



## **Pengaruh panas terhadap baja AISI 4340 pada daerah HAZ, logam las, dan bahan induk setelah mengalami pengelasan SMAW**

<sup>1</sup>Muhamad Nurhasan\*, <sup>2</sup>Iman Dirja, <sup>3</sup>Reza Setiawan  
Jurusan Teknik Mesin, Universitas Singa Perbangsa Karawang  
Karawang, 41361, Indonesia

**Email:** <sup>1</sup>\*1610631150085@student.unsika.ac.id, <sup>2</sup>dirjaIman977@gmail.com, <sup>3</sup>[reza.setiawan@staff.unsika.ac.id](mailto:reza.setiawan@staff.unsika.ac.id)

### **Abstrak**

Baja karbon AISI 4340 adalah jenis baja yang tergolong dalam baja paduan karbon sedang yang banyak digunakan sebagai bahan utama pada mesin seperti poros, roda gigi, dan batang penghubung piston pada kendaraan bermotor. Baja karbon paduan merupakan salah satu material yang banyak diproduksi dan digunakan untuk membuat alat-alat atau bagian-bagian mesin karena baja karbon paduan memiliki sifat yang dapat dimodifikasi, sedikit ulet (*ductile*), dan tangguh (*toughness*). Akan tetapi, beberapa sifat unggul tersebut dapat mengalami perubahan ketika terjadi proses pendinginan yang bervariasi. Untuk itu, diperlukan suatu kajian mengenai proses pendinginan yang tepat setelah baja tahan karat tersebut mendapat masukan panas (akibat pengelasan). Dengan demikian, sifat unggul yang dimiliki tidak akan berbeda jauh manakala sebelum dilakukan proses pengelasan dibanding dengan variasi pendinginan akibat proses pengelasan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur dalam metode pengelasan SMAW terhadap struktur mikro. Metode penelitian yang dilakukan menggunakan metode pengujian laboratorium dengan tujuan untuk mengetahui struktur mikro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelasan memberikan pengaruh terhadap struktur mikro daerah HAZ dan daerah las, struktur mikro logam Induk, dan daerah HAZ terdiri dari perlit dan ferit. Hasil dari struktur mikro dengan kandungan perlit lebih banyak dari ferit menghasilkan kualitas sambungan lebih baik.

**Kata kunci:** *Pengelasan, Struktur Mikro, SMAW, AISI 4340*

### ***The effect of heat on AISI 4340 steel in the HAZ area, weld metal, and base material after the SMAW welding process***

#### ***Abstrack***

*AISI 4340 carbon steel is a type of steel belonging to a medium carbon alloy steel which is widely used as the main material in engines such as shafts, gears and piston connecting rods in motorized vehicles. Alloy carbon steel is one of the materials that is widely produced and used to make machine tools or parts, because alloy carbon steel has properties that can be modified, slightly ductile and tough (toughness), but some of these superior properties can experience changes when there is a variety of cooling processes, for that we need a study of the proper cooling process after the stainless steel has received heat input (due to welding), thus the properties of the crowns that are owned will not be much different when before the welding process is carried out compared to variations in cooling due to the welding process. This study aims to determine the effect of temperature in the SMAW welding process method on the microstructure. The method of research carried out using laboratory testing methods in order to determine the micro structure. The results showed that welding had an influence on the microstructure of the HAZ area and the weld area, the microstructure of the parent metal, and the HAZ area consisting of pearlite and ferrite. The result of the microstructure containing more pearlite than ferrite results in better connection quality.*

**Keywords:** *Welding, Microstructure, SMAW, AISI 4340*

#### **1. Pendahuluan**

Proses pengelasan pada sebuah sambungan baja akan menghasilkan struktur baru yang berbeda dengan struktur logam induknya[1]. Hal ini disebabkan oleh bergesernya struktur mikro dari logam induk akibat masukan panas dan proses pendinginan yang tidak tepat. Baja AISI 4340 termasuk dalam deretan baja paduan yang memiliki sifat unggul yaitu tahan terhadap karat, ulet, dan mampu las yang sangat baik. Akan tetapi, beberapa sifat unggul tersebut dapat mengalami perubahan

ketika terjadi proses pendinginan yang bervariasi. Untuk itu, diperlukan suatu kajian mengenai proses pendinginan yang tepat setelah baja tahan karat tersebut mendapat masukan panas (akibat pengelasan). Dengan demikian, sifat unggul yang dimiliki tidak akan berbeda jauh manakala sebelum dilakukan proses pengelasan dibanding dengan variasi pendinginan akibat proses pengelasan.

