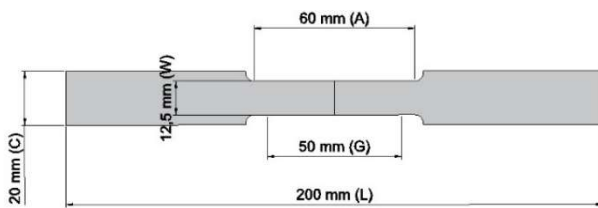
Dimana, e merupakan regangan (%), ΔL merupakan pertambahan panjang (mm) dan L_0 merupakan panjang awal (mm).

3. Modulus elastisitas

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

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (3)$$

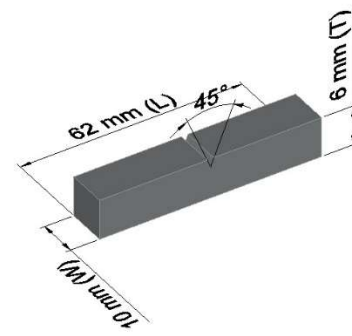
Dimana, E merupakan modulus elastisitas (GPa), σ merupakan tegangan maksimum (MPa) dan e merupakan regangan (%).



Gambar 3. Dimensi Spesimen Uji Tarik [22]

Keterangan	Dimensi
Gage length (G)	50 mm
Reduced section (A)	60 mm
Width (W)	12,5 mm
Thickness (T)	6 mm
Radius of fillet (R)	12.5 mm
Overall length (L)	200 mm
Width of grip section (C)	20 mm
Length of grip section (B)	50 mm

Uji impact adalah pengujian yang dilakukan pada suatu material dengan memberikan beban mendadak untuk mengetahui pengaruh beban tersebut terhadap keuletannya. Penelitian ini, pengujian impact menggunakan metode Charpy. Proses pengujian ini dilakukan dengan menempatkan spesimen secara horizontal, kemudian memberikan beban mendadak dari arah yang berlawanan dengan tarikan. Pengujian impact ini, spesimen akan digunakan dengan standar ASTM E23.



Gambar 4. Dimensi Spesimen Uji Impact [23]

Keterangan	Dimensi
Overall Length (L)	62 mm
Width (W)	10 mm
Thickness (T)	6 mm
Notch Thickness (N)	2 mm
Notched Charpy	45°

Spesimen yang telah melalui pengujian mekanis, selanjutnya akan dilakukan pengujian mikrofografi. Struktur mikro dari sebuah material hasil pengelasan FCAW dan proses *normalizing* dapat dianalisis melalui pengujian mikrofografi dengan memperjelas batas-batas butir pada material, sehingga dapat diamati secara langsung dengan mikroskop dan didokumentasikan melalui gambar. Tahapan pengujian mikrofografi meliputi pengamplasan spesimen uji, pemolesan, etsa dengan larutan HNO_3 3.25% yang dicampur dengan 75% alkohol, serta larutan aqua regia. Setelah itu, pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik dan gambar diambil untuk analisis lebih lanjut.

2.3. Alat dan Bahan

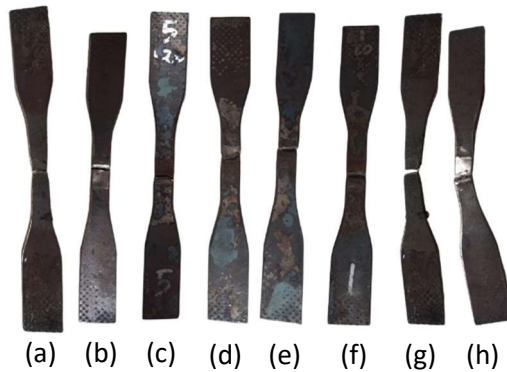
Alat dan bahan digunakan untuk membuat spesimen pada penelitian kali ini, seperti Baja ASTM A36, Elektroda E81T-Ni1C, gerinda, Mesin Las FCAW, Mesin *Heat Treatment*, Mikroskop Optik, Mesin Uji Tarik, Mesin Uji Impact, ampelas, peralatan etsa dan Jangka Sorong. Jumlah material yang diperlukan dalam penelitian dengan variasi kuat 125 A dan 175 A serta suhu PWHT 800°C, 850°C, 900°C dan tanpa PWHT dengan masing-masing variasi berjumlah 3 spesimen sehingga dibutuhkan 48 spesimen.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan penelitian ini terdapat informasi yang terdiri dari pengujian tarik, pengujian impact serta struktur mikro pada material baja ASTM A36 dengan variasi kuat pengelasan dan suhu *normalizing*, berikut data hasil penelitian tersebut.

