

## Pengaruh *Interlamellar Spacing* Terhadap Nilai Kekerasan Besi Cor Kelabu dengan Variasi Tembaga

Ari Siswanto \*, R. Widodo, Egi Ardiansyah

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

\*E-mail: aryousiswanto1@gmail.com

### Abstract

Gray cast iron is a type of cast iron which has flakes graphite forms and gray fractures. Gray cast iron is widely used because of its properties such as good vibration dampening, excellent cast capability, excellent machinability, inexpensive, and other unique properties. Giving alloying elements is one way to improve the mechanical properties of gray cast iron. Giving the element Copper can increase the formation of graphite on eutectic transformation but reduce the formation of graphite on eutectoid transformation, thereby increasing the amount of pearlite. An increase in the number of pearlite can be observed by SEM (Scanning Electron Microscope) tests aimed at increasingly tight interlamellar spacing pearlite. The results of hardness testing conducted in this study also showed an increase in the percentage of the amount of Copper able to increase the value of hardness. So that it can be concluded an increase in the percentage of the amount of element Copper in gray cast iron makes the distance between the interlamellar spacing denser and an increase in the value of hardness.

*Keywords: gray cast iron; interlamellar spacing; Copper element; hardness value*

### Abstrak

Besi cor kelabu merupakan jenis besi cor yang mempunyai bentuk grafit serpih dan patahan kelabu. Besi cor kelabu banyak dipergunakan karena sifatnya seperti peredam getaran yang baik, mampu cor yang sangat baik, *machinability* yang sangat baik, murah dan sifat unik lainnya. Pemberian unsur paduan adalah salah satu cara untuk meningkatkan sifat mekanik besi cor kelabu. Pemberian unsur Tembaga mampu meningkatkan pembentukan grafit pada transformasi eutektik akan tetapi menurunkan pembentukan grafit pada transformasi eutektoid, sehingga meningkatkan jumlah pearlit. Peningkatan jumlah pearlit dapat teramati oleh pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) yang ditujukan dengan jarak *interlamellar spacing* pearlit yang semakin rapat. Hasil pengujian kekerasan yang dilakukan dalam penelitian ini juga menunjukkan peningkatan persentase jumlah Tembaga mampu menaikkan nilai kekerasan. Sehingga dapat disimpulkan peningkatan persentase jumlah unsur Tembaga di besi cor kelabu membuat semakin rapat jarak *interlamellar spacing* serta terjadi peningkatan nilai kekerasan.

**Kata kunci:** besi cor kelabu; *interlamellar spacing*; unsur Tembaga; nilai kekerasan

### 1. Pendahuluan

Besi cor kelabu merupakan salah satu besi cor yang mempunyai struktur mikro grafit serpih/lamellar dalam matriks besi. Besi cor kelabu didasarkan warna dari patahannya. Besi cor kelabu pada dasarnya adalah campuran besi-karbon-silikon yang mengandung sejumlah kecil unsur lainnya. Besi cor kelabu dipergunakan luas karena sifatnya seperti mampu meredam getaran, mampu cor yang sangat baik, *machinability* yang sangat baik, murah dan sifat unik lainnya [1][2][3][4]. Mikro struktur besi cor kelabu biasanya terdiri dari grafit serpih dan fasa perlit dan/atau ferrit, yang mempengaruhi sifat mekaniknya. Besi cor kelabu pada umumnya memiliki fasa perlit dan ferrit, dengan nilai kekerasan mulai dari 143 hingga 255 HB [5][6]. Salah satu cara utama meningkatkan sifat mekanik adalah untuk mengurangi karbon *equivalent*, sehingga mengurangi persentase grafit dan membentuk terjadinya perlit [7].

Penambahan unsur paduan dapat juga meningkatkan pembentukan pearlit seperti penelitian yang dilakukan dengan penambahan unsur tembaga pada baja dan besi cor kelabu mengarah pada kemampuan tahan gesek [8][9][10][11][12]. Peningkatan kadar tembaga dan aluminium menyebabkan peningkatan ketahanan korosif dari paduan besi cor [13]. Dalam penelitian Stepanova N.V dkk. menyebutkan bahwa tembaga merupakan elemen perlit yang baik dalam besi cor. Tembaga dapat meningkatkan rasio perlit dan penghambatan penyebaran difusi karbon, sehingga meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan [11]. Penambahan Tembaga mampu meningkatkan kekuatan tarik 8-10% untuk tiap penambahan 1% tembaga dan meningkatkan kekerasan 10–20 HB untuk tiap penambahan 1% tembaga [14]. Namun penelitian ini tidak membahas alasan meningkatnya nilai kekerasan dengan penambahan unsur tersebut.

