

Pengaruh *Mg Treatment* Terhadap Pembuatan *Compacted Graphite (Cg) Cast Iron* Dengan Ketebalan Sampel Uji Yang Bervariasi

M. Brayendra Sures¹, Soedihono, Dipl.Ing.,MT.², Wiwik Purwadi, Dipl.Ing.,MT.²

¹ Mahasiswa Jurusan Teknologi Rekayasa Manufaktur, konsentrasi Teknologi Foundry, Politeknik Manufaktur Bandung, Jalan Kanayakan no.21 Kota Bandung, -40135, Indonesia. Hp. 081224887778.

² Dosen Jurusan Teknik Pengecoran Logam, Politeknik Manufaktur Bandung, Jalan Kanayakan no.21, kota Bandung – 40135.

*Email: brayendrasures13@gmail.com

INFO ARTIKEL

ABSTRAK

Article History:

Received

Accepted

Available online

Kata Kunci:

Compacted Graphite (CG)

Mg Treatment

Mg Rest

Ketebalan



Compacted Graphite Iron (CGI) merupakan besi cor yang memiliki grafit berbentuk cacing yang saling berhubungan dengan ujung grafit berbentuk radius, biasa disebut besi cor vermicular. Material CGI memiliki keunggulan tersendiri yaitu memiliki sifat diantara besi cor kelabu dan nodular yang memiliki kekuatan, ketangguhan, konduktivitas termal, castabilitas, dan *machinability* yang lebih baik, serta mampu meredam getaran, dimana sifat ini merupakan gabungan dari besi cor kelabu dan nodular, sehingga material ini lebih baik diaplikasikan untuk produk seperti *engine block*, *cylinder head*, *exhaust manifold*, *steering pump*, *break drum*, dan lain-lain. Salah satu faktor yang berpengaruh besar terhadap pembentukan CGI adalah *Magnesium Treatment (Mg Treatment)* dan ketebalan benda cor, yang mana *Mg Treatment* menghasilkan *Mg Rest (Mg sisa)* dan ketebalan benda cor berpengaruh terhadap laju pendinginan. Spesifikasi CGI dengan kualitas baik akan menghasilkan persentase *Compacted Graphite (CG)* $\geq 80\%$, grafit nodular (*spheroidal*) $\leq 20\%$, tanpa grafit lamelar (*flake*). Untuk mengetahui pengaruh dari *Mg Treatment* dan ketebalan benda cor terhadap pembentukan *Compacted Graphite* maka dilakukan *eksperiment* pembuatan material CGI dengan variasi nilai *Mg rest* 0.01%, 0.02% dan 0.03% dengan ketebalan sampel uji 5mm, 15mm, dan 30mm. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian komposisi menggunakan OES (*Optical Emission Spectrometry*) dan pengujian bentuk grafit menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. Dari penelitian ini didapatkan komposisi *Mg Rest* aktual yaitu 0.017%, 0,02%, dan 0,027%. Berdasarkan penelitian ini didapatkan persentase CG paling banyak pada *Mg Rest* 0,017% dengan *range* 41% s/d 83%, kemudian *Mg Rest* 0,02% dengan *range* 32% s/d 74%, dan kemudian *Mg Rest* 0,028% dengan *range* 28% s/d 51%. *Range* persentase CG yang didapatkan cukup besar, disebabkan karena adanya pengaruh dari ketebalan sampel uji, dimana peningkatan ketebalan sampel uji berbanding lurus dengan peningkatan persentase CG yang terbentuk dan berbanding terbalik dengan peningkatan persentase *spheroidal graphite* yang terbentuk.

1. PENDAHULUAN

Compacted Graphite Iron (CGI) termasuk kedalam golongan besi cor bergrafit yang biasa disebut juga dengan besi cor Vermicular, dimana besi cor ini memiliki bentuk grafit seperti cacing, bentuknya hampir mirip dengan grafit lamelar akan tetapi memiliki dimensi yang lebih pendek dan juga tebal serta memiliki ujung berbentuk radius yang termasuk kedalam grafit type IV berdasarkan ASTM A 247. Pada umumnya Compacted Graphite Iron tidak memiliki flake graphite (FG), dalam struktur hanya memiliki grafit spheroidal (SG) kurang dari 20% dan 80% dari semua grafit adalah CG (vermikular) [1].

Compacted Graphite Iron (CGI) memiliki keunggulan tersendiri, dimana CGI ini memiliki sifat diantara 2 material yaitu diantara *spheroidal graphite iron* dan *flake graphite iron* sehingga material CGI ini dapat mengantisipasi permasalahan yang ada pada *spheroidal graphite iron* dan *flake graphite iron* karena CGI memiliki sifat mekanik lebih dekat dengan besi cor nodular (*spheroidal graphite iron*) sedangkan memiliki sifat fisik (ekspansi, konduktivitas), ketahanan suhu tinggi (*thermal fatigue, thermal shock*) yang lebih dekat dengan besi cor kelabu (*flake graphite iron*)[2]. sehingga material ini dapat diaplikasikan untuk produk seperti *engine block, cylinder head, exhaust manifold, steering pump, break drum*, dan lain-lain [3].