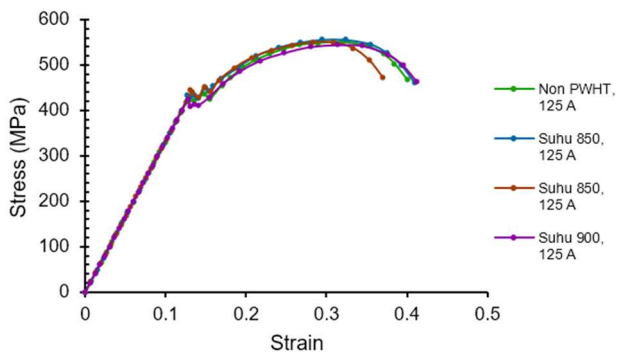
3.1. Hasil Uji Tarik

Spesimen uji baja ASTM A36 yang sudah mendapat perlakuan pengelasan dengan variasi kuat arus dan perlakuan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) telah diuji tarik yang berjumlah 3 spesimen rata-rata memiliki bentuk patahan dan mendapatkan nilai rata-rata kuat tarik yang ada pada uraian berikut.

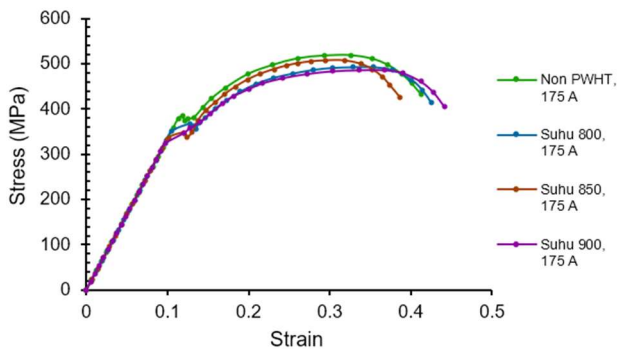


Gambar 5. Spesimen Setelah Uji Tarik (a) Non PWHT, 125 A; (b) Non PWHT, 175 A; (c) 800°C, 125 A; (d) 800°C, 175 A; (e) 850°C, 125 A; (f) 850°C, 175 A; (g) 900°C, 125 A; (h) 900°C, 175 A

Rata-rata spesimen yang telah dilakukan uji tarik dapat dilihat pada Gambar 4, patahan terjadi pada daerah *weld metal*, hal tersebut menunjukkan telah terjadi distribusi tegangan yang merata setelah dilakukan pengelasan dan *post weld heat treatment*.



Gambar 5. Kurva Stress-Strain PWHT pada Arus 125 A



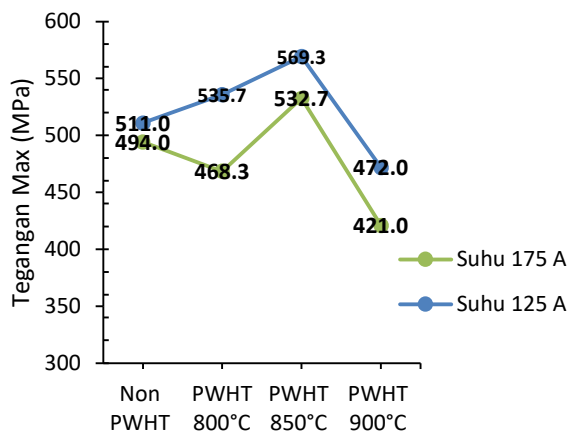
Gambar 6. Kurva Stress-Strain PWHT pada Arus 175 A

Gambar 5 dan 6 kurva *stress-strain*, menunjukkan hubungan antara tahanan dan rengangan pada material Baja ASTM A36 pada pengujian tarik. Didapat hasil *ductility* terbesar yaitu 0.44 pada kondisi suhu 900°C 175 A dan *ductility* terkecil yaitu 0.37 pada kondisi suhu 850°C 125 A. Hasil tegangan tarik didapatkan berbanding terbalik dengan nilai *ductility*, semakin rendah *ductility* maka kekuatan tarik bernilai besar.

