

PERBAIKAN METODE *DEGENERASI MORFOLOGI GRAFIT* BULAT FCD 400 MENGGUNAKAN LADEL SANDWICH

Arif Syamsudin^{1*}, Muhammad Mukti Haikal¹

¹Program Studi Teknologi Pengecoran Logam, Politeknik Manufaktur Ceper

*Corresponding author : arif@polmanceper.ac.id

Diterima: 28 Februari 2022

Direvisi: 23 Mei 2022

Disetujui: 27 Mei 2022

Terbit online: 28 Mei 2022

ABSTRAK

Morfologi grafit dan bentuk matrik mikrostruktur material mempunyai pengaruh besar terhadap sifat mekanik dan sifat fisik. Degenerasi morfologi grafit kadang masih tidak seperti yang diharapkan, begitu juga susunan matrik mikrostrukturnya. Tujuan dari penelitian ini adalah memperbaiki degenerasi grafit dalam pembuatan FCD dari menggunakan metode ladle biasa ke metode ladle sandwich. Peleburan pembuatan cairan FCD dilakukan dengan tanur induksi furnace kapasitas 900kg. sebelum penuangan dilakukan proses mg treatment menggunakan 2 ladle masing-masing kapasitas 450Kg yaitu ladle penuangan type biasa dan ladle penuangan type sandwich, pemberian Fe-Si-Mg 5,4kg dan inoculant 1,8kg. Penuangan dilakukan pada temperature antara 1450 - 1470 °C dan pada sekitar detik ke 16 s/d ke 20 setelah perlakuan mg treatment. Benda cor dalam bentuk Y blok dicetak dengan pasir CO₂ proses. Degenerasi grafit dari bentuk serpihan menjadi bulat dengan metode ladle sandwich lebih baik dari metode ladle biasa. Hasil uji kuat Tarik meningkat dari 310,2 N/mm² menjadi 429,59 N/mm² dan elongasi bertambah dari 8,51% menjadi 18,82 % kekerasan meningkat dari 139,6 HB menjadi 176 HB.

Kata kunci : *degenerasi grafit, morfologi grafit, grafit bulat*

ABSTRACT

Graphite morphology and the shape of the matrix microstructure of the material have a major influence on the mechanical properties and physical properties. Graphite morphological degeneration is sometimes still not as expected, as well as the arrangement of the microstructural matrix. The purpose of this research is to improve graphite degeneration in the manufacture of FCD from using the ordinary ladle method to the sandwich ladle method. The smelting of the FCD liquid was carried out in an induction furnace with a capacity of 900kg. before pouring, the mg treatment process was carried out using 2 ladles each with a capacity of 450Kg, namely the usual type of pouring ladle and the sandwich type of pouring ladle 5,4 kg of Fe-Si-Mg and 1,8kg of inoculant. Pouring was carried out at a temperature between 1450 – 1470 °C and at around the 16th to 20th seconds after the mg treatment. Cast objects in the form of Y blocks are molded with process CO₂ sand. Graphite degeneration from flake to spherical shape with the sandwich ladle method is better than the ordinary ladle method. The results of the tensile strength test increased from 310,2 N/mm² to 429,59 N/mm² and the elongation increased from 8,51% to 18,82 %, the hardness increased from 139,6 HB to 176HB

Keywords: *graphite degeneration, graphite morphology, spherical graphite*

1. PENDAHULUAN

FCD atau *Ferro Carbon Ductile* merupakan besi cor dengan struktur grafit berbentuk bulat (*nodular*) seperti bola-bola kecil ditemukan oleh *Keith Dwight Millis* pada tahun 1943, dan dipatenkan pada tahun 1948 oleh *Keith Dwight Millis*, *Albert Paul Gagnebin* dan *Norman Boden Pilling* [1][2][3].

Pembulatan grafit terbentuk dari unsur *carbon* (C) melalui proses pengikatan beberapa unsur gas seperti *hydrogen*, *oksigen*, *nitrogen*, dan unsur *sulfur*, metode pengikatan yang biasa dilakukan dengan *Magnesium* (Mg), serium atau kalsium ke dalam logam cair. Penambahan unsur *magnesium* adalah yang paling sesuai secara ekonomis maupun teknologis, karena pada temperature 1400-1500⁰ C dapat menurunkan gas parsial sehingga memberikan efek *degassing* yang baik terutama pada kandungan oksigen menjadi MgO dan akan mengikat *sulfur* menjadi MgS [4][1].