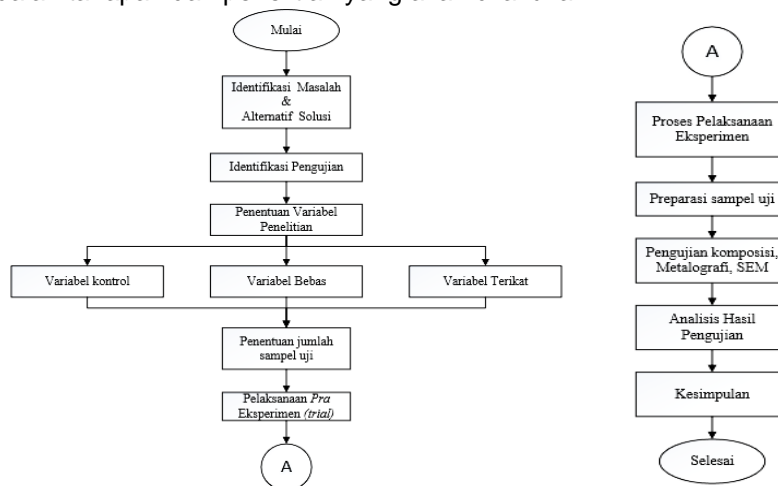
Walaupun memiliki keunggulan-keunggulan tersendiri dibanding material *Spheroidal Graphite Iron* dan *Flake Graphite Iron*, material *Compacted Graphite Iron* (CGI) masih jarang diproduksi masal dikarenakan proses pembuatan *Compacted Graphite Iron* (CGI) yang sesuai spesifikasinya masih sulit didapatkan yang disebabkan oleh banyak faktor yang berpengaruh, salah satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap pembuatan *Compacted Graphite Iron* (CGI) adalah bentuk grafit yang dihasilkan.

Bentuk grafit yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh proses *Mg-Treatment* dan laju pendinginan (*cooling rate*)[4]. Proses *Mg-treatment* akan menghasilkan *Mg Rest* (Magnesium Sisa), yang mana persentase *Mg Rest* (Mg sisa) sangat menentukan persentase *Compacted Graphite* yang terbentuk. Kemudian laju pendinginan (*cooling rate*) juga berpengaruh penting terhadap pembentukan *Compacted Graphite Iron* (CGI) yang dapat dilihat dari ketebalan produk coran yang dibuat. Berdasarkan literatur dari *ASM Metal Handbook's Volume 15* persentase *Compacted Graphite* didapatkan baru berdasarkan variasi *Mg Rest* yang dihasilkan. Dalam penelitian ini akan diberi pembaruan penelitian dengan menambahkan variasi dari ketebalan. Dengan demikian dilakukanlah penelitian ini dengan judul "Pengaruh *Mg-Treatment* Terhadap Pembuatan *Compacted Graphite* (CG) Cast Iron Dengan Ketebalan Sampel Uji Yang Bervariasi" yang bertujuan dapat menganalisis pengaruh *Mg Treatment* berdasarkan variasi *Mg Rest* (Mg sisa) yang diberikan terhadap pembentukan *Compacted Graphite* (CG) dan dapat menganalisis pengaruh ketebalan sampel uji terhadap pembentukan *Compacted Graphite* (CG) yang dihasilkan, sehingga dengan penelitian ini dapat membuat *Compacted Graphite* (CG) Cast Iron sesuai dengan spesifikasinya.

Dalam penelitian ini material yang digunakan yaitu *Compacted Graphite Iron* (CGI) dengan focus mendapatkan bentuk grafit vermicular berdasarkan variasi ketebalan sampel uji dan variasi *Mg Rest* yang dihasilkan dari proses *Mg Treatment*, dimana variasi *Mg Rest* yang diinginkan yaitu 0,01%, 0,02%, & 0,03%, dan variasi ketebalan yaitu 5mm, 15mm, dan 30mm.

2. METODE PENELITIAN

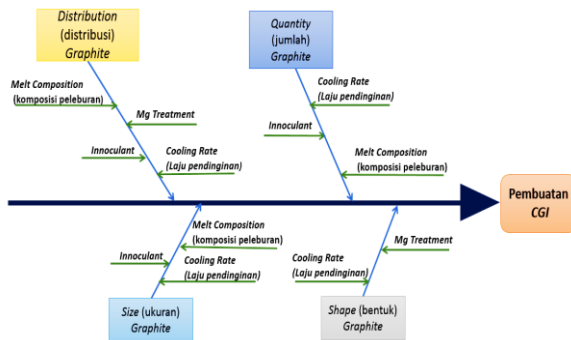
Untuk mencapai tujuan dari penelitian ini, maka dilakukan proses penelitian tahap demi tahap, berikut adalah tahapan dari penelitian yang akan dilakukan :



Gambar 1 Diagram alir penelitian.

2.1 Identifikasi Masalah & Alternatif Solusi

Permasalahan yang terjadi pada penelitian ini adalah pembuatan *Compacted Graphite Cast Iron*, yang akan ditunjukkan dalam bentuk diagram *fishbone* dibawah ini:



Gambar 2 Diagram *fishbone* untuk identifikasi dan alternatif solusi penelitian

Dalam pembuatan material CGI dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti

yang terlihat pada gambar 2 diagram *fishbone*, dimana salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap pembuatan CGI yaitu bentuk grafit yang dihasilkan. Berdasarkan diagram *fishbone* diatas bentuk grafit dipengaruhi oleh *Mg Treatment* dan laju pendinginan (*Cooling Rate*). Dengan demikian dilakukanlah penelitian pengaruh *Mg Treatment* dan laju pendinginan (*Cooling Rate*) yang diwakili oleh ketebalan sampel uji yang bervariasi, sehingga judul penelitian ini adalah “Pengaruh *Mg Treatment* Terhadap Pembuatan *Compacted Graphite* (CG) *Cast Iron* Dengan Ketebalan Sampel Uji Yang Bervariasi”.