Tegangan tarik adalah tegangan maksimum yang dicapai oleh suatu bahan sebelum retak atau pecah. Hasil pengujian menunjukkan nilai tegangan tarik maksimum yang diperoleh dari baja ASTM A36 dengan berbagai variasi kuat arus pengelasan dan suhu *normalizing* adalah sebagai berikut.

Tabel 3. Nilai Tegangan Tarik

Spesimen	Area (mm ²)	P max (KN)	σ Max (MPa)	σ Rata-Rata (MPa)
Non PWHT, 125A	125	41.4	530	511
	125	38	486	
	125	40.4	517	
Non PWHT, 175A	125	38.7	496	494
	125	39	499	
	125	38	487	
800°C, 125A	125	41.7	535	535.7
	125	42.4	543	
	125	41.3	529	
800°C, 175A	125	35.5	455	468.3
	125	36.9	473	
	125	37.2	477	
850°C, 125A	125	44.3	576	569.3
	125	46.5	595	
	125	41.8	537	
850°C, 175A	125	45.9	588	532.7
	125	40.6	520	
	125	38.5	490	
900°C, 125A	125	32.8	420	472
	125	36.8	472	
	125	40.9	524	
900°C, 175A	125	25.7	329	421
	125	36.6	469	
	125	36.3	465	



Gambar 7. Nilai Tegangan Tarik (MPa)

Hasil tegangan tarik dapat dilihat Tabel 3 dan Gambar 7, ditemukan bahwa baja ASTM A36 variasi PWHT 850°C 125 A memiliki nilai tegangan tarik yang paling besar yaitu sebesar 569.3 MPa daripada PWHT 850°C 175 A. Pada spesimen dengan variasi PWHT 800°C 125 A & 175A dan tanpa PWHT 125 A & 175A, memiliki rata-rata tegangan tarik yang bernilai lebih kecil dibandingkan dengan PWHT 850°C 125 A & 175 A. Begitupun juga pada spesimen dengan variasi PWHT 900 °C 125 A & 175 A terdapat nilai rata-rata nilai tegangan tarik paling kecil diantara spesimen yang lainnya yaitu 421 MPa.

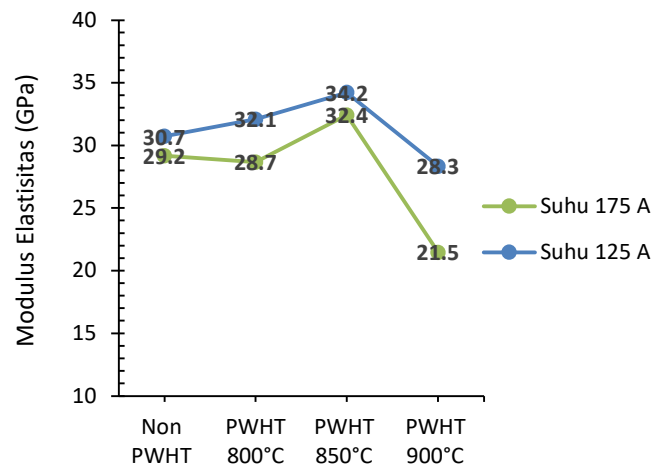
Kuat arus dan suhu PWHT yang tinggi tidak menjamin meningkatkan kekuatan tarik pada suatu material yang telah dilakukan pengelasan dan PWHT. Penelitian sebelumnya yang dilakukan (Muchammad, et al., 2024) [24], dengan penelitian pengelasan FCAW dengan Baja Tipe Grade A dengan variasi kuat arus 125 A, 150 A dan 200 A, didapatkan tegangan tarik yang paling tinggi pada kuat arus 150 A, hal tersebut menunjukkan semakin tinggi kuat arus tidak menentukan hasil tegangan tarik yang tinggi. Penelitian lain (Zamzami, et al., 2023) [25], dengan variasi suhu PWHT yaitu 350°C, 450, 550°C dan tanpa PWHT, didapatkan hasil pada suhu 450°C, hasil tersebut menunjukkan suhu tinggi tidak menentukan untuk mendapatkan tegangan tarik maksimal.