Penelitian yang dilakukan Gladman dan Pickering menyimpulkan bahwa sifat mekanik pada material baja tidak hanya ditentukan oleh kandungan pearlit saja tetapi juga oleh karakteristik struktur mikro yang merupakan bagian yang

terpenting dalam fase individu tersebut, seperti jarak antar sel dan ukuran butiran dari pearlit dan ferrit [15]. Penelitian yang dilakukan oleh O.P. Modi dkk bahwa kekuatan ferrit mengikuti rumus *Hall- Petch* berkorelasi dengan ukuran butirannya. Demikian pula, kekuatan fasa pearlit juga mengikuti rumus *Hall-Petch* yang berkorelasi dengan jarak *interlamellar spacing* [16].

L. Collini dkk meneliti pengaruh struktur mikro pearlitik besi cor kelabu di tiga perusahaan pengecoran yang berbeda. Ketiga perusahaan tersebut menghasilkan besi cor kelabu mempunyai sifat mekanik (kuat tarik, *fatigue limit*) yang berbeda meskipun memiliki fasa yang sama, ini disebabkan pengaruh lainnya seperti bentuk grafit lamellar, ukuran butiran serta adanya inklusi [17].

Zhou Wenbin melakukan penelitian efek Niobium terhadap pada pembentukan fase NbC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kandungan Niobium menyempurnakan grafit eutektik dan mempersempit jarak *interlamellar spacing* pearlit. Kerapatan jarak *interlamellar spacing* pearlit disebabkan terjadinya penurunan temperatur eutektik yang menghambat proses difusi karbon pada saat reaksi eutektoid berlangsung dan meningkatkan pembentukan fasa pearlit. Penambahan Niobium menaikkan juga nilai kekerasan dan ketahanan aus [18].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jarak *interlamellar spacing* pearlit, terhadap nilai kekerasan makro dan mikro, yang dilakukan pada material besi cor kelabu dengan variasi unsur Tembaga. Hubungan antara jarak *interlamellar* dengan nilai kekerasan serta variasi persentase Tembaga (Cu 0%, 0,3%; 0,4%; 0,5% dan 0,7%) dianalisa. Besi cor kelabu yang di teliti memiliki variasi kandungan Tembaga yang berbeda untuk mendapatkan variasi jarak *interlamellar spacing* pearlit.

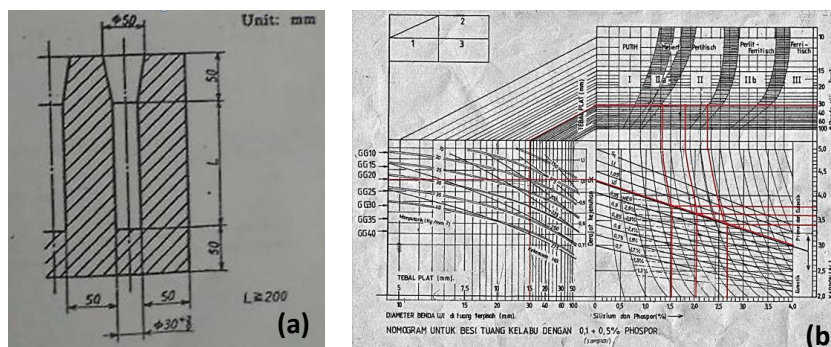
## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menentukan parameter tetap dan variatif, dimana parameter variatif yang ditentukan adalah variasi unsur Tembaga pada besi cor kelabu dengan persentase Cu (0%, 0,3%; 0,4%; 0,5% dan 0,7%), lalu parameter lainnya seperti laju pendinginan, jenis pasir cetak yang digunakan, besar modul cor sampel uji, unsur paduan dan lain-lain dianggap tetap.

Langkah selanjutnya pembuatan pola sampel dengan ukuran dan bentuk sesuai standard JIS Z 5501 (Gambar 1a). Pembuatan pola kayu digunakan sebagai mal untuk pembuatan cetakan menggunakan pasir cetak *green sand*. Proses peleburan besi cor dilakukan dan di kontrol untuk mendapatkan komposisi yang diinginkan. Penentuan komposisi besi cor kelabu menggunakan table Nomogram (Gambar 1b). Pengontrolan komposisi menggunakan alat *Optical Electron Spectrometer* (OES) ARL 4350. Setelah komposisi yang diinginkan tercapai selanjutnya cairan logam besi cor kelabu ditampung dalam ledel yang sebelumnya telah diberikan Tembaga sesuai berat hasil perhitungan peramuhan. Metode pengecoran yang dilakukan menggunakan *gravity casting*.

Pemotongan benda uji menggunakan mesin *circular saw Presi (Mecatome OS 300)* dilengkapi media air sebagai pendingin sampel. 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 1µm sebagai bahan poles. Sebelum dilakukan pengamatan sampel terlebih dahulu di etsa larutan nital 5% (5 ml HNO<sub>3</sub> dilarutkan dalam 99 ml ethanol (95%) atau methanol (99%)) [19]. Struktur mikro diamati *light optical microscope* Olympus GX71. Pengujian SEM Hitachi SU 3500 (*Scanning Electron Microscope*) untuk mengukur jarak *interlamellar spacing* struktur pearlit.

