PENGARUH ANALISIS PENGARUH VARIASI ARUS LISTRIK PADA PROSES PENGELASAN SMAW TERHADAP KARAKTERISTIK TEGANGAN-REGANGAN DAN KEKERASAN BESI COR NODULAR (*DUCTILE CAST IRON*)

Rido Agung Brillianto
S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: ridoagung.22007@mhs.unesa.ac.id

Hanna Zakiyya
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: hannazakiyya@unesa.ac.id

Abstrak

Besi cor nodular banyak digunakan pada komponen *housing bearing* karena ketahanan aus, keuletan tinggi, dan *machinability* yang baik. Namun proses pengelasan pada besi cor nodular sering menurunkan sifat mekaniknya akibat siklus termal tinggi. Penelitian eksperimental ini menganalisis pengaruh variasi arus pengelasan SMAW 80A, 90A, dan 100A menggunakan elektroda ENiFe-CI diameter 2,6 mm terhadap karakteristik tegangan-regangan dan kekerasan sambungan las pada besi cor nodular FCD 500 dengan tebal 6 mm, sambungan *single V-butt joint* sudut kampuh 60° dan posisi 1G. Pengujian tarik mengacu ASTM E8/E8M dan pengujian kekerasan *Vickers* mengacu ASTM E92 pada zona WM, HAZ, dan BM. Hasil pengujian menunjukkan tegangan tarik menurun konsisten dari 512,61 MPa pada 80A menjadi 480,82 MPa pada 90A dan 402,34 MPa pada 100A, turun 21,5% dari 80A ke 100A, diikuti penurunan regangan tarik sebesar 61,82% (dari 3,30% menjadi 1,26%) yang menandakan material semakin getas. Penurunan ini diduga berkaitan dengan pengasaran struktur dendritik pada WM serta degradasi morfologi grafit nodular disertai pelunakan matriks pada HAZ akibat naiknya *heat input*. Kekerasan pada WM dan HAZ juga menurun masing-masing 7,07% dan 6,81% dari 80A ke 100A, sementara BM relatif stabil antar arus pengelasan (selisih 0,2 HVN atau 0,07%) karena jauh dari sumber panas, tetapi tetap sekitar 9,38% lebih rendah daripada *raw material*. Hasil bersifat deskriptif dari tiga ulangan; arus 80A merupakan kondisi terbaik di antara kondisi yang diuji.
Kata Kunci: Besi cor nodular, Pengelasan SMAW, Arus Pengelasan, Uji Tarik, Kekerasan.

Abstract

Nodular cast iron is widely used in bearing housing components due to its wear resistance, high toughness, and good machinability. However, the welding process on nodular cast iron often degrades its mechanical properties due to high thermal cycling. This experimental study analyzes the effect of varying SMAW welding currents of 80A, 90A, and 100A using a 2.6-mm-diameter ENiFe-CI electrode on the stress-strain characteristics and hardness of welded joints in 6-mm-thick FCD 500 nodular cast iron, with a single V-butt joint, a 60° bevel angle, and the 1G position. Tensile testing was conducted in accordance with ASTM E8/E8M, and Vickers hardness testing was performed in accordance with ASTM E92 on the WM, HAZ, and BM zones. The test results showed a consistent decrease in tensile strength from 512.61 MPa at 80A to 480.82 MPa at 90A and 402.34 MPa at 100A, a 21.5% decrease from 80A to 100A, followed by a 61.82% decrease in tensile strain (from 3.30% to 1.26%), indicating that the material became increasingly brittle. This decrease is believed to be related to the coarsening of the dendritic structure in the WM and the degradation of the nodular graphite morphology accompanied by matrix softening in the HAZ due to increased heat input. The hardness in the WM and HAZ also decreased by 7.07% and 6.81%, respectively, from 80A to 100A, while the BM remained relatively stable across welding currents (a difference of 0.2 HVN or 0.07%) because it was far from the heat source, but remained approximately 9.38% lower than that of the raw material. These results are descriptive of three replicates; the 80A current condition yielded the best results among the tested conditions.
Keywords: Nodular cast iron, SMAW welding, welding current, tensile test, hardness.

PENDAHULUAN

Besi cor nodular banyak digunakan pada komponen *housing bearing* karena memiliki ketahanan aus, keuletan tinggi, kemampuan meredam getaran, serta kemampuan mesin (*machinability*) yang baik (Siswanto, 2019). Namun, komponen *housing bearing* sering mengalami keausan, retak, atau cacat dimensi akibat beban kerja berulang dan kondisi operasi yang berat (Prabowo & Rusydi, 2025), sehingga pengelasan sering kali diperlukan untuk penyambungan maupun perbaikan.