Morfologi grafit dan bentuk matrik struktur mikro material mempunyai pengaruh besar terhadap sifat mekanik dan sifat fisik [3][5]. Sebagai contoh *morfologi* grafit dari bentuk grafit serpih (*lamellar*) yang awalnya mempunyai sifat getas ketika sudah *degenerasi* menjadi bentuk grafit bulat (*nodular*) berubah menjadi ulet, kuat tarik dan mampu impak bisa sangat meningkat [6]. *Morfologi* bentuk dan kualitas grafit sangat ditentukan oleh kecepatan pendinginan pada saat pembekuan dan komposisi kimianya [7]. Kecepatan pendinginan dipengaruhi oleh bahan cetakan, kondisi cetakan, desain sistem saluran dan posisi penambah dalam sebuah cetakan [8].

Selama ini pembuatan FCD hanya menggunakan metode ladle biasa, sehingga sering ditemukan proses *magnesium treatment* tidak *optimal* yaitu *magnesium* hanyut dan mengambang, dan mengakibatkan *degenerasi morfologi* grafit. Kualitas tingkat kebulatan grafit tidak beraturan atau kurang sempurna, grafit dalam bentuk serpihan masih banyak tersisa [9][10].

Perbaikan kualitas *degenerasi morfologi* grafit dapat dilakukan dengan berbagai metode antara lain dengan perbaikan metode dan teknik pengecoran, modifikasi alat bantu pengecoran, dan metode pekerjaan lanjut dengan perlakuan panas. Dari beberapa metode tersebut yang paling berhubungan dengan penyelesaian permasalahan *magnesium treatment* adalah dengan modifikasi alat bantu pengecoran dengan merubah ladle biasa menjadi model *sandwich*[11].

Faktor lain yang juga sangat berpengaruh terhadap kualitas *degenerasi morfologi* dan pembulatan grafit yaitu pemilihan pasir cetak yang *konduktivitas thermal* nya rendah dan pasir CO₂ proses merupakan yang terbaik karena memiliki *konduktivitas thermal* pasir cetak paling rendah, ketepatan waktu tuang yaitu toleransi waktu tuang setelah proses *magnesium treatment* hingga waktu penuangan [12][13][4]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperbaiki kualitas *degenerasi morfologi* grafit dalam pembuatan FCD dari menggunakan metode ladle biasa menjadi menggunakan metode ladle *sandwich*.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan membuat Gambar desain ladle *sandwich* dan Gambar desain pola Y blok, untuk selanjutnya *ladle sandwich* dibuat dari plat baja dengan ketebalan 9 mm dengan proses pengerolan dan pengelasan sedangkan *pattern* Y blok dibuat dengan kayu multiplek. Benda untuk pembuatan *spesimen* uji dicor dalam bentuk Y blok dan cetakan dibuat dengan jenis bahan pasir cetak CO₂ proses. Peleburan untuk pembuatan cairan FCD dilakukan dengan tanur *induksi furnace* kapasitas 900kg. sebelum penuangan dilakukan proses *magnesium treatment* menggunakan 2 ladle masing-masing kapasitas 450 kg yaitu ladle penuangan tipe biasa dan ladle penuangan tipe *sandwich*, pemberian Fe-Si-Mg 5,4kg dan *inoculant* 1,8kg. Penuangan dari *furnace* ke ladle

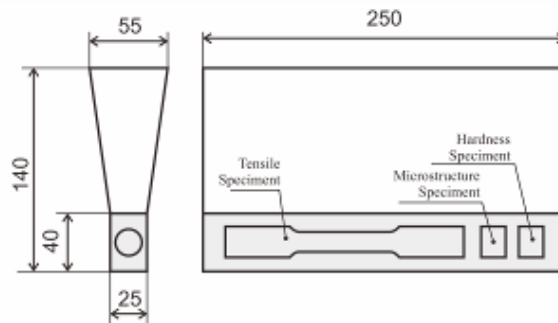
dilakukan pada temperature antara 1450 - 1470 °C, dan penuangan pada cetakan dilakukan antara 16 sampai 20 detik setelah perlakuan *magnesium treatment* [4].

Pengujian komposisi kimia dilakukan 3 metode tempat antara lain : pada *furnace* sebelum dilakukan proses *magnesium treatment*, pada ladle biasa setelah dilakukan proses *magnesium treatment* dan pada ladle *sandwich* setelah dilakukan *magnesium treatment*.

Untuk mengetahui perubahan mekaniknya dilakukan pengujian struktur mikro, pengujian kuat tarik, dan pengujian kekerasan material, bagian yang diuji sesuai dengan pembagian pemotongan specimen Y blok [14].