Pengujian keras yang dilakukan pengujian keras makro dan mikro. Pengujian kekerasan mikro menggunakan metode mikro Vickers dan beban 200 gf, indenter piramid intan dengan standar JIS Z 2244 (Future tech FM-100e). Kekerasan makro menggunakan metode *Brinell hardness* dengan beban 3000 Kgf, indenter bola baja 10 mm dengan standar JIS Z 2243 (Ernst)



Gambar 1. Bentuk dan ukuran cetakan menurut standard JIS G 5501 (a) Nomogram (b).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Pengujian Komposisi

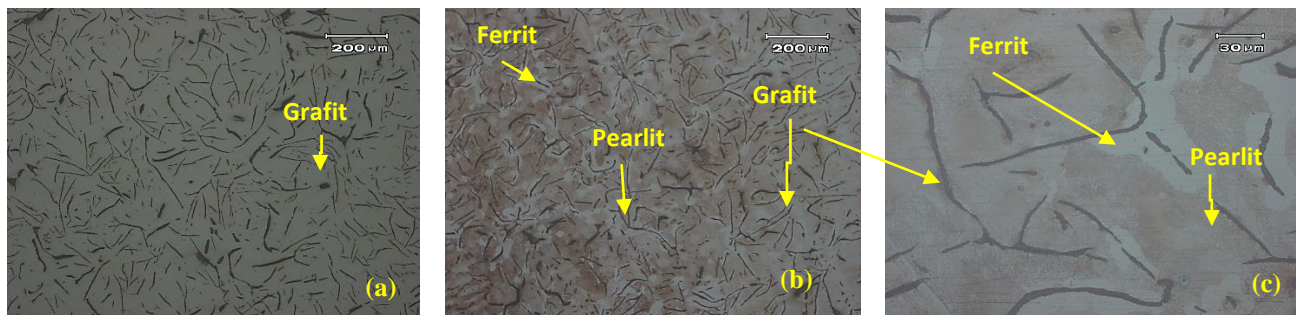
Tabel 1 merupakan hasil dari pengujian komposisi OES pada sampel, Secara umum komposisi variasi Tembaga hasil peleburan sudah sesuai dengan tujuan meskipun ada kekurangan di variasi Tembaga 0,3 % yang terjadi 0,299 dan Tembaga 0,4 % yang terjadi 0,381%. Kelebihan komposisi juga terjadi pada variasi 0,5 % yang terjadi 0,529 % dan variasi Tembaga 0,7 % yang terjadi 0,744 %. Kelebihan atau kekurangan komposisi Tembaga akibat kesulitan dalam memastikan jumlah cairan ke ledel, namun hal tersebut masih menunjukkan tren kenaikan konsentrasi Tembaga di besi cor kelabu, dan masih sesuai dengan tujuan penelitian.

**Tabel 1.** Hasil pengujian komposisi.

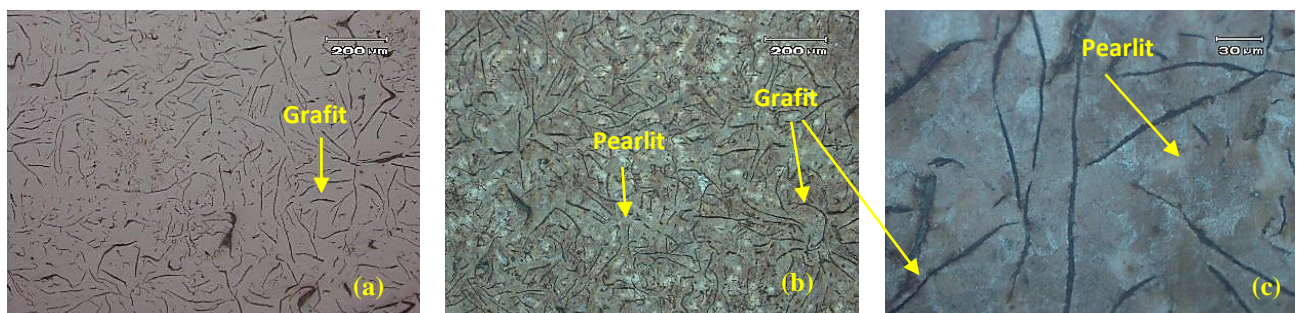
Variasi Cu	Persentase Unsur Besi Cor Kelabu (%)						
	C	Si	S	P	Mn	Cu	Fe
0%	3,424	1,764	0,013	0,012	0,638	0,007	93,815
0,30%	3,395	1,884	0,012	0,013	0,605	0,299	93,717
0,40%	3,456	1,866	0,013	0,012	0,597	0,381	93,598
0,50%	3,409	1,897	0,012	0,012	0,601	0,529	93,464
0,70%	3,363	1,876	0,012	0,013	0,604	0,744	93,309