Perubahan ini terjadi terutama pada daerah disekitar pengelasan yang biasa disebut daerah HAZ

(*Heat Affected Zone*). Daerah HAZ terletak pada logam induk dikiri-kanan logam las serta akan mengalami perubahan struktur mikro yang terbesar. Akibat dari perubahan struktur mikro tersebut sifat mekanis yang meliputi kekenyalan, kekuatan, kekerasan, keliatan, kegetasan, dan ketahanan ausnya akan berubah. Untuk itu, diperlukan pengkajian tentang pengaruh pendinginan cepat (menggunakan air) dan pendinginan lambat (udara) terhadap perubahan sifat mekanisnya agar pada proses pendinginan yang digunakan tidak merubah secara fundamental sifat asli dari logam induknya.

Beberapa penelitian telah dilakukan sebelumnya tentang pengelasan [2-5] seperti yang dilakukan oleh T.B. Santoso bahwa hasil penelitiannya menunjukkan pada kuat arus pengelasan 150 Amper struktur mikro logam induk terdiri dari *perlit* dan *ferrit*. Struktur mikro daerah HAZ dan logam las dengan kuat arus pengelasan 150 Ampere terdiri dari *bainit* dan *widmanstatten ferrite*. Struktur mikro daerah HAZ dan logam las dengan kuat arus pengelasan 100 dan 125 Ampere terdiri dari *asutenit* sisa dan *widmanstatten ferrite*[3]. Berdasarkan permasalahan tersebut perlu dilakukan kajian lanjutan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan struktur mikro pada baja AISI 4340 dengan metode pengelasan terbalik (DCEN) dan pengelasan lurus (DCEP) menggunakan proses las SMAW.

## 2. Metode Penelitian

### A. Baja AISI 4340

Pemilihan baja AISI 4340 karena baja ini banyak dipakai dalam pembuatan komponen-komponen permesinan karena murah dan mudah didapatkan di pasaran. Komponen mesin yang terbuat dari baja ini contohnya poros, roda gigi, dan rantai. Adapun data-data dari baja ini adalah sebagai berikut :

1. AISI 4340 diberi nama menurut standar *American Iron and Steel Institute* (AISI) dimana angka 4xxx menyatakan baja karbon, angka 43xx menyatakan karbon steel sedangkan angka 40 menyatakan kadar karbon persentase (0,40 %).
2. Penulisan atau penggolongan baja AISI 4340 ini menurut standar yang lain adalah sama dengan DIN C 45, JIS S 45 C, dan UNS G 10450.
3. Menurut penggunaannya termasuk baja konstruksi mesin.
4. Menurut struktur mikronya termasuk baja *hypoeutectoid* (kandungan karbon < 0,8 % C).

Dengan meningkatnya kandungan karbon maka kekuatan tarik dan kekerasan semakin menjadi naik sedangkan kemampuan regang, keuletan, ketangguhan, dan kemampuan lasnya menurun. Kekuatannya akan banyak

berkurang bila bekerja pada temperatur yang agak tinggi. Pada temperatur yang rendah ketangguhannya menurun secara drastis[6-7].

