https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval

ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Pengaruh Variasi Arus las GTAW Pada Pengelasan Dissimilar Baja ASTM A36 dan SS316L Terhadap Kekuatan Tarik dan Mikrostruktur

Rafi Zhalifunnas Tjahyono[1)], Wilma Amiruddin[2)], Parlindungan Manik[3)]
[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 :rafizhalifunnas@undip.ac.id

Abstrak

Pengelasan logam tak sejenis (dissimilar metal welding) antara baja karbon ASTM A36 dan stainless steel SS316L banyak diterapkan pada industri karena menggabungkan kekuatan struktural dan ketahanan korosi, namun kualitas sambungannya dipengaruhi arus pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi arus GTAW 100 A, 120 A, dan 140 A terhadap kekuatan tarik dan mikrostruktur sambungan dissimilar ASTM A36–SS316L pada base metal, HAZ, dan weld metal, serta menentukan arus yang menghasilkan sambungan terbaik. Penelitian dilakukan secara eksperimental pada pelat tebal 10 mm dengan sambungan single V-groove, filler ER309L, dan posisi pengelasan 1G. Pengujian tarik mengacu ASTM E8/E8M, sedangkan mikrostruktur mengacu ASTM E3 dan ASTM E407. Hasil pengujian menunjukkan tegangan tarik maksimum rata-rata tertinggi pada arus 100 A sebesar 365,60 MPa dengan fracture strain 0,34 dan fracture energy 112,93 MJ/m³, menurun menjadi 354,13 MPa pada arus 120 A (yield strength tertinggi 300,93 MPa), dan 331,46 MPa pada arus 140 A. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa peningkatan arus memperbesar heat input sehingga memicu pertumbuhan butir (grain coarsening) pada HAZ ASTM A36 dan weld metal, yang menurunkan sifat mekanik sambungan. Berdasarkan hasil tersebut, arus 100 A merupakan parameter paling optimal untuk menghasilkan sambungan dissimilar GTAW ASTM A36–SS316L dengan kombinasi kekuatan tarik dan keuletan terbaik.

Kata Kunci : Pengelasan Dissimilar, GTAW, Variasi Arus, Kekuatan Tarik, Mikrostruktur

1. PENDAHULAN

Pengelasan logam tak sejenis (*dissimilar metal welding*/DMW) banyak diterapkan di berbagai sektor industri karena mampu menggabungkan material dengan karakteristik berbeda untuk memperoleh efisiensi biaya dan kinerja komponen yang lebih optimal [1], [2]. Salah satu kombinasi yang banyak digunakan adalah baja karbon rendah ASTM A36 yang memiliki sifat mekanik baik dan biaya relatif ekonomis dengan stainless steel SS316L yang unggul dalam ketahanan korosi [3], [4]. Salah satu metode penyambungan yang umum digunakan adalah *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), karena mampu menghasilkan kualitas sambungan tinggi melalui busur listrik yang stabil dan pengendalian *heat input* yang presisi [5].

Kualitas sambungan pada pengelasan logam tak sejenis dipengaruhi secara signifikan oleh parameter proses pengelasan, terutama besar arus las yang menentukan *heat input* selama penyambungan [6]. Variasi *heat input* berpengaruh terhadap pembentukan mikrostruktur, karakteristik daerah *heat affected zone* (HAZ), serta kekuatan tarik sambungan [7]. Parameter pengelasan yang tidak tepat dapat menyebabkan perubahan morfologi logam las, pertumbuhan butir, hingga penurunan kualitas sambungan akibat cacat atau distribusi panas yang tidak merata [8]. Optimasi parameter GTAW pada berbagai kombinasi material dissimilar terbukti mampu menghasilkan mikrostruktur yang lebih homogen dan meningkatkan kekuatan tarik sambungan [9].

Penelitian terdahulu menunjukkan pengaruh signifikan parameter proses terhadap sifat mekanik

dan mikrostruktur sambungan las. Kumar dan Balasubramanian [10] melaporkan bahwa optimasi *friction welding* menggunakan *Response Surface Methodology* menghasilkan *joint efficiency* sebesar 80%. Senthilkumar dkk. [11] menunjukkan bahwa *heat input* 0,608 kJ/mm pada GTAW ASTM A36 menghasilkan kekuatan tarik tertinggi 483 MPa, sedangkan *heat input* 1,466 kJ/mm menurunkan kekuatan tarik dan kekerasan. Demarque dkk. [12] menemukan bahwa peningkatan arus dan suhu *interpass* pada sambungan Inconel 718–AISI 316L meningkatkan luas zona fusi hingga 250% dan fraksi ferit-δ hingga 151%. Kant dkk. [13] melaporkan kekuatan tarik 536 N/mm² pada GTAW dengan filler 309L, sedangkan SMAW dengan elektroda E347-16 menghasilkan kekuatan tarik dan kekerasan tertinggi (594,40 N/mm² dan 370 HV).

Pemilihan rentang arus 100 A, 120 A, dan 140 A pada penelitian ini mengacu pada Jha dan Jha [14], yang pada baja tebal 12 mm dengan variasi arus 100–140 A memperoleh kekuatan tarik optimum pada 120 A. Baghel [15] menjelaskan bahwa rentang arus tersebut penting untuk mencegah *lack of fusion* pada arus rendah dan pelebaran HAZ pada arus tinggi. Riswanda dkk. [16] melaporkan bahwa arus 120–140 A pada sambungan dissimilar AISI 1015–SS304L meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan, meski kegagalan tetap terjadi pada HAZ sisi baja karbon, sementara Amalia dkk. [17] menunjukkan arus GTAW hingga 140 A menghasilkan kekuatan tarik tertinggi dengan mikrostruktur *lathy ferrite* pada SS304.

Meskipun demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian pada kombinasi material dan proses yang menjadi fokus penelitian ini. Pratiwi dkk. [18] meneliti sambungan SS316–ASTM A36 menggunakan SMAW dengan kondisi optimum pada arus 100 A, sehingga karakteristik sambungan pada proses GTAW belum diketahui. Ade Saputra [19] menggunakan material ASTM A36–AISI 316 dengan SMAW pada rentang arus rendah (60–80 A), belum merepresentasikan GTAW pada arus 100–140 A untuk pelat tebal. Shridhar dkk. [20] membandingkan SMAW dan GTAW pada sambungan AISI 1018–AISI 304 namun berfokus pada pengaruh PWHT, bukan variasi arus. Patil dkk. [21] menggunakan GTAW berdenyut pada sambungan AISI 321–316L, namun hanya melibatkan dua jenis baja tahan karat. Mishra dkk. [22] meneliti sambungan baja lunak dengan berbagai *grade* stainless steel menggunakan TIG dan MIG tanpa variasi arus sistematis maupun analisis mikrostruktur pada tiga zona sambungan.

Berdasarkan kajian tersebut, belum ditemukan penelitian yang secara komprehensif menganalisis pengaruh variasi arus GTAW 100 A, 120 A, dan 140 A terhadap sambungan dissimilar ASTM A36–SS316L dengan menghubungkan hasil uji kekuatan tarik dan karakteristik mikrostruktur pada ketiga zona sambungan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk: 1) menganalisis pengaruh variasi arus GTAW 100 A, 120 A, dan 140 A terhadap kekuatan tarik sambungan dissimilar ASTM A36–SS316L; 2) menganalisis pengaruh variasi arus tersebut terhadap karakteristik mikrostruktur pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal*; dan 3) menentukan variasi arus GTAW yang menghasilkan karakteristik sambungan terbaik berdasarkan hasil pengujian tarik dan analisis mikrostruktur.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Objek penelitian yang digunakan adalah sambungan las *dissimilar* antara baja karbon rendah ASTM A36 dan *stainless steel* SS316L dengan ketebalan material 10 mm. Kedua material disambungkan menggunakan proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan variasi arus pengelasan sebesar 100 A, 120 A, dan 140 A serta menggunakan *filler metal* ER309L. Pemilihan ASTM A36 dan SS316L didasarkan pada perbedaan karakteristik kedua material, baik dari komposisi kimia maupun sifat mekaniknya, sehingga respons material terhadap masukan panas selama proses pengelasan juga berbeda.

Baja ASTM A36 merupakan baja karbon struktural dengan kandungan karbon relatif rendah dan memiliki kemampuan las yang baik. Mikrostruktur utama ASTM A36 umumnya terdiri atas *ferrite* dan *pearlite*. Selama proses pengelasan, perubahan masukan panas dapat memengaruhi ukuran butir dan distribusi *ferrite–pearlite*, terutama pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) [23], [24].

