

## Perbaikan Kekerasan dan Struktur Mikro Besi Cor Nodular 700 Fasa Ledeburitik dengan Pengaturan Media Pendingin dan Tempering

Ari Siswanto

Jurusan Teknologi Pengecoran Logam, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung, Jawa Barat

E-mail: aryousiswanto1@gmail.com

### Abstract

*This research was conducted on nodular cast iron 700 material which has ledeburitic phase. Nodular cast iron 700 phase ledeburite has hardness and microstructure that is not following ISO 1083. To repaired the hardness value and microstructure, a heat treatment process is carried out. The heat treatment carried out removes the ledeburitic phase at austenitization temperature, then cooled using various cooling media. The tempering process followed the results of variations in the cooling media. The effects of the heat treatment were tested for hardness and microstructure. The test results show the cooling process of free air media and continued tempering 5500 C results in hardness and microstructure values according to ISO 1083.*

**Keywords:** Nodular cast iron; ledeburitic; hardness; micro structure; heat treatment

### Abstrak

Penelitian ini dilakukan pada material besi cor nodular 700 yang memiliki fasa ledeburitik. Besi cor nodular 700 fasa ledeburitik memiliki kekerasan dan struktur mikro yang tidak sesuai ISO 1083. Untuk memperbaiki nilai kekerasan dan struktur mikro dilakukan proses perlakuan panas. Perlakuan panas yang dilakukan menghilangkan fasa ledeburitik pada temperatur austenisasi, kemudian didinginkan menggunakan media pendinginan yang bervariasi. Hasil variasi media pendinginan dilanjutkan dengan proses tempering. Hasil perlakuan panas tersebut dilakukan pengujian kekerasan dan struktur mikro. Hasil pengujian menunjukkan proses pendinginan media udara bebas dan dilanjutkan temper 550<sup>0</sup> C menghasilkan nilai kekerasan dan struktur mikro sesuai ISO 1083.

**Kata kunci:** besi cor nodular; ledeburitik; kekerasan; struktur mikro; perlakuan panas

### 1. Pendahuluan

Besi cor nodular merupakan salah satu jenis besi cor yang memiliki grafit bulat dengan struktur mikro ferrit dan atau pearlit [1][2]. Besi cor nodular memiliki keunggulan dibanding besi cor yang lainnya seperti besi cor kelabu bersifat keras namun getas, besi cor mampu tempa memiliki keuletan yang baik, namun ketahanan yang rendah terhadap gesekan. Besi cor nodular memiliki keuletan yang tinggi, *machinability* yang baik dan juga kekuatan yang baik, ketangguhan, mampu pemesian dan *hardenability*, sehingga menawarkan banyak keuntungan [3][4].

Sifat besi cor nodular dipengaruhi oleh paduan dan laju pendinginan. Dalam proses pengecoran logam sulit untuk mendapatkan fasa yang seragam dalam benda cor yang memiliki ketebalan yang berbeda-beda. Seperti yang terjadi pada bagian benda cor yang tebal dan yang tipis, hal tersebut dikarenakan laju pendinginan yang berbeda [1][5].

Pada benda cor yang memiliki perbedaan ketebalan yang bervariasi, tidak dapat dihindari terbentuknya fasa ferrit yang lunak pada bagian tebal dan terbentuk fasa ledeburit (pearlit+karbida) pada bagian yang tipis [6]. Untuk menghindari terbentuknya struktur mikro yang keras pada bagian tipis dapat dilakukan dengan menambahkan unsur karbon dan silikon dalam proses peleburannya, namun hal ini mengakibatkan kekerasan yang menurun karena terbentuknya struktur mikro ferite dan grafit yang berukuran besar [7] [8].

Besi cor nodular yang memiliki fasa ledeburit bersifat keras dan getas sehingga sulit untuk diproses pemesian [1] [9], bahkan bila besi cor nodular memiliki fasa yang tidak sesuai dengan standar seperti tabel 1 dapat di anggap *reject* [10]. Proses *solid treatment* (perlakuan padat atau perlakuan panas) salah satu solusi yang dapat dilakukan ketika material sudah dalam keadaan padat. Proses ini dilakukan dengan cara memanaskan benda hingga temperatur pemanasan austenit, tidak sampai temperatur cair, kemudian ditahan beberapa lama, kemudian diatur laju pendinginannya. Pendinginan material sampai temperatur kamar dapat dilakukan secara kontinyu media pendingin, misalnya oli atau dilakukan penahan isothermal pada temperatur transformasi fasa yang diinginkan. Untuk mendapatkan sifat dan fasa yang diinginkan sebaiknya laju pendinginan di atur sesuai diagram CCT dan TTT (gambar 3).