#### 3.2 Pengujian Metallografi

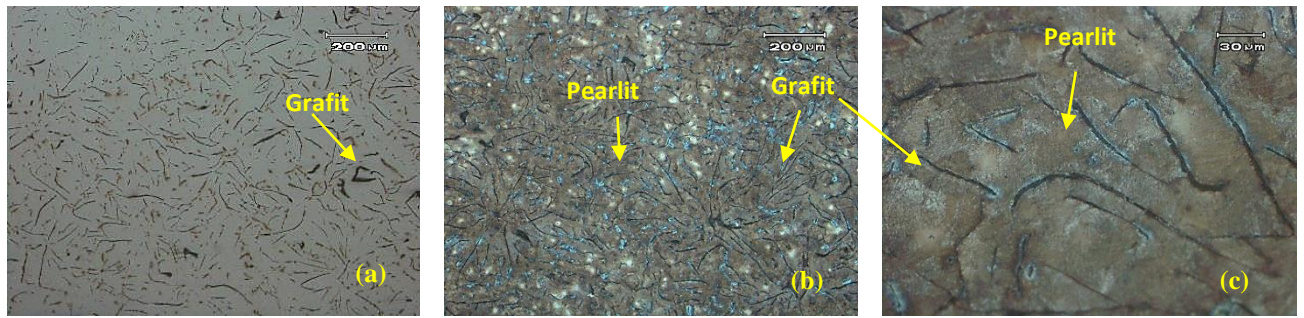
Pengamatan mikro struktur dilakukan pada sampel sebelum di etsa dilakukan untuk melihat distribusi, bentuk grafit serta ukuran grafit yang terbentuk dan setelah etsa untuk melihat fasa yang terbentuk.



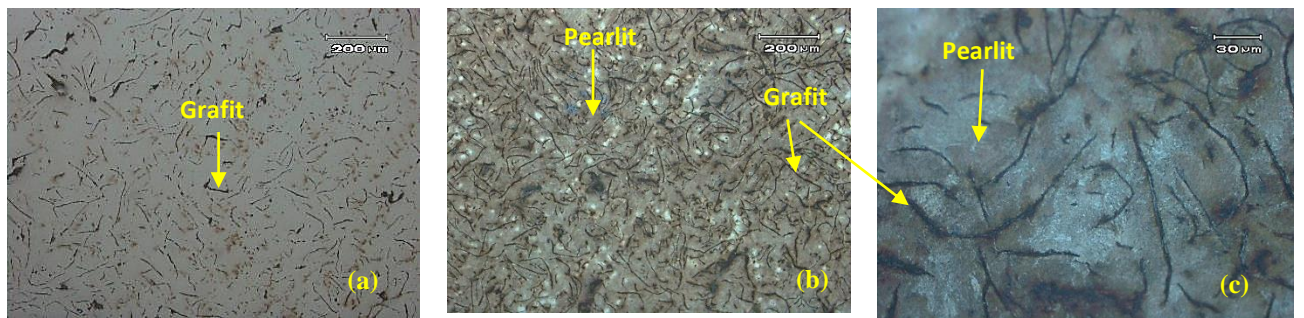
**Gambar 2.** Mikro struktur kondisi besi cor kelabu 0 % Tembaga tidak di etsa (a), bagian di etsa perbesaran 100 X mikroskop (b) dan bagian di etsa perbesaran 1000 X mikroskop (c).



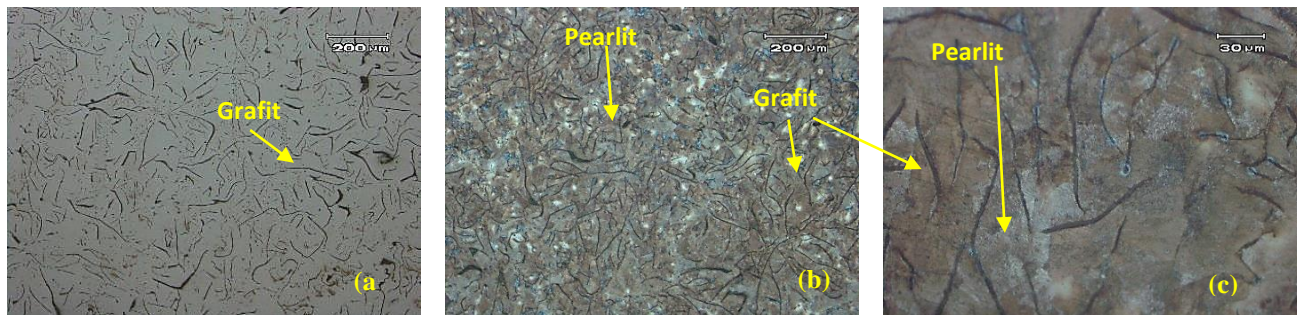
**Gambar 3.** Mikro struktur kondisi besi cor kelabu 3 % Tembaga tidak di etsa (a), bagian di etsa perbesaran 100 X mikroskop (b) dan bagian di etsa perbesaran 1000 X mikroskop (c).