Material kedua yang digunakan adalah *stainless steel* SS316L. Material ini merupakan baja tahan karat austenitik dengan kandungan karbon rendah. Kandungan unsur paduan pada SS316L memberikan karakteristik yang berbeda dibandingkan ASTM A36, terutama dalam respons material terhadap siklus termal selama proses pengelasan. Variasi *heat input* pada proses GTAW dapat memengaruhi ukuran butir, distribusi fase, serta pembentukan *delta ferrite* pada daerah las dan HAZ [25], [26]. Komposisi kimia dan sifat mekanik baja ASTM A36 dan SS316L yang

digunakan sebagai acuan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Kandungan ASTM A36 dan SS316L

Unsur	ASTM A36	SS316L
Karbon (C)	≤ 0,26%	0,03%
Silikon (Si)	≤ 0,40%	0,75%
Mangan (Mn)	0,6-0,9%	2%
Nikel (Ni)	-	10-14%
Krom (Cr)	-	16-18%
Fosfor (P)	≤ 0,04%	≤ 0,045%
Sulfur (S)	≤ 0,05%	≤ 0,03%

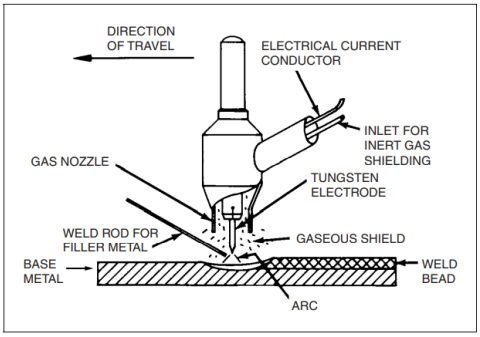
Tabel 2. *Mechanical Properties* ASTM A36 dan SS316L

Mechanical Properties	**Nilai ASTM A36**	**Nilai SS316L**
Tensile Strength	400 - 550 MPa	485-620 MPa
Poissons Ratio	0,26	0,30
Elongation	≤ 20%	35-45%
Modulus Elastisitas	200 GPa	193 GPa

2.2. Pengelasan

Pengelasan merupakan proses penyambungan material secara permanen melalui pembentukan ikatan metalurgi dengan memanfaatkan energi panas, dengan atau tanpa tekanan dan logam pengisi. Pada penelitian ini digunakan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), yaitu proses pengelasan busur yang memanfaatkan elektroda tungsten tidak terumpan serta gas inert sebagai pelindung daerah pengelasan. Karakteristik tersebut memungkinkan GTAW menghasilkan busur yang relatif stabil dan memberikan pengendalian panas yang baik, sehingga sesuai diterapkan pada penyambungan material yang memiliki karakteristik metalurgi berbeda. Kualitas sambungan yang dihasilkan tidak hanya ditentukan oleh jenis material dan logam pengisi, tetapi juga oleh parameter proses yang mengendalikan siklus termal selama pengelasan. Kondisi termal tersebut selanjutnya menentukan pembentukan daerah *weld metal*, *heat affected zone* (HAZ), serta perubahan sifat mekanik material di sekitar sambungan [27], [28].

Arus pengelasan menjadi salah satu parameter penting pada GTAW karena berhubungan langsung dengan besarnya energi panas yang diberikan ke sambungan. Peningkatan arus umumnya meningkatkan *heat input*, sehingga dapat memperbesar penetrasi, memengaruhi ukuran *weld pool*, memperluas HAZ, serta mengubah laju pendinginan dan perkembangan mikrostruktur. Namun, masukan panas yang lebih besar tidak selalu menghasilkan kualitas sambungan yang lebih baik karena paparan panas berlebih dapat mendorong pertumbuhan butir dan perubahan fase yang berpotensi menurunkan sifat mekanik. Pada sambungan *dissimilar* ASTM A36–SS316L, kondisi tersebut menjadi lebih kompleks karena kedua material memiliki respons termal dan metalurgi yang berbeda. Oleh karena itu, pengaturan arus diperlukan untuk memperoleh keseimbangan antara penetrasi yang memadai, kestabilan mikrostruktur, dan kemampuan sambungan dalam menahan beban [29], [30].



Gambar 1. Ilustrasi Pengelasan GTAW

2.3. Tahap Penelitian

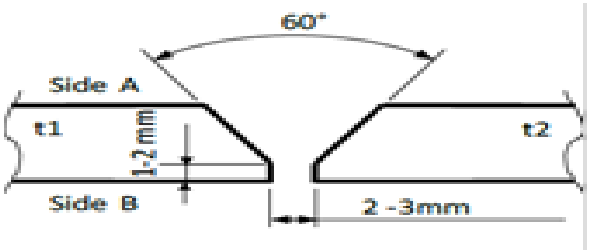
Tahap penelitian diawali dengan persiapan material berupa baja ASTM A36 dan *stainless steel* SS316L dengan ketebalan 10 mm. Kedua pelat dipotong sesuai kebutuhan, kemudian bagian sambungan dibentuk menggunakan konfigurasi *single V-groove* dan diposisikan saling berhadapan sebelum proses pengelasan dilakukan. Penjepitan material dilakukan untuk menjaga kestabilan posisi dan celah sambungan selama pengelasan. Selanjutnya, penyambungan dilakukan menggunakan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan tiga variasi arus, yaitu 100 A, 120 A, dan 140 A. Perbedaan arus tersebut digunakan sebagai variabel utama untuk menghasilkan kondisi masukan panas yang berbeda sehingga pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan dapat dianalisis. Dengan standar prosedur yang sesuai dan detail sebagai berikut.

a. Mesin Las : TIG
b. Gas Pelindung : Argon 15L/min
c. Jenis Pengelasan : 141 (GTAW)
d. Arus Listrik : 100 A, 120 A, 140 A
e. Jenis Elektroda : ER309L
f. Logam Induk ; *Stainless* SS316L dan Baja ASTM A36
g. Posisi Pengelasan : PA/1G
h. Tahap Pengelasan : Root pass, Fill pass, pass 2-n

Setelah proses pengelasan selesai, sambungan dipotong dan dibentuk menjadi spesimen sesuai dengan jenis pengujian yang dilakukan. Pengujian tarik menggunakan spesimen yang mengacu pada ASTM E8/E8M [31], sedangkan preparasi spesimen untuk pengamatan mikrostruktur mengikuti ASTM E3 [32]. Hasil dari setiap variasi arus kemudian dibandingkan untuk mengetahui perubahan kekuatan tarik serta karakteristik mikrostruktur pada daerah *base metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal*. Tahapan tersebut memungkinkan pengaruh perubahan arus GTAW terhadap kualitas sambungan dissimilar ASTM A36–SS316L dianalisis secara sistematis.

2.4. Pembuatan Spesimen

Pembuatan spesimen diawali dengan menyiapkan pelat baja ASTM A36 dan *stainless steel* SS316L dengan ketebalan 10 mm. Kedua material dipotong sesuai ukuran yang dibutuhkan, kemudian bagian tepi yang akan disambungkan dipersiapkan dengan membentuk kampuh tipe *single V-groove*. Geometri kampuh dibuat dengan sudut 60°, *root face* sekitar 1–2 mm, dan *root gap* sekitar 2–3 mm. Pembentukan bevel dilakukan untuk menyediakan ruang yang memadai bagi logam las sekaligus membantu tercapainya penetrasi pada bagian akar sambungan. Geometri kampuh perlu dijaga tetap seragam karena perubahan sudut bevel maupun celah akar dapat memengaruhi distribusi panas, volume logam pengisi, dan kestabilan penetrasi selama proses GTAW. Konfigurasi bevel yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri Bevel Sambungan ASTM A36–SS316L

Setelah bevel terbentuk, pelat ASTM A36 dan SS316L diposisikan saling berhadapan dengan mempertahankan *root gap* yang telah ditentukan, kemudian dijepit menggunakan *clamp* agar posisi dan geometri sambungan tidak berubah selama proses pengelasan. Sambungan selanjutnya dilas menggunakan GTAW pada variasi arus 100 A, 120 A, dan 140 A. Setelah proses pengelasan selesai, pelat hasil sambungan dipotong kembali untuk menghasilkan spesimen sesuai kebutuhan pengujian. Spesimen uji tarik dibentuk mengacu pada ASTM E8/E8M [31], sedangkan spesimen pengamatan mikrostruktur dipersiapkan berdasarkan ASTM E3 [32]. Tahapan ini dilakukan secara konsisten pada setiap variasi arus agar perbedaan hasil pengujian dapat dikaitkan dengan perubahan parameter pengelasan, bukan akibat perbedaan geometri atau proses persiapan spesimen.

