



## **Analisis Kuat Arus Pengelasan Sambungan *Tube to Tubesheet* Stainless Steel Type 316L Terhadap Struktur Mikro, dan Kekerasan di *Heat Exchanger***

Moh. Syaiful Amri<sup>1\*</sup>, Bachtiar<sup>1</sup>, Moh. Miftachul Munir<sup>1</sup>, Mukhlis<sup>1</sup>, Muhammad Ari<sup>1</sup>,  
Muhammad Thriq Wahyudi<sup>1</sup>, Ilham Kurniawan<sup>1</sup>, Rikko Harli Haruri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia, ITS, Sukolilo, Surabaya, 6011, Indonesia*

**Abstrak.** Sambungan *tube to tubesheet* pada *heat exchanger* berperan penting dalam menjamin kinerja dan keandalan operasi. Variasi kuat arus pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) mempengaruhi *heat input* yang berdampak pada struktur mikro, struktur makro, dan sifat mekanik sambungan. Penelitian ini menganalisis pengaruh arus 110 A, 130 A, dan 150 A pada sambungan *tube* SA-213 TP316L ke *tubesheet* SA-240 TP316L setelah *tube expansion* sebesar 8% sesuai standar TEMA edisi ke-11. Pengujian meliputi uji mikro, makro, dan kekerasan metode *Vickers* pada enam zona. Hasil menunjukkan bahwa kenaikan arus meningkatkan *heat input*, memengaruhi lebar *Heat Affected Zone* (HAZ) dan morfologi butir. Arus 150 A menghasilkan fusi sempurna tanpa cacat makro, memperhalus butir pada zona las, serta memberikan kekerasan tertinggi 357,4 HV pada area of *expand*, sedangkan kekerasan terendah 182,0 HV tercatat pada *base metal tube* (110 A). Peningkatan kekerasan *weld metal* dari 200,8 HV menjadi 225,8 HV menandakan kontribusi *heat input* optimal dalam pembentukan butir halus. Nilai tinggi pada area of *expand* disebabkan *strain hardening* akibat proses ekspansi. Pemilihan arus optimal terbukti penting untuk integritas sambungan dan sifat mekanik yang baik.

**Kata kunci:** Arus pengelasan, *Heat exchanger*, Kekerasan, Struktur makro, Struktur mikro

**Abstract.** *The tube-to-tubesheet joint in heat exchangers plays a crucial role in ensuring performance and operational reliability. Variations in Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) current affect heat input, influencing the microstructure, macrostructure, and mechanical properties of the joint. This study examines the effect of 110 A, 130 A, and 150 A currents on SA-213 TP316L tube to SA-240 TP316L tubesheet joints after 8% tube expansion in accordance with the 11th edition of TEMA standards. Tests included macro examination, microstructural analysis, and Vickers hardness testing in six zones. Results show that increasing current increases heat input, affecting the width of the heat-affected zone (HAZ) and grain morphology. A current of 150 A produced perfect fusion without macro defects, refined grains in the weld zone, and yielded the highest hardness of 357.4 HV in the area of expansion, while the lowest value of 182.0 HV was recorded in the base metal tube (110 A). The hardness increase in weld metal from 200.8 HV to 225.8 HV indicates the role of optimal heat input in forming fine grains. The high value in the expansion zone is attributed to strain hardening from the expansion process. Selecting the optimal current is essential for achieving joint integrity and favorable mechanical properties.*

Email Korespondensi: [amri@ppns.ac.id](mailto:amri@ppns.ac.id)  
doi: 10.35991/jtm.v8i2.78

# Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet* Stainless Steel 316L Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan

**Keywords:** *Hardness, Heat exchanger, Macrostructure, Microstructure, Welding current*

## Pendahuluan

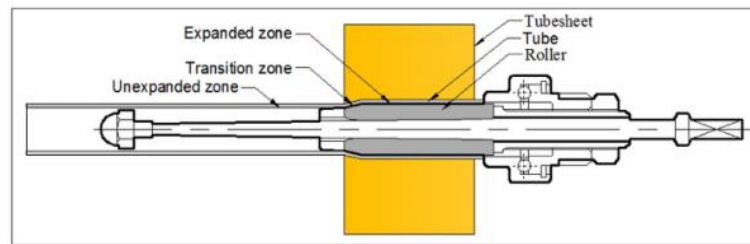
*Heat exchanger* merupakan peralatan penting di berbagai industri yang berfungsi mengalihkan panas antara dua fluida. Dalam tipe *shell and tube*, sambungan *tube to tubesheet* menjadi bagian kritis yang menentukan efisiensi dan keandalan operasi (Al-Odhaib et.al 2020). Proses pembuatannya biasanya mengombinasikan *tube expansion* dan pengelasan GTAW, di mana kuat arus pengelasan berperan penting dalam menentukan *heat input*. Variasi arus pengelasan memengaruhi lebar *Heat Affected Zone* (HAZ), morfologi butir, pembentukan fasa, dan sifat mekanik sambungan. *Heat input* secara langsung memengaruhi siklus termal, lebar HAZ, dan laju pendinginan, yang secara krusial menentukan transformasi fasa mikro dan sifat mekanik material. Pada zona sambungan yang telah mengalami tegangan residual tinggi, penggunaan arus pengelasan berlebihan berpotensi menyebabkan *overheating* di HAZ. Efek termal yang intensif ini dapat memicu perubahan mikrostruktur merugikan seperti pembentukan zona keras-getas (martensit, presipitasi karbida berlebih) serta penurunan ketangguhan material (Kou 2003). Sebaliknya, arus terlalu rendah berisiko menimbulkan cacat fusi seperti penetrasi tidak sempurna (*incomplete penetration*) dan inklusi. Pemilihan kuat arus optimal dengan demikian merupakan kompromi kompleks antara menjamin integritas las dan memitigasi degradasi material (Riswanda et al. 2024).

