



Peningkatan Sifat Mekanis Kekerasan dan Impact Ductile Cast Iron FCD-50 Melalui Proses Heat Treatment dengan Pendinginan Oli

Abdul Azis Weripih¹, SURIANSYAH², Arief Rizki Fadhillah³✉

^{1,2,3} Prodi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama
Jl. Taman Borobudur Indah No.1, Malang, Indonesia
✉ *Corresponding author*: arief.rizki.f@widyagama.ac.id

Diterima Redaksi : 10 September 2023
Selesai Revisi : 22 Oktober 2023
Diterbitkan Online : 20 November 2023

Abstract

The demand for iron and steel metals in industry continues to increase, especially for cast iron applications such as gray, white, wrought and nodular cast iron (ductile cast iron). Ductile cast iron is widely used as a substitute for steel because of its mechanical properties that are close to steel, and has a high level of hardness. This study aims to determine the increase in hardness and impact properties of FCD-50 nodular cast iron through the heat treatment process. This method is done by heating the material at a certain temperature and cooling it using oil media. Hardness test and microstructure test were conducted as the main data analysis. The test results showed an increase in hardness from 54.2 HRC to 56.07 HRC. In addition, there was a change in the microstructure with the discovery of graphite, pearlite, and ferrite phases, where ferrite appeared more dominant and diffuse. These findings indicate that heat treatment is effective in improving the performance of ductile cast iron FCD-50.

Keywords: *Ductile Cast Iron FCD-50; Hardness; Heat Treatment; Micro Structure.*

Abstrak

Kebutuhan logam besi dan baja dalam industri terus meningkat, terutama untuk aplikasi besi tuang seperti besi tuang kelabu, putih, mampu tempa, dan nodular (ductile cast iron). Ductile cast iron banyak digunakan sebagai pengganti baja karena sifat mekaniknya yang mendekati baja, serta memiliki tingkat kekerasan yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peningkatan kekerasan dan sifat impak dari besi cor nodular FCD-50 melalui proses heat treatment. Metode ini dilakukan dengan memanaskan material pada suhu tertentu dan mendinginkannya menggunakan media oli. Uji kekerasan dan uji struktur mikro dilakukan sebagai analisis data utama. Hasil uji menunjukkan peningkatan kekerasan dari 54,2 HRC menjadi 56,07 HRC. Selain itu, terjadi perubahan struktur mikro dengan ditemukannya fasa grafit, perlit, dan ferrit, di mana ferrit tampak lebih dominan dan menyebar. Temuan ini mengindikasikan bahwa heat treatment efektif meningkatkan performa material ductile cast iron FCD-50.

Kata kunci: *Ductile Cast Iron FCD-50; Hardness; Heat Treatment; struktur mikro.*

1. Pendahuluan

Perkembangan bidang ilmu material berjalan seiring dengan kemajuan industri, terutama industri di bidang otomotif dan pemesinan. Berbagai kebutuhan material yang beraneka ragam menuntut untuk selalu melakukan inovasi-inovasi baru, baik dari pemilihan material dengan berbagai sifat sampai dengan pembaruan dari sifat-sifat material tersebut. Material logam menjadi salah satu jenis material yang utama dalam berbagai lini bidang keteknikan,

terutama pada bidang teknik mesin. Material logam memiliki banyak keunggulan dalam penggunaannya pada bidang permesinan dibandingkan dengan material non logam.

Material logam yang paling banyak digunakan dalam dunia industri adalah baja, karena memiliki sifat kekuatan yang tinggi, kemampuan kekerasan yang baik dan relatif ulet. Pada perkembangannya penggunaan material baja diimbangi dengan semakin banyaknya penggunaan material besi cor. Hal ini terjadi karena besi cor memiliki beberapa keunggulan dibandingkan baja, yaitu dalam segi ekonomis yang relatif lebih murah daripada baja, kemudian memiliki sifat mampu cor (*cast ability*) yang baik, serta memiliki sifat lebih mudah untuk diberikan pelakuan *machining* (*machinability*) yang relatif lebih baik dibandingkan dengan baja.