2.5. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sambungan *dissimilar* ASTM A36–SS316L dalam menerima pembebanan aksial hingga mengalami deformasi dan patah. Spesimen hasil pengelasan pada masing-masing variasi arus 100 A, 120 A, dan 140 A diuji menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan mengacu pada ASTM E8/E8M [31]. Selama pengujian, gaya tarik diberikan secara bertahap hingga spesimen mengalami kegagalan, sehingga diperoleh hubungan antara beban, perpindahan, tegangan, dan regangan. Data tersebut digunakan untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanik sambungan sebagai akibat dari perbedaan kondisi termal selama proses pengelasan. Pada sambungan logam tak sejenis, respons tarik tidak hanya dipengaruhi oleh kekuatan masing-masing logam induk, tetapi juga oleh kondisi *weld metal*, HAZ, serta karakteristik metalurgi yang terbentuk selama pengelasan [33], [34].



Gambar 3. Universal Testing Machine (UTM)

Nilai tegangan tarik dihitung berdasarkan perbandingan antara gaya yang bekerja dengan luas penampang awal spesimen, sedangkan regangan diperoleh dari perubahan panjang spesimen terhadap panjang awalnya. Selain tegangan dan regangan, analisis kurva *stress–strain* juga digunakan untuk menentukan *fracture strain* dan *fracture energy*. *Fracture strain* menunjukkan besarnya deformasi yang mampu dicapai material hingga mengalami patah, sedangkan *fracture energy* menggambarkan kemampuan material menyerap energi selama proses deformasi sampai kegagalan. Parameter tersebut memberikan informasi yang lebih menyeluruh dibandingkan hanya menggunakan nilai kekuatan tarik maksimum karena dapat menunjukkan keseimbangan antara kekuatan dan kemampuan deformasi pada setiap variasi arus pengelasan.

Tegangan tarik dihitung dengan persamaan:

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

σ = Tegangan (Mpa)
F = Gaya Tarik (N)
A_0 = Luas penampang awal (mm^2)

Sedangkan Regangan dihitung menggunakan:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\%$$

ε = Regangan (%)
L_f = Panjang akhir (mm)
L_0 = Panjang awal (mm)

Nilai *Fracture Strain* dapat dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon_f = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

ε_f = *Fracture Strain*
L_f = Panjang spesimen pada saat patah (mm)
L_0 = Panjang awal (mm)

Sementara itu, *fracture energy* per satuan volume diperoleh dari luas daerah di bawah kurva tegangan–regangan sampai titik patah, yang secara matematis dinyatakan sebagai:

$$U_f = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \times \varepsilon_f$$

U_f = Energi patah per satuan volume
σ_y = *Yield Strength* (MPa)
σ_u = *Ultimate Strength* (MPa)
ε_f = Regangan pada saat patah

Semakin besar luas daerah di bawah kurva *stress–strain*, semakin besar energi yang dapat diserap spesimen sebelum mengalami kegagalan. Dengan demikian, perbandingan nilai tegangan maksimum, regangan, *fracture strain*, dan *fracture energy* digunakan untuk menilai pengaruh variasi arus GTAW terhadap respons mekanik sambungan ASTM A36–SS316L secara lebih komprehensif.

2.6. Pengujian Mikrostruktur

Pengujian mikrostruktur dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik internal sambungan *dissimilar* ASTM A36–SS316L akibat perbedaan arus pengelasan GTAW. Pengamatan difokuskan pada beberapa zona yang mengalami kondisi termal berbeda, yaitu *base metal* ASTM A36, HAZ ASTM A36, *weld metal*, HAZ SS316L, dan *base metal* SS316L. Perbedaan *heat input* pada arus 100 A, 120 A, dan 140 A dapat menghasilkan laju pemanasan dan pendinginan yang berbeda sehingga berpotensi memengaruhi ukuran butir, distribusi fasa, serta morfologi struktur pada masing-masing daerah sambungan. Oleh karena itu, analisis mikrostruktur tidak hanya digunakan untuk menggambarkan perubahan struktur akibat proses pengelasan, tetapi juga menjadi dasar untuk menjelaskan perbedaan respons mekanik yang diperoleh dari pengujian tarik [35], [36].

Preparasi spesimen dilakukan dengan mengacu pada ASTM E3 [32], yang meliputi pemotongan spesimen secara melintang terhadap arah pengelasan, pengamplasan bertahap, serta pemolesan hingga diperoleh permukaan yang rata dan bebas goresan. Setelah proses pemolesan, permukaan spesimen dilakukan proses etsa berdasarkan ASTM E407 [37] untuk memperjelas batas butir dan karakteristik fasa sebelum dilakukan pengamatan mikroskopis. Hasil pengamatan pada setiap zona sambungan kemudian dibandingkan antarvariasi arus untuk menilai perubahan morfologi dan distribusi struktur yang terbentuk. Pendekatan tersebut penting karena perubahan sifat mekanik pada sambungan *dissimilar* tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan nilai kekuatan tarik, tetapi perlu dikorelasikan dengan perubahan mikrostruktur yang terjadi akibat siklus termal selama proses pengelasan.

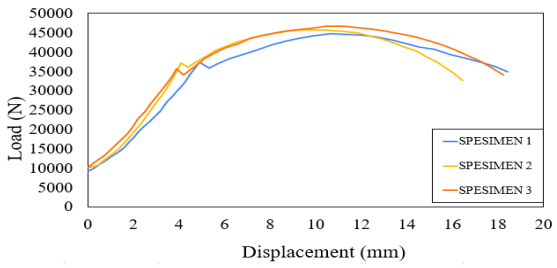
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

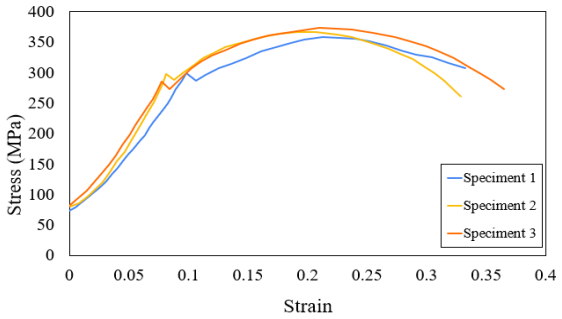
3.1. Hasil Pengujian Tarik

Gambar 4. menunjukkan lokasi patahan pada spesimen uji tarik hasil pengelasan GTAW dengan variasi arus 100 A, 120 A, dan 140 A. Pada variasi arus las 100 A, lokasi patahan diduga terbentuk pada daerah *heat affected zone* (HAZ) yang ditandai dengan adanya *necking* sebelum terjadi patahan, menunjukkan bahwa spesimen memiliki kemampuan deformasi plastis yang baik. Pada variasi arus 120 A, lokasi patahan diduga terjadi pada daerah transisi antara *weld metal* dan HAZ dengan karakteristik deformasi berupa *necking* yang menunjukkan perilaku ulet pada sambungan las. Sementara itu, pada variasi arus 140 A, patahan diduga terjadi pada daerah HAZ atau *fusion boundary* yang dipengaruhi oleh peningkatan masukan panas selama proses pengelasan. Secara umum, ketiga variasi menunjukkan adanya fenomena *necking* sebelum patah yang mengindikasikan bahwa sambungan las ASTM A36–SS316L dengan filler E309L mengalami mekanisme patah yang bersifat ulet.