**Gambar 4.** Mikro struktur kondisi besi cor kelabu 4 % Tembaga tidak di etsa (a), bagian di etsa perbesaran 100 X mikroskop (b) dan bagian di etsa perbesaran 1000 X mikroskop (c).



**Gambar 5.** Mikro struktur kondisi besi cor kelabu 5 % Tembaga tidak di etsa (a), bagian di etsa perbesaran 100 X mikroskop (b) dan bagian di etsa perbesaran 1000 X mikroskop (c).



**Gambar 6.** Mikro struktur kondisi besi cor kelabu 7 % Tembaga tidak di etsa (a), bagian di etsa perbesaran 100 X mikroskop (b) dan bagian di etsa perbesaran 1000 X mikroskop (c).

Dapat diamati pada Gambar 2a sampai dengan 6a secara umum bentuk, distribusi, serta ukuran dari grafit pada ke lima variasi tersebut tidak adanya perbedaan, dimana bentuk grafit seluruhnya mempunyai bentuk serpih/lamellar dengan distribusi sebaran yang mempunyai distribusi A yaitu tersebar secara acak serta ukuran grafit 4 [14][20].

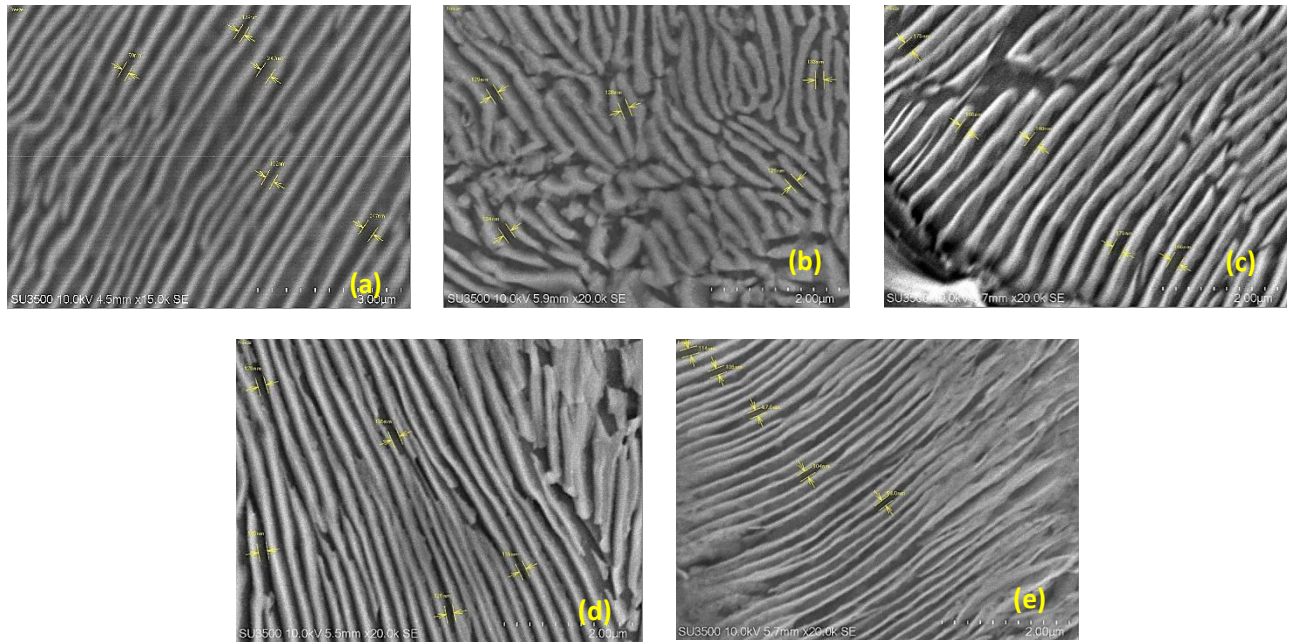
Besi cor kelabu tanpa paduan (Gambar 2b dan 2c) terbentuk fasa ferrit. Fasa ferrit terbentuk karena tidak adanya unsur paduan Tembaga yang menghalangi pembentukan grafit. Fasa ferrit terbentuk disekitar grafit hal ini menunjukkan bahwa karbon lebih cenderung membentuk grafit dibandingkan membentuk senyawa  $Fe_3C$  / sementit didalam pearlit [11].

Dari Gambar 3b dan 3c sampai dengan Gambar 6b, 6c tersebut dengan variasi 0,3% , 0,4% , 0,5% dan 0,7% Tembaga dapat dilihat bahwa pada semua variasi memiliki mikro struktur dasar yang terbentuk adalah pearlit. Fasa yang terbentuk adalah sepenuhnya pearlit atau 100 % pearlit atau pearlitik [21][22]. Unsur Tembaga mempertahankan struktur pearlit serta memperhalus pearlit pada konsentrasi lebih dari 0,3 %. Pada konsentrasi ini struktur mikro yang terbentuk menjadi sepenuhnya pearlitik. Perbedaan yang terjadi pada setiap variasi sesuai dengan penelitian-penelitian terdahulu bahwa Tembaga dapat memperhalus pearlite dimana hasil perbedaan ini tidak dapat dilihat pada pengujian struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik namun harus menggunakan SEM.