Tempering bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa dan kemungkinan retak, mengurangi kekuatan dan kekerasan, namun meningkatkan keuletan dan ketangguhan serta untuk meningkatkan kemampuan proses pemesian. Proses tempering dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti kandungan paduan, struktur mikro *as-quenched* dan jumlah

pembulatan. Fasa martensitik dari besi cor nodular paduan rendah dengan jumlah pembulatan tinggi menurunkan temperatur dan waktu tempering [1]. Temperatur tempering disarankan 425-600 °C [1].

Beberapa penelitian telah dilakukan salah satunya oleh Wiwik dan Dewi yaitu penguraian ledeburit di material besi cor kelabu pada benda *impeller blades* yang memiliki grafit lamellar, penelitian tersebut dilakukan pada temperatur kritis 830 °C dan media pendinginan udara bebas, namun penelitian tersebut masih menghasilkan sisa karbida yang memiliki sifat keras dan getas, serta hanya dilakukan pada besi cor kelabu [11]. Menurut Brown untuk melarutkan semua karbida diperlukan temperatur austenisasi 900-925 °C selama 3-5 jam [12].

Penelitian oleh Rochim S dan Beny B melakukan analisa perubahan sifat mekanik dan struktur mikro pada besi cor nodular grade 700 pada kondisi *as cast* pearlitik dengan menvariasikan proses pendinginan baik kontinyu maupun *isothermal* [13], penelitian ini menghasilkan berbagai kekerasan dan struktur mikro. Penelitian ini dilakukan pada kondisi *as cast* besi cor nodular 700 memiliki grafit dan fasa perlit 95 % dan ferrit 5 % dengan bentuk perlit yang halus yang telah sesuai standard ISO 1083 (table 1). Penelitian ini lebih untuk merubah sifat dan kekuatan besi cor nodular 700.

Proses penghilangan ledeburit yang dilakukan oleh Wiwik dan Fazri pada besi cor nodular grade 400 pada kondisi *as cast* struktur mikro ledeburit 5 %, ferrite 80% dan pearlit 15%. Proses ini dilakukan melalui variasi temperatur austenisasi. Temperatur austenit yang di variasikan 780, 830, 880 dan 930 °C dari penelitian yang dilakukan dapat menghilangkan fasa ledeburit 5% pada temperatur diatas 830 °C [14]. Penelitian ini untuk menghilangkan sejumlah kecil ledeburit sedangkan eksperimen yang dilakukan mempunyai fasa ledeburitik (100% ledeburit).

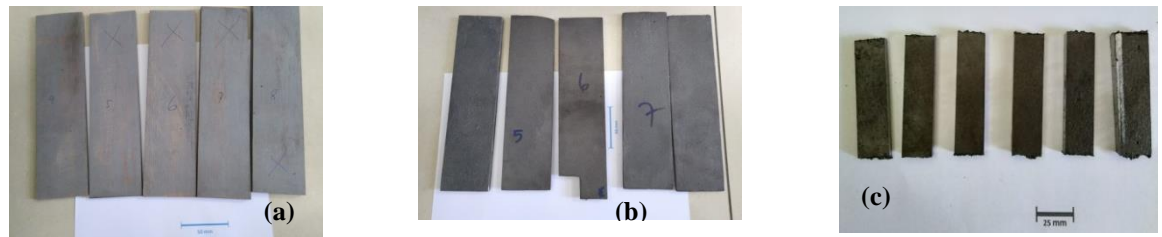
Untuk menghilangkan fasa ledeburitik yang terbentuk pada sampel besi cor nodular 700. Dalam eksperimen ini dilakukan proses perlakuan panas dengan cara memanaskan besi cor nodular ledeburitik hingga temperatur austenisasi 910 °C dengan waktu penahanan dilakukan selama 2 jam pada sampel yang memiliki fasa ledeburitik, kemudian didinginkan serta dilakukan proses tempering. Proses pendinginan dilakukan dengan memvariasikan media pendingin dilanjutkan tempering untuk mendapatkan struktur mikro dan nilai kekerasan yang sesuai dengan standar ISO 1083.