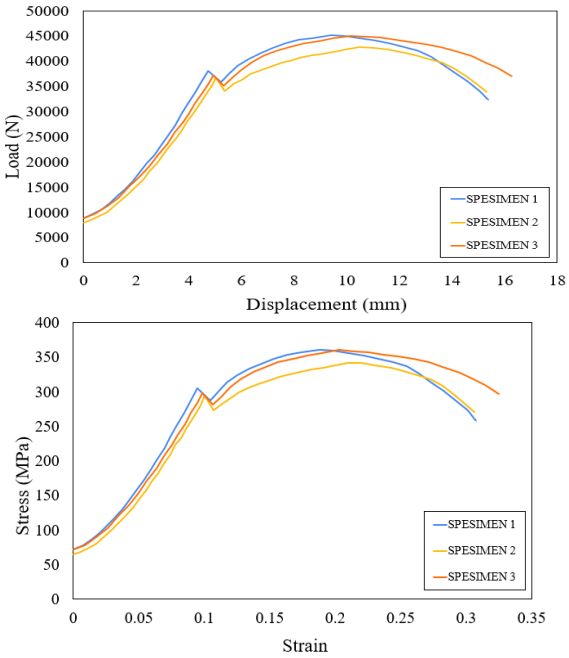


Gambar 4. Spesimen Uji Tarik, a)100A, b) 120A, c) 140A

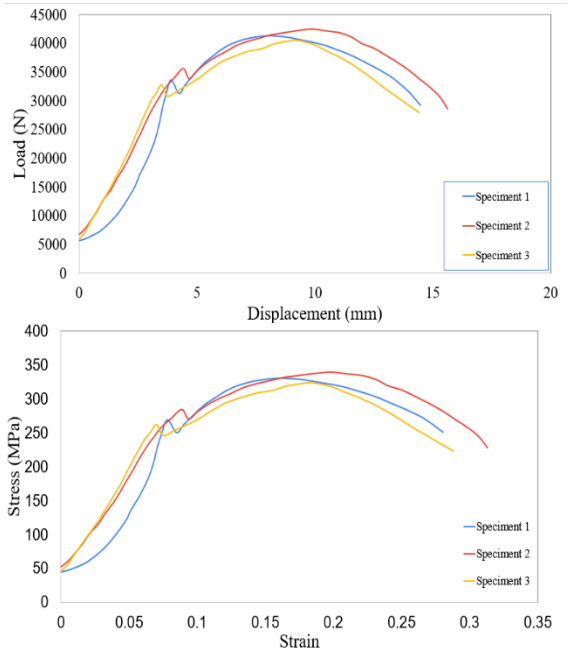




Gambar 5. Kurva Load-Displacement dan Kurva Stress-Strain Arus 100 A



Gambar 6. Kurva Load-Displacement dan Kurva Stress-Strain Arus 120 A



Gambar 7. Kurva Load-Displacement dan Kurva Stress-Strain Arus 140 A

Tabel 3. Data Hasil Uji Tarik

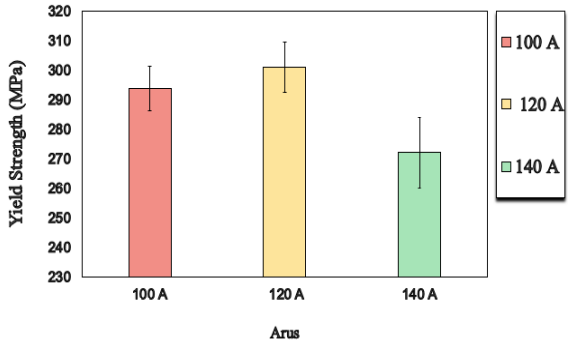
Spesimen	A_0 (mm^2)	F (N)	σ Maks (MPa)	Standar Deviasi	σ Rata-rata (MPa)
Arus 100 A	125	45200	358	7.63	365.600
	125	45600	365		
	125	46700	374		
Arus 120 A	125	45100	361	10	354.133
	125	42700	342		
	125	45000	360		
Arus 140 A	125	41300	330	8.05	331.467
	125	42500	340		
	125	40500	324		

Berdasarkan Tabel 3 hasil pengujian tarik pada variasi arus 100 A, 120 A, dan 140 A, terlihat bahwa peningkatan arus pengelasan memberikan pengaruh terhadap perubahan sifat mekanik sambungan. Pada arus 100 A, diperoleh tegangan maksimum rata-rata sebesar 365,60 MPa dengan beban maksimum mencapai sekitar 46.700 N. Gambar 5 - 7 Kurva *load-displacement* dan *stress-strain* menunjukkan perilaku elastis pada tahap awal pembebanan yang kemudian berubah menjadi deformasi plastis hingga mencapai kondisi maksimum sebelum mengalami penurunan akibat *necking*. Nilai standar deviasi tegangan sebesar 7,63 MPa menunjukkan bahwa hasil pengujian antar spesimen cukup konsisten. Kondisi ini mengindikasikan bahwa arus 100 A mampu menghasilkan sambungan dengan kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik.

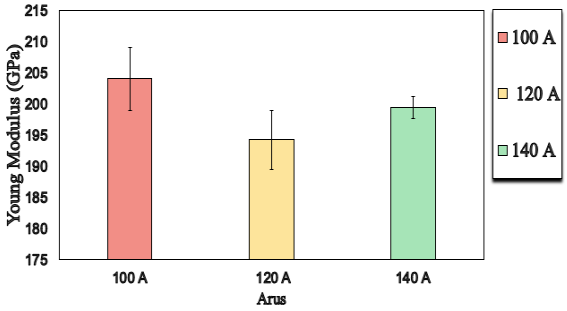
Pada arus 120 A, tegangan maksimum rata-rata mengalami penurunan menjadi 354,13 MPa sedangkan pada arus 140 A terjadi penurunan lebih lanjut menjadi 331,46 MPa. Berdasarkan kurva *load-displacement* dan *stress-strain*, kedua variasi tersebut menunjukkan pola yang serupa, yaitu peningkatan beban dan tegangan hingga mencapai titik maksimum kemudian mengalami penurunan akibat terjadinya deformasi plastis dan *necking*. Penurunan kekuatan tarik pada arus yang lebih tinggi diduga berkaitan dengan masukan panas (*heat input*) yang meningkat sehingga dapat menyebabkan perubahan struktur mikro pada daerah sambungan, seperti pertumbuhan butir atau berkurangnya kekuatan akibat pelunakan material. Meskipun demikian, arus 120 A masih mempertahankan tingkat keuletan yang baik, sedangkan arus 140 A menunjukkan penurunan kemampuan deformasi sebelum patah. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan arus tidak selalu meningkatkan kekuatan tarik, dan pada kondisi penelitian ini arus 100 A memberikan performa mekanik paling optimal.

Tabel 4. Rata-rata Hasil Uji Tarik

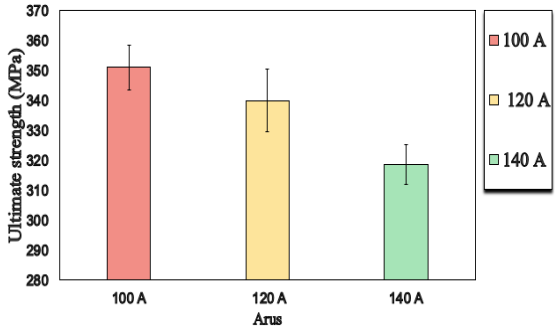
Spesimen	Yield Strength (MPa)	Young Modulus (GPa)	Fracture Strain	Fracture energy (MJ/m3)
Arus 100 A	293.76	204.06	0.34	112.09
Arus 120 A	300.93	194.29	0.32	104.81
Arus 140 A	281.00	199.42	0.30	91.87



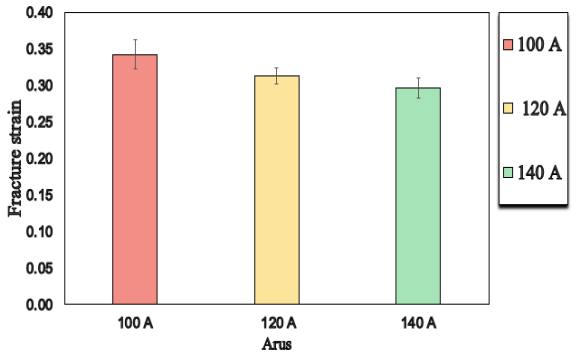
(a)



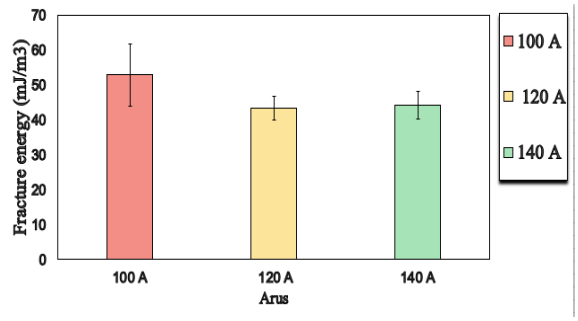
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 8 Hasil Pengujian Tarik, a) *Yield Strength*, b) *Young Modulus*, c) *Ultimate Tensile Strength*, d) *Fracture strain*, e) *Fracture Energy*