2.2 Bentuk Spesimen Uji

Spesimen dicor dalam bentuk Y blok type B standard JIS-G5502: 2001, dengan ukuran sesuai Gambar 1. Pembagian pemotongan specimen uji ditunjukkan seperti pada Gambar 1, dari kiri specimen uji untuk kuat tarik, specimen uji *metalografi*, specimen uji kekerasan. Untuk spesimen uji komposisi dibuat *chill test* langsung dari cairan logam.



Gambar 1. Skema pembagian pemotongan Y Blok

A. Spesimen uji komposisi kimia

Pengujian dan preparasi spesimen dengan mengikuti standard ASTM E415-14, Spesimen uji untuk pengujian komposisi kimia dengan material besi cor harus berbentuk *chill test*, yaitu *spesimen* yang sengaja dibuat dengan dicor dalam bentuk tipis sesaat setelah selesai dicor langsung dicelup air, tujuannya adalah untuk pendinginan cepat [15]. Pendinginan dengan cepat berujung karbon belum sempat melakukan *presipitasi* dan masih berbentuk karbon bebas. Sehingga ketika di uji komposisi kimia dengan spektrometer semua unsur kimia yang ada masih bisa terbaca dan belum sempat tertutup *presipitasi* karbon dalam bentuk grafit seperti kalau pendinginan normal.

B. Spesimen uji *Metalografi*

Sebelum melakukan pengujian *metalografi* harus ada persiapan atau *preparasi spesimen* agar struktur mikro bisa terbaca di *mikroskop* dengan jelas, *standard preparasi specimen* dan pengujian dengan standard ASTM E3-11 2017 [16]. *Spesimen* diampas secara bertahap dari *mesh* 600 sampai *mesh* 1200, dan di lanjutkan dengan *polishing* untuk menghilangkan bekas sayatan ampas hingga mengkilap, agar terlihat jelas perbedaan struktur *perlit*, *ferit* dan *grafit specimen* uji harus di *etsa* dengan menggunakan *nital* 2% (asam nitrat (HNO₃) sebesar 2% dengan *Etanol* sebesar 98%).

C. Spesimen uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan mesin uji kekerasan dengan metode *hardness vickers* yaitu menggunakan *identor* berbentuk piramida dengan sudut 136° dengan memakai standard ASTM E-92 dan hasilnya dikonversikan ke dalam *hardness brinell*. *preparasi spesimen* uji dilakukan dengan menggerinda dan mengampas permukaan yang akan diuji sehingga

rata, serta pada bagian bawah dan bagian atas permukaan harus sejajar, agar supaya *identor* menekan pada bidang yang rata bukan pada bidang yang miring[17].

D. Spesimen Uji Kuat Tarik

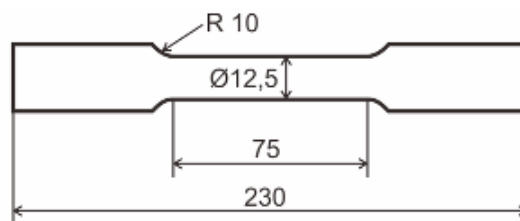
Preparasi spesimen uji kuat Tarik harus menggunakan mesin bubut, karena bentuknya simetris dan ada standard bentuk dan standard ukuran, dalam pembuatan *specimen* uji ini memakai standard ASTM E8/E8M-08, sedangkan bentuk dan ukuran seperti pada Gambar 2 [18]. Akurasi hasil pengujian kuat tarik sangat di pengaruhi dari ketepatan ukuran dan tingkat kehalusan bubutan *specimen* uji khususnya kehalusan pada bagian radius, sehingga tidak putus pada bagian yang kasar.

2.3 Cetakan pasir CO₂ proses

Cetakan adalah rongga yang sengaja dibuat membentuk negatif dari benda kerja dan nantinya akan diisi cairan logam sampai penuh agar ketika membeku akan membentuk benda. Y blok di cetak dengan metode cetakan terbuka dengan jenis cetakan pasir CO₂ proses seperti yang ditunjukkan Gambar 3. Dimana bahan baku utama adalah pasir *silica* dengan bahan pengikat water glass (*Sodium silikat*) dan bahan tambah gula tetes yang dilarutkan dengan sedikit air selanjutnya diaduk menggunakan mikser. Proses terjadinya ikatan antar pasir dan mengeras membentuk cetakan karena di hembuskan gas *karbon dioksida* (CO₂) ke dalam pasir cetak melalui lubang tusuk yang sengaja dibuat[19][20]. Bagian rongga bagian dalam cetakan yang nantinya bersentuhan dengan cairan diberikan pelapis (*coating*) agar permukaan cetakan pasirnya tidak *tersinter* (partikel-partikel pasir leleh dan menempel ke benda).