Besi cor merupakan logam paduan yang menerapkan unsur besi (Fe) dan karbon (C). Komposisi kimia tersebut telah ditetapkan dalam diagram keseimbangan Fe-C pada batas kelarutan karbon pada besi γ memiliki kandungan karbon sebesar 2% sampai sampai 6,67 %, sedangkan pada baja kandungan karbon hanya mencapai 2% [1]. Tetapi semakin tinggi kadar karbon yang ada pada besi cor dapat mengakibatkan besi cor menjadi rapuh/getas. Besi cor pada dasarnya terdiri dari paduan yang memiliki banyak komponen penyusun yang terdiri dari unsur silikon (Si) sebesar 1-3%, mangan (Mn) sebesar 0,25-15%, *phosphor* (P) sebesar 0,05-15%, dan unsur-unsur penyusun lainnya, walaupun masih terdapat kandungan unsur-unsur lainnya, tidak berpengaruh besar terhadap perubahan sifat dari besi cor tersebut [2], [3].

Terdapat tiga jenis besi cor yang banyak digunakan dalam industri, yaitu besi cor kelabu (*gray cast iron*), besi cor ulet atau besi cor nodular (*nodular cast iron*) dan besi cor putih (*white cast iron*). Ketiga jenis besi cor ini mempunyai komposisi kimia yang hampir sama yaitu kandungan karbon sebesar 2,5-3,5 %, silicon sebesar 1-3 %, mangan kurang dari 1% sedangkan belerang dan *phosphor* dibatasi paling maksimum sebesar 0,05-0,10% [4]. Walaupun ketiga jenis besi cor tersebut memiliki kandungan komposisi kimianya yang hampir sama akan tetapi sifat yang dimiliki dari setiap jenisnya berbeda-beda yang dipengaruhi oleh proses pengolahannya.

Heat Treatment adalah perlakuan panas kepada material logam untuk memperoleh sifat-sifat baru yang diinginkan, dengan proses melakukan pemanasan logam hingga mencapai temperatur tertentu. Kemudian dilakukan pendinginan ataupun penambahan unsur tertentu, sehingga diperoleh bentuk struktur mikro, kekerasan ataupun sifat lain yang diinginkan. Melalui perlakuan pemanasan yang tepat, tegangan dalam dapat dihilangkan, besar butirannya dapat diperbesar atau diperkecil, sifat mekanik dapat ditingkatkan, serta didapatkan suatu permukaan yang keras disekeliling inti yang ulet [5], [6].

Hardening adalah perlakuan panas terhadap baja/besi dengan sasaran meningkatkan kekerasan alami dari baja/besi yang dikenai perlakuan tertentu. Heat treatment menuntut pemanasan spesimen menuju temperatur pengerasan didaerah atau di atas titik kritis dan pendinginan yang dilakukan secara cepat dengan kecepatan pendinginan kritis. Akibat pendinginan cepat yang dilakukan dari suhu pengerasan, menimbulkan terjadinya perubahan struktur besi secara cepat, sehingga menimbulkan perubahan sifat kekerasan yang tinggi. Proses pengerasan ini disebut pengerasan kejut atau pencelupan besi panas secara langsung yang mencapai kecepatan pendinginan kritis (martensit).

Sehingga untuk mengetahui seberapa besar tingkat kekerasan dan perubahan struktur mikro dari besi cor kelabu (FCD-50). Dalam penelitian kali ini, dimana uji kekerasan digunakan sebagai dasar penelitian untuk mengetahui ketahanan bahan dan perubahan struktur mikro yang terbentuk pada ductile cast iron FCD -50. Sehingga dapat diketahui tingkat kekerasan yang terjadi sebelum dan sesudah pengujian langsung dengan media pendinginan Oli, setelah pemanasan 600°C.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian ekperimental. Penelitian eksperimental ini menggunakan besi cor kelabu (gray cast iron) yang diberikan perlakuan heat treatment dengan menggunakan media pendinginan oli. Sehingga mengadopsi model one-shot case study. Pengolahan data menggunakan metode kuantitatif yang dimulai dari pengumpulan data, penafsiran atas data yang didapatkan dari hasil pengujian, serta penampilan hasil pengujian.