Tabel 3, 4 dan Gambar 8 menunjukan hasil perbandingan sifat mekanik sambungan pada variasi arus pengelasan 100 A, 120 A, dan 140 A berdasarkan parameter *yield strength*, *ultimate strength*, *Young modulus*, *fracture strain*, dan *fracture energy*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa arus 100 A menghasilkan nilai *ultimate strength* tertinggi sebesar 365,60 MPa dengan *fracture strain* sebesar 0,34 dan *fracture energy* sebesar 112,09 MJ/m3, yang mengindikasikan kemampuan material dalam menahan beban serta deformasi sebelum mengalami patah lebih baik dibandingkan variasi lainnya. Pada arus 120 A, nilai *yield strength* mengalami sedikit peningkatan hingga 300,93 MPa, namun terjadi penurunan pada *ultimate strength* menjadi 354,13 MPa dan *fracture energy* menjadi 104,81 MJ/m3. Sementara itu, peningkatan arus menjadi 140 A menyebabkan penurunan hampir pada seluruh parameter mekanik, dengan *ultimate strength* sebesar 331,46 MPa, *fracture strain* 0,30, dan *fracture energy* 91,87 MJ/m3. Penurunan sifat mekanik pada arus yang lebih tinggi menunjukkan bahwa peningkatan masukan panas akibat arus pengelasan dapat memengaruhi struktur mikro material, seperti pertumbuhan butir atau perubahan fase pada daerah sambungan, sehingga mengurangi kemampuan material dalam menahan beban tarik. Berdasarkan hasil tersebut, arus 100 A memberikan kondisi pengelasan paling optimal karena mampu menghasilkan keseimbangan terbaik antara kekuatan tarik, kekakuan, dan kemampuan deformasi sebelum terjadi kegagalan.

3.2. Analisis Diagram *Schaeffler*

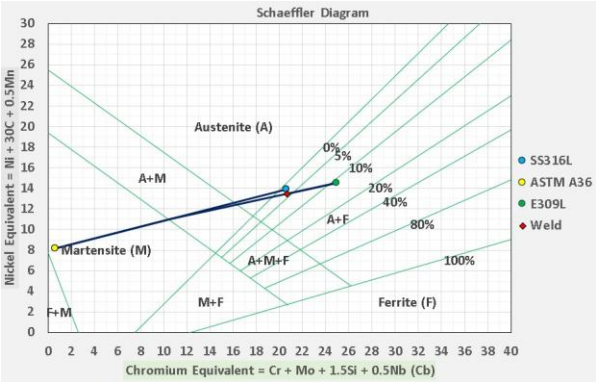
Pada Gambar 9 ditunjukkan prediksi fasa logam las pada sambungan dissimilar ASTM A36–SS316L menggunakan Diagram *Schaeffler* dengan filler E309L. Perhitungan *Chromium Equivalent* (CrEq) dan *Nickel Equivalent* (NiEq) dilakukan dengan mempertimbangkan dilution sebesar 15% ASTM A36, 15% SS316L, dan 70% E309L terhadap komposisi akhir *weld metal*. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai (CrEq) sekitar 20,65 dan (NiEq) sekitar 13,46, yang kemudian diplot pada Diagram *Schaeffler* untuk memprediksi fasa logam las.

Titik komposisi *weld metal* berada pada wilayah *Austenite* + *Ferrite* (A+F) dan dekat dengan batas wilayah *Austenite*. Berdasarkan posisi tersebut, kandungan *delta ferrite* diperkirakan sekitar 0–5% dengan *Ferrite Number* (FN) sekitar 3–5. Dengan demikian, struktur logam las diprediksi didominasi oleh *austenite* sekitar 95–100% dan hanya mengandung sedikit *delta ferrite*. Keberadaan *delta ferrite* dalam jumlah terbatas dapat membantu mengurangi kecenderungan *hot cracking*, sedangkan dominasi *austenite* mempertahankan sifat ulet logam las. Hasil ini sesuai dengan pengamatan mikrostruktur penelitian yang menunjukkan matriks utama *austenite* dengan persebaran *delta ferrite* halus pada daerah *weld metal*.

Diagram *Schaeffler* menunjukkan bahwa filler E309L mampu menghasilkan keseimbangan fasa yang sesuai pada sambungan *dissimilar* ASTM A36–SS316L, yaitu *austenite* sebagai fasa dominan dengan *delta ferrite* sekitar 0–5% dan FN sekitar 3–5. Namun, karena Diagram *Schaeffler* bersifat prediktif, nilai persentase *ferrite* dan FN tersebut tetap merupakan estimasi dan perlu diverifikasi dengan *ferritescope* atau analisis metalografi kuantitatif untuk memperoleh nilai yang lebih akurat.

Tabel 5. Hasil Perhitungan CrEq, NiEq, FN, dan Prediksi Struktur Fasa Logam Las Menggunakan Diagram *Schaeffler* untuk Elektroda E309L.

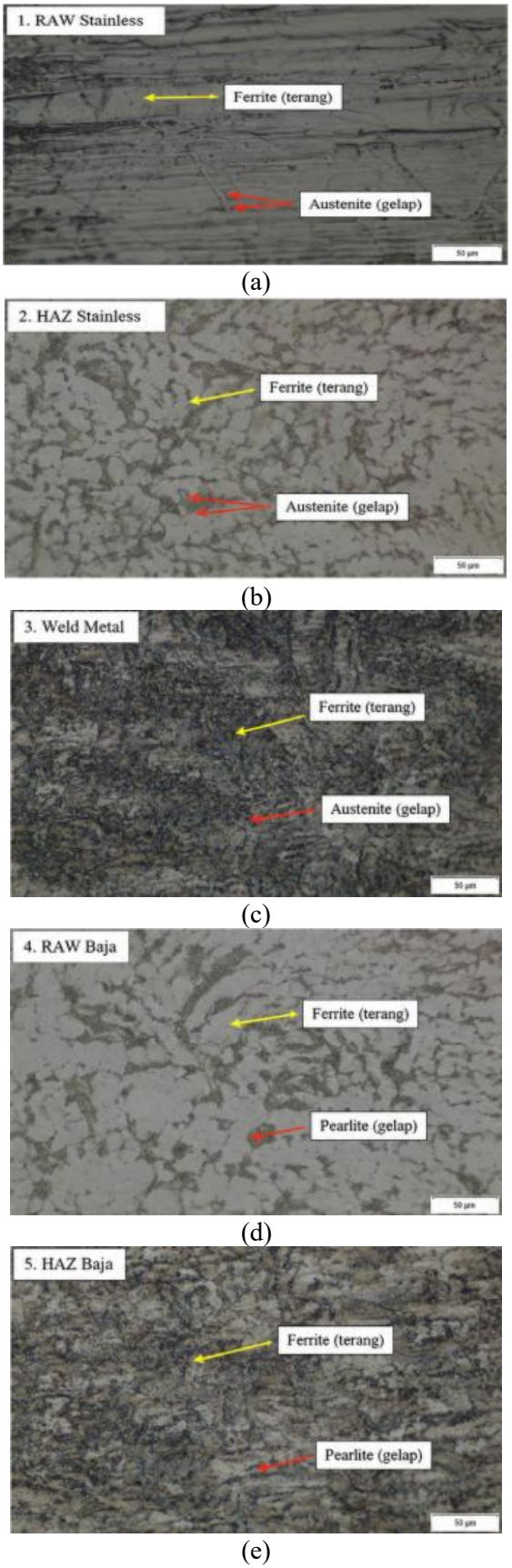
Elektroda	CrEq	NiEq	FN	Prediksi Fasa
E309L	20.6	13.4	3-5	0-5% *Ferrite* + *Austenite* 95-100%



Gambar 9. Diagram *Schaeffler* fasa logam las pada sambungan *Dissimilar* ASTM A36–SS316L dengan Elektroda E309L.