Modulus elastisitas yang didapatkan pada baja ASTM A36 dengan berbagai variasi kuat arus pengelasan dan suhu *normalizing* adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Data Hasil Modulus Elastisitas

Spesimen	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	E (GPa)	E Rata-Rata (GPa)
Non PWHT, 125A	426	14	30.4	30.7
	398	12	33.2	
	400	14	28.6	

Non PWHT, 175A	360	14	25.7	29.2
	376	12	31.3	
	366	12	30.5	
800°C, 125A	422	14	30.1	32.1
	422	12	35.2	
	433	14	30.9	
800°C, 175A	351	12	29.3	28.7
	359	12	29.9	
	375	14	26.8	
850°C, 125A	458	12	38.2	34.2
	479	14	34.2	
	424	14	30.3	
850°C, 175A	491	14	35.1	34.2
	404	14	28.9	
	400	12	33.3	
900°C, 125A	302	12	25.2	28.3
	363	12	30.3	
	414	14	29.6	
900°C, 175A	123	12	10.3	21.5
	348	12	29.0	
	352	14	25.1	



Gambar 8. Nilai Modulus Elastisitas (GPa)

Bedasarkan Tabel 4 dan Gambar 8, rata-rata nilai modulus elastisitas yang didapatkan berbanding lurus dengan nilai tegangan tarik, nilai modulus elastisitas paling tinggi dimiliki pada spesimen dengan 850°C 125 A sebesar 34.2 GPa sedangkan nilai modulus elastisitas paling rendah didapatkan pada spesimen 900°C 175A yaitu sebesar 21.5 GPa.

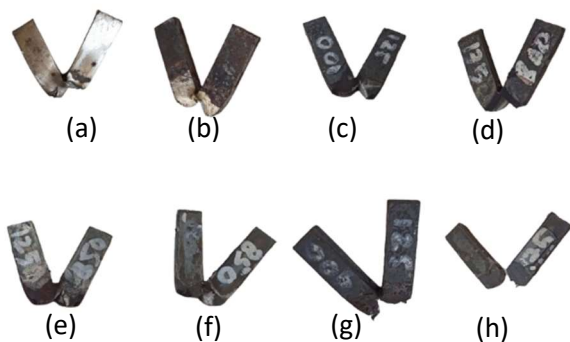
Terdapat perbedaan dari penelitian sebelumnya (Muchammad, et al., 2024) [24], pengelasan FCAW dengan Baja Tipe Grade A dengan variasi kuat arus 125 A, 150 A dan 200 A, rata-rata nilai modulus elastisitas tertinggi pada sambungan las 125 A elektroda E81T-Ni1C. Hal tersebut benbanding terbalik dengan tegangan tarik yang dihasil pada 125 A.

Penelitian lain (Zamzami, et al., 2023) [25], dengan variasi suhu PWHT yaitu 350°C, 450,

550°C dan tanpa PWHT, didapatkan bahwa meningkatnya suhu PWHT menghasilkan rata-rata modulus elastisitas yang rendah. Spesimen tanpa PWHT memiliki nilai modulus elastisitas yang tinggi.

3.2. Hasil Uji Impak

Pengujian Impak dilakukan untuk menentukan nilai ketangguhan dari hasil pengelasan material baja ASTM A36 dengan berbagai variasi kuat arus pengelasan dan suhu *normalizing*. Pengujian ini dilakukan sesuai dengan standar ASTM E23.