Kandungan unsur pada AISI 4340 menurut standard ASTM A 827-85 adalah sebagai berikut :

**Tabel 1.** Unsur pada baja AISI 4340

Unsur	%	Sifat mekanis lainnya
Karbon	0,42 – 0,50	Tensile strength
Mangan	0,60 – 0,90	Yield strength
Fosfor	Maksimum 0,035	Elongation
Sulfur	Maksimum 0,040	Reduction in area
Silicon	0,15 – 0,40	Hardness

Baja AISI 4340 disebut sebagai baja karbon karena sesuai dengan pengkodean internasional, yaitu seri 43xx berdasarkan nomenklatur yang dikeluarkan oleh AISI dan SAE (*Society of Automotive Engineers*). Pada angka 43 pertama merupakan kode yang menunjukkan plain carbon kemudian kode xxx setelah angka 43 menunjukkan komposisi karbon [8-9].

Jadi, baja AISI 4340 berarti baja karbon atau plain carbon steel yang mempunyai komposisi karbon sebesar 0,40%. Baja spesifikasi ini banyak digunakan sebagai komponen roda gigi, poros, dan bantalan. Pada aplikasinya ini baja tersebut harus mempunyai ketahanan aus yang baik karena sesuai dengan fungsinya harus mampu menahan keausan akibat bergesekan dengan rantai. Ketahanan aus didefinisikan sebagai ketahanan terhadap abrasi atau ketahanan terhadap pengurangan dimensi akibat suatu gesekan[10-12]. Pada umumnya ketahanan aus berbanding lurus dengan kekerasan.

Logam merupakan unsur kimia yang mempunyai sifat-sifat kuat, liat, keras, penghantar listrik dan panas, mengkilap dan umumnya mempunyai titik cair tinggi, contoh dari logam antara lain, besi, timah putih, tembaga, emas, nikel[13-14].

Logam dapat dibagi dalam beberapa golongan seperti:

- a. Logam berat : Besi, nikel, khrom, timah putih, timah hitam, seng.
- b. Logam ringan : Aluminium, magnesium, titanium, kalsium, kalium, natrium, barium.
- c. Logam mulia : Emas, perak, platina (platinum).
- d. Logam Refraktori : Wolfram, molibden, titanium, zirkonium.
- e. Logam radio aktif : Uranium, radium.

Logam banyak digunakan dalam berbagai industri manufaktur seperti proses pembuatan komponen mesin, dalam industri konstruksi seperti jembatan, *pressure vessel*, dan *Heat Exchanger*.

**Tabel 2.** Sifat Mekanis Baja AISI 4340

SIFAT MEKANIS	BAJA AISI 4340
Berat Spesifik	7.7 – 8.03 (x1000kg/m <sup>3</sup> )
Modulus Elastisitas	190 – 210 Gpa
Kekuatan geser	505 Mpa
Kekuatan Tarik	585 Mpa
Kekerasan	179.8
Elongation	12

Plat Strip yaitu plat bar atau plat baja merupakan material stainless steel yang terbuat dari berbagai bahan material seperti nikel, krom, silicon, besi, karbon, dan molibdenum dengan kadar yang cukup tinggi. Plat strip memiliki lebar kurang lebih antara 2 mm sampai 60 mm.

Plat strip sendiri ini masuk kedalam kategori baja berkarbon rendah. Plat strip dapat digunakan sebagai jari-jari pada sebuah pagar atau sebagai rangka teralis pada sebuah jendela.

**Tabel 3.** Standar Ukuran dan Berat Plat ASTM

Ukuran	Berat
3 x 19 mm x 6 M	2,68 kg
3 x 25 mm x 6 M	3,54 kg
3 x 30 mm x 6 M	4,21 kg
4 x 19 mm x 6 M	3,56 kg
4 x 25 mm x 6 M	4,68 kg
4 x 30 mm x 6 M	5,61 kg
4 x 32 mm x 6 M	6,00 kg
4 x 38 mm x 6 M	7,15 kg
4 x 50 mm x 6 M	9,40 kg
5 x 19 mm x 6 M	4,50 kg
5 x 25 mm x 6 M	5,89 kg
5 x 30 mm x 6 M	7,06 kg
5 x 32 mm x 6 M	7,53 kg
5 x 38 mm x 6 M	8,95 kg
5 x 50 mm x 6 M	11,77 kg
6 x 19 mm x 6 M	5,37 kg
6 x 25 mm x 6 M	7,10 kg
6 x 32 mm x 6 M	9,05 kg