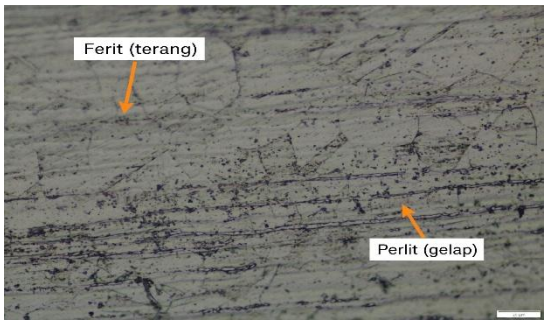
3.3. Hasil Pengujian Mikrostruktur

Gambar 10 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro pada pengelasan *dissimilar* GTAW arus 100 A untuk masing-masing daerah uji: *base metal* SS316L, HAZ SS316L, *weld metal*, *base metal* ASTM A36, dan HAZ ASTM A36 pada perbesaran 500x Pada daerah *base metal* SS316L, struktur mikro didominasi oleh matriks fasa austenit (γ) murni yang homogen dengan batas-batas butir poligonal dan penampakan batas kembar (*twin boundaries*) yang jelas tanpa indikasi endapan karbida. Bergeser ke daerah HAZ sisi SS316L dan area batas fusi (*fusion boundary*), terlihat transisi yang jelas dengan pembentukan dendritik transisi yang tumbuh mengarah ke pusat logam las sesuai arah aliran panas, di mana arus 100 A yang menghasilkan *heat input* rendah mampu membatasi pertumbuhan ukuran butir austenit (*grain coarsening*). Selanjutnya pada daerah *weld metal*, terbentuk struktur mikro pembekuan berupa dendritik dan seluler yang rapat dengan matriks utama fasa austenit serta persebaran delta ferit (δ-ferrite) berstruktur halus (*lathy/vermicular ferrite*) yang efektif mencegah *hot cracking* dan mengonfirmasi laju pendinginan cepat yang berkontribusi pada tingginya nilai *Ultimate Strength* serta *fracture energy*. Sementara itu pada sisi *base metal* ASTM A36, struktur didominasi oleh fasa ferit (terang) sebagai matriks ulet dan perlit (gelap) yang tersebar teratur di antara batas butir, sedangkan pada daerah HAZ ASTM A36 terjadi rekristalisasi akibat siklus termal yang menghasilkan ukuran butir relatif halus dan terdistribusi merata tanpa memicu terbentuknya fasa getas seperti martensit, sehingga menjelaskan mengapa spesimen 100 A mengalami patahan ulet (*ductile fracture*) di daerah *base metal* / HAZ ASTM A36.

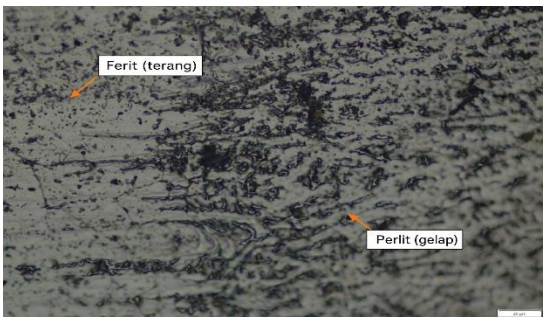


Gambar 10. Perbesaran Struktur Mikro 500x pada spesimen 100 A, a) raw *stainless*, b) HAZ *stainless*, c) *weld metal*, d) raw baja, e) HAZ baja

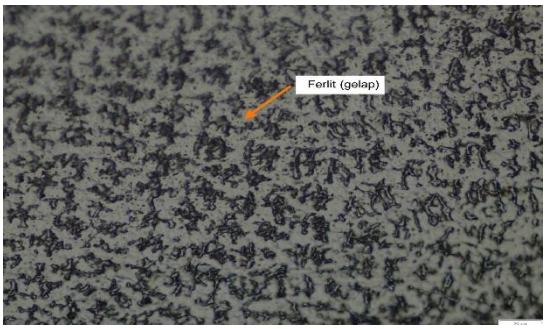
Gambar 11 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro pada pengelasan *dissimilar* GTAW arus 120 A untuk masing-masing daerah uji: *base metal* SS316L, *weld metal*, *base metal* ASTM A36, dan HAZ ASTM A36 pada perbesaran 500x Pada daerah *base metal* SS316L, struktur mikro masih menampilkan matriks fasa austenit (γ) yang stabil dengan pola *twin boundaries* khas material induk. Pada daerah *weld metal*, peningkatan masukan panas (*heat input*) akibat kenaikan arus menjadi 120 A memicu pertumbuhan struktur dendritik dan seluler yang sedikit lebih kasar dibandingkan spesimen 100 A, namun tetap menghasilkan distribusi delta ferit (δ-ferrite) yang optimal di antara matriks austenit untuk mencegah kecenderungan retak panas. Sementara itu pada base metal ASTM A36, struktur mikro terdiri dari fasa ferit (terang) dan perlit (gelap) yang terdistribusi teratur. Efek signifikan dari arus 120 A terlihat jelas pada daerah HAZ ASTM A36, di mana peningkatkan heat input menyebabkan perkasaran ukuran butir ferit dan perlit (*grain coarsening*) yang lebih nyata dibanding kondisi 100 A. Perkasaran butir serta pembentukan fasa transisi akibat masukan panas sedang ini meningkatkan hambatan pergerakan dislokasi di daerah batas elastis, yang secara langsung menjelaskan mengapa spesimen arus 120 A mencatatkan nilai batas lumer (*yield strength*) tertinggi yaitu sebesar 300,93 MPa. Namun demikian, perkasaran butir di HAZ tersebut juga sedikit menurunkan nilai kekuatan tarik maksimum (UTS 354,13 MPa), *fracture strain* (0,31), dan *fracture energy* (104,81 MJ/m3) jika dibandingkan dengan arus 100 A, dengan kegagalan tarik tetap terpusat pada area terlemah yaitu daerah HAZ / base metal ASTM A36. Maka dari itu spesimen 120 A mengalami patahan pada bagian *weld metal*/HAZ



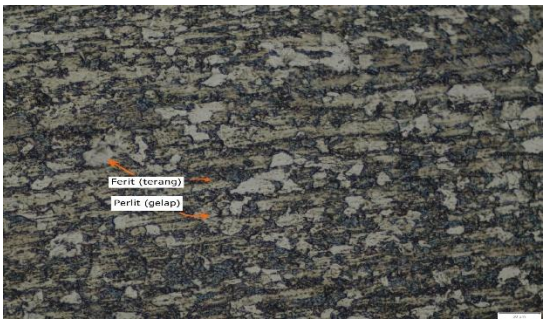
(a)



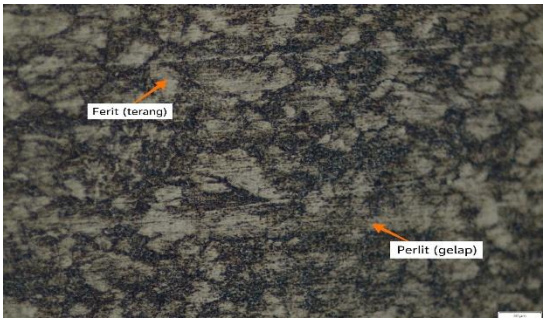
(b)



(c)



(d)

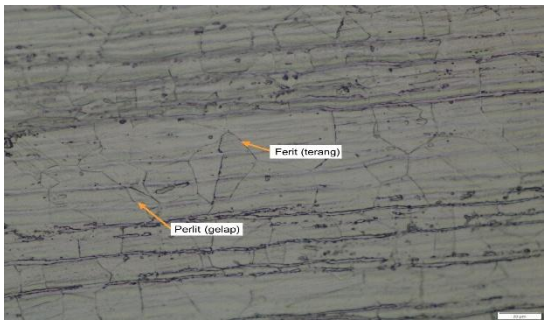


(e)

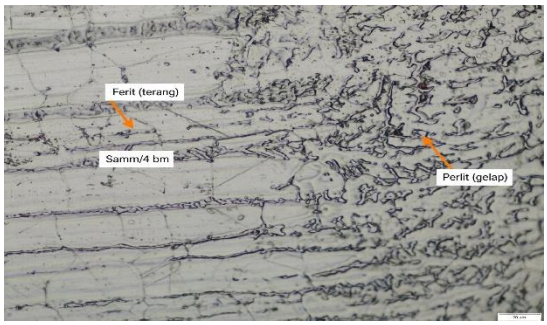
Gambar 11. Perbesaran Struktur Mikro 500x pada spesimen 120 A, a) Raw *stainless*, b) HAZ *Stainless*, c) *Weld Metal*, d) Raw Baja, e) HAZ baja