Jika terjadi *over expansion* pada proses penyambungan *tube to tubesheet*, maka pengelasan menjadi lebih rentan terhadap masukan panas berlebih, sehingga risiko distorsi, retak panas, dan perubahan mikrostruktur meningkat. Dalam kondisi ini, pemilihan arus pengelasan yang tepat menjadi kebutuhan mendesak untuk mencegah kerusakan tambahan pada sambungan. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk menganalisis pengaruh variasi kuat arus 110A, 130A, dan 150A terhadap struktur mikro, struktur makro, dan nilai kekerasan sambungan *tube to tubesheet* 316L, sebagai dasar penentuan parameter pengelasan optimal untuk mendukung kinerja dan *keandalan heat exchanger*. Tahapan pelaksanaannya menggunakan proses GTAW dengan variasi arus 110 A, 130 A, dan 150 A dengan proses *expand* sebelum pengelasan sebesar 8 % dan hasil pengelasan diuji kekerasan, struktur mikro dan makro.

## 2. Tinjauan Pustaka

Dalam praktik manufaktur, sambungan ini umumnya dibuat melalui kombinasi teknik *tube expansion* dan pengelasan. *Tube expansion* merupakan proses pengerjaan dingin yang memperbesar diameter dalam *tube* menggunakan *expander roller* sehingga menjepit rapat di dalam lubang *tubesheet*. Tujuannya adalah menghasilkan sambungan mekanis yang kuat dan kedap, namun *over expansion* dapat meningkatkan tegangan residual yang membuat sambungan lebih sensitif terhadap masukan panas berlebih saat pengelasan, sehingga memperbesar risiko distorsi, retak panas, dan perubahan mikrostruktur (Thekkuden et al. 2023). Gambar 1 menunjukkan *expander roller* yang digunakan dalam proses *tube expansion*.

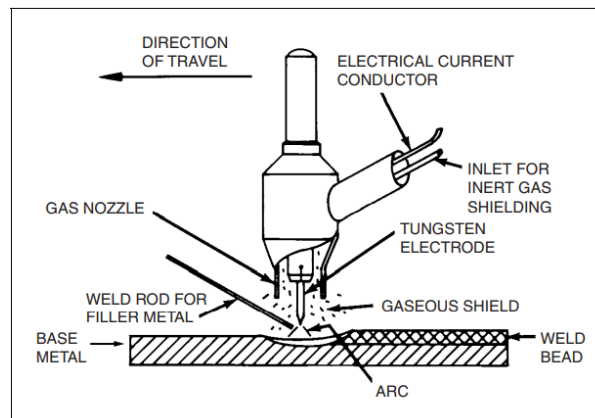
## Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet Stainless Steel 316L* Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan



**Gambar 1.** *Expander Roller* (Thekkuden et al. 2023)

Parameter pengelasan dan persentase *expands* ditemukan mempengaruhi kekuatan tarik keluar dari sambungan *tube to tubesheet*. Selain faktor-faktor di atas, *design* mempertimbangkan penambahan alur pada lubang *tubesheet* bagian dalam untuk meningkatkan kekuatan tarik keluar. Dalam proses *expands* hidraulik, kekuatan sambungan ditemukan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah alur dan tekanan *expands*, tetapi kesimpulan ini hanya didapat dari simulasi. Secara eksperimental bahwa baik gaya tarik keluar maupun gaya dorong keluar meningkat seiring dengan tekanan *expands* hidraulik, namun setelah mencapai tekanan *expands* tertentu, kekuatan mulai menurun (Ma et al. 2015).

Proses pengelasan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) banyak digunakan karena mampu menghasilkan sambungan berkualitas tinggi dengan tingkat cacat rendah. Kuat arus pengelasan menjadi parameter kunci yang mengatur *heat input*, lebar *heat affected zone* (HAZ), dan laju pendinginan, yang secara langsung memengaruhi pembentukan fasa dan sifat mekanik sambungan (Jiang et al. 2024). Skema pengelasan GTAW ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini.



**Gambar 2.** Pengelasan GTAW (Allpro, 2021)

Ada beberapa faktor yang menentukan kualitas hasil lasan. Faktor-faktor tersebut meliputi arus listrik, tegangan, kecepatan pengelasan, polaritas listrik, dan besar penetrasi las. Arus listrik, tegangan, dan kecepatan, merupakan hubungan yang menghasilkan energi pengelasan tersendiri yang disebut dengan *Heat Input* (HI). Perhitungan *heat input* dapat dilihat pada Persamaan 1 berikut ini.

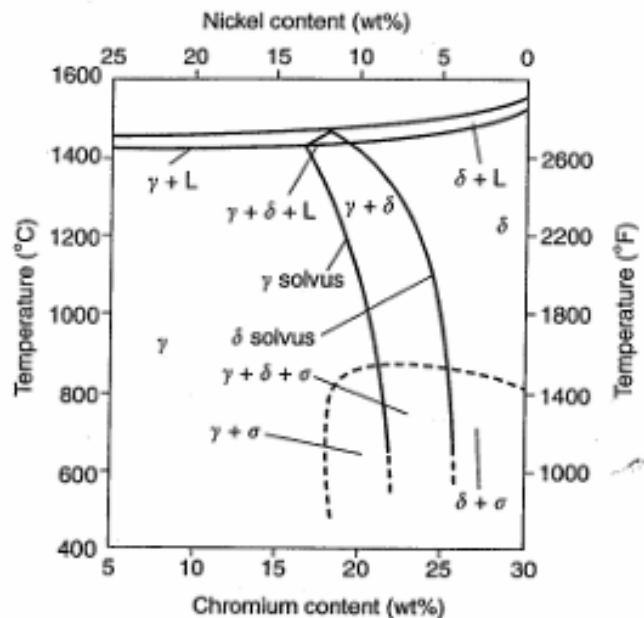
$$\frac{\text{Voltage} \times \text{ampere} \times 60}{\text{Travel speed}} \quad (1)$$