### B. Struktur Mikro

Struktur mikro adalah struktur yang hanya bisa diamati melalui mikroskop baik itu mikroskop optik maupun mikroskop elektron. Informasi yang bisa diperoleh dari struktur mikro antara lain identifikasi fasa-fasa yang ada, presentase fasa, distribusi fasa, inklusi (pengotor), presipitat maupun ukuran butir [15]. Perubahan struktur suatu sistem pencampuran logam hanya akan terjadi apabila suatu campuran didinginkan secara perlahan-lahan [14]. Pada cairan logam yang telah mencapai temperatur tertinggi kemudian didinginkan sampai mencapai titik beku, maka akan terjadi perubahan-perubahan struktur. Perubahan yang terjadi pada suatu logam

adalah berhubungan dengan letak atom-atom di dalam balur-balur jarak antara tiap-tiap balur dan besarnya suatu balur yang terjadi.

Struktur mikro dapat diubah dengan suatu perlakuan panas. Ini berarti untuk material dengan komposisi yang sama dapat mempunyai sifat-sifat yang berbeda dan ini bisa diperoleh dengan cara mengubah struktur mikronya. Dengan kata lain, untuk memperbaiki sifat-sifat suatu material sesuai dengan yang dikehendaki dapat diperoleh dengan cara mengubah struktur mikronya. Dalam mengetahui struktur mikro suatu material perlu dilakukan pengujian struktur mikro. Pengujian struktur mikro bertujuan untuk mengetahui struktur sebelum perlakuan panas dan sesudah perlakuan panas suatu material. sebelum perlakuan panas dan sesudah perlakuan panas suatu material.

Beberapa fasa yang sering ditemukan dalam baja karbon :

#### 1. Austenite

Austenite adalah campuran besi dan karbon yang terbentuk pada pembekuan, pada proses pendingin selanjutnya austenite berubah menjadi ferrite dan pearlit dan sementite. Sifat austenite adalah lunak, tidak magnetis, dan dapat ditempa. Kadar karbon maksimum sebesar 2, 14%. Berikut struktur austenite :



**Gambar 1.** Struktur Austenite

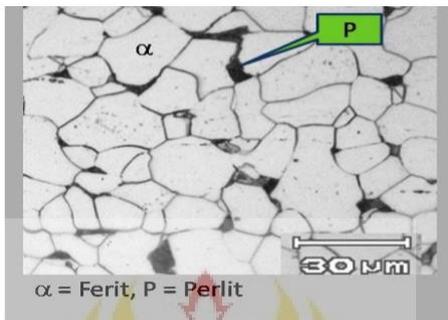
#### 2. Ferrite

Fasa ini disebut alpha ( $\alpha$ ), ruang antar atomnya kecil dan rapat sehingga hanya sedikit menampung atom karbon oleh sebab itu daya larut karbon dalam ferrite rendah < 1 atom C per 1000 atom besi. Pada suhu ruang, kadar karbonnya 0, 008%, sehingga dapat dianggap besi murni. Kadar maksimum karbon sebesar 0,025% pada suhu 723o C. Ferrite bersifat magnetik sampai suhu 768o C. Sifat ferrite lainnya adalah lunak dan liat. Ferrite berwarna putih.