### 3.3 Jarak *Interlamellar Spacing* Pearlit

Untuk melihat perbedaan *interlamellar spacing* yang terjadi setelah penambahan unsur Tembaga, dengan variasi 0,0-0,7 % maka dilakukan pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*). Pengujian SEM yang dilakukan untuk

mendapatkan nilai kuantitatif dari hasil penambahan Tembaga pada besi cor kelabu. Pengujian SEM dilakukan pada 2 lokasi yang berbeda di setiap variasi Tembaga, setiap lokasi dilakukan 5 titik pengukuran. Berikut merupakan hasil dari pengujian SEM dapat dilihat Gambar 7.



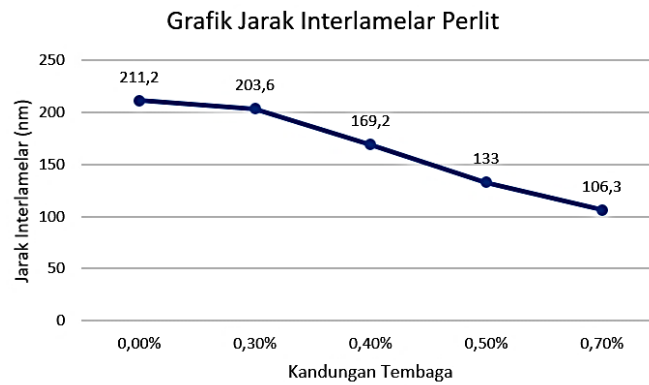
**Gambar 7.** Hasil pengujian SEM pearlit dari besi cor kelabu kandungan 0% Tembaga (a), 3% Tembaga (b), kandungan 4% Tembaga (c), kandungan 5% Tembaga (d), dan kandungan 7% Tembaga (e).

Hasil Pengujian SEM yang terdapat pada Gambar 7 dengan perbesaran 15.000–20.000 kali pengaruh penambahan Tembaga yang diberikan terhadap besi cor kelabu secara morfologis atau kualitatif dapat dilihat bahwa semakin bertambahnya unsur paduan Tembaga semakin rapat *interlamellar spacing* pearlit. Table 2 merupakan data pengukuran jarak *interlamellar spacing* pearlit.

**Tabel 2.** *Interlamellar spacing* pearlit masing-masing variasi.

Variasi Tembaga	<i>Interlamellar spacing</i> (nm)					Rata - Rata (nm)
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
0%	159	139	242	192	247	211,2
	169	225	262	264	213	
0,30%	129	134	128	126	133	203,6
	292	315	260	295	224	
0,40%	175	166	180	179	166	169,2
	155	161	173	168	169	
0,50%	128	145	135	126	115	133
	123	137	137	137	147	
0,70%	108	104	107	112	112	106,3
	114	106	97	104	99	

Dapat dilihat pada Gambar 8 dapat disimpulkan bahwa semakin bertambahnya penambahan variasi Tembaga semakin kecil nilai kerapatan yang didapat maka semakin rapat jarak antar *interlamellar* pearlit yang terjadi, sesuai dengan penelitian Deny Kurniawan dan Erman Sitorus menyebutkan bahwa unsur Tembaga dapat memperhalus pearlit [21].