*Austenitic stainless steel 316L*, sebagai paduan Fe–Cr–Ni dengan kadar nikel tinggi, memiliki kestabilan fasa *austenite* yang luas sebagaimana ditunjukkan oleh diagram fasa Fe–Cr–Ni. Selama pengelasan, pendinginan cepat dapat menghasilkan *delta ferrite* dalam jumlah kecil yang berfungsi mengurangi risiko *hot cracking* dan meningkatkan ketangguhan

## Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet* Stainless Steel 316L Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan

(Lippold, et.al 2005). Kandungan karbon yang sangat rendah ( $<0,03\%$ ) mengurangi risiko presipitasi karbida krom di batas butir, sehingga memperbaiki ketahanan terhadap korosi *intergranular*. Berdasarkan diagram fasa Fe–Cr–Ni, 316L berada dalam wilayah stabil *austenite* pada suhu ruang, diperkuat oleh kadar nikel tinggi yang meningkatkan nilai *nickel equivalent* ( $Ni_{eq}$ ). (Lippold et al. 2005).

Gambar 3 menunjukkan diagram *pseudobiner* sistem Fe-Cr-Ni pada kandungan besi 70% untuk material *austenitic stainless steel* dengan kandungan 18% *chromium* dan 12% *nickel*



**Gambar 3.** Diagram Fe-Cr-Ni (Lippold et al. 2005)

Struktur *austenite* pada 316L bersifat non-magnetik, ulet, dan memiliki laju pengerasan regangan (*strain hardening rate*) tinggi. Karakteristik ini membuatnya relatif tahan terhadap transformasi martensitik selama deformasi dingin, berbeda dengan baja tahan karat austenitik berkadar nikel rendah yang memiliki *stacking fault energy* (SFE) rendah. Kondisi ini memengaruhi respons material terhadap panas pengelasan, di mana variasi *heat input* dan tegangan residual dapat mengubah morfologi butir serta distribusi fasa, yang pada akhirnya berdampak pada sifat mekanik sambungan (Bártová et al. 2022).

Evaluasi kualitas sambungan las meliputi pengujian makro, mikro, dan kekerasan. Uji makro digunakan untuk menilai bentuk fusi, dimensi HAZ, dan deteksi cacat (Kumar and Shahi 2011) sedangkan uji mikro berfokus pada morfologi butir, distribusi fasa, dan presipitasi karbida akibat pengaruh *heat input*. Uji kekerasan digunakan untuk mengukur ketahanan material terhadap deformasi plastis.

### 3. Metode

Material yang digunakan adalah *tube* SA-213 TP316L dengan diameter luar (*outside diameter*) 19,05 mm dan ketebalan *tube* 1,5 mm, serta *tubesheet* SA-240 TP316L dengan diameter lubang 19,30 mm dan ketebalan 25 mm. *Filler metal* yang digunakan adalah kawat las ER316L berdiameter 1,6 mm. Proses penyambungan dilakukan dengan metode GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) pada posisi pengelasan 5F menggunakan gas pelindung argon UHP 99,99% dengan flowrate 10–15 L/min. Variasi kuat arus yang digunakan adalah 110 A, 130 A, dan 150 A. Sebelum proses pengelasan, dilakukan *tube expansion* dengan persentase ekspansi 8% sesuai batasan (TEMA 11th 2023), dengan panjang area ekspansi 22 mm dari tepi depan *tubesheet*.

## Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet* Stainless Steel 316L Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan

Pengujian makro dilakukan pada penampang melintang sambungan setelah preparasi permukaan dan etsa menggunakan larutan *aquaregia*, dengan tujuan mengamati bentuk fusi, dan kemungkinan cacat seperti *lack of fusion* atau porositas. Pengujian mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 200x dan 500x di mana sampel dipoles dan dietsa untuk menampakkan morfologi butir, distribusi fasa, serta presipitasi pada logam las, HAZ, dan logam dasar. Sementara itu, pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Vickers* dengan beban 1 kgf selama 12 detik, diambil minimal tiga titik uji pada setiap zona, yaitu pada daerah *Weld Metal*, *Heat Afective Zone* dan *Base Metal* selanjutnya hasilnya dihitung nilai rata-ratanya.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil Pengelasan

**Tabel 1.** Parameter Pengelasan

No.	Spesimen	Arus <i>Actual</i> (A)	Voltage (V)	Travel Speed (mm/min)	<i>Heat input</i> (kJ/mm)
1	Arus 110A	111	12.5	79.05	1.05
2	Arus 130A	131.8	13.3	80.8	1.3
3	Arus 150A	152.4	14.3	93.23	1.41

Berdasarkan data pada Tabel, terlihat bahwa peningkatan kuat arus pengelasan diikuti oleh kenaikan *heat input*. Spesimen dengan arus 110A menghasilkan *heat input* sebesar 1,05 kJ/mm, sedangkan pada spesimen dengan arus 130A nilai *heat input* meningkat menjadi 1,30 kJ/mm. Peningkatan lebih lanjut pada arus menjadi 150A menghasilkan *heat input* tertinggi yaitu 1,41 kJ/mm. Hal ini menunjukkan hubungan berbanding lurus antara kuat arus dan *heat input*, di mana semakin besar arus yang digunakan, semakin besar pula energi panas yang disalurkan ke sambungan per satuan panjang las.