2.2 Penentuan Variabel Penelitian

Terdapat 3 variabel yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini, yang mana variabel tersebut adalah sebagai berikut:

• Variabel Kontrol

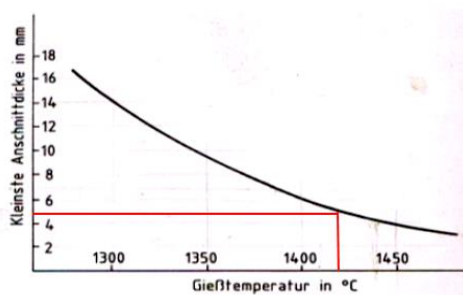
variabel kontrol adalah variabel yang dikendalikan atau dibuat konstan sehingga hubungan variabel bebas terhadap variabel terikat tidak terpengaruh oleh faktor luar yang tidak teliti. Variabel kontrol pada penelitian ini terdiri dari 7 variabel yaitu:

I. Penambahan *inoculant*

Berdasarkan literatur dari *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook* hlm.86 penambahan *inoculant* untuk material CGI berkisar dari 0,2 s/d 0,5% dari berat cairan[5]. Berdasarkan *trial* (*pra eksperiment*) didapatkan persentase penambahan *inoculant* yang paling baik adalah 0,35% dari berat cairan, sehingga penambahan *inoculant* untuk 60 kg cairan logam CGI adalah 210 gram.

II. Suhu *Taping* dan Suhu *Pouring*

Berdasarkan literature dari *Giesserei Lexikon* halahlm.160, temperatur pouring dilihat berdasarkan ketebalan minimum dari benda coran seperti grafik dibawah ini,



Gambar 3 Grafik temperatur tuang terhadap ketebalan dinding coran[6].

Ketebalan dinding minimum coran pada penelitian ini adalah 5mm, berdasarkan grafik diatas terlihat pada ketebalan 5mm temperatur tuang (*pouring*) adalah $\pm 1425^{\circ}\text{C}$. berdasarkan *trial* (*pra eksperiment*) yang dilakukan, penurunan suhu selama proses *Mg Treatment* dengan holding time 2 menit adalah 100°C sehingga suhu *taping* untuk penelitian ini adalah $\pm 1425^{\circ}\text{C} + 100^{\circ}\text{C} = \pm 1525^{\circ}\text{C}$.

III. *Carbon Equivalent* (CE)

Berdasarkan literatur *ASM Metal Handbook Vol 15: Casting* hlm.1456 menyatakan bahwa *Carbon Equivalent* (CE) pada CGI ditunjukkan pada CE 3,7 s/d 4,7. Pada benda dengan tebal 10-40 mm, komposisi *eutektik* (CE = 4.3%) dianjurkan untuk mendapatkan kekuatan *casting* yang paling optimum [2], dengan demikian dalam penelitian ini target CE yang akan digunakan adalah 4,3.

IV. *Fading Time* (waktu tunggu)

Berdasarkan literatur dari jurnal dengan judul “*Cast Iron: Compacted Graphite*” (oleh Marcin Gorny) mencantumkan pembentukan *compacted Graphite* yang baik terjadi pada *fading time* 2, 3, & 4 menit [7].

Berdasarkan *trial* (pra *eksperiment*) yang disesuaikan dengan lingkungan bengkel pengecoran logam POLMAN Bandung, *fading time* terbaik dilakukan dalam waktu 2 menit setelah reaksi *Mg Treatment*.

V. *Layout* Coran Dan Dimensi Sistem Saluran & Penambah

Untuk memperkecil resiko ketidak akuratan hasil penelitian maka *Layout* coran, dimensi dan bentuk sistem saluran serta penambah dibuat konstan sesuai perhitungan.

VI. Proses Pencetakan Dan Pasir Cetak Yang Digunakan

Ukuran cetakan yang digunakan untuk belahan bawah adalah 580 x 450 x 100 mm, rangka cetak atas dengan ukuran 580 x 450x 150 mm, proses pencetakan dilakukan menggunakan *rammer* (penumbuk mesin manual), dan pasir cetak yang digunakan menggunakan pasir cetak *greensand*.

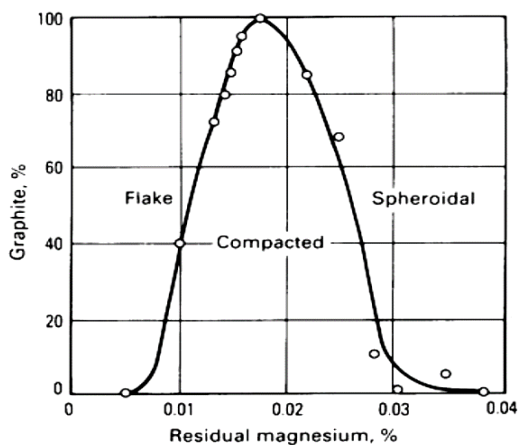
VII. Tanur dan ladell yang digunakan

Tanur yang digunakan pada penelitian ini yaitu tanur induksi dengan kapasitas 250 kg yang ada dibengkel Pengecoran Logam Polman Bandung, kemudian untuk ladell yang digunakan yaitu ladell tipe *Lip Pouring* dengan kapasitas 60 kg dengan bagian bawah ladell dibuat *bath* untuk meletakkan bahan *Mg Treatment*.