**Tabel 1.** Sifat mekanik besi cor nodular menurut standar ISO 1083 [1].

Grade	Tensile strength		0.2% offset yield strength		Elongat ion (min, %)	Impact energy				Hardness, HB	Structure
	MPa	ksi	MPa	ksi		Mean (a)		Individual			
						J	ft·lbf	J	ft·lbf		
<b>ISO Standard 1083 (International)</b>											
800-2	800	116	480	70	2	...	...	...	...	248–352	Pearlite or tempered
700-2	705	102	420	61	2	...	...	...	...	229–302	Pearlite
600-3	600	87	370	54	3	...	...	...	...	192–269	Pearlite + ferrite
500-7	500	73	320	46	7	...	...	...	...	170–241	Ferrite + pearlite
400-12	400	58	250	36	12	...	...	...	...	<201	Ferrite
370-17	370	54	230	33	17	13	9.5	11	8.1	<179	Ferrite

## 2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan melakukan proses pembuatan pola rata dengan ketebalan yang bervariasi 4-8 mm (gambar 1a) yang menunjukkan jika benda yang kita buat memiliki ketebalan yang bervariasi dari tipis hingga tebal. Kemudian pola tersebut dipergunakan sebagai mal untuk pembuatan cetakan. Cetakan pasir *greensand* yang telah selesai dibuat selanjutnya dicor sesuai komposisi kimia besi cor nodular (tabel 2). Komposisi besi cor nodular di kontrol supaya sesuai target, jenis pengujian yang dilakukan *spectrometer* menggunakan peralatan *Optical Electron Spectrometer* (OES) ARL 4350. Setelah komposisi yang diinginkan tercapai selanjutnya cetakan di cor. Cetakan yang telah dingin dibongkar dan sampel benda cor yang berbeda ketebalan dibersihkan dengan menggunakan mesin *shoot blasting* guna membersihkan sisa pasir cetak yang melekat pada besi cor nodular.



**Gambar 1.** Pola cetakan ketebalan bervariasi (a) hasil pengecoran (b) dan potongan sampel coran (c).

**Tabel 2.** Komposisi standar dan hasil pengujian spectrometer

Unsur	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Cu (%)	Cr (%)	Mg (%)
Komposisi target [10]	3,4-3,8	1,8-2,8	0,01-0,03	<0,05	Mak 0,8	<0,5	<0,05	0,03-0,06
Hasil pengujian OES	3,7	2,0	0,01	0,014	0,6	0,47	0,04	0,04

Sampel besi cor nodular dengan ketebalan bervariasi hasil pengecoran selanjutnya di potong melintang dengan arah ketebalan dengan menggunakan mesin *circular saw Presi (Mecatome OS 300)*. Semua potongan penampang yang melintang tersebut di uji metallografi. Pengujian metallografi dimulai dengan mengampelas permukaan hasil pemotongan menggunakan mesin *Struers* memakai kertas ampelas mulai dari grit 120 sampai dengan 1000. Selanjutnya dilakukan proses polishing menggunakan mesin *Struers polishing* dan alumina 1 $\mu$ m sebagai bahan poles. Sebelum dilakukan pengamatan  $\pm 1/2$  bagian sampel terlebih dahulu di etsa. Ini dilakukan untuk mengamati grafit bagian tidak di etsa dan mengamati fasa pada bagian yang teretsa. Proses etsa besi cor nodular menggunakan larutan nital 5% (5 ml HNO<sub>3</sub> dilarutkan dalam 99 ml ethanol (95%) atau methanol (99%)) [15]. Struktur mikro diamati menggunakan Olympus GX71 dengan software *struktur analyzer DP 12 Optical Mikroskop (OM)*. Pengujian ini dilakukan pada besi cor nodular kondisi *as cast* maupun setelah proses perlakuan panas [15].

Hasil pengujian struktur mikro pada setiap ketebalan didapatkan fasa ledeburitik terjadi pada ketebalan 4 mm (gambar 1b), proses selanjutnya membuat sampel dengan memotong arah memanjang besi cor nodular yang bertingkat untuk diproses perlakuan panas. Proses perlakuan dilakukan pada sampel bertingkat yang memiliki fasa ledeburitik di persiapkan sebanyak 10 buah. Sampel tersebut dipanaskan dalam tungku *muffle* merk *vecstar* pada temperatur austenisasi 910 °C dan dilakukan penahan selama 2 jam. Selanjutnya setiap sampel diatur laju pendinginannya dengan media pendingin (didalam *furnance*, udara bebas, udara tiup, *quenching* oli dan *quenching* air), beberapa sampel dilanjutkan proses tempering.