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Optical Microscope yang bertujuan untuk memperoleh data morfologi dari spesimen uji dengan menerapkan persebaran sebesar 200x untuk melihat presipitat pada FCD-50, Variabel bebas dalam penelitian ini adalah penggunaan media pendinginan oli. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah morfologi surface area yang meliputi persebaran presipitat dan kekerasan dari ductile cast iron FCD-50. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah suhu heat treatment pada 600°C.

Prosedur Penelitian

Penelitian ini diawali dengan persiapan spesimen uji dari material ductile cast iron FCD-50 sebanyak 10 buah, yang kemudian dibagi menjadi dua kelompok utama. Kelompok pertama terdiri dari 5 spesimen yang tidak diberi perlakuan panas (tanpa heat treatment), sedangkan kelompok kedua terdiri dari 5 spesimen yang akan diberi perlakuan heat treatment.

Tahap berikutnya adalah menyiapkan media pendingin berupa oli yang akan digunakan dalam proses quenching untuk memastikan pendinginan cepat setelah pemanasan. Proses perlakuan panas dimulai dengan pemanasan spesimen FCD-50 hingga suhu 600°C, menggunakan furnace atau tanur listrik yang dapat mempertahankan suhu secara stabil. Setelah mencapai suhu tersebut, spesimen ditahan selama 30 menit guna memungkinkan difusi fasa yang merata dan pembentukan struktur mikro yang stabil.

Setelah proses penahanan selesai, spesimen segera dilakukan pendinginan cepat (quenching) dengan cara dicelupkan ke dalam media oli yang telah dipersiapkan hingga mencapai suhu kamar. Proses ini bertujuan untuk mengunci struktur mikro hasil pemanasan dan memicu pembentukan fasa-fasa tertentu seperti martensit atau bainit tergantung pada laju pendinginan. Setelah spesimen mencapai suhu ruang, dilakukan dua jenis pengujian utama. Pertama, dilakukan pengamatan struktur mikro menggunakan Optical Microscope untuk melihat perubahan morfologi dan distribusi fasa-fasa seperti ferrit, perlit, dan kemungkinan terbentuknya martensit. Kedua, dilakukan pengujian kekerasan pada masing-masing spesimen menggunakan alat Torsen Motorized Rockwell System Hardness Tester (Type RH-3NR-A) guna mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap tingkat kekerasan material. Nilai kekerasan yang diperoleh kemudian dianalisis dan dibandingkan antara spesimen tanpa perlakuan dan yang diberi perlakuan panas untuk melihat pengaruh perlakuan termal terhadap sifat mekanik material.