#### 3.2 Pengaruh Kuat Arus Terhadap Struktur Mikro

##### 3.2.1 Struktur mikro *base metal tube*

Dalam *base metal tube* (SA-213 TP316L), struktur mikro tetap didominasi oleh butiran *austenite* yang sama ukuran dan merata, meskipun arus pengelasan ditingkatkan. Dengan meningkatkan arus, misalnya dari 110 A menjadi 130 A atau bahkan 150 A, struktur logam dasar *tube* tetap menunjukkan bentuk *austenite* yang stabil tanpa terjadi perubahan fase signifikan seperti pembentukan *delta ferrite*. Fenomena ini konsisten dengan laporan bahwa zona *base metal* umumnya tidak mengalami perubahan fasa saat fasa stabil seperti *austenite* mendominasi dan pendinginan tidak terjadi langsung di daerah tersebut (Moslemi et al. 2015). Pengamatan struktur mikro pada area *base metal tube* digunakan pembesaran 200X dari masing-masing variasi arus 110A, 130A, dan 150A di tunjukkan pada Gambar 4.

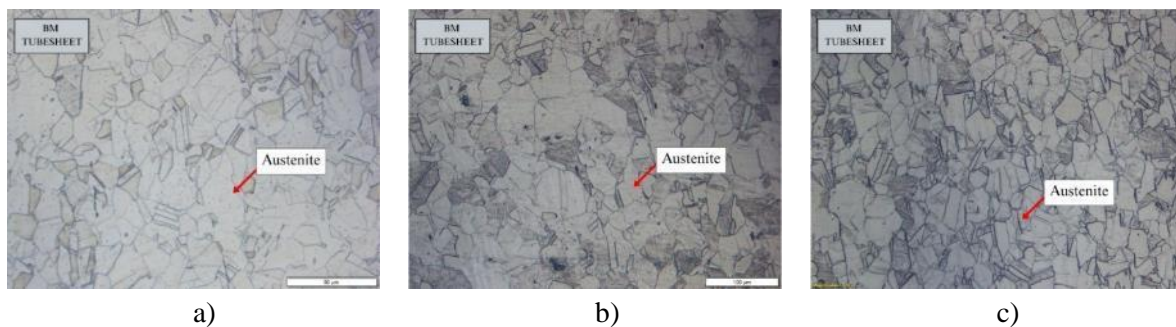


## Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet* Stainless Steel 316L Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan

a) b) c)  
**Gambar 4.** Struktur Mikro *Base Metal Tube* a) Arus 110A, b) Arus 130A, dan c) Arus 150A

### 3.2.1 Struktur mikro *base metal tubesheet*

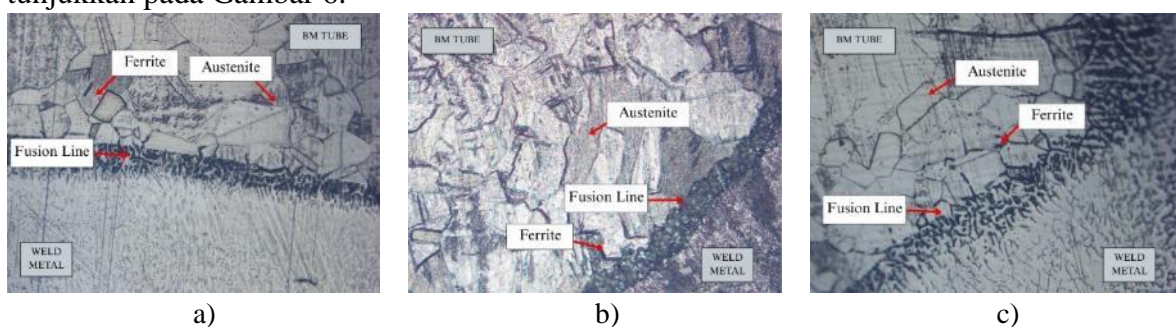
Pada base metal *tubesheet* (SA-240 TP316L), struktur mikro awal menampilkan butir-butir *austenite equiaxed* yang cukup seragam, meskipun sedikit lebih besar dibanding pada *tube*, akibat metode fabrikasi dan massa termal yang berbeda. Ketika kuat arus pengelasan dinaikkan dari 110 A ke 130 A hingga 150 A, siklus termal dari las hanya memengaruhi zona HAZ dan area sekitar *fusion line* saja. Dengan demikian, bagian *base metal* yang tidak terpapar panas pengelasan mempertahankan struktur *austenite equiaxed*-nya tanpa transformasi fasa primer. Penelitian (García-García et al. 2017) menunjukkan bahwa base metal tetap stabil sebagai *austenite*, sedangkan perubahan morfologi baru terjadi di HAZ saat *heat input* meningkat. Pengamatan struktur mikro pada area *base metal tubesheet* digunakan pembesaran 200X dari masing-masing variasi arus 110A, 130A, dan 150A di tunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Struktur Mikro *Base Metal Tubesheet* a) Arus 110A, b) Arus 130A, dan c) Arus 150A

### 3.2.3 Struktur mikro *fusion line tube*

Dalam area transisi antara *base metal tube* dan *weld metal* pada material SA-240 TP316L, struktur mikro didominasi oleh fasa *austenite* ( $\gamma$ ) dengan adanya sedikit *delta ferrite* ( $\delta$ ) sebagai akibat segregasi kromium di batas butir selama pendinginan pasca pengelasan. Pada arus las rendah (110 A), pendinginan cepat menghasilkan butir *austenite* yang kasar, sedangkan arus tinggi (150 A) memperpanjang waktu paparan panas, memicu *grain growth* sesuai observasi pada 316L dimana peningkatan arus memperlebar dan memperdalam zona las serta memperbesar butir  $\gamma$ . Pengamatan struktur mikro pada area *fusion line tube* digunakan pembesaran 200X dari masing-masing variasi arus 110A, 130A, dan 150A di tunjukkan pada Gambar 6.