Pengujian kekerasan metode Rockwell menggunakan alat uji *Future tech FM-1e* dilakukan pada besi cor nodular kondisi *as cast* maupun setelah proses perlakuan panas sebanyak 5 titik yang dirata-ratakan. Sebelum di uji kekerasan sampel diratakan menggunakan *swing grider delta-360*. Hasil pengujian kekerasan Rockwell B dan C kemudian dikonversikan menggunakan software *Uconeer* menjadi kekerasan Brinell untuk menyesuaikan kekerasan menurut standar ISO 1083 (table 1).

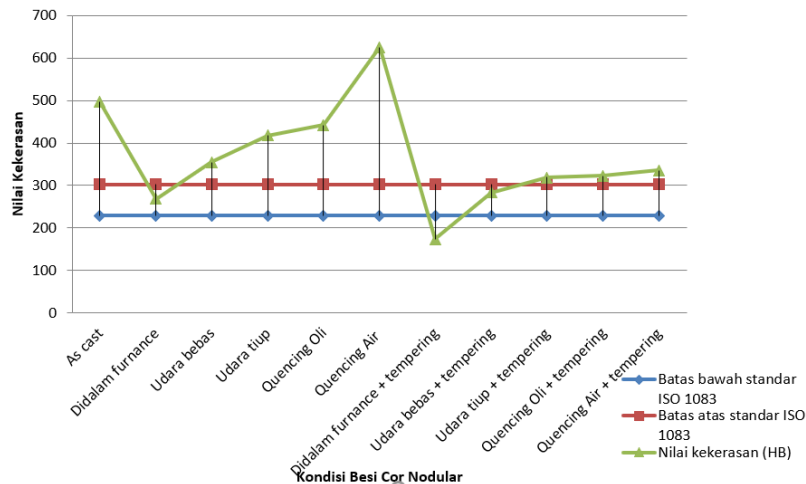
### 3 Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Nilai Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada sampel besi cor nodular kondisi *as cast*, pendinginan didalam *furnance*, udara bebas, udara tiup, *quenching* oli dan *quenching* air. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa kondisi *as cast* besi cor nodular cukup keras (550 HB) karena fasa yang terbentuk ledeburitik (karbida + pearlit).

**Tabel 3.** Nilai kekerasan besi cor nodular dan konversi.

No	Kondisi	Nilai Kekerasan rata-rata (HRC)	Nilai kekerasan konversi (HB)
1	<i>As cast</i>	49,7	497
2	Didalam <i>furnance</i>	27	268
3	Udara bebas	38,5	355
4	Udara tiup	44,9	418
5	<i>Quenching</i> Oli	47	442
6	<i>Quenching</i> Air	58,7	626
7	Didalam <i>furnance</i> + tempering	88,42 HRB *	174
8	Udara bebas + tempering	29,26	283
9	Udara tiup + tempering	34,2	319
10	<i>Quenching</i> Oli + tempering	34,7	323
11	<i>Quenching</i> Air + tempering	36,3	336

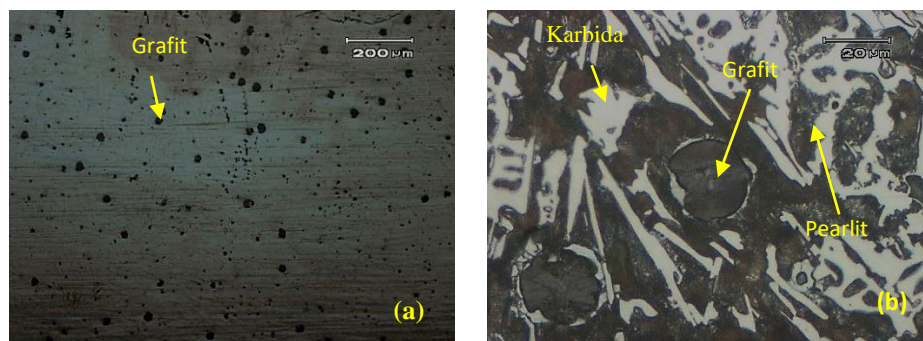


**Gambar 2.** Grafik nilai kekerasan besi cor nodular dalam berbagai variasi laju pendinginan dan tempering.

Berdasarkan perlakuan panas yang dilakukan, didapatkan nilai kekerasan dengan pendinginan dalam *furnance* dan udara bebas disertai tempering menghasilkan nilai kekerasan sesuai standar ISO 1083 namun struktur mikro yang dipersyaratkan perlu diamati. Dari grafik proses perlakuan panas menunjukkan nilai kekerasan meningkat seiring meningkatnya laju pendinginan (gambar 2). Proses tempering yang dilakukan menurunkan nilai kekerasan (gambar 2).