Besi cor nodular merupakan paduan besi dengan kandungan karbon lebih dari 1,7% dan silikon sekitar 1-3% yang memiliki grafit berbentuk nodul sehingga mampu

mendistribusikan tegangan secara lebih merata dan memberikan sifat mekanik yang baik. Kekuatan tariknya berada pada kisaran 370-700 MPa dengan kekerasan 130-250 HB, elongasi 10-20% dan ketangguhan impac 10-20 J/cm^2, bergantung pada komposisi kimia dan struktur mikro matriksnya (Vaško dkk., 2018). Pada proses pengelasan, sifat mekanik tersebut dapat menurun hingga 15-20% akibat siklus termal tinggi yang menyebabkan laju pendinginan cepat pada *Heat Affected Zone* (HAZ), memicu pembentukan fasa keras dan getas seperti martensit dan sementit, serta menurunkan stabilitas grafit nodular sehingga konsentrasi tegangan meningkat dan keuletan menurun (Balubun & Suriansyah, 2018).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik hasil pengelasan. Penelitian Pernada (2022) melaporkan bahwa pengelasan SMAW pada arus 90A dengan elektroda ENi-CI pada besi cor nodular setebal 8 mm menurunkan kekuatan tarik dari 562,99 MPa menjadi 191,79 MPa atau turun 65,93%. Penelitian Daryono dkk. (2021) meneliti arus 80A, 85A, dan 90A dengan elektroda ENiFe-CI diameter 2,6 mm dengan sudut kampuh V-*butt joint* 60° pada besi cor kelabu, yang menunjukkan bahwa kekerasan logam induk, HAZ, dan logam las lebih rendah dibandingkan nilai awalnya. Pada zona *base metal* arus 80A nilai kekerasan maksimum dari 205,7 VHN turun menjadi 192,17 VHN, pada zona HAZ arus 85A nilai kekerasan maksimum dari 215,8 VHN turun menjadi 203,46 VHN, sedangkan pada zona *weld metal* nilai kekerasan maksimum arus 90A dari 228,9 VHN turun menjadi 211,18 VHN. Sementara pengamatan struktur mikro pada zona HAZ didominasi struktur martensit. Penelitian Wibowo dkk. (2019) melaporkan bahwa pada besi cor kelabu dilas dengan rentang arus 90A, 100A, dan 110A, kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada 90A 118,54 MPa, pada arus 100A menjadi 118,54 MPa, dan pada arus 110A turun menjadi 106,99 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengelasan tidak optimal pada sambungan las akibat pengaturan arus yang kurang tepat, berpotensi besar mereduksi sifat mekanik besi cor nodular secara drastis.

Salah satu upaya mengendalikan penurunan sifat mekanik tersebut adalah mengatur arus pengelasan untuk mengontrol masukan panas (*heat input*), yang memengaruhi laju pendinginan dan pembentukan struktur mikro, terutama pada HAZ. Arus yang terlalu rendah menyebabkan penetrasi dangkal dan ikatan sambungan yang lemah, sedangkan arus yang terlalu tinggi meningkatkan risiko pembentukan martensit dan karbida getas serta degradasi nodul grafit. *Shielded Metal Arc Welding* dipilih karena peralatannya sederhana, biayanya relatif murah, dan dapat menghasilkan sambungan yang kuat (Istiqlaliyah & Mufarrih, 2018). Elektroda berbasis nikel seperti ENiFe-CI direkomendasikan standar AWS A5.15 untuk besi cor nodular karena koefisien muai termalnya mendekati logam induk dan mampu menekan pembentukan karbida getas pada HAZ (Sayed dkk., 2019).

Meskipun demikian, arus pengelasan yang memberikan kombinasi kekuatan tarik, keuletan, dan kekerasan terbaik pada sambungan las SMAW, pada material besi cor nodular FCD 500 dengan elektroda ENiFe-CI Chin 2 diameter 2,6 mm pada rentang arus pengelasa 80-100A belum diketahui. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi arus pengelasan 80A, 90A, dan 100A terhadap karakteristik tegangan-regangan dan kekerasan *Vickers* pada zona *weld metal* (WM), HAZ, dan *base metal* (BM), disertai pengamatan struktur mikro untuk menjelaskan kecenderungan yang diperoleh.

Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi kuat arus las 80A, 90A, dan 100A pada pengelasan SMAW terhadap nilai tegangan-regangan pada besi cor nodular?
2. Kombinasi Bagaimana pengaruh variasi kuat arus las 80A, 90A, dan 100A pada pengelasan SMAW terhadap nilai uji kekerasan pada besi cor nodular?

Tujuan Penelitian

Adapun dari tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi kuat arus las 80A, 90A, dan 100A terhadap nilai karakteristik tegangan-regangan sambungan las SMAW pada besi cor nodular.
2. Menganalisis pengaruh variasi kuat arus las 80A, 90A, dan 100A terhadap nilai kekerasan sambungan las SMAW pada besi cor nodular.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental untuk mengetahui pengaruh variasi arus listrik 80A, 90A, dan 100A pada proses pengelasan SMAW. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah besi cor nodular FCD 500 tebal 6 mm yang dilas menggunakan elektroda ENiFe-CI diameter 2,6 mm dengan sambungan *single V-butt joint* sudut kampuh 60° pada posisi 1G sebanyak 3 lapis. Pengujian tarik mengacu pada ASTM E8/E8M dan pengujian kekerasan *Vickers* mengacu pada ASTM E92 pada zona WM, HAZ, dan BM. Dari hasil pengujian dilakukan analisis untuk mengetahui pengaruh variasi arus pengelasan terhadap perubahan karakteristik tegangan-regangan dan kekerasan serta keterkaitannya dengan perubahan struktur mikro setelah pengelasan pada besi cor nodular.

Tempat Dan Waktu Penelitian

1. Waktu Penelitian

   Waktu yang dilakukan pada penelitian ini dalam rentang waktu November 2025 hinga Juli 2026.
2. Tempat Penelitian.

   Penelitian ini dilakukan di laboratorium bahan mesin Politeknik Negeri Malang.

Variable Penelitian

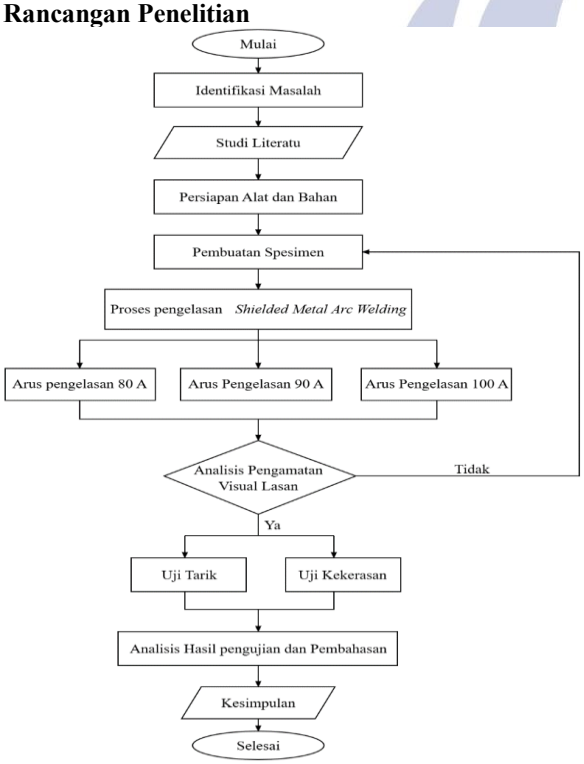
Variabel yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Variable Bebas
   a. Variasi arus pengelasan 80A, 90A, dan 100A.
2. Variable Terikat

a. Uji tarik untuk mengetahui nilai karakteristik tegangan-regangan.
b. Uji kekerasan Vickers pada tiga titik yaitu *weld metal*, *heat affected zonel*, dan *base metal*

3. Variable Terkontrol
   a. Material besi cor nodular FCD 500
   b. Pemotongan plat ukuran 200 x 100 mm
   c. Perlakuan panas awal pada raw material dan material yang dilakukannya lasan, dengan temperatur 720° C selama 1 jam untuk menyeragamkan mikrostrur awal pada material.
   d. Pengelasan SMAW.
   e. Sudut kampuh las *Single V-butt joint* 60°**.**
   f. Elektroda ENiFe-CI diameter 2,6 mm.
   g. Posisi pengelasan 1G.
   h. Tegangan pengelasan 24V
   i. Polaritas DCEP.

Rancangan Penelitian



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian.