#### 3. Pearlit

Fasa ini merupakan campuran mekanis yang terdiri dari dua fasa, yaitu ferrite dengan kadar karbon 0,025% dan sementite dalam bentuk lamellar (lapisan) dengan kadar karbon 6, 67% yang berselang-seling rapat terletak bersebelahan. Pearlit merupakan struktur

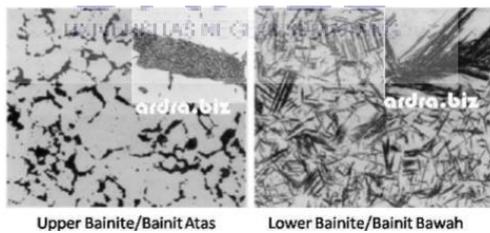
mikro dari reaksi eutektoid lamellar. Sifat pearlite adalah lebih keras dan lebih kuat dari pada ferrite, tetapi kurang liat dan tidak magnetis. Pearlite berwarna hitam. Berikut ini gambar struktur ferrit dan pearlit :



**Gambar 2.** Struktur Pearlit dan Ferrit

#### 4. Bainit

Bainit merupakan fasa yang terjadi akibat transformasi pendinginan yang sangat cepat pada fasa austenite ke suhu antara 250oC-550oC dan ditahan pada suhu tersebut (isothermal). Bainit adalah struktur mikro dari reaksi eutektoid ( $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$ ) non lamellar (tidak berupa lapisan). Bainit merupakan struktur mikro campuran fasa ferrit dan sementite ( $Fe_3C$ ). Sifat dari bainit adalah lunak. Berikut gambar struktur bainit:



**Gambar 3.** Struktur Bainit

#### 5. Martensite

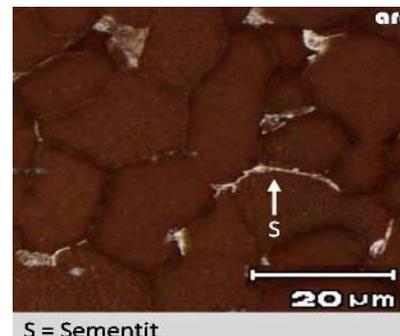
*Martensite* merupakan fasa dengan *ferrit* dan *sementite* bercampur, bukan dalam lamellar, melainkan jarum-jarum sementite. Fasa ini terbentuk dari *Austenite* meta stabil didinginkan dengan laju pendinginan cepat tertentu. Terjadinya hanya presipitasi  $Fe_3C$  unsur paduan lainnya tetapi larut transformasi isothermal pada 260o C untuk membentuk dispersi karbida yang halus dalam metrik ferrit. Martensite bilah (*lath martensite*) terbentuk jika kadar C dalam baja sampai 0,6%, sedangkan di atas 1 % C akan terbentuk martensite pelat (*plate martensite*). Perubahan dari tipe bilah ke pelat terjadi pada interval  $0,6\% < C < 1,08\%$ . Sifat dari martensite adalah rapuh dan keras, kekerasan tergantung dari komposisi karbon. Martensite berbentuk seperti jarum. Berikut ini struktur martensite:



**Gambar 4.** Struktur Martensite

#### 6. Sementite (karbida besi)

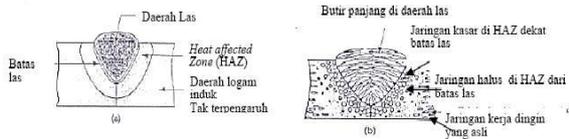
Pada paduan besi melebihi batas daya larut membentuk fasa kedua yang disebut karbida besi (*sementite*). Karbida besi mempunyai komposisi kimia  $Fe_3C$ . Dibandingkan dengan ferrit, sementite sangat keras. Karbida besi dalam ferrit akan meningkatkan kekerasan baja, tetapi karbida besi murni tidak liat. Karbida ini tidak dapat menyesuaikan diri dengan adanya konsentrasi tegangan akibatnya kurang kuat. Sifat sementite adalah keras, rapuh, dan magnetis. Berikut ini struktur dari sementite (karbida besi):