Gambar 12 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro pada pengelasan *dissimilar* GTAW arus 140 A untuk daerah uji *base metal* SS316L, HAZ SS316L, *weld metal*, *base metal* ASTM A36, dan HAZ ASTM A36 pada perbesaran 500x. Pada daerah *base metal* SS316L, struktur mikro masih

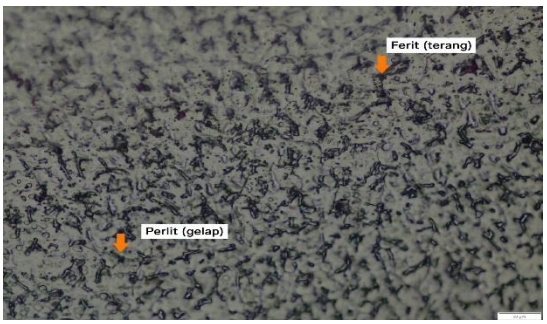
memperlihatkan matriks fasa austenit (γ) dengan garis batas kembar (*twin boundaries*) khas material induk. Pada HAZ SS316L, peningkatan *heat input* yang signifikan akibat penggunaan arus tertinggi (140 A) menyebabkan penumpukan panas berlebih, yang mendorong pertumbuhan butir austenit (*grain coarsening*) tampak lebih jelas di area dekat batas fusi. Pada daerah *weld metal*, masukan panas yang tinggi serta laju pendinginan (*cooling rate*) yang relatif lambat mengakibatkan struktur dendritik menjadi lebih kasar dan merenggang jika dibandingkan dengan spesimen arus 100 A dan 120 A. Sementara itu, pada *base metal* ASTM A36 struktur mikro terdiri dari fasa ferit (terang) dan perlit (gelap) yang terdistribusi teratur, namun pada daerah HAZ ASTM A36 terjadi perkasaran butir ferit dan perlit yang sangat signifikan akibat siklus termal pengelasan 140 A. Terjadinya perkasaran butir (*grain coarsening*) di daerah HAZ A36 dan *weld metal* ini secara langsung menurunkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi, yang menjelaskan mengapa spesimen arus 140 A mengalami patahan pada bagian HAZ dan mencatatkan nilai sifat mekanik paling rendah di antara seluruh variasi, yaitu nilai *yield strength* (281 MPa), *ultimate tensile strength* (UTS 331,46 MPa), keuletan (*fracture strain* 0,30), serta *fracture energy* (91,87 MJ/m^3), dengan titik kegagalan tarik tetap terjadi secara ulet pada zona terlemah yaitu daerah HAZ / *base metal* ASTM A36.



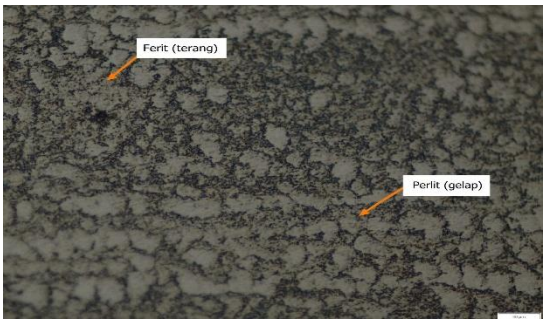
(a)



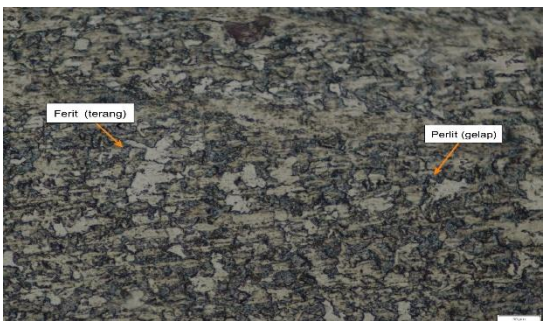
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 12. Perbesaran Struktur Mikro 500x pada spesimen 140 A, a) Raw *stainless*, b) HAZ *Stainless*, c) *Weld Metal*, d) Raw Baja, e) HAZ baja

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian tarik dan pengamatan mikrostruktur pada sambungan *dissimilar* GTAW ASTM A36–SS316L dengan variasi arus 100 A, 120 A, dan 140 A, dapat disimpulkan sebagai berikut. 1) Variasi arus pengelasan GTAW berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan, dengan tegangan tarik maksimum rata-rata tertinggi diperoleh pada arus 100 A sebesar 365,60 MPa disertai *fracture strain* 0,34 dan *fracture energy* 112,93 MJ/m³, kemudian menurun menjadi 354,13 MPa pada arus 120 A dan 331,46 MPa pada arus 140 A; penurunan ini diduga berkaitan dengan meningkatnya *heat input* seiring kenaikan arus, meskipun arus 120 A justru mencatatkan *yield strength* tertinggi sebesar 300,93 MPa. 2) Variasi

arus GTAW turut memengaruhi karakteristik mikrostruktur pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal*; pada arus 100 A, HAZ ASTM A36 mengalami rekristalisasi dengan butir relatif halus dan merata tanpa fasa getas, sedangkan *weld metal* menghasilkan struktur dendritik rapat dengan *delta ferrite* halus yang efektif mencegah *hot cracking*. Peningkatan arus menjadi 120 A dan 140 A memicu perkasaran ukuran butir (*grain coarsening*) yang semakin nyata pada HAZ ASTM A36 dan struktur dendritik yang semakin kasar pada *weld metal*, sehingga menurunkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi dan berkontribusi pada penurunan kekuatan mekanik sambungan. 3) Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian tarik dan mikrostruktur, arus 100 A merupakan parameter pengelasan GTAW yang paling optimal untuk sambungan *dissimilar* ASTM A36–SS316L pada pelat tebal 10 mm, karena mampu menghasilkan kombinasi kekuatan tarik, keuletan, dan struktur mikro yang paling baik dibandingkan arus 120 A dan 140 A.

DAFTAR PUSTAKA

[1] G. Gebreamlak, S. Palani, B. Sirhabizu, S. M. Atnaw, and E. Gebremichael, "Dissimilar friction stir welding process-a review," *Adv. Mater. Process. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 3900–3922, 2022, doi: 10.1080/2374068X.2022.2036446.

[2] W. Lu, Y. Zhang, D. Yu, D. Sun, and H. Li, "Research Progress on Control Strategy of Intermetallic Compounds in Welding Process of Heterogeneous Materials," *Steel Res. Int.*, vol. 93, no. 4, 2022, doi: 10.1002/srin.202100427.

[3] N. S. Drastiawati, H. Zakiyya, B. Yunitasari, T. H. Ningsih, R. A. Gumara, and B. P. Anggoro, "Review of MIG and TIG welding current variation of low-carbon steel materials based on tensile strength," in *E3s Web of Conferences*, 2024. doi: 10.1051/e3sconf/202451302014.

[4] M. Lee, H. Kim, S.-W. Son, and J. Ahn, "The Influence of Cr2N Addition and Ni/Mn Ratio Variation on Mechanical and Corrosion Properties of HIP-Sintered 316L Stainless Steel," *Materials (Basel).*, vol. 18, no. 12, 2025, doi: 10.3390/ma18122722.

[5] A. K. Singh, V. Dey, and R. N. Rai, "Techniques to improveweld penetration in TIG welding (A review)," in *Materials Today Proceedings*, 2017, pp. 1252–1259. doi: 10.1016/j.matpr.2017.01.145.

[6] R. R. V. Padala and K. V. V. S. Rao, "INVESTIGATION ON EFFECT OF TIG WELDING PARAMETERS ON DISSIMILAR WELD JOINTS OF AISI 304 AND AISI 310 STEELS USING RESPONSE SURFACE METHOD," *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 80–96, 2021.

[7] K. Harlian, Riswanda, Sugianto, S. Albert Daniel, B. Muhammad, and Akhyar, *Effect of Welding Parameter Conditions of 304L SS and AISI 1015 Dissimilar Steel Weld Joints to Macrostructure and Mechanical Properties*, vol. 1067. 2022. doi: 10.4028/p-by83w7.

[8] F. Ternane, F. Sebaa, M. Benachour, and N. Benachour, "Regression Modeling and Process Analysis of Resistance Spot Welding on Dissimilar Steel Sheets," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 8896–8900, 2022, doi: 10.48084/etasr.5059.