• **Variabel Bebas**

I. *Mg Rest* yang dihasilkan

Mg Rest (*Mg sisa*) merupakan residual Magnesium dari proses *Mg Treatment*. Berdasarkan literatur pada ASM Metal HandBook Vol.15, hal.1461 pembentukan compacted graphite berdasarkan *Mg Rest* (*Mg sisa*) yang dihasilkan membentuk grafik kurva parabola negatif (-) dengan nilai range 0,06% s/d 0,033% dan puncak dari kurva dihasilkan pada *Mg Rest* (*Mg sisa*) 0,017% [2].



Gambar 4 Pengaruh *Mg Rest* (*Mg Sisa*) terhadap bentuk grafit yang dihasilkan

Sedangkan berdasarkan literatur Foseco Ferrous Foundryman's Handbook pembentukan Compacted Graphite dimulai dari kandungan *Mg Rest* (*Mg sisa*) 0,01% s/d 0,03% [5].

Berdasarkan literatur yang dilihat *range Mg Rest* (*Mg sisa*) tidak jauh berbeda, dengan demikian untuk mendapatkan grafik yang ideal dalam penelitian ini maka diambilah 3 variasi *Mg Rest* (*Mg sisa*) untuk penelitian ini yaitu dengan 0.01, 0.02, dan 0,03%. Berdasarkan hasil *trial* dan perhitungan yang dilakukan, untuk mendapatkan *Mg Rest* (*Mg sisa*) 0.01, 0.02, dan 0,03% maka pemasukan bahan *Mg treatment* (*FeSiMg* dengan kadar *Mg* 6,08%) adalah 230 gram, 460 gram, dan 690 gram.

II. Ketebalan sampel uji

Ketebalan benda coran sangat mempengaruhi *cooling rate* dari pengecoran besi cor sehingga dapat mempengaruhi bentuk grafit yang dihasilkan [8][9].

Penentuan variasi ketebalan sampel uji dilakukan berdasarkan ketebalan casting rata-rata yang sering digunakan pada material *compacted graphite iron (CGI)* seperti *engine block*, *cylinder head*, *exhaust manifold*, *steering pump*, *break drum*, dan lain-lain yang mana ketebalannya antara 5 s/d 30 mm. Dengan demikian ditetapkanlah variasi ketebalan sampel uji yaitu 5, 15, dan 30 mm.

• **Variabel Terikat**

Variabel terikat dari penelitian ini adalah pembuatan *Compacted Graphite (CG) Cast Iron* atau pembuatan Vermikular Grafit.

2.3 Penentuan Jumlah Sampel Uji

Penentuan jumlah sampel uji pada penelitian ini menggunakan metode *Taguchi* pemilihan *orthogonal array* [10]. Pada penelitian ini terdapat dua faktor atau parameter yaitu *Mg Rest* (*Mg sisa*) dan ketebalan sampel uji, yang mana masing-masing faktor tersebut memiliki 3 level. Berdasarkan perhitungan derajat kebebasan (*degree of freedom*) didapatkan pilihan pilihan *Orthogonal array* L9(3²) dengan jumlah sampel uji sebanyak 9 sampel uji seperti tabel dibawah ini:

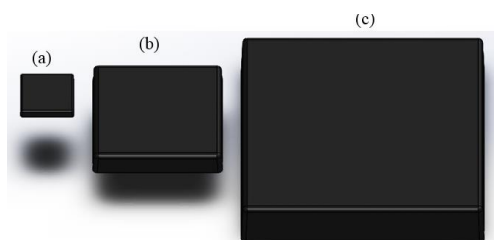
Tabel 1 Orthogonal Array Penelitian

Jumlah Sampel	Faktor	
	Mg Rest (%)	Ketebalan Sampel Uji (mm)
1	0,01	5
2	0,01	15
3	0,01	30
4	0,02	5
5	0,02	15
6	0,02	30
7	0,03	5
8	0,03	15
9	0,03	30

2.4 Pelaksanaan Eksperimen

Proses pelaksanaan eksperimen dilakukan dalam beberapa tahapan, yang mana tahapan tersebut dimulai dari Perancangan pola dan coran. Pada perancangan pola dan coran untuk penelitian ini meliputi penentuan dimensi sampel uji, penentuan target komposisi & perhitungan penambah, perhitungan sistem saluran, dan layout coran sampel uji CGI.

Sampel uji dari penelitian CGI ini terdiri dari 3 sampel uji dengan ketebalan sampel uji masing-masing adalah 5 mm, 15 mm, dan 30 mm, Sampel uji dibuat berbentuk plat. berdasarkan literatur oleh R. Wlodawer dengan judul “*Directional solidification of steel casting*” sampel uji dengan bentuk plat, maka panjang sisi-sisinya lebih besar sama dengan (\geq) 5 X tebal sampel uji[11]. Pada penelitian ini dimensi panjang dan lebar dari sampel uji adalah(5x tebal)+10, sehingga dimensi sampel uji untuk ketebalan 5mm = 35x35x5 mm (modul 0,2 cm), sampel uji tebal 15mm = 85x85x15 mm (modul 0,6 cm), dan sampel uji tebal 30mm = 160x160x30 mm (modul 1,1 cm).