### 3.2 Struktur Mikro

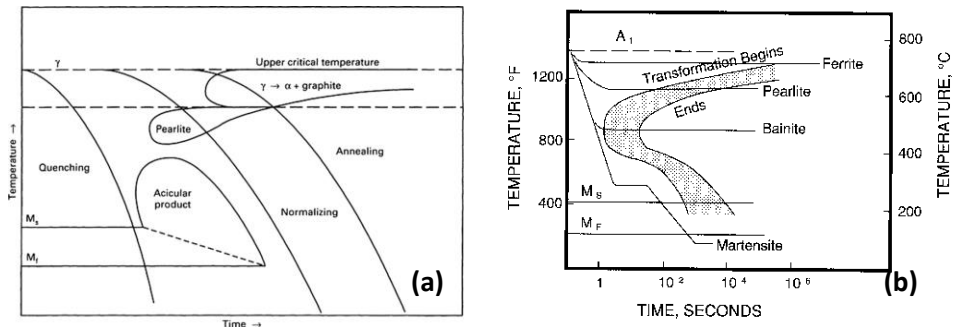
Gambar 3 menunjukkan foto struktur mikro kondisi *as cast* besi cor nodular di bagian di etsa 3 (a) dan tidak di etsa 3(b). Besi cor nodular di kondisi *as cast* bagian tidak di etsa jumlah grafit bulat yang terbentuk sedikit dan fasa yang terbentuk 100% ledeburit (karbida dan pearlit). Fasa ledeburitik ini terbentuk pada benda coran besi cor nodular yang bervariasi di ketebalan 4 mm, karena laju pendinginan yang cepat.



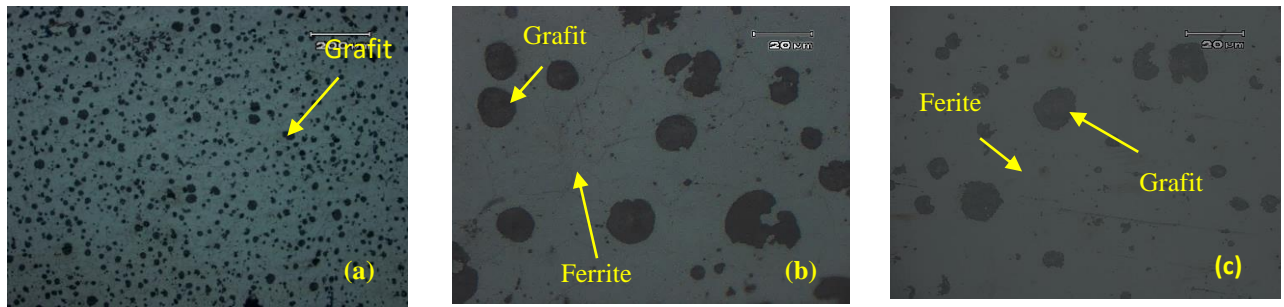
**Gambar 3.** Mikro struktur kondisi *as cast* bagian tidak di etsa (a) dan bagian di etsa.

Dari hasil Eksperimen, proses perlakuan panas yang dilakukan pada temperatur 910 °C dengan lama penahanan selama 2 jam dan pendinginan yang bervariasi yaitu di dalam *furnance*, udara bebas, udara tiup, oli, dan air yang kemudian dilanjutkan proses tempering menghasilkan kekerasan dan fasa yang berbeda-beda. Gambar 5 sampai 9 menunjukkan laju pendinginan yang berbeda dan dilanjutkan proses tempering.

Dengan waktu penahanan selama 2 jam pada temperatur austenisasi 910 °C seluruh fasa ledeburit ((karbida besi (Fe<sub>3</sub>C) dan pearlit) bertransformasi menjadi 3Fe (γ) dan C (grafit). Proses penahanan selama 2 jam memberikan waktu yang cukup untuk karbida terurai untuk membentuk menjadi grafit, hal ini terlihat dalam gambar 5a - 9a memiliki jumlah grafit yang lebih banyak jika dibandingkan dengan jumlah grafit gambar 3a (*as cast*). Grafit dalam jumlah yang lebih banyak terjadi pada semua semua besi cor nodular setelah proses perlakuan panas dibandingkan kondisi *as cast*. Grafit ini terbentuk pada temperatur austenisasi [16].