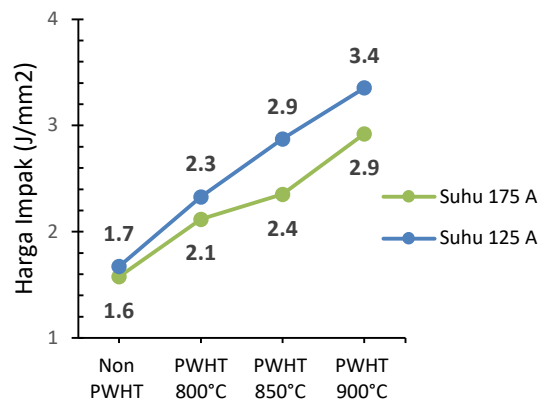
Gambar 5. Spesimen Setelah Uji Impak (a) Non PWHT, 125A; (b) Non PWHT, 175 A; (c) 800°C, 125 A; (d) 800°C, 175 A; (e) 850°C, 125 A; (f) 850°C, 175 A; (g) 900°C, 125 A; (h) 900°C, 175 A

Rata-rata spesimen yang telah dilakukan uji impak dapat dilihat pada Gambar 5, patahan terjadi pada daerah *weld metal* setelah dilakukan uji impak.

Tabel 5. Data Hasil Uji Impak

Spesimen	Energi Impak (J)	Luas Area (mm ²)	Nilai Impak (J/mm ²)	Rata-Rata Impak (J/mm ²)
Non PWHT, 125A	90	61.8	1.5	1.7
	115	63	1.8	
	106	60.9	1.7	
Non PWHT, 175A	82	61.5	1.3	1.6
	108	61.2	1.8	
	98	60	1.6	
800°C, 125A	157	63.6	2.5	2.3
	144	62.0	2.3	
	137	62.4	2.2	
800°C, 175A	139	61.8	2.2	2.1
	116	61.5	1.9	
	140	63.0	2.2	
850°C, 125A	168	66.2	2.5	2.9
	224	63.8	3.5	
	163	63.2	2.6	
850°C, 175A	163	65.3	2.5	2.4
	152	66.8	2.3	

900°C, 125A	138	60.4	2.3	3.4
	281	66.8	4.2	
	224	70.7	3.2	
	176	65.3	2.7	
900°C, 175A	253	67.1	3.8	2.9
	172	65.2	2.6	
	152	64.3	52.4	



Gambar 9. Nilai Impak (J/mm²)

Berdasarkan Tabel 6 dan Gambar 10, rata-rata harga impak pada kuat arus 125 A lebih besar dari kuat arus 175 A dan seiring bertambahnya suhu PWHT harga impak semakin meningkat. Didapatkan nilai rata-rata uji impak tersebar dimiliki pada 900°C 125 A yaitu 3.4 J/mm² dan terkecil dimiliki pada tanpa PWHT 175 A sebesar 1.6 J/mm². Hal ini dapat diartikan bahwa pengaruh dari proses *normalizing* terhadap nilai impak menjadi lebih tangguh daripada yang tidak mengalami perlakuan *normalizing*.

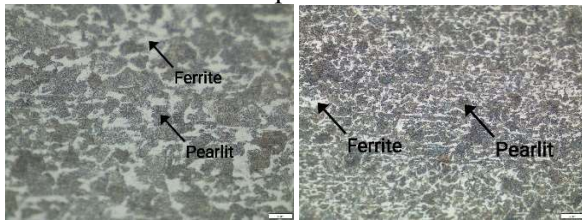
Penelitian sebelumnya (Zamzami, et al., 2023) [25], dengan variasi suhu PWHT yaitu 350°C, 450, 550°C dan tanpa PWHT pengujian impak yang didapatkan suhu 550°C memiliki nilai yang tinggi. Hal tersebut dapat sama dengan penelitian diatas seiring meningkatkannya suhu PWHT dan maka nilai impak yang didapatkan semakin tinggi.

3.3. Hasil Uji Struktur Mikro

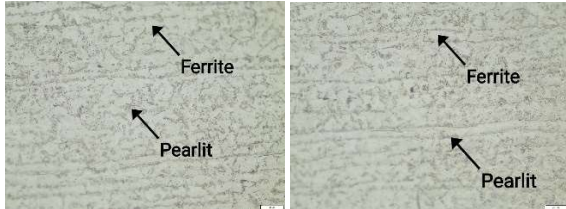
Pengujian mikrografi dalam penelitian ini bertujuan untuk mengamati perbedaan bentuk struktur mikro pada sambungan las baja ASTM A36 setelah dilakukan pengelasan FCAW (Flux-Cored Arc Welding) dengan variasi kuat arus dan suhu perlakuan panas, sehingga perubahan struktur mikro dapat diketahui.