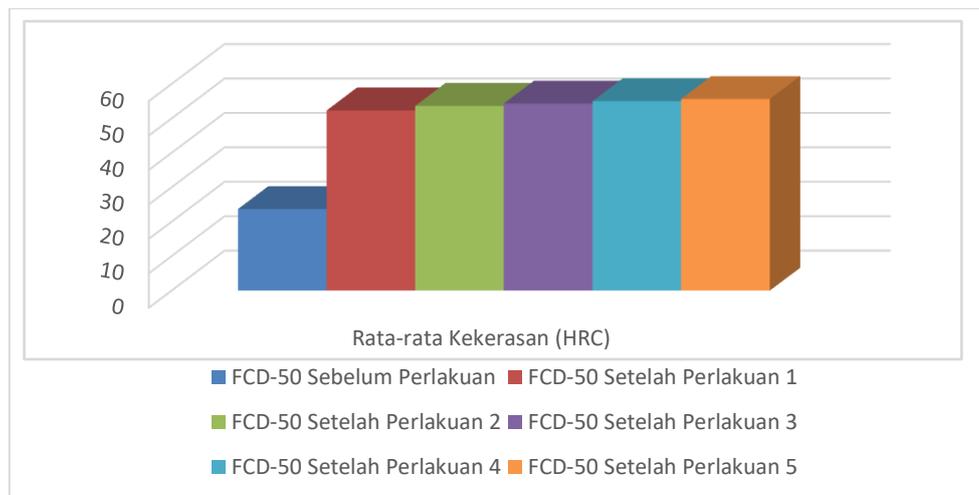
3. Hasil dan Pembahasan

Kekerasan Ductile Cast Iron FCD-50

Analisis data hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kekerasan dari ductile cast iron FCD-50 setelah diberikan perlakuan heat treatment dengan menggunakan pendinginan oli. Data hasil pengujian kekerasan ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Hasil Kekerasan FCD-50 Sebelum dan Setelah Dikenai Perlakuan *Heat Treatment*.

Jumlah Sampel.	Jenis Bahan	Beban Mayor (kg)	Beban Minor (kg)	Waktu (detik)	Jenis Indentor	Harga Kekerasan (HRC)			Rata-rata Kekerasan (HRC)
1.	FCD-50 Sebelum Perlakuan	150	10	5	Diamond Cone	20.5	23.4	27.3	23.7
2.	FCD-50 Setelah Perlakuan 1	150	10	5	Diamond Cone	52	52	53	52,33
3.	FCD-50 Setelah Perlakuan 2	150	10	5	Diamond Cone	51	57	53	53,67
4.	FCD-50 Setelah Perlakuan 3	150	10	5	Diamond Cone	53	58	52	54,33
5.	FCD-50 Setelah Perlakuan 4	150	10	5	Diamond Cone	54	53	58	55
6.	FCD-50 Setelah Perlakuan 5	150	10	5	Diamond Cone	56	55	56	55,67



Gambar 1. Grafik Hasil Kekerasan FCD-50 Sebelum dan Setelah Dikenai Perlakuan *Heat Treatment*.

Berdasarkan data hasil pengujian kekerasan diperoleh bahwa FCD-50 sebelum dikenai perlakuan memiliki tingkat kekerasan yang jauh lebih rendah seperti ditunjukkan oleh Tabel 1 dan Gambar 1, yaitu sebesar 23,7 HRC dibandingkan dengan lima spesimen yang dikenakan perlakuan *heat treatment* dengan menggunakan pendinginan oli sebesar lebih dari 50 HRC. Tabel 1 menunjukkan nilai rata-rata kekerasan Spesimen FCD-50 pertama menunjukkan tingkat kekerasan sebesar 52,33 HRC, spesimen kedua sebesar 53,67 HRC, spesimen ketiga sebesar 54,33 HRC, spesimen keempat sebesar 55 HRC dan spesimen kelima sebesar 55,67 HRC. Jika dibandingkan antar spesimen yang telah dikenai *heat treatment* spesimen pertama

merupakan spesimen dengan tingkat kekerasan terendah dibandingkan dengan keempat spesimen lainnya.

Hal ini disebabkan oleh proses pembentukan struktur mikro yang belum optimal selama tahapan pendinginan, khususnya ketika menggunakan media oli pada suhu ruang. Pendinginan yang terjadi tidak berlangsung cukup cepat untuk memicu transformasi fasa yang signifikan, seperti terbentuknya martensit atau bainit dalam jumlah dominan. Suhu oli yang masih berada pada kondisi suhu ruang (sekitar 25–30°C) menyebabkan laju penurunan suhu pada spesimen berlangsung lebih lambat dibandingkan jika media pendingin berada pada kondisi lebih rendah atau dimodifikasi.