Bahan, Alat Dan Instrumen Penelitian

1. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:
   a. Material besi cor nodular FCD 500.
   b. Elektroda ENiFe-CI diameter 2,6 mm.
2. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antra lain:
   a. Mesin las SMAW.
   b. Sarung tangan las.
   c. kap las.
   d. Jangka sorong.
   e. Gerinda.
   f. Sikat kawat.
   g. Ragum.
3. Instrumen Peneleitian
   a. Mesin uji tarik.
   b. Mesin uji kekerasan Vickers.

Prosedur Penelitian

Material dipotong menjadi pelat berukuran 200 × 100 x 6 mm, kemudian diberi perlakuan panas awal pada temperature 720°C selama 1 jam dan didinginkan pada suhu ruangan, untuk menyeragamkan struktur mikro awal, *raw material* diberi perlakuan yang sama. Selanjutnya dibentuk kampuh V tunggal 60° dengan kaki akar 1 mm dan celah akar 2 mm. Pengelasan SMAW dilakukan pada arus 80A, 90A, dan 100A sebanyak 3 lapis dengan elektroda ENiFe-CI diameter 2,6 mm pada posisi 1G, dilanjutkan pengamatan visual hasil lasan sebelum spesimen diuji tarik dan kekerasan.

Proses Pengujian Tarik

Spesimen uji tarik dibuat mengacu pada ASTM E8 dengan sebanyak 9 spesimen (3 per arus). Panjang total 200 mm, panjang ukur 50 mm, lebar 12,5 mm, tebal 6 mm, lebar pegangan 20 mm, panjang pegangan 50 mm, dan jari-jari lengkung 12,5 mm. Spesimen dipasang vertikal pada penjepit mesin uji tarik, kemudian diberi beban tarik kontinu dengan kecepatan konstan hingga patah. Setelah patah nilai yang tercatat di mesin uji tarik di hitung dengan persamaan berikut untuk mencari nilai tegangan dan regangan:

$$\sigma t = \frac{F_U}{A_0} \quad \text{.....(1)}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{Lo} \times 100\% \quad \text{.....(2)}$$

Proses Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan *Vickers* (VHN) mengacu pada ASTM E92, diukur dengan beban 50 gf dan waktu tahan 10 detik menggunakan indentor intan piramida bersudut puncak 136°, pada tiga titik di masing-masing zona WM, HAZ, dan BM (9 titik per arus), serta pada *raw material* sebagai pembanding.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik hasil sambungan las besi cor nodular, khususnya nilai tegangan tarik maksimum (*tensile strength*) dan regangan (*elongation*) yang dihasilkan pada setiap variasi arus pengelasan 80A, 90A, dan 100A. Pengujian uji tarik dilakukan menggunakan standar ASTM E8, hasil dari pengujian ini dapat diperoleh gambaran mengenai kemampuan sambungan las dalam menahan beban tarik hingga mengalami deformasi dan akhirnya patah.



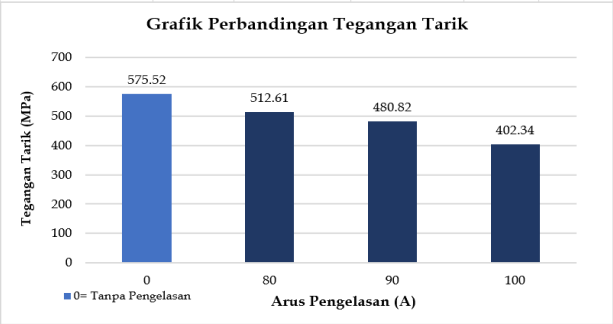
Gambar 2 Spesimen uji tarik.

UNESA Universitas Negeri Surabaya

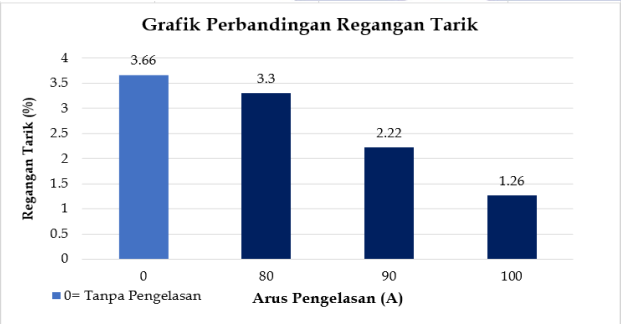
Setelah spesimen di uji hingga hatah, hasil pengujian tarik disajikan pada tabel dan grafik sebagai berikut:

Tabel 1 Hasil Pengujian Tarik.