2.4 Bentuk Desain Ladel Sandwich

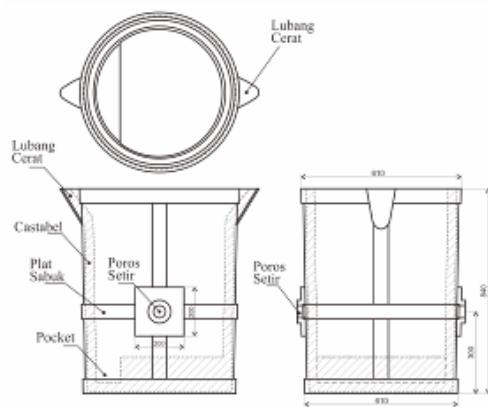
Desain ladel *sandwich* dan ladel biasa yang membedakannya adalah dengan adanya *pocket* sebagai tempat untuk meletakkan *magnesium* dan *inoculant* (*Alloy Master*) dan ditutup dengan plat baja [13]. Ladel *sandwich* dibuat dari plat dengan tebal 9 mm yang dibentuk dengan metode *rolling* untuk penyabungan tiap komponen dengan dilas, kapasitas dari ladel adalah 450 kg. Gambar 4 merupakan Gambar desain ladel *sandwich* dengan Gambar 5 ladel *sandwich* yang sedang proses pembuatan.



Gambar 2. Gambar dan ukuran *spesimen* uji kuat tarik



Gambar 3. Cetakan pasir CO₂ proses Y blok



Gambar 4. Gambar desain ladle sandwich



Gambar 5. Pembuatan ladle sandwich

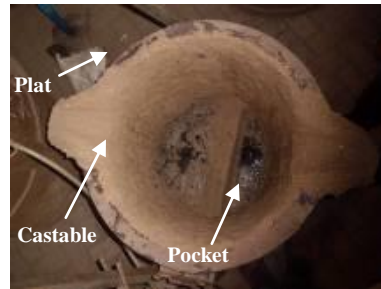
Sebagai bahan *refraktori* agar tahan panas *temperatur* tinggi, ruang bagian dalam ladle *sandwich* dilapisi *castabel* yang dibentuk dengan cara dicetak dan pada bagian bawah ladle dibuat *pocket* untuk wadah *magnesium* dan *Inoculant* seperti yang ditunjukkan Gambar 6.

2.5 Proses Mg Treatment

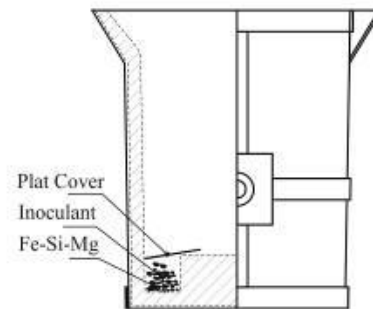
Proses *Mg treatment* adalah proses penambahan unsur *magnesium (Mg)* ke dalam cairan [1]. *magnesium (Mg)* selalu bereaksi dengan S, O, dan Si dari bahan *castabel* sehingga penambahan *magnesium (Mg)* harus memperhitungkan prosentase *magnesium (Mg)* yang akan hilang karena reaksi tersebut, sisa *magnesium (Mg)* setelah reaksi (*Mg-rest*) pada saat cairan logam dituangkan ke cetakan diharapkan 0,01% s/d 0,02% agar kualitas pembulatan bisa optimal [4].

Magnesium (Mg) adalah unsur terkuat untuk *degenerasi* grafit menjadi matrik bulat, akan tetapi *magnesium (Mg)* tidak bisa secara individu ditambahkan pada cairan besi karena *magnesium (Mg)* merupakan pembentuk karbida, sehingga berpeluang terjadinya *ledeburit*, *magnesium (Mg)* biasanya tidak berdiri sendiri, akan tetapi selalu dipadukan dengan unsur lain contohnya dipadukan dengan Si menjadi Fe-Si- Mg[3][21].