**Gambar 5.** Struktur Sementite

#### C. Struktur Mikro Daerah Las

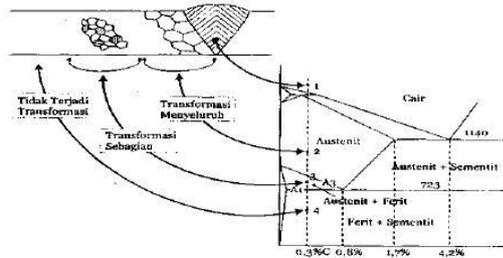
Daerah Logam Las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Komposisi logam las terdiri dari komponen logam induk dan tambahan dari elektroda. Karena logam las dalam proses pengelasan ini mencair kemudian membeku, maka kemungkinan besar terjadi pemisahan komponen yang menyebabkan terjadinya struktur yang tidak homogen, ketidakhomogenannya struktur akan menimbulkan struktur ferit kasar dan bainit atas yang menurunkan ketangguhan logam las. Pada daerah ini struktur mikro yang terjadi adalah berbutir panjang (*columnar grains*). Struktur ini berawal dari logam induk dan tumbuh ke arah tengah daerah logam las.



**Gambar 6.** Daerah Logam Lasan dan Logam Induk

**D. Daerah Pengaruh Panas atau Heat Affectected Zone (HAZ)**

Daerah pengaruh panas atau *heat affected zone (HAZ)* adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat sehingga visual daerah dekat dengan garis lebur las maka susunan struktur logamnya semakin kasar. Pada daerah HAZ terdiri tiga titik yang berbeda, titik 1 dan titik 2 menunjukkan temperatur pemanasan mencapai daerah Berfasa austenite dan ini disebut dengan transformasi menyeluruh yang artinya struktur mikro baja mula-mula ferit+perlit kemudian bertransformasi menjadi austenite 100%. Titik 3 menunjukkan temperatur pemanasan, daerah itu mencapai daerah berfasa ferit dan austenite dan ini yang disebut transformasi sebagian yang artinya struktur mikro baja mula-mula ferit+perlit berubah menjadi ferit dan austenite.



**Gambar 7.** Heat Affectected Zone

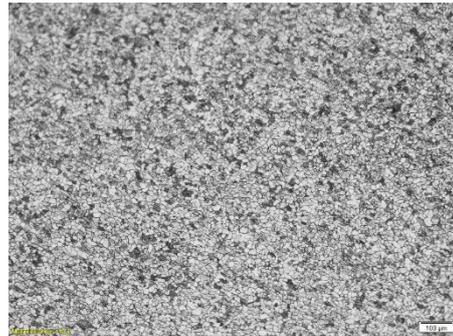
**E. Logam Induk**

Logam induk adalah bagian logam dasar dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan – perubahan struktur dan sifat. [3] (Wiryosumarto,2000).

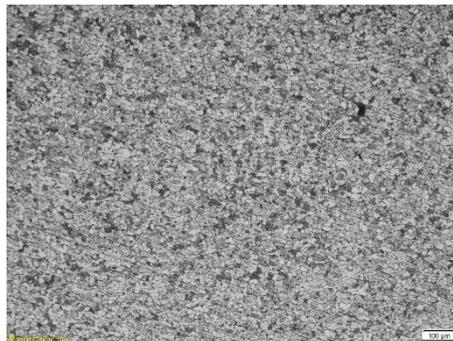
**3. Hasil dan Pembahasan**

**A. Pembahasan Hasil Pengamatan Struktur Mikro Pada Daerah Logam Induk**

Berdasarkan baja AISI 4340 dilakukan pengamatan pada daerah logam induk dan berdasarkan pada gambar 1, dan gambar 2 terdapat struktur mikro yang didominasi kristal *ferit* dan *perlit*. Banyaknya Struktur *kristal perlit* pada material Baja AISI 4340 mengakibatkan kekerasan bahannya tinggi, sedangkan pada struktur Kristal ferit tidak dominan pada material ini. Struktur kristal ferit tampak butiran putih dan kristal perlit berupa butiran hitam atau gelap.