Arus	Spesimen	Beban maks. (N)	Tegangan tarik (MPa)	Regangan (%)
Raw	1	43242,48	576,56	3,70
	2	43164,00	575,52	3,66
	3	43124,76	574,99	3,62
	Median	**43164,00**	**575,52**	**3,66**
80 A	1	37032,75	493,77	3,30
	2	39240,00	523,20	3,44
	3	38445,39	512,61	3,18
	Median	**38445,39**	**512,61**	**3,30**
90 A	1	36346,05	484,61	2,24
	2	36061,56	480,82	2,22
	3	35796,69	477,29	2,04
	Median	**36061,56**	**480,82**	**2,22**
100 A	1	29969,55	399,59	1,38
	2	30175,56	402,34	1,22
	3	31460,67	419,48	1,26
	Median	**30175,56**	**402,34**	**1,26**



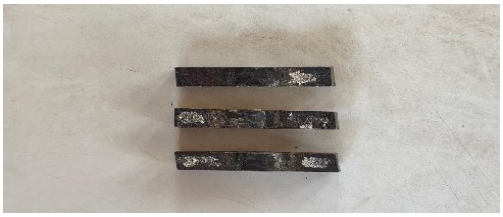
Grafik 1 Perbandingan tegangan tarik.



Grafik 2 Perbandingan regangan tarik.

Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *vickers* (VHN) sesuai standar ASTM E92 dengan beban 50 gf dan waktu tahan 10 detik menggunakan indentor intan berbentuk piramida dengan sudut puncak 136°. Pengujian dilakukan pada tiga titik yang tersebar merata pada permukaan masing-masing spesimen, zona yang diuji meliputi HAZ, WM, dan BM.

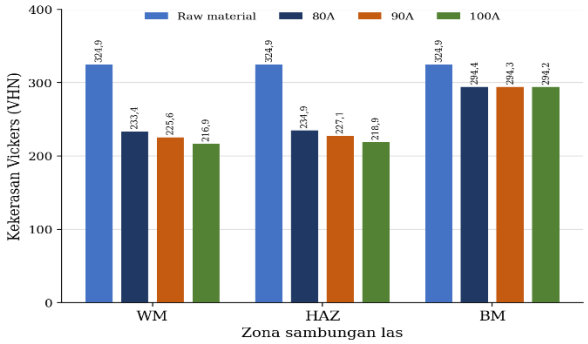


Gambar 3 Spesimen uji kekerasan Vickers.

Setelah spesimen di uji pada zona *Base Metal* (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), dan *Weld Metal* (WM) pada setiap variasi arus pengelasan, hasil pengujian kekerasan disajikan pada tabel dan grafik sebagai berikut:

Tabel 2 Hasil Pengujian Tarik

Arus	Titik	WM	HAZ	BM
Raw	1	327,09		
	2	324,87		
	3	320,98		
	Median	**324,87**		
80 A	1	233,4	235,2	294,4
	2	232,9	234,7	294,5
	3	233,8	234,9	294,3
	Median	**233,4**	**234,9**	**294,4**
90 A	1	224,1	226,4	294,2
	2	225,6	227,1	294,3
	3	226,9	227,2	294,4
	Median	**225,6**	**227,1**	**294,3**
100 A	1	217,1	219,7	294,2
	2	216,4	218,9	294,1
	3	216,9	218,2	294,3
	Median	**216,9**	**218,9**	**294,2**



Grafik 3 Perbandiangan Kekerasan Vickers Zona *Weld Metal*, *Heat Affected Zone*, dan *Base Metal*

Pengaruh Variasi Arus pengelasan Terhadap Uji Tarik Dan Mikrostruktur

Berdasarkan data hasil uji tarik pada table dan grafik, terlihat bahwa variasi arus pengelasan memberikan perbedaan terhadap nilai tegangan tarik dan regangan tarik. Nilai tegangan tarik pada *raw material* yaitu 575,52 MPa dengan regangan 3,66%. Setelah dilakuannya pengelasan, tegangan tarik menurun seiring kenaikan arus pengelasan, yaitu sebesar 512,61 MPa pada 80A, pada arus 90A turun menjadi 480,82 MP, dan pada arus 100A turun menjadi 402,34 MPa. Dari 80A ke 100A terjadi penurunan 110,27 MPa atau sebesar 21,51%. Regangan tarik menunjukkan