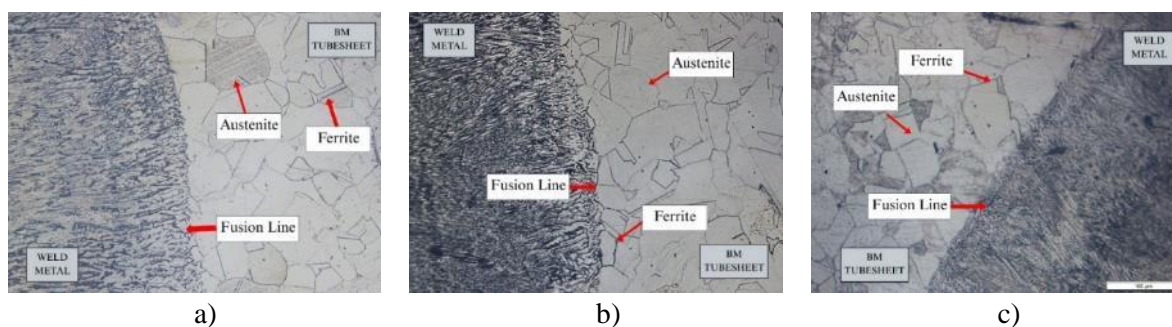


## Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet* Stainless Steel 316L Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan

**Gambar 6.** Struktur Mikro *Fusion Line Tube* a) Arus 110A, b) Arus 130A, dan c) Arus 150A

### 3.2.4 Struktur mikro *fusion line tubesheet*

Pada *fusion line tubesheet*, massa termal yang lebih besar membuat pendinginan berlangsung lebih lambat dibanding *fusion line tube*. Peningkatan arus dari 110 A ke 130 A dan 150 A memperluas zona transisi (*HAZ*) serta memicu pertumbuhan butir *austenite* yang lebih signifikan. Penelitian pada 316L menunjukkan bahwa *heat input* tinggi memperbesar ukuran butir di *HAZ* dan mengurangi kandungan *delta ferrite* (Li et al. 2013). Laju pendinginan yang lambat ini memungkinkan terbentuknya butir *austenite* besar, meskipun fasa *austenite* tetap dominan (Ou et al. 2022). Pengamatan struktur mikro pada area *fusion line tubesheet* digunakan pembesaran 200X dari masing-masing variasi arus 110A, 130A, dan 150A di tunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Struktur Mikro *Fusion Line Tubesheet* a) Arus 110A, b) Arus 130A, dan c) Arus 150A

### 3.2.5 Struktur mikro *weld metal*

Struktur mikro pada *weld metal* ditandai oleh dendrite *austenite* dengan *delta ferrite* ( $\delta$ ). Fase *delta ferrite* yang berbentuk *lathy* dan *acicular* ditemukan pada *weld metal* dengan input panas rendah pada material *austenitic stainless steel*. Sementara itu, fase *delta ferrite* dendritik ditemukan lebih dominan pada input panas tinggi pada material *austenitic stainless steel*. Pada arus rendah (110 A), *heat input* kecil dan pendinginan cepat menghasilkan struktur *austenite* yang renggang dan berbutir besar, dengan *delta ferrite* sedikit dan tidak merata. Saat arus meningkat ke 130 A, pendinginan melambat, menciptakan butiran *austenite* yang lebih halus dan homogen serta distribusi  $\delta$ -*ferrite* yang merata, sehingga  $\delta$ -*ferrite* diperlukan untuk menghindari retak panas (Piotr Noga, 2024). Pada arus tinggi (150 A), terjadi *grain growth* intensif dengan struktur *austenite* yang sangat halus dan peningkatan minor *delta ferrite*. Pengamatan struktur mikro pada area *weld metal* digunakan pembesaran 200X dari masing-masing variasi arus 110A, 130A, dan 150A di tunjukkan pada Gambar 8.



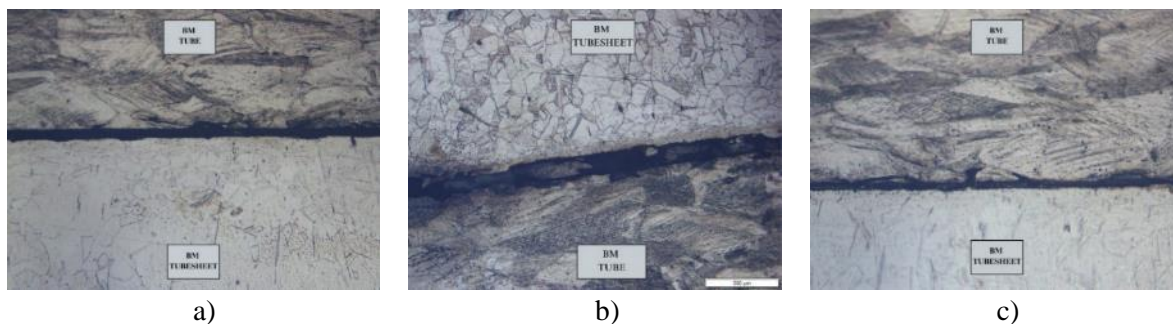
## Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet* Stainless Steel 316L Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan

a) b) c)