Metode *sandwich* adalah metode yang paling sederhana konstruksinya, mudah dalam pembuatan dan perawatan alatnya, lebih sedikit unsur *magnesium (Mg)* yang hilang terbakar menjadi terak [1]. Konstruksi ladle *sandwich* bagian bawah terdapat *pocket* untuk sebagai wadah *magnesium (Mg)* dan *Inoculant*, pada saat *tapping* dari tanur diatas *pocket* harus ditutup plat seperti yang ditunjukkan Gambar 7 yang bertujuan agar cairan yang mancur dari tanur tidak langsung jatuh menabrak *magnesium (Mg)* dan *Inoculant* sehingga hanyut mengambang akan tetapi tetap dibawah bereaksi membuat grafit bulat. Jumlah pemberian *magnesium (Mg)* dan *inoculant* pada tiap variasi ladle baik ladle biasa atau ladle *sandwich* adalah jumlah Fe-Si-Mg 5,4kg dan inoculant 1,8kg.



Gambar 6. *Pocket* untuk *magnesium (Mg)* dan *Inoculant*



Gambar 7. *Pocket* penempatan Fe-Si-Mg

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian komposisi kimia

Dalam pencapaian kualitas pembuatan FCD 400 ada standard yang harus dicapai baik dari segi komposisi kimia, struktur mikro atau kemampuan mekaniknya. Nilai standard pengujian seperti yang ditunjukkan Tabel 1 merupakan nilai acuan target yang harusnya dicapai untuk pembuatan FCD 400.

Pengambilan cairan untuk diuji komposisi kimia dilakukan tiga kali yaitu pada tanur sebelum dilakukan *Mg treatment*, pada ladle biasa sesudah dilakukan *Mg treatment* dan ladle *sandwich* setelah dilakukan *Mg Treatment*. Table 2 menunjukkan hasil pengujian komposisi kimia dengan *spectrometer*. Dari Tabel 2 hasil komposisi kimia pada tiap pengambilan ketiga-tiganya nilainya masih pada daerah toleransi standard, akan tetapi nilainya *fluktuatif* pada setiap pengambilan, mungkin dikarenakan adanya dampak reaksi antar unsur ketika dilakukan penambahan unsur yang dimasukkan dan memulai *berdifusi* dengan cairan logam.

Tabel 1. Standard FCD 400

No	Standar	Keterangan
1	Komposisi	C : 3,4 - 3,9%
		Si : 2,2 - 2,8%
		Mn : 0,3% Max.
		P : 0,1% max.
		S : 0,02% max.
		Mg : 0,03 - 0,05%
2	Struktur Mikro	Nodulariti : 75 %
		Perlite : 15% min.
		Cementit : 3% max.
3	Kuat Tarik	Strength 400 MPa Elongasi 10% min.
4	Kekerasan (HB)	HB 121-212

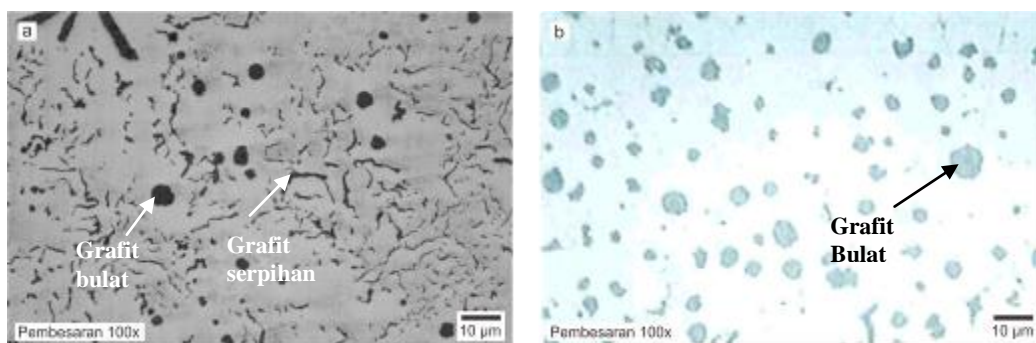
Tabel 2. Hasil Komposisi kimia

Unsur	Standard	Non Mg Treatment %	Mg Treatment %	
			Ladel biasa	Ladel sandwich
Carbon	3,4-3,9	3,49	3,10	3,52
Silicon	2,2-2,8	2,48	2,04	2,60
Mangan	< 0,3	0,28	0,85	0,28
Phospor	<0,1	0,07	0,06	0,07
Sulfur	<0,02	0,01	0,30	0,018
Magnesium			0,12	0,053