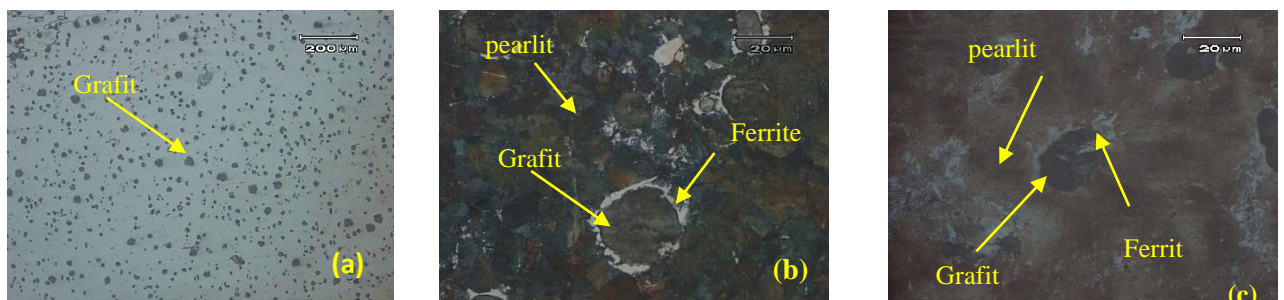
Gambar 4. Diagram CCT (a) dan TTT (b) besi cor nodular [1] [16].



Gambar 5. Mikro struktur kondisi pendinginan dalam furnace bagian tidak di etsa (a), bagian di etsa (b) dan pendinginan dalam furnace dilanjutkan proses tempering (c).

Pendinginan sangat lambat seperti didinginkan dalam furnace menghasilkan besi cor nodular yang memiliki fasa ferrit yang terbebas dari karbida. Pendinginan ini membuat karbon memiliki kesempatan yang lebih lama memisahkan diri dari karbida, serta kecenderungan membentuk grafit dan fasa ferrite (gambar 5b). Proses ini menghasilkan nilai kekerasan yang sesuai namun struktur mikro tidak sesuai dengan persyaratan ISO 1083 mensyaratkan pearlit.

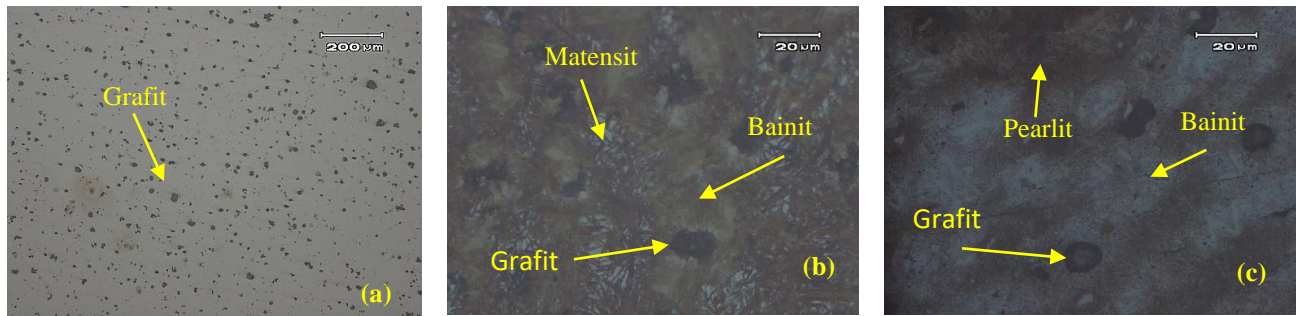
Gambar 5c menunjukkan bahwa proses tempering yang dilakukan tidak merubah fasa sebelum proses tempering, tempering hanya menurunkan nilai kekerasan dan menghilangkan tegangan dalam. Besi cor nodular dengan fasa ferrit mempunyai sifat keuletan dan ketangguhan maksimum, meningkatkan kemampuan pemesinan, bersifat seragam namun mengurangi kekuatan dan kekerasan.



Gambar 6. Mikro struktur kondisi pendinginan udara bebas bagian tidak di etsa (a), bagian di etsa (b) dan pendinginan dalam udara bebas dilanjutkan proses tempering (c)

Laju pendinginan harus cukup cepat seperti di dinginkan udara bebas dapat menekan pembentukan ferrit dan menghasilkan fasa pearlitik (gambar 5b). Pearlite memiliki struktur yang terdiri dari dua fasa yang berbentuk lamelar (atau berlapis) yang terdiri dari lapisan ferit ( $\alpha$ ) dan karbida ( $Fe_3C$ ) yang terjadi pada besi cor nodular. Fasa ferrit berada di sekitar grafit karena sebagian besar karbon lebih cenderung membentuk grafit sehingga kelarutan karbon disekitar grafit kecil. Kelarutan karbon dalam fasa ferrit 0,02% [16].