[9] V. Verma, A. Singh, A. K. Pandey, C. Sharma, P. Sonia, and K. K. Saxena, "Experimental investigation of tensile properties and microstructure of TIG welded dissimilar joints of Al6061/Al5083 Aluminium alloy," *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 29, no. 2, pp. 262–270, 2022.

[10] R. KUMAR and M. BALASUBRAMANIAN, "Application of response surface methodology to optimize process parameters in friction welding of Ti–6Al–4V and SS304L rods," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 25, no. 11, pp. 3625–3633, Nov. 2015, doi: 10.1016/S1003-6326(15)63959-0.

[11] S. Senthilkumar, S. Manivannan, R. Venkatesh, and M. Karthikeyan, "Influence of heat input on the mechanical characteristics, corrosion and microstructure of ASTM A36 steel welded by GTAW technique," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, p. e19708, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19708.

[12] R. Demarque, R. S. Silva, E. P. dos Santos, and J. A. de Castro, "Metallurgical characterization of dissimilar joints inconel 718 - Inox 316L welded by the autogenous TIG process | Avaliação de Parâmetros de Soldagem nas Características de Juntas Dissimilares Inconel 718 - Inox 316L Soldadas pelo Processo TIG Autógeno," *Soldag. E Insp.*, vol. 23, no. 3, pp. 380–392, 2018, doi: 10.1590/0104-9224/SI2303.07.

[13] R. Kant, R. Mittal, C. Kumar, B. S. Rana, M. Kumar, and R. Kumar, “Fabrication and characterization of weldments AISI 304 and AISI 316 Used in industrial applications,” in *Materials Today Proceedings*, 2018, pp. 18475–18481. doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.189.

[14] Rohit Jha and A. K. Jha, “Investigating the Effect of Welding Current on the Tensile Properties of SMAW Welded Mild Steel Joints,” *Int. J. Eng. Res. Technol.* , vol. 3, no. 4, pp. 1304–1307, 2014, Accessed: Aug. 07, 2026. [Online]. Available: https://www.ijert.org/investigating-the-effect-of-welding-current-on-the-tensile-properties-of-smaw-welded-mild-steel-joints

[15] P. K. Baghel, “Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: An overview,” *Heliyon*, vol. 8, no. 12, p. e12161, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12161.

[16] R. Riswanda, H. Kadir, and A. Saragih, “PEMBUATAN DAN PENGUJIAN SIFAT MEKANIK WELDING SPESIMEN LOGAM DISSIMILAR AISI 1015 DENGAN AISI 304L MENGGUNAKAN PROSES GMAW,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 1, pp. 167–175, May 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i1.1461.

[17] L. Amalia, M. L. Sinambela, R. A. Tanjung, and J. Awali, “Analysis of Welding Current Variation of SMAW and GTAW Combination Welding with Double V Groove on The Mechanical Properties and Microstructure of SS304 Stainless Steel,” *SPECTA J. Technol.*, vol. 7, no. 1, May 2023, doi: 10.35718/specta.v7i1.663.

[18] D. K. Pratiwi, A. Arifin, Gunawan, A. Mardhi, and Afriansyah, “Investigation of Welding Parameters of Dissimilar Weld of SS316 and ASTM A36 Joint Using a Grey-Based Taguchi Optimization Approach,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 7, no. 1, p. 39, Feb. 2023, doi: 10.3390/jmmp7010039.

[19] M. A. Ade Saputra, “Microstructural Evolution and Mechanical Performance of SMAW Dissimilar Welds Between ASTM A36 and AISI 316 with E316-16 Electrode at Different Welding Currents,” *Indones. J. Eng. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 157–165, 2025, Accessed: Aug. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.aps.or.id/journal/index.php/ijes/article/view/201

[20] Shridhar *et al.*, “Mechanical properties and residual stresses in multi pass AISI 304 to AISI 1018 steel welds by SMAW and GTAW,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 27052, Jul. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-06063-0.

[21] T. Patil *et al.*, “Experimental investigation on solidification cracking & intergranular corrosion of AISI 321 & AISI 316 L dissimilar weld on pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW),” *Heliyon*, vol. 10, no. 15, p. e34648, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e34648.

[22] R. R. Mishra, V. K. Tiwari, and R. S, “A Study of Tensile Strength of MIG And TIG Welded Dissimilar Joints of Mild Steel and Stainless Steel,” *Int. J. Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 23–32, Apr. 2014, doi: 10.14810/ijamse.2014.3203.

[23] S. Sumarji, A. Hariyanto, F. A. Wahyudianto, and A. Suprihanto, “Optimisation of Preheating Temperature for Mechanical Performance of SMAW Welded ASTM A36 Steel,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 21, no. 1, pp. 67–74, May 2026, doi: 10.32497/jrm.v21i1.7356.

[24] D. Nursyifaulkhair, Priyambodo Nur Ardi Nugroho, D. Wardani, K. Kharismajid, M. K. Al Amin, and M. E. N. Khazi, “Effect of SMAW Process Parameters on Hardness, Temperature Distribution, and Micro–Macro Structure of A36 Steel Welded Joints,” *J. Konversi Energi dan Manufaktur*, Jan. 2026, doi: 10.21009/JKEM.11.1.1.

[25] P. S. Gowthaman, S. Jeyakumar, and D. Sarathchandra, “Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 33, no. 11, pp. 5536–5546, Jun. 2024, doi: 10.1007/s11665-023-08312-7.

[26] H. Wang *et al.*, “Effect of Heat Input on Microstructure and Properties of Laser-Welded 316L/In601 Dissimilar Overlap Joints in High-Temperature Thermocouple,” *Materials (Basel).*, vol. 16, no. 22, p. 7114, Nov. 2023, doi: 10.3390/ma16227114.

[27] M. Khedr, A. Hamada, A. Järvenpää, S. Elkatatny, and W. Abd-Elaziem, “Review on the Solid-State Welding of Steels: Diffusion Bonding and Friction Stir Welding

Processes," *Metals (Basel).*, vol. 13, no. 1, p. 54, Dec. 2022, doi: 10.3390/met13010054.

[28] M. Sangsuriyun, P. Surin, P. Srinoi, and S. Thermsuk, "Effect of welding current on the mechanical performance and microstructural evolution of GTAW-welded AISI 304 stainless steel butt joints," *Results Mater.*, vol. 29, p. 100903, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.rinma.2026.100903.

[29] T. Sonar *et al.*, "Effect of welding current modes and post weld heat treatment on microstructure, tensile properties and fracture behavior of gas tungsten arc welded AlCoCrFeNi2.1 EHEA sheets for advanced gas turbine applications," *Def. Technol.*, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.dt.2026.01.004.

[30] R. A. Jibhakate, S. M. Ramteke, and S. Sharma, "Effect of heat input on the microstructures and mechanical properties of gas tungsten arc welded dissimilar joints between Hastelloy C-22 and Nitronic 50 stainless steel," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 240, no. 7, pp. 1197–1212, Jul. 2026, doi: 10.1177/14644207251369092.

[31] ASTM International, "ASTM E8/E8M-25: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," Jul. 01, 2025, *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*. doi: 10.1520/E0008_E0008M-25.

[32] ASTM International, "ASTM E3-26: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens," Feb. 15, 2026, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/E0003-26.

[33] M. F. Mamat, E. Hamzah, Z. Ibrahim, R. A. Majid, and A. Bahador, "Effect of Filler Metals on the Microstructures and Mechanical Properties of Dissimilar Low Carbon Steel and 316L Stainless Steel Welded Joints," *Mater. Sci. Forum*, vol. 819, pp. 57–62, Jun. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.819.57.

[34] A. Wahab, L. H. Arma, and H. Arsyad, "Effect of electrodes on microstructures and mechanical properties of dissimilar metal joints ASTM A36 and ASTM A240 type 316L," 2023, p. 030007. doi: 10.1063/5.0126332.

[35] S. Kumar and A. S. Shahi, "Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 6, pp. 3617–3623, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.02.017.

[36] X. Tan, W. Lu, and X. Rao, "Effect of ultra-fast heating on microstructure and mechanical properties of cold-rolled low-carbon low-alloy Q&P steels with different austenitizing temperature," *Mater. Charact.*, vol. 191, p. 112086, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.matchar.2022.112086.

[37] ASTM Internasional, "ASTM E407-23: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys," Nov. 01, 2023, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/E0407-23.