pola serupa, pada raw material nilai regangan tarik 3,66%, setelah dilakukannya pengelasan turun menjadi 3,30% pada arus 80A, pada arus 90A turun menjadi 2,22%, dan pada arus 100A turun menjadi 1,26%, atau turun 61,82% dari 80A ke 100A. Penurunan relatif terbesar terjadi pada kenaikan arus dari 90 A ke 100 A, yaitu sekitar 43,24%. Penurunan tegangan dan regangan tarik seiring kenaikan arus berkaitan dengan meningkatnya masukan panas (*heat input*). Apabila tegangan dan kecepatan pengelasan relatif konstan, kenaikan arus meningkatkan *heat input* sehingga laju pendinginan pada *Weld Metal* dan *Heat Affected Zone* melambat dan waktu perkembangan struktur mikro menjadi lebih lama (Wibowo dkk., 2019). Sehingga keuletan menurun dan sambungan cenderung semakin getas pada arus yang lebih tinggi. Patahanan terjadi pada zona *Weld Metal* di ketiga variasi arus, sehingga *Weld Metal* merupakan zona terlemah pada sambungan las.

Hasil dari pengamatan mikrostruktur pada zona *Weld Metal*, grafit nodular tidak ditemukan pada ketiga arus; strukturnya berupa dendrit hasil pembekuan yang mengasar seiring kenaikan arus, yaitu batang utama dendrit membesar dari 14 µm (80A) menjadi 17 µm (90A) dan 22 µm (100A), cabang dendrit dari 14 µm (50%) menjadi 17 µm (53%) dan 21 µm (57%), serta celah antar-dendrit dari 8 µm menjadi 10 µm dan 12 µm. Struktur yang kasar dan tidak homogen ini diduga mengurangi kemampuan WM menahan beban tarik dan berdeformasi plastis sebelum patah, karena grafit nodular yang pada *Base Metal* berperan sebagai penahan retak (*crack blunter*) tidak terbentuk kembali pada daerah yang mencair penuh. Dengan demikian zona *Weld Metal* menjadi titik lemah yang rentan terhadap inisiasi retak. Sedangkan pada zona *Heat Affected Zone*, ukuran dan persentase grafit nodular menurun dari 75 µm (33%) pada 80A menjadi 70 µm (31%) pada 90A dan 68 µm (29%) pada 100A. Grafit yang mengecil dan berubah bentuk berkurang fungsinya sebagai penahan retak dan berpotensi menjadi pemusat tegangan (*stress raiser*). Sehingga seluruh spesimen patah pada zona *Weld Metal* dari ketiga arus, yang menunjukkan bahwa zona *Weld Metal* merupakan daerah terlemah sambungan. Karena lokasi patah sama, perbedaan tegangan dan regangan antar-arus diduga lebih berkaitan dengan pengasaran dendrit pada *Weld Metal* daripada perpindahan lokasi patah. Struktur mikro *Base Metal* yang relatif stabil pada ketiga arus (grafit 80-81 µm; 34%) menunjukkan bahwa penurunan sifat tarik terutama berkaitan dengan perubahan struktur pada zona *Weld Metal* dan *Heat Affected Zone* akibat siklus termal pengelasan.

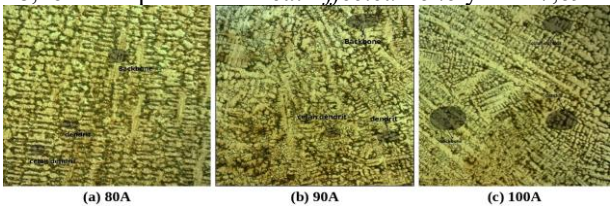
Pengaruh Variasi Arus pengelasan Terhadap Uji Kekerasan Dan Mikrostruktur

Berdasarkan data hasil uji kekerasan Vickers pada table fan grafik, terlihat bahwa variasi arus pengelasan memberikan perbedaan terhadap nilai kekerasan yang signifikan pada zona *Weld Metal* dan *Heat Affected Zone*. Nilai kekerasan pada *raw material* sebesar 324,87 VHN. Setelah dilakukan pengelasan, kekerasan zona *Weld Metal* turun menjadi 233,4 VHN pada arus 80A, arus 90A turun menjadi 225,6 VHN dan arus 100A turun menjadi 216,9 VHN. Kekerasan zona *Heat Affected Zone* turun menjadi 234,9 VHN pada arus 80A, arus 90A turun menjadi 227,1 VHN, dan arus 100A turun menjadi 218,9 VHN. Kekerasan zona *Base Metal* pada arus 80A yaitu 294,4 VHN, arus 90A yaitu 294,3 VHN, dan arus 100A yaitu 294,2 VHN. Dari 80A ke 100A, kekerasan zona *Weld Metal* turun 16,5 VHN atau sebesar 7,07% dan zona *Heat Affected Zone* turun 16,0 VHN qatau sebesar 6,81%. Kekerasan zona *Base Metal* relatif tidak berubah antar variasi arus pengelasan, selisih sekitar 0,2 VHN atau 0,07%, sebanding dengan sebaran antar-titik sekitar 0,2 VHN, tetapi sekitar 9,38% lebih rendah daripada *raw material*. Penurunan terbesar terjadi dari *raw material* ke arus 80A, yaitu 28,16% pada zona Weld Metal dan 27,69% pada zona *Heat Affected Zone*.