**Gambar 8.** Struktur Mikro *Weld Metal* a) Arus 110A, b) Arus 130A, dan c) Arus 150A

### 3.2.6 Struktur mikro *area of expand*

Pada *area of expand*, deformasi plastis akibat *tube expansion* mengubah morfologi butir austenite. Kenaikan arus dari 110 A ke 130 A dan 150 A meningkatkan heat input, memperlambat pendinginan, dan memicu rekristalisasi parsial. Pada arus tinggi (150 A), rekristalisasi lebih optimal sehingga butir menjadi lebih halus dan seragam. Sebaliknya, pada arus rendah (110 A), panas tidak cukup untuk rekristalisasi sempurna, sehingga butir terdistorsi dan cenderung lebih kasar. Temuan ini sejalan dengan (Mohammadzahi et.al 2024) dan (Wang, Godfrey, and Liu 2023) yang melaporkan bahwa interaksi antara deformasi plastis dan pemanasan menentukan ukuran butir pada stainless steel austenitik. Pengamatan struktur mikro pada *area of expand* digunakan pembesaran 200X dari masing-masing variasi arus 110A, 130A, dan 150A di tunjukkan pada Gambar 9.



**Gambar 9.** Struktur Mikro *Area of Expand* a) Arus 110A, b) Arus 130A, dan c) Arus 150A

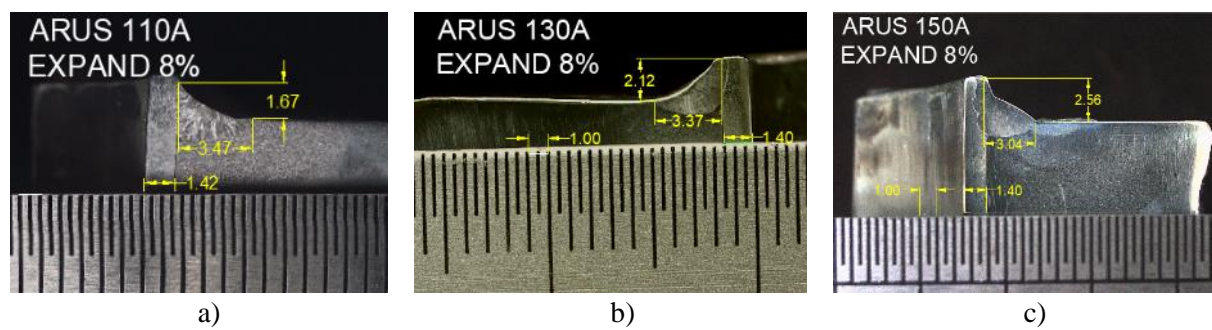
### 3.3 Pengaruh Kuat Arus Terhadap Struktur Makro

Pada pengamatan struktur makro tampak bahwa arus las 150 A dan tekanan *expand* 8% menghasilkan fusi yang sangat baik tanpa cacat mendasar seperti porositas atau retakan. Arus ini menghasilkan struktur las dengan penetrasi yang cukup dan bentuk zona fusi yang sterilisasi sehingga menciptakan sambungan yang homogen dan bebas dari cacat visual. Peningkatan arus efektif dalam mengimbangi efek deformasi dari *expands*, menjaga kualitas sambungan meski terjadi perubahan pada geometri akibat proses *cold working*. Hal ini sejalan dengan temuan (Thekkuden et al. 2022), yang menyatakan bahwa kombinasi antara arus las tinggi dan tekanan *expands* efektif meningkatkan integritas fusi pada sambungan *tube to tubesheet*. Sedangkan pada arus 110 A dan 130 A masih terdapat cacat *incomplete fusion* yang mana diakibatkan karena adanya celah yang belum sepenuhnya tertutup dan distribusi panas yang tidak optimal. Hal ini sejalan dengan temuan (Thekkuden et al. 2022), yang menyatakan bahwa kombinasi antara arus las tinggi dan tekanan *expands* efektif meningkatkan integritas fusi pada sambungan *tube to tubesheet*.

Gambar 10 menunjukkan hasil struktur makro pada sambungan *tube to tubesheet* dengan menggunakan variasi arus sebesar 110A, 130A, dan 150A



## Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet Stainless Steel 316L* Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan

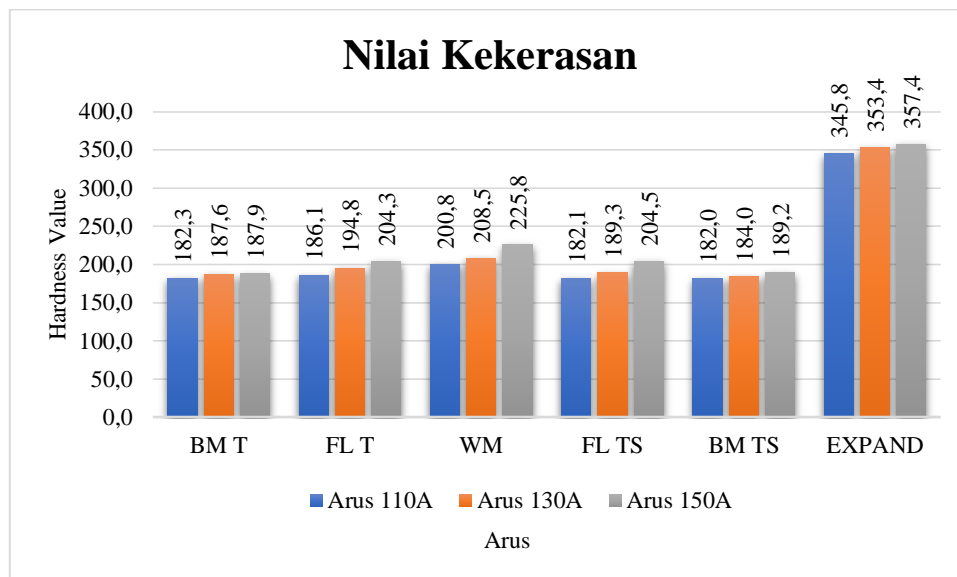


**Gambar 10.** Struktur Makro a) Arus 110A, b) Arus 130A, dan c) Arus 150A

### 3.4 Pengaruh Kuat Arus Terhadap Nilai Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada daerah *base metal tube*, *base metal tubesheet*, *fusion line tube*, *fusion line tubesheet*, *weld metal*, dan *area of expand*. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa peningkatan arus las dari 110 A ke 150 A diikuti oleh kenaikan kekerasan pada hampir semua zona, terutama pada *Weld Metal* (WM) dan zona *expansion*. Pada *Base Metal* (BM) dan *Fusion Line* (FL), kenaikan kekerasan relatif kecil karena struktur *austenite* di area tersebut stabil dan tidak banyak dipengaruhi oleh panas las, meskipun arus tinggi sedikit memperlebar *Heat Affected Zone* (HAZ). Di WM, kekerasan meningkat tajam dipengaruhi oleh peningkatan input panas yang menghasilkan penetrasi las lebih besar, memperluas dimensi dilusi pengelasan dan memperbaiki sifat mekanik sambungan (Moslemi et al. 2015). Zona *Expansion* menunjukkan nilai kekerasan tertinggi karena efek signifikan *strain hardening* selama proses ekspansi *tube*, yang menyebabkan pemurnian butir dan peningkatan kepadatan dislokasi pada material (Saffiudeen et al. 2024). Peningkatan kekerasan pada logam las dari 200,8 HV (110 A) menjadi 225,8 HV (150 A) menunjukkan bahwa masukan panas (*heat input*) tinggi maka butir yang dibawa akan lebih halus sehingga ketika memadat maka logam lasan akan berikatan dengan kuat sehingga menghasilkan kekerasan yang tinggi (Widodo 2016). Singkatnya, arus 150 A memberikan kekerasan tertinggi pada WM dan *Expansion* sebagai hasil sinergis antara peningkatan input panas termal dan penguatan mekanis oleh deformasi plastis. Struktur mikro terbentuk menjadi lebih halus dan seragam, disertai distribusi delta ferrite stabil yang berwujud lathy atau skeletal, di mana jumlah dan distribusinya sangat dipengaruhi oleh arus las. Ferrite pada pengelasan yang dibuat dengan input panas rendah hingga tinggi dapat berupa ferrite acicular (Lippold et al. 2005). Meskipun *austenitic stainless steel* umumnya stabil pada suhu tinggi, namun adanya sedikit fasa *delta ferrite* di area las bisa menambah kekerasan. Hal ini dibuktikan oleh (Zhang, Chunlei, Dorte Juul Jensen 2021) yang menyatakan bahwa fasa *delta ferrite* pada hasil pengelasan 316L dapat meningkatkan kekerasan dan ketahanan terhadap *hot cracking*. Arus tinggi menghasilkan struktur mikro yang lebih halus serta nilai kekerasan yang lebih tinggi pada logam las *austenitic* (Hassan, Ahmed, Iman El-Mahallawi 2023). Hasil pengujian rata-rata kekerasan *Vickers* ditunjukkan pada Gambar 11.

## Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet* Stainless Steel 316L Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan



Gambar 11. Grafik Nilai Kekerasan

#### 4. Kesimpulan

Pada arus yang tinggi, yaitu 150 A, menghasilkan pengelasan yang sempurna tanpa adanya cacat seperti *porosity* atau *incomplete fusion*. Selain itu, struktur mikro di area las menjadi lebih halus dan meminimalkan distorsi pada sambungan. Dari hasil pengujian kekerasan, nilai terendah ditemukan pada *base metal tubesheet* sebesar 182,0 HV ketika menggunakan arus 110 A, sedangkan nilai tertinggi terjadi di zona *expansion* sebesar 357,4 HV ketika menggunakan arus 150 A. Nilai kekerasan tinggi di zona *expansion* dipengaruhi oleh *cold working* yaitu *expand* sebesar 8% yang terjadi selama proses ekspansi. Saran kedepan untuk bisa dikembangkan perlakuan panas pada daerah *expand* yang tidak terkena pengelasan.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak kampus PPNS yang telah memfasilitasi penyediaan sarana, prasarana sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Terimakasih juga penelitian ini didanai oleh DIPA PPNS tahun 2025.

#### Daftar Pustaka

- Allpro. (2021). Diambil kembali dari <https://www.allpro.co.id/pengelasan/gtaw/>
- Al-Odhaib, Ahmed, and Abdulaziz S. Alaboodi. 2020. "Review on Heat Exchanger Tube-To-Tubesheet Joining." *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)* 11(10):1395–1405. doi:10.34218/IJARET.11.10.2020.133.
- Bártová, Katarína, Mária Dománková, Jozef Bárta, and Peter Pastier. 2022. "Influence of 40% Cold Working and Annealing on Precipitation in AISI 316L Austenitic Stainless

**Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan Tube to Tubesheet Stainless Steel 316L Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan**