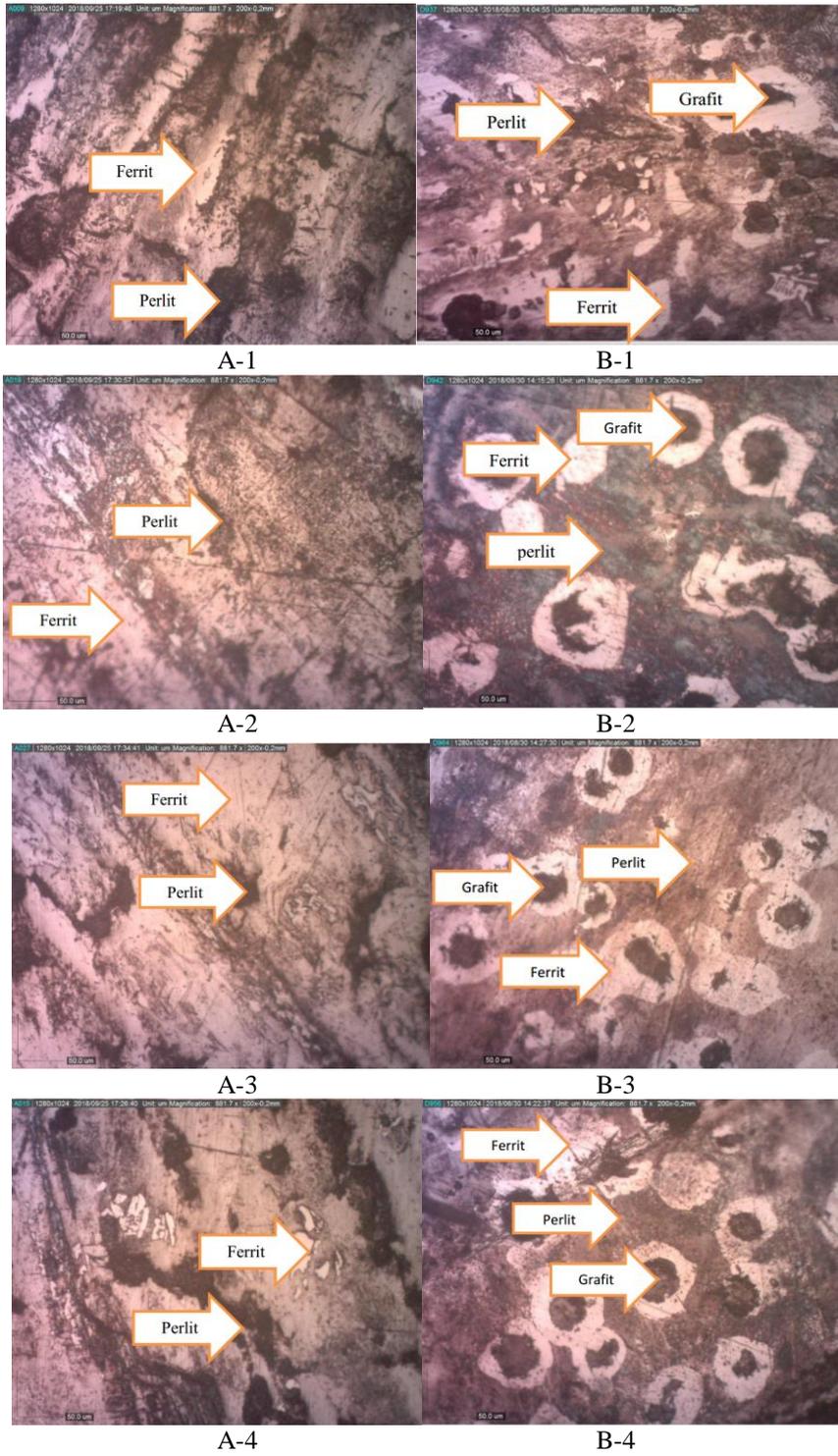
Pada heat treatment, khususnya proses quenching, media pendingin yang digunakan memiliki pengaruh besar terhadap tingkat transformasi fasa yang terjadi saat material mengalami penurunan suhu drastis. Jika suhu media terlalu tinggi, proses quenching menjadi tidak efektif karena laju perpindahan panas dari logam ke media tidak cukup cepat untuk menstabilkan fasa metastabil seperti martensit. Akibatnya, struktur mikro yang terbentuk cenderung masih didominasi oleh fasa ferrit dan perlit yang memiliki kekerasan relatif rendah dibandingkan martensit.