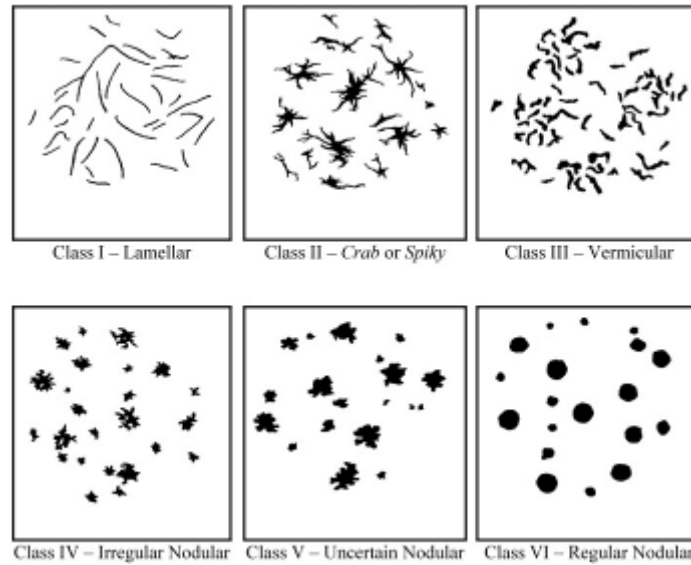
3.2 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan terhadap specimen uji yang dituang (*pouring*) dengan menggunakan ladel biasa dan ladel *sandwich*, berikut adalah hasil struktur mikro nya. Dari Gambar 8 (a) dapat dilihat bahwa hasil dari *mg treatment* dengan ladel biasa serpihan grafit masih banyak terjadi. Kemungkinan besar *magnesium* (Mg) tidak maksimal bereaksi di dalam cairan akan tetapi mengapung dan membentuk terak sehingga tingkat pembulatan rendah, maka sebagian masih berbentuk serpihan grafit. Berdasarkan klasifikasi secara visual berdasarkan standard ISO 945-1 grafit pada Gambar 9, yang terbentuk rata-rata kelompok III (*vermicular*) dan hanya sedikit grafit kelompok VI (*regular nodular*) [25]. Sedangkan dengan ladel *sandwich* dari Gambar 8 (b) dapat dilihat pembulatan grafit sangat bagus dan hampir sempurna, apabila dihubungkan dengan hasil komposisi kimia pada Tabel 2 nilai unsur kimia *Silicon* (Si) pada ladel *sandwich* lebih tinggi, sedangkan Si adalah sebagai promote inti dalam pembentukan grafit, didalam besi melakukan *dekomposisi* karbida menjadi besi dan grafit $Fe_3C \xrightarrow{Si} 3Fe + C$ (grafit), karbon bersama silikon apabila membeku bersama membentuk grafit (*grafitisasi*). Berdasarkan klasifikasi secara visual berdasarkan standard ISO 945-1 pada Gambar 9, grafit yang terbentuk adalah grafit kelompok VI (*regular nodular*) [25]. Sedangkan Sebagai pembanding persentase tingkat pembulatan grafit dapat dilihat pada Gambar 15.

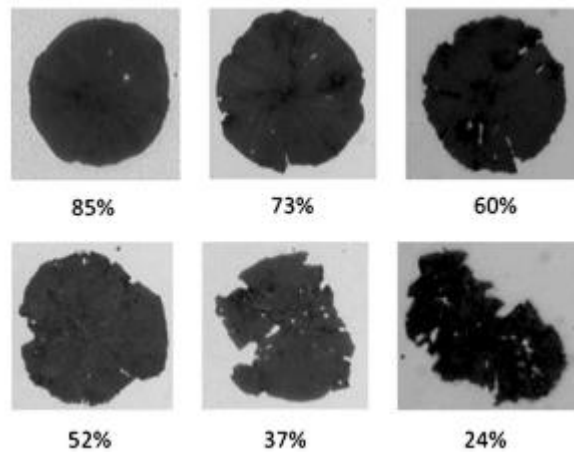
Apabila membandingkan Gambar 8a dan Gambar 8b dengan Gambar 10 *persentase* pembulatan yang terjadi adalah diatas 73% dibawah 85% (pembulatan hampir sempurna). Jumlah persentase susunan sebaran distribusi grafit pada mikrostruktur hanya sekitar 10-15% seperti Gambar 8a dan Gambar 8b, hanya saja *morfologi* bentuknya berbeda, pada Gambar 8a grafit yang berbentuk bulat hanya ± 4% dan ± 10 % berbentuk grafit serpihan, sedang pada Gambar 8b grafit berbentuk bulat ± 12% dan yang ± 2% grafit berbentuk serpihan.



a b
Gambar 8. Struktur mikro (a) ladel biasa (b) ladel *sandwich*



Gambar 9. Class mikrostruktur ISO 945-1



Gambar 10. Nilai persentase pembulatan dihitung dengan model matematik [23]

3.3 Pengujian Kuat Tarik

Tabel 3 menunjukkan perbandingan hasil pengujian kuat tarik dengan ladel *sandwich* dengan ladel biasa, kuat tarik ladel *sandwich* lebih tinggi dan elongasi juga lebih tinggi. Pada Gambar 8a struktur mikro pada ladel biasa dipenuhi grafit serpih sehingga ketika diuji kuat tarik pada grafit-grafit serpih itu bisa menjadi pemicu terjadinya regangan hingga terjadi patahan, sedang pada Gambar 8b struktur mikro pada ladel *sandwich* permukaan strukturnya sebagian besar adalah *ferit* sehingga elongasi lebih tinggi dan matrik grafitnya bulat hampir sempurna maka kuat tariknya lebih tinggi.