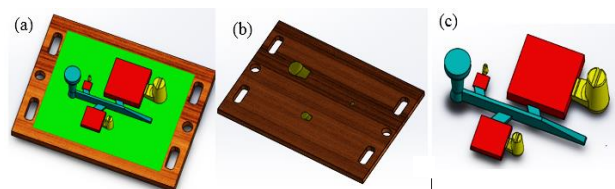
Gambar 5 Sampel uji (a) tebal 5mm, (b) tebal 15mm, (c) tebal 30mm

Kemudian dilakukan penentuan target komposisi dari penelitian seperti pada tabel dibawah ini:

Tabel 2 Komposisi CGI (ASM vol 1) dan komposisi target penelitian

Material	C (%)	SI (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	CE target
ASM Vol 1	2,5 - 4	1 - 3	0,2 - 1	0,01 - 0,1	0,01 - 0,03 (0,07-0,12)	3,7 - 4,7
CGI	Target 1	3,50	2,4	0,4	0,01	4,3
	Target 2	3,45	2,55	0,4	0,01	
	Target 3	3,40	2,7	0,4	0,01	

Kemudian dilakukan perhitungan penambah dan sistem saluran, dimana perhitungan penambah dan sistem saluran dilakukan berdasarkan literature dari buku “Perancangan Coran Semester 4 & 5 Oleh Oyok Yudiyanto” dan “*Ductile Iron III Gating And Riser: QIT* oleh Stephen I Karsay” berikut adalah hasil perancangan pola dan coran dari pembuatan sampel uji CGI.



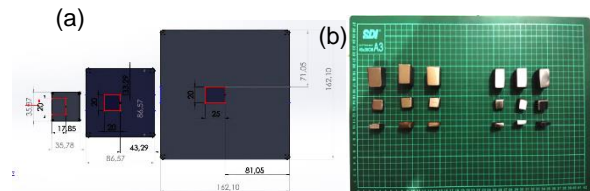
Gambar 6 Layout coran (a) bagian atas (b) bagian bawah & (c) design hasil coran dari sampel uji CGI

Kemudian dilakukan pembuatan pola, penambah serta sistem saluran. Setelah itu dilakukan pembuatan cetakan menggunakan pasir cetak greensand.

Kemudian dilakukan proses peleburan dan penuangan. Proses peleburan menggunakan tanur induksi kapasitas 250 kg, ladle yang digunakan ladle tipe *Lip Pouring* kapasitas 60 Kg, proses *taping* dilakukan sebanyak tiga kali sesuai dengan target komposisi yang sudah ditentukan, suhu *taping* dijaga $\pm 1525^{\circ}\text{C}$ dan suhu *pouring* dijaga $\pm 1425^{\circ}\text{C}$, pemasukan *inoculant* dilakukan saat proses *taping* dengan pemasukan sebanyak 210 gram/ 60kg cairan, proses *Mg Treatment* dilakukan di dalam ladle (menggunakan metode *sandwich*), pengambilan sampel uji spektro dilakukan sebanyak 3 kali di setiap ladle setelah proses *fading* selama 2 menit dari proses *Mg Treatment*, setelah pengambilan sampel uji spektro dilakukan proses *pouring* ke dalam cetakan.

2.5 Preparasi Pemotongan Sampel Uji

Preparasi pemotongan sampel uji untuk proses pengujian diambil pada bagian tengah dari benda sampel uji, dimana pada bagian tengah tersebut hanya dipengaruhi oleh 2 sisi pelepas panas yaitu bagian atas dan bawah, tidak dipengaruhi oleh sisi-sisi lainnya. Pemotongan sampel uji dilakukan menggunakan mesin gergaji potong berpendingin. Berikut gambar rencana pemotongan sampel uji dan hasil pemotongan sampel uji:



Gambar 7 (a) Rencana pemotongan dan (b) hasil pemotongan sampel uji untuk pengujian metalografi dan SEM

2.6 Pengujian Hasil Eksperimen

Pengujian yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah pengujian komposisi, pengujian metalografi dan pengujian SEM (*Scanning Elektron Mikroskopy*).

Pengujian komposisi dilakukan menggunakan mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*), pengujian ini dilakukan dengan tujuan validasi komposisi sampel uji dengan komposisi yang sudah ditargetkan berdasarkan *ASM Metal Handbook Vol. 1*, hal.21.

Pengujian metalografi dilakukan menggunakan mikroskop optik "Olympus" dengan tujuan untuk mengamati bentuk, distribusi, ukuran, dan jumlah grafit yang dihasilkan. Kemudian pengujian SEM dilakukan dengan tujuan validasi grafit yang dihasilkan (menghitung *length to thickness ratio*) dan analisis mekanisme pembentukan grafit yang dihasilkan.