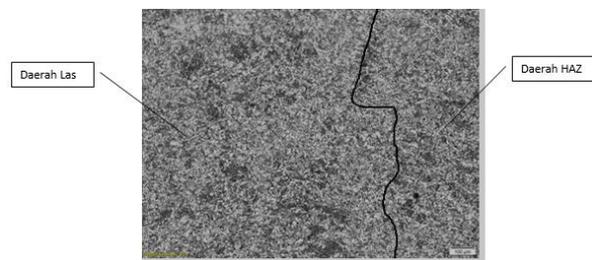
**Gambar 8.** Struktur mikro pada daerah Logam Induk proses pengelasan lurus (DCEP) pembesaran 100x dengan skala 100 μm.



**Gambar 9.** Struktur mikro pada daerah Logam Induk proses pengelasan terbalik (DCEN) pembesara 100x dengan skala 100 μm.

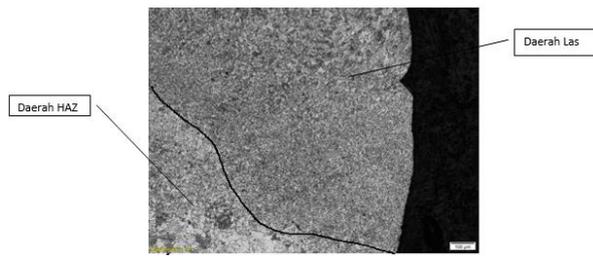
**B. Pembahasan Hasil Pengamatan Struktur Mikro Pada Daerah Las**

Berdasarkan gambar 10 peleburan hasil pengelasan menggunakan elektroda E6013 dengan diameter 2.6 mm sudah mengalami perubahan fasa, partikel, terdiri dari perlit, ferit. Partikel pada arus tersebut lebih besar dan unsur partikelnya baik didinginkan oleh udara.



**Gambar 10.** Struktur mikro daerah las proses pengelasan lurus (DCEP) pembesaran 100x dengan skala 100 μm.

Peleburan hasil pengelasan menggunakan elektroda E6013 dengan diameter 2.6 mm sudah mengalami perubahan fasa, partikel, terdiri dari perlit, ferit. Pada area pengelasan terbalik terdapat rongga atau cacat.



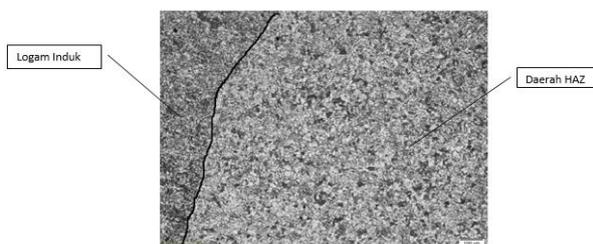
**Gambar 11.** Struktur mikro daerah las proses pengelasan Terbalik (DCEN) pembesaran 100x dengan skala 100  $\mu\text{m}$ .

Daerah las merupakan bagian yang mencair pada saat pengelasan dimana bagian ini mendapatkan temperature tinggi. Struktur nya banyak dipengaruhi oleh waktu ataupun jarak pengelasan yang tidak konstan.

#### C. Pembahasan Hasil Pengamatan Struktur Mikro Pada Daerah HAZ

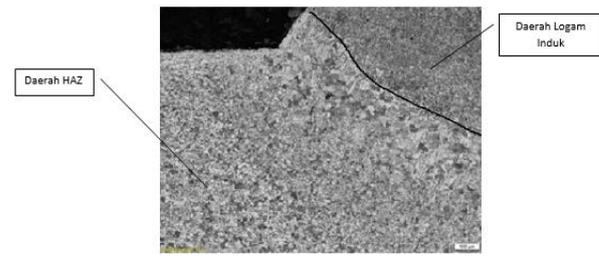
Daerah HAZ (*Heat Affect Zone*) merupakan daerah logam induk yang masih terpengaruh oleh panas dari pengelasan las listrik, semakin dekat jarak logam induk dengan titik pengelasan maka pengaruh panasnya semakin tinggi dan sebaliknya. Apabila jauh dari titik pengelasan, pengaruh panasnya akan semakin rendah, hal ini membuktikan perambatan panas yang rata pada material/spesimen sehingga mempengaruhi struktur mikro.