Hasil pengujian struktur mikro pada sambungan las baja ASTM A36 menunjukkan sebagai berikut:

1. Struktur mikro pada daerah *base metal*



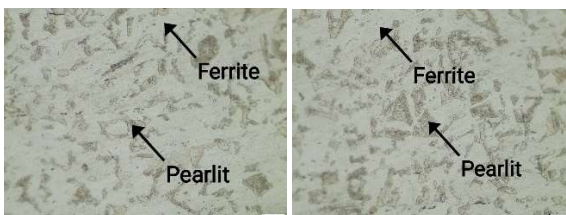
(a) Non PWHT 125 (b) Non PWHT 175 A



(c) 800°C, 125A (d) 800°C, 175A



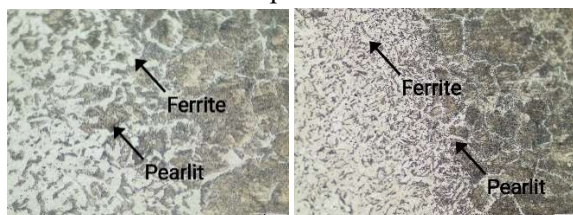
(e) 850°C, 125A (f) 850°C, 175A



(g) 900°C, 125A (h) 900°C, 175A

Gambar 11. Struktur Mikro pada Daerah Base Metal

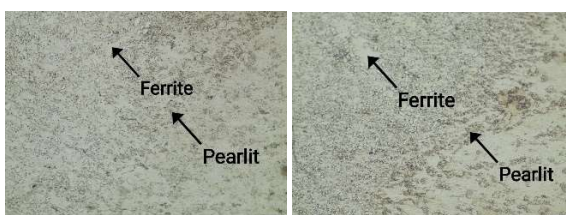
2. Struktur mikro pada daerah *HAZ*



(a) Non PWHT 125 A (b) Non PWHT 175 A



(c) 800°C, 125A (d) 800°C, 175A



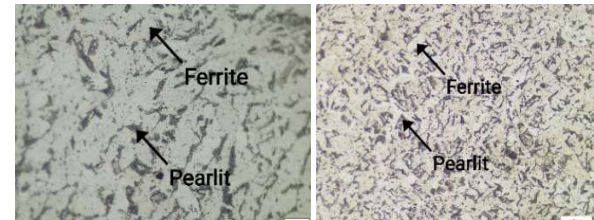
(e) 850°C, 125A (f) 850°C, 175A



(g) 900°C, 125A (h) 900°C, 175 A

Gambar 12. Struktur Mikro pada Daerah HAZ

3. Struktur mikro pada daerah *weld*



(a) Non PWHT 125 A (b) Non PWHT 175 A



(c) 800°C, 125A (d) 800°C, 175A



(e) 850°C, 125A (f) 850°C, 175A



(g) 900°C, 125A (h) 900°C, 175A

Gambar 13. Struktur Mikro pada Daerah Weld

Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa pada daerah pengelasan spesimen tanpa PWHT 125 A dan 175 A ukuran rata-rata butir masih besar serta lebih renggang, sedangkan pada spesimen yang diberikan heat treatment 800°C 125 A & 175 A, 850°C 125 A & 175 A, dan 900°C 125 A & 175 A ukuran butir pada daerah pengelasan menjadi lebih kecil dan lebih rapat. Ketiga area pada spesimen yang diamati menunjukkan bahwa semakin lama durasi PWHT, semakin rapat dan merapikan butir *ferrite* dan *pearlite*. Hal tersebut akan mempengaruhi tegangan residual, nilai kekuatan dan ketahanan dari suatu material.