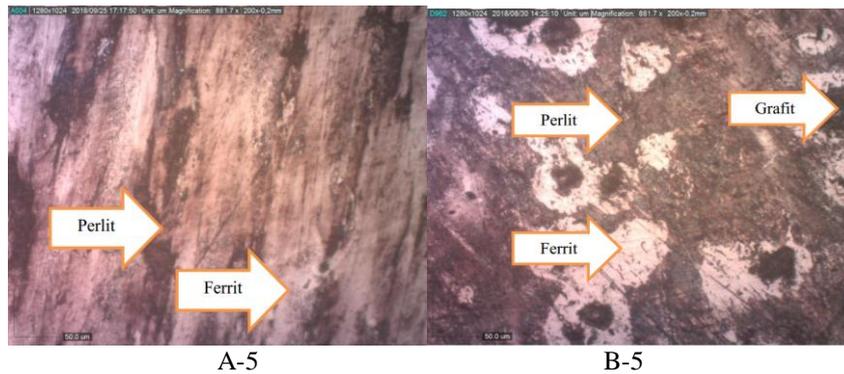
Dengan demikian, rendahnya tingkat kekerasan pada spesimen hasil perlakuan panas dapat dikaitkan langsung dengan kurangnya efektivitas proses pendinginan yang dipengaruhi oleh suhu awal media oli. Untuk mencapai hasil yang lebih maksimal, disarankan agar media pendingin didinginkan terlebih dahulu hingga mencapai suhu yang lebih rendah, atau menggunakan media dengan konduktivitas termal lebih tinggi guna mempercepat proses penyerapan panas dari logam. Pendekatan ini dapat membantu memastikan transformasi fasa yang lebih agresif, sehingga mampu meningkatkan kekerasan secara signifikan pada spesimen hasil perlakuan.

Hal ini dikarenakan proses pembentukan struktur yang terjadi pada saat proses pendinginan menggunakan media oli masih kurang maksimal. Faktor yang memicu terjadinya tingkat kekerasan yang rendah dipengaruhi oleh suhu oli yang masih dalam suhu ruang, sehingga laju pembentukan struktur perlit dan ferrit-nya bergerak cepat dan membuat struktur Fe-C mengalami tegangan yang mengakibatkan pengerasan kejut (*hardening*) [7], [8]. Darmadi, 2015 mengatakan bahwa dalam proses pembentukan fasa martensit yang terjadi selama proses pendinginan akan menghasilkan reaksi *eutectoid* pada struktur Fe-C dalam pembentukan ferrit α dan karbida C, sebagai dekomposisi austenit γ berkomposisi *eutectoid*, maka struktur γ (~ 0.8% C) menjadi α +C. Berbeda halnya dengan pendinginan menggunakan metode pendinginan cepat (*ff*), maka yang terjadi adalah pembentukan α +C akan sangat cepat [9], [10]. Sehingga dengan dicelupkannya spesimen ke dalam media pendinginan oli secara mendadak akan menyebabkan fasa austenit berubah langsung menjadi fasa martensit yang menghasilkan tingkat kekerasan tinggi dan merubah struktur FCD-50 menjadi getas serta tidak ulet [11]–[13].

Metalografi Ductile Cast Iron FCD-50

Analisa metalografi yang dilakukan menunjukkan struktur mikro ductile cast iron FCD-50 sebelum dan sesudah dikenai perlakuan heat treatment dengan media pendinginan oli, seperti pada gambar 2 di bawah ini





Gambar 2. A-1 Sampai A-5 Spesimen FCD-50 Tanpa Perlakuan *Heat Treatment* dan B-1 Sampai B-5 Spesimen FCD-50 Dengan Perlakuan *Heat Treatment*.

Berdasarkan hasil pengamatan mikrostruktur yang ditunjukkan pada Gambar 2 A-1 sampai A-5, terlihat bahwa struktur metalografi material ductile cast iron FCD-50 yang belum mengalami perlakuan panas hanya menunjukkan keberadaan dua fasa utama, yaitu perlit dan ferrit, tanpa terdeteksinya fasa martensit. Hal ini menegaskan bahwa material berada dalam kondisi as-cast atau belum mengalami perlakuan termal lanjutan yang dapat memicu transformasi struktur mikro menjadi fasa-fasa dengan kekerasan lebih tinggi, seperti martensit atau bainit.