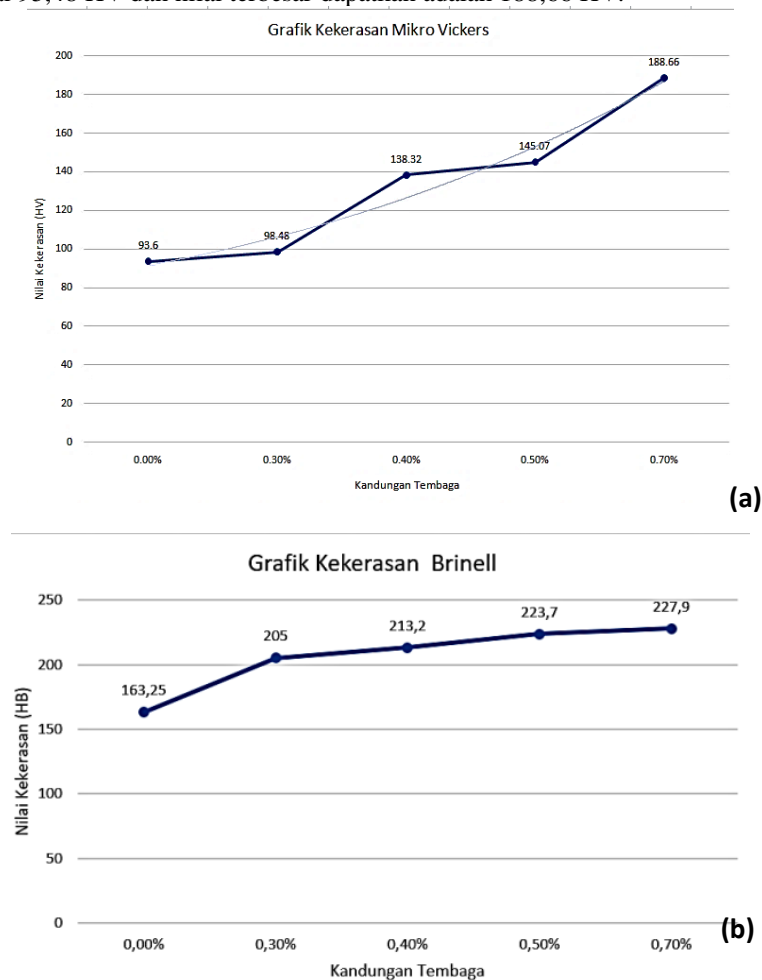


**Gambar 8.** Grafik *interlamellar spacing* pearlit.

Rapatnya *interlamellar spacing* pearlit terjadi karena karbon yang akan berdifusi kedalam grafit terhambat oleh adanya unsur paduan dari Tembaga sehingga menyebabkan karbon yang akan berdifusi kedalam grafit tidak terjadi dan menyebabkan karbon membentuk senyawa  $Fe_3C$  / sementit didalam pearlit sehingga pearlite tersebut menjadi semakin rapat [2][23], menyebutkan bahwa Tembaga meningkatkan potensi pembentukan grafit pada transformasi eutektik akan tetapi menurunkan pembentukan grafit pada transformasi eutektoid, sehingga meningkatkan jumlah pearlit [11].

### 3.3 Pengujian Kekerasan

Dari hasil pengujian mikro Vickers didapatkan bahwa pada fasa pearlit mengalami peningkatan kekerasan seiring bertambahnya unsur paduan tembaga, dapat dilihat pada Gambar 9a grafik kekerasan pada fasa pearlit mengalami peningkatan akibat bertambahnya unsur paduan tembaga. Nilai terendah pada pengujian kekerasan mikro vickers tersebut berada pada nilai 95,48 HV dan nilai terbesar didapatkan adalah 188,66 HV.



**Gambar 9.** Grafik kekerasan mikro Vickers (a), dan kekerasan Brinell (b).

Dari pengujian kekerasan metode Brinell didapatkan hasil dari variasi 0,0 % Cu nilai kekerasan yang dihasilkan yaitu 163,2 HB dimana nilai tersebut adalah nilai terkecil. Nilai kekerasan kecil yang terjadi karena adanya fasa ferrit yang terbentuk. Fasa ferrit terbentuk membuat kekerasan besi cor kelabu tanpa paduan Tembaga paling kecil dibandingkan dengan paduan Tembaga.

Besi cor kelabu variasi 0,3 % mengalami peningkatan nilai kekerasan menjadi 205 HB, variasi 0,4 % meningkat menjadi 213,2 HB, variasi 0,5 % meningkat menjadi 223,7 HB dan variasi 0,7 % mempunyai nilai kekerasan paling tinggi yaitu 227,9 HB. Peningkatan nilai kekerasan ini adalah akibat adanya perbedaan pada fasa pearlit yang terbentuk pada setiap variasi dimana semakin meningkatnya kandungan Tembaga *interlamellar spacing* pearlit semakin rapat [2] formula *Hall-Petch* menyebutkan bahwa meningkatnya kerapatan *interlamellar spacing* pearlit atau semakin halus pearlit yang maka sifat mekanik akan meningkat [16].

#### 4. Kesimpulan

Besi cor kelabu tanpa paduan Tembaga mempunyai kekerasan yang paling rendah karena terbentuknya fasa ferrit serta jarak *interlamellar spacing* yang lebih longgar sebesar 211,2 nm. Peningkatan jumlah Tembaga dalam besi cor kelabu merapatkan jarak *interlamellar spacing* pearlit. Penambahan unsur Tembaga mulai 0,3% sampai 0,7%, terjadi penurunan jarak *interlamellar spacing* pearlit dalam struktur mikro mulai 203,6 sampai dengan 106,3 nm.

Bertambahnya kerapatan *interlamellar spacing* disebabkan terhambatnya proses difusi karbon pada saat reaksi eutektoid berlangsung. Hambatan tersebut terjadi karena pengaruh unsur Tembaga memudahkan pembentukan grafit pada transformasi eutektik akan tetapi menurunkan pembentukan grafit pada transformasi eutektoid dan memudahkan pembentukan sementit pada fasa pearlit yang mengakibatkan bertambahnya kerapatan *interlamellar spacing* pearlit.