Hasil tersebut dapat dilihat pada pengujian tarik spesimen dengan PWHT 850°C 125 A memiliki nilai rata-rata terbesar yaitu 569.3 MPa dan pengujian impak dengan spesimen PWHT 900°C 125 A memiliki rata-rata terbesar yaitu 3.4 J/mm². Penelitian sebelumnya (Farhan, et, al., 2019) [6] dengan variasi suhu PWHT 900°C, 975°C dan raw material menyatakan bahwa pada suhu 900°C memiliki butir *ferrit* dan *pearlit* yang lebih kecil serta rapat dibandingkan dengan spesimen RAW, didukung dengan hasil pengujian tegangan tarik pada spesimen 900°C sebesar 397.52 MPa lebih besar dari spesimen RAW yaitu 389.25 MPa.

4. KESIMPULAN

Pengujian tarik rata-rata kuat arus yang dihasilkan 125 A cenderung menghasilkan tegangan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi dibanding 175 A. Namun pada regangan tarik nilai yang didapatkan fluktuatif. PWHT pada 850°C menunjukkan tegangan tarik dan modulus elastisitas optimal sebesar 569.3 MPa dan 34.2 GPa dibandingkan dengan 800°C, 900°C, dan tanpa PWHT. Namun pada regangan tarik nilai yang fluktuatif disetiap suhu, serta dapat dilihat pada kurva *stress-strain* didapatkan hasil *ductility* yang besar maka kekuatan tarik maksimal yang dihasilkan kecil.

Pengujian impak pada penelitian ini didapatkan bahwa nilai impak dengan variasi kuat arus 125 A memiliki rata-rata nilai lebih tinggi dibanding 175 A. Begitupun dengan suhu PWHT, semakin tinggi suhu PWHT maka nilai *absorb energy* semakin besar yang didapat. Kedua pengujian tarik dan impak dapat dilihat struktur mikro pada zona pengelasan, suhu PWHT meningkatkan maka semakin rapat dan merapikan butir *ferrite* dan *pearlit*.

Berdasarkan hasil penelitian, kombinasi parameter optimal untuk memperoleh sifat mekanik yang baik pada sambungan las baja ASTM A36 adalah menggunakan kuat arus 125 A dengan proses *normalizing* pada suhu 850°C. Pemilihan kuat arus dan suhu PWHT yang tepat akan memberikan kualitas dari penetrasi pada pengelasan, membantu mengembalikan struktur mikro yang lebih homogen dan dapat meningkatkan kekuatan serta ketangguhan suatu material.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penulisan penelitian ini, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini tidak akan terwujud tanpa bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa serta semua

pihak yang telah memberikan dukungan baik secara formal maupun material dalam penyusunan tugas akhir ini. Secara khusus, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada orang tua, Dosen Pembimbing 1, dan Dosen Pembimbing 2 serta instansi yang terkait yang telah memberikan petunjuk, bantuan, serta dukungan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Wiryosumarto and T. Okumura, *Teknologi Pengelasan Logam*, vol. 8. 2000.
- [2] T. Surdia, "Pengetahuan bahan teknik," (*No Title*), 1999.
- [3] A. S. M. H. Committee, "Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys." ASM International, Jan. 01, 1990. doi: 10.31399/asm.hb.v01.9781627081610.
- [4] R. D. N. Manurung, U. Budiarto, and H. Yudo, "Analisa Kekuatan Tarik dan Impak Hasil Las SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Pada Baja ASTM A36 Dengan Variasi Polaritas dan Besar Arus Pengelasan," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 9, no. 4, 2021.
- [5] S. A. Mohamat, I. A. Ibrahim, A. Amir, and A. Ghalib, "The effect of flux core arc welding (FCAW) processes on different parameters," *Procedia Eng.*, vol. 41, pp. 1497–1501, 2012.
- [6] A. Farhan, U. Budiarto, and A. W. B. Santosa, "Analisa Perbandingan Kekuatan Tarik, Tekuk, dan Mikrografi Pada Sambungan Las Baja SS 400 Akibat Pengelasan FCAW (Flux-Cored Arc Welding) dengan Variasi Jenis Kampuh dan Posisi Pengelasan," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 4, 2019.
- [7] T. Kannan and N. Murugan, "Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 176, no. 1–3, pp. 230–239, 2006.
- [8] M. Alip, "Teori dan praktek las / Mochamad Alip." Jakarta: Proyek pengembangan lembaga pendidikan tenaga kependidikan 1989, Jakarta, 1989. [Online]. Available: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip&db=edsoai&AN>