Struktur metalografi yang diamati pada Gambar A-1 sampai A-5 menunjukkan bahwa perlit dan ferrit tersebar secara merata di seluruh permukaan bidang uji, membentuk jaringan mikro yang relatif homogen. Keduanya tampak menyatu tanpa adanya batas butir yang tegas yang memisahkan masing-masing fasa, yang menunjukkan bahwa selama proses solidifikasi dan pendinginan alami, kedua fasa tumbuh dan berkembang secara bersamaan tanpa mengalami segregasi yang berarti. Ferrit biasanya terlihat sebagai area yang lebih terang, sedangkan perlit tampak sebagai struktur lamelar berwarna lebih gelap yang tersusun sejajar dalam satu arah tertentu.

Keberadaan fasa perlit dalam jumlah yang relatif lebih tinggi dibandingkan ferrit memberikan indikasi bahwa material ini memiliki kombinasi antara kekuatan dan keuletan, di mana perlit berperan dalam meningkatkan kekerasan, sedangkan ferrit menyumbang sifat daktilitas atau keuletan. Namun, karena belum dilakukan proses perlakuan panas seperti austempering atau quenching, tidak terbentuk fasa martensit yang dapat meningkatkan kekerasan material secara drastis.

Ketidakhadiran fasa martensit juga menunjukkan bahwa transformasi fasa tidak terjadi secara cepat dan tidak melibatkan suhu kritis yang diperlukan untuk pembentukan martensit. Dengan demikian, kondisi mikrostruktur yang diamati pada spesimen ini sangat penting sebagai acuan atau referensi awal sebelum perlakuan panas diberikan. Struktur awal ini dapat dibandingkan secara langsung dengan struktur mikro pasca-perlakuan untuk mengevaluasi efektivitas heat treatment dalam mengubah struktur mikro dan sifat mekanik dari FCD-50.

Sedangkan Gambar 2 B-1 sampai B-5 menunjukkan perbedaan yang sangat jelas dengan berubahnya struktur metalografi ductile cast iron FCD-50. Struktur metalografi FCD-50 dari Gambar 2 B-1 sampai B-5 terlihat jelas perubahan fasa perlit yang mendominasi dan mengelilingi fasa ferrit, sedangkan fasa ferrit berkurang dan membentuk struktur yang lebih teratur yang membentuk lingkaran yang disertai dengan menunjukkan batas butir yang terlihat jelas, dimana di dalam fasa ferrit mengikat grafit yang terlihat berwarna lebih gelap daripada fasa perlit. Bentuk grafit yang bulat, sferoid (nodul) merubah keuletan ductile cast iron FCD-50 menjadi lebih keras [4], [7], [14].

Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan memberikan perlakuan heat treatment pada ductile cast iron FCD-50 dengan media pendinginan oli menunjukkan proses transformasi hardening yang dapat dilihat melalui analisa metalografi seperti yang ditunjukkan Gambar 2 B-1 sampai B5. Transformasi yang terjadi akibat terperangkapnya atom karbon pada struktur kristal secara bersamaan pada saat terjadi transformasi polymorfi dari FCC ke BCC [11], [15].

4. Kesimpulan

Proses heat treatment yang dilakukan dapat meningkatkan sifat kekerasan dari besi cor nodular (ductile cast iron) FCD-50 meningkat sebesar 2 kali lipat dari besi cor nodular (ductile cast iron) FCD-50 tanpa diberikan perlakuan heat treatment menggunakan media oli yang ditunjukkan dengan hasil rata-rata kekerasan sebesar 23,7 HRC sedangkan besi cor nodular (ductile cast iron) FCD-50 setelah diberikan perlakuan heat treatment dengan pendinginan oli memiliki tingkat kekerasan rata-rata tertinggi sebesar 55,67 HRC. Hal tersebut dikonfirmasi dengan hasil perubahan struktur mikro yang menunjukkan lebih banyak fasa ferrit dibandingkan dengan fasa perlit dan disertai dengan munculnya fasa grafit yang diikat oleh fasa perlit.