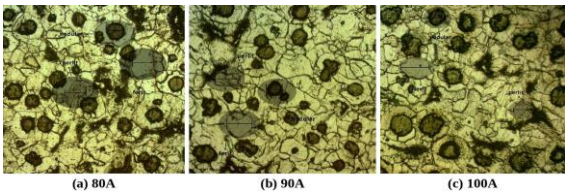
Penurunan pada zona *Weld Metal* berkaitan dengan *heat input* yang meningkat seiring arus, sehingga kolam las yang lebih besar pada arus tinggi membeku lebih lambat sehingga struktur dendritik mengasar dan jarak antar-dendrit melebar. Hal ini sejalan dengan Schonmaier dkk. (2021) yang menyatakan bahwa peningkatan *heat input* pada pengelasan busur memperbesar jarak dendrit dan menurunkan kekerasan. Berkurangnya luas batas antar-dendrit per satuan luas diduga menurunkan ketahanan terhadap deformasi plastis lokal saat indentasi, sehingga kekerasan zona *Weld Metal* turun dari 233,4 VHN pada arus 80A menjadi 216,9 VHN pada arus 100A.

Pada zona *Heat Affected Zone*, penurunan kekerasan diduga berkaitan dengan disolusi sebagian grafit nodular disertai perlambatan laju pendinginan. Pada arus rendah, pendinginan yang cepat membatasi waktu difusi karbon sehingga karbon yang terlepas cenderung terperangkap membentuk konstituen yang lebih keras. Pada arus tinggi, waktu difusi yang lebih lama memungkinkan karbon membentuk kembali matriks ferit-perlit yang lebih lunak. Hal ini tercermin pada fraksi ferit zona *Heat Affected Zone* yang naik dari 37% menjadi 39% dan 41% dengan fraksi perlit tetap 30%, diikuti penurunan kekerasan HAZ dari 234,9 VHN menjadi 218,9 VHN

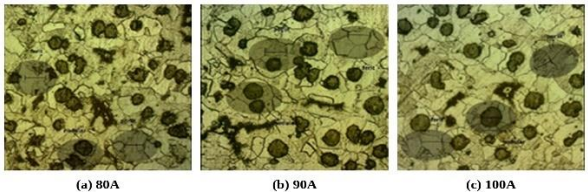
Pada zona *Base Metal* berada jauh dari sumber panas sehingga tidak mengalami pencairan maupun siklus termal cepat; kekerasannya relatif stabil yaitu 294,4-294,2 VHN dan struktur mikronya tidak berubah berarti terhadap arus. Meskipun demikian, kekerasan zona *Base Metal* sekitar 9,38% lebih rendah daripada *raw material*, yang berkaitan dengan tegangan sisa atau perambatan panas minor dari siklus termal pengelasan. Penurunan terbesar terjadi dari *raw material* ke arus 80A pada zona *Weld Metal* yaitu 28,16% dan pada zona *Heat Affected Zone* yaitu 27,69%.



Gambar 4 Mikrostruktur Zona *Weld Metal* Pada Arus 80A,90A, dan 100A



Gambar 5 Mikrostruktur Zona HAZ Pada Arus 80A, 90A, dan 100A.



Gambar 6 Mikrostruktur Zona *Base Metal* Pada Arus 80A, 90A, dan 100A.

Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian tarik dan kekerasan Vickers pada variasi arus pengelasan 80A, 90A, dan 100A pada material besi cor nodular FCD 500 tebal 6 mm dengan elektroda ENiFe-CI diameter 2,6 mm, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan dari 80A hingga 100A menurunkan kekuatan dan keuletan sambungan las secara konsisten. Tegangan tarik turun dari 575,52 MPa pada raw material menjadi 512,61 MPa pada arus 80A, arus 90A turun menjadi 480,82 MPa, dan arus 100A turun menjadi 402,34 MPa, atau menurun 21,51% dari 80A ke 100A. Regangan tarik juga menurun dari 3,66% pada raw material menjadi 3,30% pada 80A, arus 90A turun menjadi 2,22%, dan arus 100A turun menjadi 1,26%, atau turun 61,82% dari 80A ke 100A, yang menandakan sambungan las semakin getas. Penurunan ini diduga disebabkan oleh meningkatnya *heat input* yang memicu pengasaran dendrit pada zona *Weld Metal* yaitu batang utama dari 14 µm menjadi 22 µm serta degradasi grafit nodular pada zona HAZ yaitu ukuran dari 75 µm menjadi 68 µm dan fraksi dari 33% menjadi 29%. Seluruh spesimen uji tarik patah pada zona *Weld Metal*.
2. Hasil pengujian kekerasan Vickers menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan dari 80A ke 100A menurunkan kekerasan pada zona Weld Metal dan HAZ, sementara Base Metal relatif stabil. Pada zona Weld Metal, kekerasan turun dari 324,87 VHN (raw material) menjadi 233,4 VHN pada 80A, 225,6 VHN pada 90A, dan 216,9 VHN pada 100A, atau menurun 7,07% dari 80A ke 100A. Penurunan ini berkaitan dengan meningkatnya heat input yang membuat kolam las lebih besar dan membeku lebih lambat, sehingga struktur dendritik mengasar dan jarak antar-dendrit melebar. Pada zona HAZ, kekerasan turun dari 324,87 VHN menjadi 234,9 VHN pada 80A, 227,1 VHN pada 90A, dan 218,9 VHN pada 100A, atau menurun 6,81% dari 80A ke 100A, yang diduga akibat disolusi sebagian grafit nodular disertai melambatnya laju pendinginan. Sementara itu, Base Metal relatif stabil pada kisaran 294,4-294,2 VHN (selisih 0,07%) karena letaknya jauh dari sumber panas, meskipun nilainya masih sekitar 9,38% lebih rendah daripada raw material (324,87 VHN).

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan. Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Dilakukan *post weld heat treatment* (PWHT) untuk mengurangi tegangan sisa dan kerapuhan logam las, mengingat patahan seluruh spesimen terjadi pada zona *weld metal*.
2. Dilakukan pengujian tambahan seperti *scanning electron microscopy* (SEM) dan *energy dispersive X-ray spectroscopy* (EDX) untuk mengidentifikasi porositas, inklusi, maupun distribusi unsur paduan secara lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Siswanto, A. (2019). Perbaikan kekerasan dan struktur mikro besi cor nodular 700 fasa ledeburitik dengan pengaturan media pendingin dan tempering. *21*(4), 224–230.

Prabowo, B., & Rusydi, M. I. (2025). Analisis desain housing bearing dengan pendekatan finite element method (FEM). *Jurnal Ilmu Teknik Mesin*, *5*(1), 11–19.

Vaško, A., Belan, J., & Tillová, E. (2018). Effect of copper and molybdenum on microstructure and fatigue properties of nodular cast irons. *Manufacturing Technology*, *18*(6), 1049–1052.

Balubun, F. D., & Suriansyah, S. (2018). Pengaruh austemper ductile iron terhadap kekerasan dan struktur mikro ductile cast iron (FCD-45). *10*(1), 18–24.

Pernada, M. (2022). Pengaruh shielded metal arc welding terhadap kekuatan tarik dan modulus elastisitas besi cor nodular.

Daryono, D., Prihantoro, T., & Setiawan, A. (2021). Pengaruh kuat arus las terhadap sifat mekanis dan struktur mikro sambungan las besi tuang kelabu menggunakan elektroda nikel dengan proses pengelasan SMAW. *Accurate: Journal of Mechanical Engineering and Science*, *2*(1), 1–6. https://doi.org/10.35970/accurate.v2i1.585

Wibowo, T. N., Setiawan, K., & Sutrimo, W. (2019). Analisis pengaruh variasi arus pengelasan SMAW terhadap kekuatan tarik dan foto makro pada material besi cor kelabu. *ITEKS*.

Istiqlaliyah, H., & Mufarrih, A. (2018). Analisa pengaruh variasi kuat arus, media pendingin, dan merk elektroda terhadap kekuatan tarik dan distorsi sudut sambungan baja ST 37. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, *11*(1), 41–45.

Sayed, P. A., Kogade, A. S., Lilhare, A. S., Bhimte, B. P., & Wankhede, A. (2019). Comprehensive study of cast iron welding by using different electrode, with the help of destructive testing. *5*(6), 2251–2254.

UNESA Universitas Negeri Surabaya