=edsoai.on1027427726&site=eds-live&custid=ns003811

- [9] M. T. I. Sianturi, U. Budiarto, and I. P. Mulyatno, "Analisa Kekuatan Tarik dan Impak Baja ST 40 Pengelasan Flux-Cored Arc Welding (FCAW) Posisi 4G dengan Variasi Arus Pengelasan," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 4, 2019.
- [10] E. Widodo, I. Iswanto, M. A. Nugraha, and K. Karyanik, "Electric current effect on mechanical properties of SMAW-3G on the stainless steel AISI 304," in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, p. 12003.
- [11] R. Haq, U. Budiarto, and I. P. Mulyatno, "Analisa Kekuatan Tarik, Tekuk, dan Impak Pengelasan Flux Cored Arc Welding Material Baja St 40 Posisi 3G dengan Variasi Kuat Arus Listrik," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 4, 2019.
- [12] M. I. R. Putra, M. Ari, and I. K. Rohmat, "Analisis Temperatur PWHT dan Holding Time pada Sambungan Las Material SA 387 Grade 11 Class 1 Terhadap Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro." Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, 2019.
- [13] B. T. Sofyan, "Pengantar material teknik." UNHAN RI PRESS, 2021.
- [14] S. Jokosisworo, "Pengaruh Normalizing Dengan Variasi Waktu Penahanan Panas (Holding Time) Terhadap Sifat Mekanik Baja ST 46," *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 15, no. 2, pp. 68–73, 2018.
- [15] S. Ramadhan, S. Syukran, and N. Juhan, "ANALISIS PENGARUH PROSES NORMALIZING PADA SAMBUNGAN LAS SMAW BAJA PLAT SS-400 TERHADAP NILAI IMPACT DAN HARDNESS," *J. Mesin Sains Terap.*, vol. 5, no. 2, pp. 107–113, 2021.
- [16] H.-W. Wu, T.-J. Wu, R.-K. Shiue, and L.-W. Tsay, "The Effect of normalizing temperature on the short-term creep rupture of the simulated HAZ in Gr. 91 steel welds," *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 12, p. 1072, 2018.
- [17] P. C. Lubis, U. Budiarto, and S. J. Sisworo, "Analisa Pengaruh Variasi Waktu Post Weld Heat Treatment Pada Pengelasan SMAW Baja A36 Terhadap Kekuatan Uji Tarik, Uji Impak, Dan Struktur Mikro," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 10, no. 3, pp. 48–57, 2022.
- [18] I. Triwijaya, A. S. Sirajuddin, A. Asmara, M. Mustafa, K. Selleng, and H. Hidayat, "Pengaruh Proses Post Weld Heat Treatment (PWHT) Pada Pengelasan SMAW terhadap Kekuatan Tarik Baja ST 60," *J. Mek.*, vol. 13, no. 1.
- [19] A. Aloraier, R. Ibrahim, and P. Thomson, "FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 83, no. 5, pp. 394–398, 2006.
- [20] I. F. Augustino, "Pengaruh Lama Waktu Tunggu Pada Proses Pwht Terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro dan Tegangan Sisa Pada Pengelasan Baja AAR M201 GR. B+." Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [21] R. Setiaji, "Pengujian Tarik," *Jakarta Lab. Metal. Fis. FTUI*, 2009.
- [22] G. Motors and W. Europe, *Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators*. 2000.
- [23] E. 23 ASTM, "Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials," *E23-07a, Pennsylvania, PA, USA*, 2007.
- [24] R. Muchammad, S. Jokosisworo, and A. W. B. Santosa, "Pengaruh Kuat Arus dan Jenis Elektroda dengan Kandungan Nikel Terhadap Sifat Mekanis Baja Kapal Grade A pada Pengelasan FCAW," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 12, no. 1, 2024.
- [25] Z. Zamzami, U. Budiarto, and S. Jokosisworo, "Pengaruh Variasi Temperatur PWHT Terhadap Kekuatan Tarik, Impak, dan Struktur Mikro Aluminium 6061 Pasca Pengelasan MIG," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 11, no. 2, pp. 13–21, 2023.