- Steel.” *Materials* 15(18):1–18. doi:10.3390/ma15186484.
- García-García, V., H. Hernández-Belmontes, I. Mejía, F. Reyes-Calderón, and C. Maldonado. 2017. “Effect of the Heat Input on the Heat Affected Zone in the Austenitic Stainless Steel Welding by the GTAW Process-An Experimental and Computational Analysis.” *MRS Advances* 2(61):3781–86. doi:10.1557/adv.2017.594.
- Hassan, Ahmed, Iman El-Mahallawi, and Mohamed Raafat El-Koussy. 2023. “Effect of GTAW Welding Current on the Quality of 304L Austenitic Stainless Steel Using ER316L.”” *International Journal of Materials Technology and Innovation*. doi:10.21608/ijmti.2023.190981.1075.
- Jiang, Xiaowei, Wenhui Wang, Chunguang Xu, Jingdong Li, and Jiangquan Lu. 2024. “Effect of Process Parameters on Welding Residual Stress of 316L Stainless Steel Pipe.” *Materials* 17(10). doi:10.3390/ma17102201.
- Kou, Sindo. 2003. *Welding Metallurgy*. Vol. 4.
- Kumar, Subodh, and A. S. Shahi. 2011. “Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded AISI 304 Stainless Steel Joints.” *Materials and Design* 32(6):3617–23. doi:10.1016/j.matdes.2011.02.017.
- Li, Li Chan, Meng Yu Chai, Yong Quan Li, Wen Jie Bai, and Quan Duan. 2013. “Effect of Welding Heat Input on Grain Size and Microstructure of 316L Stainless Steel Welded Joint.” *Applied Mechanics and Materials* 331(July):578–82. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.331.578.
- Lippold, John C., Damian J. Kotecki, and A. John Wiley. 2005. *AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS @ Zk !! C ,.*
- Ma, H., H. J. Yu, C. F. Qian, Z. S. Liu, and J. X. Zhou. 2015. “Experimental Study of Hydraulically Expanded Tube-to-Tubesheet Joints for Shell-and-Tube Heat Exchangers.” *Procedia Engineering* 130:263–74. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.220.
- Mohammadzahi, Sara, and Hamed Mirzadeh. 2024. “Grain Refinement of Austenitic Stainless Steels by Cross Rolling and Annealing Treatment: A Review.” *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials* 57(2):112–19. doi:10.22059/jufgnsm.2024.02.01.
- Moslemi, Navid, Norizah Redzuan, Norhayati Ahmad, and Tang Nan Hor. 2015. “Effect of Current on Characteristic for 316 Stainless Steel Welded Joint Including Microstructure and Mechanical Properties.” *Procedia CIRP* 26:560–64. doi:10.1016/j.procir.2015.01.010.
- Ou, Guofu, Guangwei Qian, Haozhe Jin, Wangping Wu, and Qianqian Li. 2022. “Microstructure and Corrosion Resistance of Fusion Welding Zone for Duplextubes Welded with Q345R Tube Sheet under Different Welding Currents.” *Metals* 12(5). doi:10.3390/met12050705.
- Riswanda, Akhyar, H. Kadir, Sugianto, and A. D. Saragih. 2024. “The Effect of Heat Input on Tensile Strength, Vickers Hardness, and Microstructure on DMW of AISI 1015 and 304L SS through the GMAW Process.” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 123(1):5–16. doi:10.5604/01.3001.0054.4920.

**Analisis Pengaruh Kuat Arus Pengelasan Pada Sambungan *Tube to Tubesheet* Stainless Steel 316L Terhadap Struktur Mikro, Struktur Makro, dan Kekerasan**

- Saffiudeen, Mohamed Fayas, Dinu Thomas Thekkuden, Abdel Hamid Ismail Mourad, Fasil T. Mohammed, Abdullah Syed, Khalid Abdulrahman Al-Sayed, Yassir A. Alamri, and Mohammad N. Al Qahtani. 2024. "Combined Gas Tungsten Arc Welding and Shielded Metal Arc Welding Processes for Joining Tube to Tubesheet in Shell and Tube Heat Exchangers." *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME* 146(4). doi:10.1115/1.4065519.
- TEMA 11th. 2023. "Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association 8th Edition." *TEMA - Tubular Exchanger Manufacturers Association* 298.
- Thekkuden, Dinu Thomas, Abdel Hamid Ismail Mourad, Abdel Hakim Bouzid, and Muhammad M. Sherif. 2023. "Investigation of Expansion Percentages and Groove Inclusions on the Performance of Welded, Expanded, Welded-Expanded Tube-to-Tubesheet Joints." *Journal of Materials Research and Technology* 22:2078–92. doi:10.1016/j.jmrt.2022.12.045.
- Thekkuden, Dinu Thomas, Abdel Hamid Ismail Mourad, Tholkappiyan Ramachandran, Abdel Hakim Bouzid, Ravi Kumar, and Ahmed Alzamy. 2022. "Combined Effect of Tungsten Inert Gas Welding and Roller Expansion Processes on Mechanical and Metallurgical Characteristics of Heat Exchanger Tube-To-Tubesheet Joints." *Journal of Materials Research and Technology* 21:4724–44. doi:10.1016/j.jmrt.2022.11.043.
- Wang, Wei Yi, Andrew Godfrey, and Wei Liu. 2023. "Effect of Heat Treatment on Microstructural Evolution in Additively Manufactured 316L Stainless Steel." *Metals* 13(6). doi:10.3390/met13061062.
- Widodo, Eriek Wahyu Restu. 2016. "Pengaruh Kuat Arus Listrik Dan Jenis Kampuh Las Terhadap Kekerasan Dan Strukturmakro Pada Pengelasan Stainless Steel Aisi 304." *Jurnal IPTEK* 20(2):47. doi:10.31284/j.iptek.2016.v20i2.49.
- Zhang, Chunlei, Dorte Juul Jensen, and Tianbo Yu. 2021. "Microstructure and Texture Evolution During Cold Rolling of 316L Stainless Steel." 52.