Terlihat bahwa partikelnya masih kecil dan banyak tidak jauh beda dengan logam induk karena data tersebut pengaruh dengan panas dari las dan kemungkinan panas dan pendinginnya tidak stabil.



**Gambar 12.** Struktur mikro daerah HAZ proses pengelasan lurus (DCEP) pembesaran 100x dengan skala 100  $\mu\text{m}$ .

Gambar 13 terlihat bahwa partikelnya sangat kecil, banyak dan terlihat pada gambar ada kecacatan di bagian kiri atas, bentuk partikel baja tersebut sudah berubah fasanya dari proses perambatan panas dan pendinginan udara yang sama strukurnya terlihat berubah.



**Gambar 13.** Struktur mikro daerah HAZ proses pengelasan Terbalik (DCEN) pembesaran 100x dengan skala 100  $\mu\text{m}$ .

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan disertai dengan pengelasan untuk mengetahui struktur mikro pada baja AISI 4340 maka dapat diambil disimpulkan bahwa pengelasan memberikan pengaruh terhadap struktur mikro daerah HAZ dan daerah las, struktur mikro logam Induk, dan daerah HAZ terdiri dari perlit dan ferit. Hasil dari struktur mikro dengan kandungan perlit lebih banyak dari ferit menghasilkan kualitas sambungan lebih baik. Pada pengelasan terbalik (DCEN) terdapat kecacatan di daerah las.

#### Referensi

- [1] Kosasih, "Teknologi dan Proses Pengelasan." Bandung: Balai Bahan Bahan dan Barang Teknik, 2015
- [2] A. Setiawan and Y. A. Y. Wardana, "Analisa Ketangguhan dan Struktur Mikro pada Daerah Las dan HAZ Hasil Pengelasan Sumerged Arc Welding pada Baja SM 490," *J. Tek. mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 57–63, 2006.
- [3] T. B. Santoso, S. Solichin, and P. Trihutomo, "Pengaruh kuat arus listrik pengelasan terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro las SMAW dengan elektroda E7016," *J. Tek. Mesin*, vol. 23, no. 1, 2016.
- [4] B. H. KEMBAREN and A. S. Mohruni, "PENGARUH VARIASI KECEPATAN LAS DAN KUAT ARUS TERHADAP KEKERASAN, TEGANGAN TARIK, STRUKTUR MIKRO BAJA KARBON RENDAH DENGAN ELEKTRODA E 6013." Sriwijaya University, 2012.
- [5] R. O. Mahendra, "Analisis Pengaruh Bahan PIN terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Sambungan Plat Aluminium pada Proses Friction Stir Welding." Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2019.

- [6] K. Easterling, *Introduction to the physical metallurgy of welding*. Elsevier, 2013.
- [7] B. Bandanadjaja, C. Ruskandi, "Perlakuan Panas Material AISI 4340 Untuk Menghasilkan Dual Phase Steel Ferrit-Bainit." Bandung: POLMAN, 2016
- [8] J. E. Bringas, "Handbooks of comparative world steel standards." ASTM International, 2004.
- [9] D. G. Rethwisch, "William D. Callister, Jr.," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 3.
- [10] A. C. E. on Terminology, *ASTM Dictionary of Engineering Science & Technology*. Astm International, 2005.
- [11] M. P. Groover, "Fundamentals-of-Modern-Manufacturing-4Th-Edition-By-Mikell-P-Groover." John Wiley & Sons, 2010.
- [12] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering*. Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2009.
- [13] J. E. Bringas, "Handbooks of comparative world steel standards." ASTM International, 2004.
- [14] Amanto H., dan Daryanto, "Ilmu bahan," *cetakan pertama*, Bumi aksara, 1999
- [15] R. M. Susita and S. Sulamdari, "Microstructure Characterization Of Stainless-Steel Implanted By Nitrogen Ion; KARAKTERISASI STRUKTUR MIKRO STAINLESS-STEEL HASIL IMPLANTASI ION NITROGEN," 1996.