Hasil pengujian keras yang dilakukan pada variasi persentase unsur Tembaga yang bertambah menunjukkan kenaikan nilai kekerasan, hal ini terjadi karena semakin rapatnya jarak *interlamellar spacing* atau semakin halus pearlit yang terjadi sehingga nilai kekerasan meningkat.

#### 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] ASM Handbook vol 15, *ASM Handbook Volume 15: Casting*. 2008.
- [2] 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.
- [3] I. Chakrabarty, "Heat Treatment of Cast Irons," in *Comprehensive Materials Finishing*, vol. 2–3, Elsevier Inc., 2016, pp. 246–287.
- [4] "https://en.wikipedia.org/wiki/Gray\_iron#cite\_note-schweitzer72-2." .
- [5] "Comparison Table for Some Gray Iron Casting Grades." [Online]. Available: <http://www.iron-foundry.com/gray-iron-casting-grades.html>. [Accessed: 11-Sep-2019].
- [6] Dormer, "Cast Iron Application Material Group."
- [7] W. Xu, M. Ferry, and Y. Wang, "Influence of alloying elements on as-cast microstructure and strength of gray iron," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 390, no. 1–2, pp. 326–333, 2005.
- [8] A. M. Omran, G. T. Abdel-Jaber, and M. M. Ali, "Effect of Cu and Mn on the Mechanical Properties and Microstructure of Ductile Cast Iron," *J. Eng. Res. Appl. www.ijera.com ISSN*, vol. 4, no. 1, pp. 2248–962290, 2014.
- [9] D. B. W. Agus Suprihanto, Yusuf Umardani, "Perbaikan Sifat Mekanis Besi Cor Kelabu Lewat Penambahan Unsur Cr dan Cu," *Rotasi (Semarang)*, vol. 8, no. 3, pp. 24–28, 2006.
- [10] A. Suprihanto, D. Satrijo, and R. Suratman, "Pengaruh Penambahan Unsur Cr dan Cu Terhadap Kekuatan Tarik Besi Cor Kelabu FC20," *Rotasi" J. Tek. Mesin"*, vol. 9, no. 1, pp. 17–24, 2007.
- [11] N. V. Stepanova, A. A. Razumakov, and E. A. Lozhkina, "Structure and mechanical properties of Cu-alloyed cast Iron," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 682, pp. 178–182, 2014.
- [12] E. E. T. ELSawy, M. R. EL-Hebeary, and I. S. E. El Mahallawi, "Effect of manganese, silicon and chromium additions on microstructure and wear characteristics of grey cast iron for sugar industries applications," *Wear*, vol. 390–391, pp. 113–124, 2017.
- [13] S. Takamori, Y. Osawa, and K. Halada, "Aluminum-alloyed cast iron as a versatile alloy," *Mater. Trans.*, vol. 43, no. 3, pp. 311–314, 2002.
- [14] H. T. Angus, "Mechanical, physical and electrical properties of cast iron," *Cast Iron Phys. Eng. Prop.*, pp. 34–160, 1976.

- [15] P. F. Gladman T, "The effect of grain size on the mechanical properties of ferrous materials.," *UK Appl. Sci. Publ.*, pp. 141–98, 1983.
- [16] O. P. Modi, N. Deshmukh, D. P. Mondal, A. K. Jha, A. H. Yegneswaran, and H. K. Khaira, "Effect of interlamellar spacing on the mechanical properties of 0.65% C steel," *Mater. Charact.*, vol. 46, no. 5, pp. 347–352, 2001.
- [17] L. Collini, G. Nicoletto, and R. Konečná, "Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 488, no. 1–2, pp. 529–539, 2008.
- [18] Z. Wenbin, Z. Hongbo, Z. Dengke, Z. Hongxing, H. Qin, and Z. Qijie, "Niobium alloying effect in high carbon equivalent grey cast iron," *China Foundry*, vol. 8, no. 1, pp. 36–40, 2011.
- [19] ASM Handbook vol 9, *Metallography and Microstructures 2004 ASM*, vol. 9. 2004.
- [20] J. R. Brown, "Foseco Ferrous Foundryman ' s Handbook Foseco Ferrous Foundryman ' s Handbook Edited by," p. 371, 2000.
- [21] "Perancangan Proses Pembuatan Tromol Rem Dengan Improvisasi Terhadap Sifat Mekanik Material FC 30." [Online]. Available: [http://digilib.polman-bandung.ac.id/index.php?p=show\\_detail&id=7454](http://digilib.polman-bandung.ac.id/index.php?p=show_detail&id=7454). [Accessed: 03-Sep-2019].
- [22] K. Gray, "Effect on the Mechanical Properties of Gray Cast," vol. 3, no. 5, pp. 81–84, 2014.
- [23] G. I. Silman, V. V. Kamynin, and V. V. Goncharov, "On the mechanisms of copper effect on structure formation in cast iron," *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 49, no. 7–8, pp. 387–393, 2007.