3. DATA DAN ANALISIS

3.1 Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi kimia dari penelitian ini mengacu pada literatur dari *Asm Metal Handbook's Vol.1 Hlm.21*. Berikut adalah hasil pengujian komposisi kimia dari hasil penelitian yang disandingkan dengan komposisi material CGI berdasarkan *Asm Metal Handbook's Vol.1 Hlm.21* dan target komposisi yang sudah ditetapkan sebelumnya.

Tabel 3 Hasil pengujian komposisi sampel uji penelitian

Variasi	Parameter unsur						
	C %	Si %	CE	Mn %	P %	S %	Mg Rest %
Range komposisi (ASM Vol 1)	2,5 - 4	1 - 3	3,7-4,7	0,2 - 1	0,01 - 0,1	0,01 - 0,03 (0,07-0,12)	0,01 s/d 0,03
Target 1 (<i>Mgn</i> 230 gram)	3,50	2,4	4,3	0,4	0,01	0,01	0,01
Aktual target 1 (<i>Mgn</i> 230 gram)	3,31	2,45	4,13	0,23	0,011	0,009	0,017
Target 2 (<i>Mgn</i> 460 gram)	3,45	2,55	4,3	0,4	0,01	0,01	0,02
Aktual Target 2 (<i>Mgn</i> 460 gram)	3,38	2,58	4,25	0,23	0,01	0,01	0,02
Target 3 (<i>Mgn</i> 690 gram)	3,40	2,7	4,3	0,4	0,01	0,01	0,03
Aktual Target 3 (<i>Mgn</i> 690 gram)	3,39	2,83	4,33	0,24	0,01	0,0065	0,028

Berdasarkan tabel 3 hasil pengujian komposisi diatas dapat dilihat nilai aktual dari komposisi target 1, 2, dan 3 masuk kedalam range komposisi material CGI menurut *ASM Vol 1*, akan tetapi dilihat dari target komposisi masing-masing target ada sedikit perbedaan pada nilai karbon pada target 1 dan 2 dan aktual komposisi mangan yang lebih kecil dari pada yang ditargetkan.

Kandungan karbon pada aktual target 1 dan 2 didapat lebih kecil dikarenakan terjadi abnormal *losses* karbon saat proses pengecoran, dimana berdasarkan percobaan dan data dari bengkel Pengecoran Logam Polman Bandung *losses* karbon biasanya berkisar antara 10% s/d 14 % akan tetapi aktual *losses* yang terjadi adalah mencapai 17%, sehingga nilai karbon aktual lebih kecil daripada yang ditargetkan. Nilai karbon yang lebih kecil ini membuat aktual dari *Carbo Equivalent* (CE) lebih kecil dari pada yang ditargetkan (CE = 4,3) , akan tetapi nilai CE yang didapat tidak jauh dari nilai 4,3 sehingga jika dilihat dari diagram Fe3C tidak terlalu berpengaruh terhadap bentuk grafit yang dihasilkan. Kemudian nilai aktual dari komposisi mangan lebih kecil dari pada yang ditargetkan akan tetapi masih masuk kedalam *range* material CGI.

Sedangkan untuk *Mg Rest* yang dihasilkan, pada aktualnya untuk target 2 dan target 3 sesuai dengan yang diharapkan, akan tetapi untuk aktual target 1 tidak sesuai dengan yang diharapkan, dimana pada target 1 diharapkan *Mg Rest* 0,01% sedangkan aktualnya 0,017%, jika dihubungkan referensi ASM vol 15 halaman 1461, maka pada nilai 0,017 % *Mg Rest* akan menghasilkan persentase *Compacted Graphite* paling maksimal, sehingga pada penelitian ini kemungkinan grafik persentase pembentukan *Compacted Graphite* akan mulai dari puncak kemudian menurun terbentuknya *Compacted Graphite* seiring meningkatnya *Mg Rest* yang dihasilkan.

Magnesium saat proses pengecoran sebagian akan menguap keluar dan bereaksi dengan *surface aktif* menghasilkan MgS dan MgO, pada hasil komposisi yang didapatkan kadar sulfur (S) dalam cairan konstan akan tetapi kadar oksigen (O) dalam cairan tidak diketahui, dengan demikian dapat diperkirakan akibat dari perbedaan nilai *Mg Rest* yang diharapkan dengan *Mg Rest* aktual pada target 1 terjadi karena lebih sedikitnya magnesium yang menguap keluar atau unsur oksigen didalam cairan lebih sedikit sehingga Magnesium yang bereaksi dengan oksigen juga lebih sedikit, dengan demikian dapat menghasilkan *Mg Rest* yang lebih banyak dari pada yang ditargetkan.



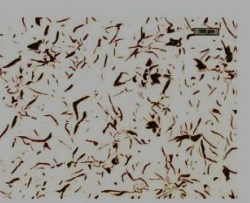
3.2 Pengujian Metalografi dan SEM

• Validasi Bentuk Grafit Yang Dihasilkan

Pembuatan material *Compacted Graphite Iron* (CGI) memiliki spesifikasi grafit yang dihasilkan yaitu menghasilkan grafit vermicular (*Compacted Graphite*) dan grafit bulat (*spheroidal graphite*) tanpa ada grafit lamelar (*flake graphite*). Jika dilihat dari perbesaran dibawah 200X bentuk grafit vermicular tidak jauh berbeda dengan grafit lamelar, perbedaannya adalah pada gambar 2 dimensi terlihat grafit vermicular memiliki dimensi yang lebih pendek dan ujung grafit berbentuk radius sedangkan grafit lamelar memiliki dimensi yang lebih panjang dan ujung grafit berbentuk meruncing.