Tabel 3. Hasil Uji Kuat Tarik

Nama	Yield strenght	Tensile strenght	Elongation
Units	N/mm ²	N/mm ²	%
Ladel biasa	205,1	310,2	8,51
Ladel Sandwich	269,8	429,59	18,82

3.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode *hardness Vickers* dan dikonversikan ke dalam *hardness brinell*. Standard yang dipakai adalah ASTM E 92-82 yaitu menggunakan mesin uji kekerasan dengan indentor yang berbentuk piramida dengan sudut kemiringan 136° dan pembebanan sebesar 1 kgf hingga 120 kgf [17]. Tabel 4 menunjukkan hasil uji kekerasan untuk ladel *sandwich* kekerasannya lebih tinggi dari uji kekerasan ladel biasa. Apabila dihubungkan dengan Tabel 3 hasil uji kuat Tarik, kuat tarik dan kekerasan besi cor selalu berbanding lurus, maka ketika kuat tarik meningkat pasti kekerasan juga akan meningkat. Apabila dihubungkan dengan Gambar 8a dan 8b Gambar struktur mikro, bentuk struktur mikro Gambar 8a hampir di semua permukaan tersebar grafit serpih sehingga ketika pengujian kekerasan *indentor* uji menekan grafit, sedang Gambar 8b cenderung lebih bersih dari grafit serpih dan struktur *ferrit* lebih dominan sehingga ketika menguji kekerasan *indentor* uji menekan *ferrit*, sedangkan tingkat kekerasan *grafit* lebih rendah *ferrit* [26].

Tabel 4. Hasil uji kekerasan

Nama	<i>Vickers HV</i>		<i>Brinels HB</i>	
	<i>range</i>	<i>average</i>	<i>range</i>	<i>average</i>
Ladel biasa	140-160	150,1	120-150	139,6
Ladel <i>Sandwich</i>	180- 190	188,5	171- 181	178

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian perbaikan *degenerasi* grafit dalam pembuatan FCD 400 dari metode *magnesium treatment* menggunakan metode ladel biasa ke metode ladel *sandwich* dapat disimpulkan:

1. *Degenerasi* grafit dari bentuk serpihan menjadi bulat dengan metode ladel *sandwich* lebih baik dari metode ladel biasa.
2. Hasil uji kuat Tarik meningkat dari $310,2 \text{ N/mm}^2$ menjadi $429,59 \text{ N/mm}^2$ dan elongasi bertambah dari 8,51% menjadi 18,82 % kekerasan meningkat dari 139,6 HB menjadi 176 HB.
3. Dengan metode ladel biasa tidak bisa disebut FCD 400 karena kuat Tarik tidak bisa mencapai minimal 400 N/mm^2 .

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Ghosh, "Production aspects of spheroidal graphite iron," *CAFP*, pp. 38–51, 2008, [Online]. Available: <http://eprints.nmlindia.org/5869/1/38-51.PDF>
- [2] J. H. William Smith, *Foundations of Materials Science and Engineering*, 6th ed. Florida: McGraw-Hill Book Co., 2003.
- [3] S. Swain, "Effect of Chemistry and Processing Variables on the Mechanical Properties of Thin-wall Ductile Iron Castings," National Institute Of Technology Rourkela, 2008. [Online]. Available: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/1562/>
- [4] R. S. R. Widodo, "Kaji Eksperimental Pengaruh Penahanan Cair Terhadap Pembentukan Grafit Bulat Pada Proses Pengecoran Besi Cor Nodular 700," *mesin ITB*, vol. XV, no. 3, p. 6, 2017.