Daftar Pustaka

- [1] R. Denti Salindeho, J. Soukota, R. Poeng, J. Teknik, M. Universitas, and S. Ratulangi, "Pemodelan Pengujian Tarik Untuk Menganalisis Sifat Mekanik Material," *Poros Tek. Mesin Unsrat*, vol. 2, pp. 1–11, 2013.
- [2] S. Bayu and U. Yusuf, "Pengaruh Waktu Austempering Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Austempered Ductile Iron Non Paduan dan Paduan 0,3% dan 0,6% Mo," *J. Foundry*, pp. 1–5, 2011.
- [3] S. Matheus, "Analisis Modulus Elastisitas dan Angka Poisson Bahan dengan Uji Tarik," *J. Barekeng*, vol. 5, no. 2, pp. 9–14, 2011.
- [4] S. Askar, S. Sinarep, and N. H. Sari, "Pengaruh Preheat Dan Tempering Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan Baja Jis Ss 400," *Din. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 1, pp. 16–25, 2013, doi: 10.29303/d.v3i1.84.
- [5] Sutiyoko, "Perubahan Sifat Mekanik Material Karena Perbedaan Konsentrasi Larutan Garam Nacl Pada Proses Quenching," *Jur. Tek. Pengecoran Logam Politek. Manufaktur Ceper*, vol. 4, no. 1, pp. 25–28, 2014.
- [6] F. Yusman, "PENGARUH MEDIA PENDINGIN PADA PROSES QUENCHING TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKUR MIKRO BAJA AISI 1045 Oleh FAKHRIZAL YUSMAN," *Skripsi*, vol. 1045, 2018.
- [7] W. Darmadi, "Pengaruh Media Pendingin Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Pada Besi Cor," *Tek. Mesin Univ. Muhammadiyah Surakarta*, 2015.
- [8] M. Ali, J. Teknik, M. Politeknik, and N. Lhokseumawe, "Pengaruh Media Pendingin Terhadap Beban Impak," *Tek. Mesin PNL*, pp. 9–14, 2019.
- [9] H. Mustofa, H. Supriadi, and Z. Zulhanif, "Pengaruh Temperatur Tempering Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Aisi 1045 Yang Diquenching Dalam Media Pendingin Tersirkulasi," *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 6–16, 2020, doi: 10.23960/fema.v8i2.3.
- [10] M. Azizi, H. Purwanto, and M. Dzulfikar, "Pengaruh Suhu Quench Dan Temper Pada Proses Pengerasan Permukaan Baja Aisi 1045," *J. Ilm. Momentum*, vol. 14, no. 2, pp.

- 23–28, 2018, doi: 10.36499/jim.v14i2.2510.
- [11] A. Pramono, “Karakteristik Mekanik Proses Hardening Baja Aisi 1045 Media Quenching Untuk Aplikasi Sprocket Rantai,” *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 1, pp. 32–38, 2011.
- [12] R. Saputra and E. Tyastomo, “Upn " Veteran " Jakarta Upn " Veteran " Jakarta,” vol. 9, no. 1, pp. 164–181, 2013.
- [13] Gunawan Dwi Haryadi, “Pengaruh Suhu Tempering Terhadap Kekerasan Struktur Mikro Dan Kekuatan Tarik Pada Baja K-460,” *Rotasi*, vol. 7, no. 3, pp. 1–10, 2012.
- [14] S. Mizhar, D. Gerhana, and B. Tampubolon, “Analisa Kekerasan Dan Struktur Mikro Terhadap Variasi Temperatur Tempering Pada Baja Aisi 4140,” *Tek. Mesin ITM*, vol. 1, no. 2, pp. 98–104, 2015.
- [15] S. Prasetyo, “Pengaruh Proses Temper Terhadap Kekerasan, Ketangguhan Dan Struktur Mikro Pada Hasil Tempa Tradisional Di Desa Mandi Angin,” *J. Austenit*, vol. 10, no. 2, pp. 79–83, 2018.