Untuk mengetahui grafit yang dihasilkan pada penelitian yang dilakukan maka dilakukanlah validasi bentuk grafit yang dihasilkan dibandingkan dengan literatur, seperti berikut:

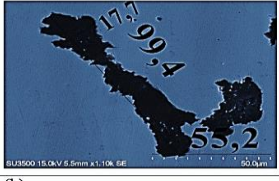
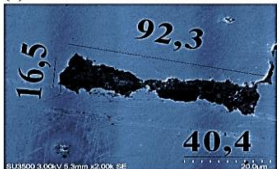
Tabel 4 Validasi bentuk grafit yang dihasilkan dengan literatur

		
(a) Gambar <i>Compacted Graphite</i> yang dihasilkan pada penelitian dengan <i>MgRest</i> 0,017 ketebalan 30mm	(b) Gambar <i>Compacted Graphite</i> . (sumber:Marcin Gorny. Cast iron: compacted graphite)[7]	(c) Gambar <i>flake graphite</i> . (sumber:Marcin Gorny. Cast iron: compacted graphite)[7]

Berdasarkan tabel 4 diatas dapat dilihat grafit yang dihasilkan pada penelitian ini (gambar a) lebih dekat bentuknya dengan grafit vermicular (*Compacted Graphite*) yang terlihat pada gambar (b) dibandingkan dengan grafit *lammelar* (*flake graphite*) pada gambar (c).

Untuk mendapatkan Validasi bentuk grafit yang lebih akurat maka dilakukanlah perhitungan *Length To Thickness Ratio*, dimana berdasarkan literatur dari ISO 16112:2006, *Compected* (vermicular) *graphite cast iron* dan dari literatur S Charoenvilaisiri; D.M Stefanoscu; R Ruxanda; T.S Piwonka "*Thin Wall Compacted Graphite Iron Casting*" menyatakan "nilai *Length To Thickness Ratio* untuk grafit vermikular bernilai antara 2 s/d 10." [12] [13].

Tabel 5 Validasi grafit yang dihasilkan dengan perhitungan *length to thickness*

Gambar Grafit Yang Dihasilkan (SEM)	Perhitungan <i>Length To Thickness Ratio</i>
(a) 	$\text{length to thickness ratio} = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}$ $L_{\max} = 99,4 \text{ mm}$ $L_{\min} = 17,7 \text{ mm}$ Maka, $\text{length to thickness ratio} = \frac{99,4 \text{ mm}}{17,7 \text{ mm}}$ $\text{length to thickness ratio} = 5,6$
(b) 	$\text{length to thickness ratio} = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}$ $L_{\max} = 92,3 \text{ mm}$ $L_{\min} = 16,5 \text{ mm}$ Maka, $\text{length to thickness ratio} = \frac{92,3 \text{ mm}}{16,5 \text{ mm}}$ $\text{length to thickness ratio} = 5,59$

Gambar dalam tabel 5 disamping diambil dari perwakilan gambar hasil pengujian SEM sampel uji penelitian, gambar (a) dan gambar (b) mewakili grafit rata-rata yang terbentuk. Berdasarkan hasil perhitungan *length to thickness ratio* gambar (a) dan (b) masuk kedalam grafit vermikular (*Compacted graphite*). Dengan demikian dapat dikatakan hasil grafit yang dihasilkan pada penelitian ini adalah grafit vermikular bukan grafit lamelar.

• Analisis Bentuk, Ukuran, Distribusi, Dan Jumlah Grafit Yang Dihasilkan

Berikut adalah hasil pengamatan bentuk, ukuran, distribusi, jumlah, dan persentase terbentuknya CG & SG grafit menggunakan mikroskop optik yang dilakukan pada setiap variasi *Mg Rest* dan ketebalan sampel uji pada perbesaran 100X.

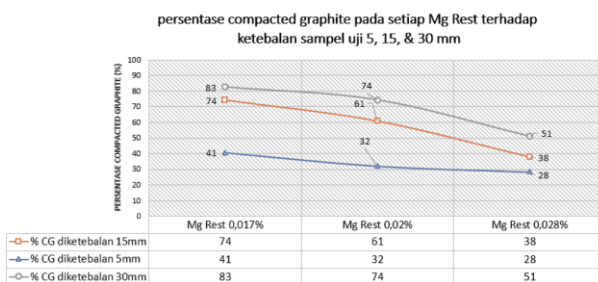
Tabel 6 Gambar grafit yang dihasilkan disetiap variasi *Mg Rest* & ketebalan sampel uji

Data 1			
	Ketebalan 5 mm	Ketebalan 15 mm	Ketebalan 30 mm
Mg Rest (Mg sisa) 0,017 %			
Mg Rest (Mg sisa) 0,02 %			
Mg Rest (Mg sisa) 0,028 %			
Data 2 (faktor keterulangan)			
	Ketebalan 5 mm	Ketebalan 15 mm	Ketebalan 30 mm
Mg Rest (Mg sisa) 0,017 %			
Mg Rest (Mg sisa) 0,02 %			
Mg Rest (Mg sisa) 0,02 %			
Mg Rest (Mg sisa) 0,028 %			