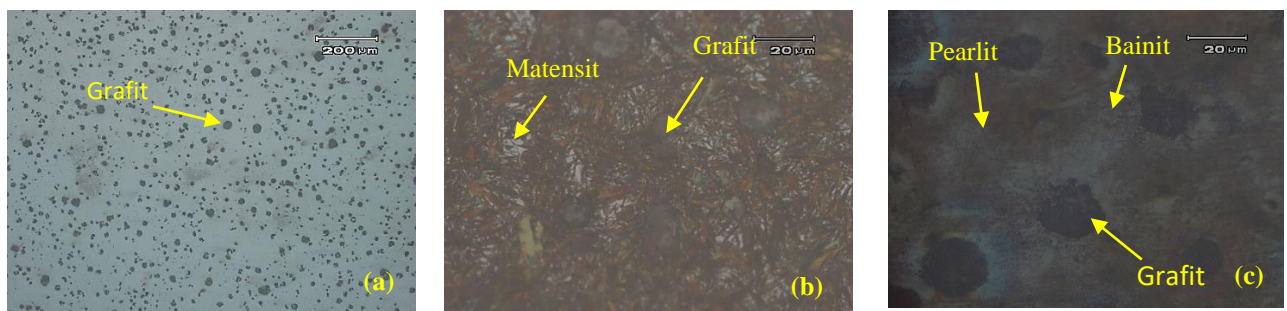
Tambahan proses tempering membuat jumlah ferrit lebih banyak serta jarak antar lamellar menjadi lebih renggang (gambar 5c) sehingga membuat nilai kekerasan menurun (283 HB) bila dibandingkan pendinginan udara bebas (355 HB). Nilai kekerasan dan fasa yang terbentuk pada proses pendinginan udara bebas yang dilanjutkan tempering menunjukkan kesesuaiannya dengan standar ISO 1083 besi cor nodular 700 yaitu 229-302 HB dengan fasa pearlit.



**Gambar 7.** Mikro struktur kondisi pendinginan udara tiup bagian tidak di etsa (a), bagian di etsa (b) dan pendinginan udara tiup dilanjutkan proses tempering (c).

Semakin cepat laju pendinginan seperti yang terjadi pendinginan udara tiup (gambar 7b), membuat karbon sulit untuk untuk memisahkan diri sehingga terbentuk fasa bainit dan martensit. Kekerasan yang terjadi tergantung pada kandungan karbon martensit dan prosentase martensit dalam matrik (terbentuk fasa bainit dan martensit). Dalam hubungannya dengan kandungan silikon, temperatur austenitisasi menentukan kandungan karbon austenit. Untuk kandungan silikon sekitar 2,5%, suhu austenitisasi sekitar 900 °C akan menghasilkan kandungan karbon optimal dan kekerasan maksimum. Temperatur austenitisasi yang lebih rendah, 800-845 °C, akan menghasilkan austenit dengan kandungan karbon rendah sehingga dalam pendinginannya akan menghasilkan martensit yang lebih lunak [16].

Tempering yang dilakukan merubah fasa martensit dan bainit (gambar 7c) tertransformasi menjadi pearlit dan bainit perubahan ini membuat nilai kekerasan berubah menjadi lebih rendah sebelum tempering 418 HB menjadi 319 HB setelah tempering. Nilai kekerasan dan fasa yang terjadi belum memenuhi standar ISO 1083.



**Gambar 8.** Mikro struktur kondisi pendinginan oli bagian tidak di etsa (a), bagian di etsa (b) dan pendinginan oli dilanjutkan proses tempering (c).



**Gambar 9.** Mikro struktur kondisi pendinginan air bagian tidak di etsa (a), bagian di etsa (b) dan pendinginan air dilanjutkan proses tempering (c).

Pendinginan menggunakan media oli dan air yang sangat cepat terbentuk fasa martensit (gambar 8b dan 9b). Fasa kristal martensit yang terbentuk adalah BCT (*body centered tetragonal*), yang sebenarnya adalah kristal BCC (*body centered cubic*) yang terganggu karena adanya atom karbon yang tidak sempat berdifusi keluar pada proses pendinginan. Kondisi terdistorsi ini menghasilkan peningkatan kekerasan.

Tempering yang dilakukan pada media pendinginan oli dan air mampu memtransformasikan fasa martensit menjadi fasa pearlit serta bainit. Jumlah perbandingan antara fasa bainit dan pearlit membedakan antara tempering media oli dengan air, yang mana tempering media oli fasa bainit lebih sedikit di bandingkan tempering pada sampel media air (gambar 8c dan 9c). Tempering media oli mempunyai nilai kekerasan 323 HB dan 336 HB untuk tempering media air. Tempering yang dilakukan belum memenuhi kriteria kesesuaian menurut standar ISO1083.