- [5] U. Tewary *et al.*, “The Origin of Graphite Morphology in Cast Iron,” p. 37, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117660>.
- [6] Y. A. P. M. I. N. Choo, “Investigation Of Ductile Iron In Mold Treatment Process Parameter,” University Malaysia Pahang, 2009.
- [7] S. Kim, S. L. Cockcroft, A. M. Omran, and H. Hwang, “Mechanical, wear and heat exposure properties of compacted graphite cast iron at elevated temperatures,” *J. Alloys Compd.*, vol. 487, no. 1–2, pp. 253–257, 2009, doi: 10.1016/j.jallcom.2009.07.098.
- [8] Sutyoko, Suyitno, M. Mahardika, and A. Syamsudin, “Prediction of Shrinkage Porosity in Femoral Stem of Titanium Investment Casting,” *Arch. Foundry Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 157–162, 2016, doi: 10.1515/afe-2016-0102.
- [9] N. S. Tiedje, “Solidification, processing and properties of ductile cast iron,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 5, pp. 505–514, 2010, doi: 10.1179/026708310X12668415533649.
- [10] Muhammad nur hidajatullah, “Pengaruh Kandungan Tembaga terhadap Struktur Mikro Besi Cor Nodular untuk Sidecore,” in *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Terapan SV UGM 2014*, 2014, p. 11.
- [11] D. M. Stefanescu, G. Alonso, P. Larrañaga, E. De la Fuente, and R. Suarez, “A Comparative Study of Graphite Growth in Cast Iron and in Analogous Systems,” *Int. J. Met.*, vol. 12, no. 4, pp. 722–752, 2018, doi: 10.1007/s40962-017-0204-1.
- [12] A. Kumar Gupta, D. Boruah, N. Suresh, N. Kamal, and A. K. Singh, “Preparation effect of mould systems on microstructure and mechanical properties of spheroidised graphite iron,” *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 6, no. 4, pp. 68–73, 2016, [Online]. Available: www.ijera.com
- [13] S. Si, M. Si, and D. Febriantoro, “Pengaruh Jumlah TDCR 5 Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Pada Pembuatan Besi Cor Nodular FCD 450 (Produk Elastic Shoulder),” vol. 450, pp. 1–7.
- [14] Japan Industrial Standard JIS-G5502: 2001, *Spheroidal graphite iron castings*. Tokyo: Japan Standard Association JSA, 2001.
- [15] ASTM, “ASTM E415-14: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry,” no. April 1999, pp. 1–13, 2014, doi: 10.1520/E0415-15.2.
- [16] A. Interanational, “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens 1,” *ASTM Int.*, vol. 03.01, no. July, pp. 1–12, 2012, doi: 10.1520/E0003-11R17.1.
- [17] ASTM E92-82, “Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials,” *ASTM Int.*, vol. 82, no. Reapproved 2003, pp. 1–9, 2004.
- [18] ASTM E8, “ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1,” *Annu. B. ASTM Stand.* 4, no. C, pp. 1–27, 2010, doi: 10.1520/E0008.
- [19] M. Venkataramana, “Parametric Optimisation of Carbon - Dioxide Moulding Process for Maximum Mold Hardness,” *Int. J. Eng. Res.*, vol. V5, no. 01, pp. 103–107, 2016, doi: 10.17577/ijertv5is010107.
- [20] John R. Brown, *Foseco Ferrous Foundryman’s Handbook*, 11th ed. Oxford: Foseco International Ltd, 2000.
- [21] Y. A. P. M. I. N. Choo, “INVESTIGATION OF DUCTILE IRON IN MOLD

TREATMENT PROCESS PARAMETER,” UNIVERSITY MALAYSIA PAHANG, 2009.

- [22] J. Olofsson, K. Salomonsson, and I. L. Svensson, “Modelling and simulations of ductile iron solidification- induced variations in mechanical behaviour on component and microstructural level,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 84, no. 1, 2015, doi: 10.1088/1757-899X/84/1/012026.
- [23] S. C. Murcia, E. A. Ossa, and D. J. Celentano, “Nodule evolution of ductile cast iron during solidification,” *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 45, no. 2, pp. 707–718, 2014, doi: 10.1007/s11663-013-9979-5.
- [24] R Widodo, “besi cor nodular,” *Blog Hapli*. <https://hapli.wordpress.com/forum-ferro/besi-cor-nodular/>
- [25] International Standard Organization, “ISO 945-1-2019,” in *International Standard*, 2009, p. 47.
- [26] N. F. D. S. Guterres, Rusnaldy, A. Widodo, and A. Syamsudin, “Investigate Temperature Preheating on the Chill Plate to Identify Surface Characteristic on the Ductile Iron by Sand Casting,” *Int. J. Eng. Mater. Manuf.*, vol. 6, no. 3, pp. 141–151, 2021, doi: 10.26776/ijemm.06.03.2021.05.