#### 4. Kesimpulan

Besi cor nodular dengan fasa ledeburitik, nilai kekerasan dan struktur mikro dapat diperbaiki dengan proses perlakuan panas. Temperatur austenisasi, waktu penahan tertentu serta laju pendinginan mempengaruhi nilai kekerasan dan struktur mikro yang terjadi. Semakin cepat laju pendinginan maka akan terjadi perubahan nilai kekerasan dan struktur mikro. Nilai kekerasan dan struktur mikro besi cor nodular 700 ledeburitik dapat diperbaiki dengan proses perlakuan panas. Proses perlakuan panas dilakukan pada temperatur austenite 910 °C, waktu penahanan 2 jam dan media pendinginan udara bebas yang kemudian di lanjutkan tempering dapat mengembalikan nilai kekerasan dan struktur mikro yang sesuai dengan standar ISO 1083, fasa pearlit dan kekerasan 283 HB.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis pada kesempatan ini mengucapkan terimakasih kepada semua pihak khususnya seluruh dosen dan staf di jurusan teknik pengecoran logam POLMAN Bandung yang telah memberikan dukungan moril dan pikiran sehingga penelitian dan paper ini dapat terselesaikan. Selanjutnya penulis juga mengucapkan terimakasih kepada seluruh jajaran pimpinan di POLMAN atas ijin penggunaan segala fasilitas serta bahan sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

#### Daftar Pustaka

- [1] I. Chakrabarty, "Heat Treatment of Cast Irons," in *Comprehensive Materials Finishing*, vol. 2–3, Elsevier Inc., 2016, pp. 246–287.
- [2] W. Darmadi, "Pengaruh media pendinginan terhadap struktur mikro dan kekerasan pada besi cor," 2015.
- [3] R. Widodo, "Besi Cor | HAPLI." [Online]. Available: <https://hapli.wordpress.com/forum-ferro/besi-cor/>. [Accessed: 05-Aug-2019].
- [4] ASM Handbook vol 1, *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys Section: Publication Information and Contributors Publication Information and Contributors*, vol. 1. 2005.
- [5] ASM Handbook vol 15, *ASM Handbook Volume 15: Casting*. 2008.
- [6] Sukomal Ghosh, "Heat Treatment Of Cast Irons," 1999, pp. K1–K15.
- [7] A. Gil-Del-Val, P. M. Diéguez, M. Arizmendi, and M. Estrems, "Experimental Study of Tapping Wear Mechanisms on Nodular Cast Iron," in *Procedia Engineering*, 2015, vol. 132, pp. 190–196.
- [8] J. peng Zou, K. Shimizu, and Q. zhou Cai, "Effects of Cr Content and Annealing Temperature on Microstructure and Wear Characteristics of Cast Ausferrite Nodular Iron," *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 22, no. 11, pp. 1049–1054, Nov. 2015.
- [9] P. P. and K. T. P. Kulu, R. Tarbe, M. Saarna, A. Surzenkov, "Wear resistance and selection of steels, hardmetals and hardfacings for abrasive wear conditions," *Int. J. Microstruct. Mater. Prop.*, pp. 101–113, 2015.
- [10] Ductile Iron Society, "Ductile Iron Quality Assurance Guide," no. c, pp. 2–6.
- [11] W. Purwadi and D. Idamayanti, "Modification of ledeburite microstructure on impeller blades by mean of heat treatment," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 541, p. 012029, 2019.
- [12] J. R. Brown, "Foseco Ferrous Foundryman 's Handbook Foseco Ferrous Foundryman ' s Handbook Edited by," p. 371, 2000.
- [13] R. S and B. Beny, "Analisis Perubahan Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Besi Cor Nodular 700 Setelah Mengalami Proses Perlakuan Panas," *Mesin*, vol. 17, no. 2, pp. 44–50, 2002.
- [14] W. Purwadi and Fazri, "Penghilangan Struktur Mikro Ledeburitik pada FCD dengan Metoda Heat Treatment," *Ratmi*, vol. 11, pp. 25–30, 2013.
- [15] ASM Handbook vol 9, *Metallography and Microstructures 2004 ASM*, vol. 9. 2004.
- [16] Ductile Iron Society, "Sec. 7 Introduction." [Online]. Available: <https://www.ductile.org/didata/Section7/7intro.htm#Tempering>. [Accessed: 19-Aug-2019].