Tabel 7 hasil pengamatan dan perhitungan grafit disetiap variasi *Mg Rest* & ketebalan sampel uji

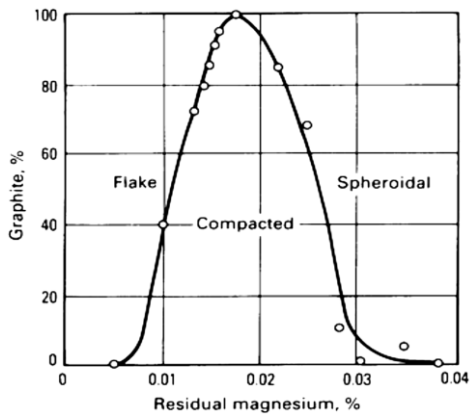
Data 1 dan Data 2 (faktor keterulangan)							
<i>Mg Rest</i> / ketebalan		Ketebalan 5 mm		Ketebalan 15 mm		Ketebalan 30 mm	
		Data 1	Data 2	Data 1	Data 2	Data 1	Data 2
Mg Rest (Mg sisa) 0,017 %	Bentuk grafit	1 & IV	1 & IV	1 & IV	1 & IV	1 & IV	1 & IV
	Distribusi grafit	Tipe A	Tipe A	Tipe A	Tipe A	Tipe A	Tipe A
	Ukuran grafit	4, 5, dan 6	4, 5, dan 6	4 dan 5	4 dan 5	3, 4, dan 5	3, 4, dan 5
	Jumlah CG	237	229	239	275	280	246
	Jumlah SG	358	323	80	98	67	45
	Total jumlah grafit	595	552	319	373	347	291
Persentase CG		40%	41%	75%	74%	81%	85%
Persentase SG		60%	59%	25%	26%	19%	15%
Mg Rest (Mg sisa) 0,02 %	Bentuk grafit	1 & IV	1 & IV	1 & IV	1 & IV	1 & IV	1 & IV
	Distribusi grafit	Tipe A	Tipe A	Tipe A	Tipe A	Tipe A	Tipe A
	Ukuran grafit	4, 5, dan 6	4, 5, dan 6	4 dan 5	4 dan 5	3, 4, dan 5	3, 4, dan 5
	Jumlah CG	178	178	176	239	206	240
	Jumlah SG	326	445	110	158	62	94
	Total jumlah grafit	504	623	286	397	268	334
Persentase CG		35 %	29%	62%	60%	77%	72%
Persentase SG		65%	71%	38%	40%	23%	28%
Mg Rest (Mg sisa) 0,028 %	Bentuk grafit	1 & IV	1 & IV	1 & IV	1 & IV	1 & IV	1 & IV
	Distribusi grafit	Tipe A	Tipe A	Tipe A	Tipe A	Tipe A	Tipe A
	Ukuran grafit	4, 5, dan 6	4, 5, dan 6	4 dan 5	4 dan 5	4 dan 5	4 dan 5
	Jumlah CG	117	116	88	111	112	89
	Jumlah SG	286	308	152	173	113	79
	Total jumlah grafit	403	424	240	284	225	168
Persentase CG		29%	27%	37%	39%	50%	52%
Persentase SG		71%	73%	63%	61%	50%	48%

Berdasarkan tabel 6 dan tabel 7 dapat dilihat bentuk grafit yang dihasilkan pada penelitian ini disemua sampel uji ialah bentuk I (*spheroidal graphite*) dan bentuk IV (*compacted graphite*), akan tetapi persentase *compacted graphite* (CG) dan *spheroidal graphite* (SG) yang terbentuk berbeda-beda, dimana persentase dari CG yang terbentuk dapat dilihat seperti grafik dibawah ini:



Gambar 8 Grafik Persentase *Compacted Graphite* (CG) pada setiap *Mg Rest* dan ketebalan sampel uji

Persentase CG pada grafik diatas, didapat berdasarkan nilai rata-rata dari % CG dari data 1 dan data 2 (faktor keterulangan). Berdasarkan grafik pada gambar 8 dapat dilihat *Mg rest* sangat berpengaruh terhadap pembentukan CG. Pada penelitian ini persentase terbesar terbentuk CG adalah pada *Mg Rest* 0,017, dimana semakin tinggi *Mg Rest* maka semakin kecil persentase CG yang terbentuk melainkan meningkatkan persentase SG. Hal ini didukung dengan referensi dari "Asm Metal Handbook Vol. 15: Casting. hlm 1461" seperti gambar 9 berikut ini[2].



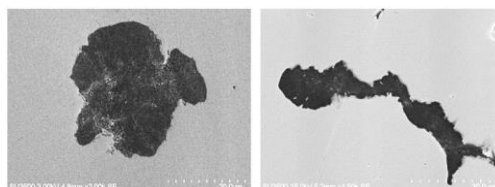
Gambar 9 Pengaruh *Mg Rest* terhadap bentuk grafit yang dihasilkan (ASM Vol 15)

Berdasarkan hasil penelitian ini, disamping *Mg Rest* ketebalan sampel uji juga sangat memberi pengaruh terhadap terbentuknya *Compacted Graphite*, dimana semakin tebal sampel uji maka semakin besar persentase CG yang dihasilkan dengan kata lain semakin tipis sampel uji maka persentase terbentuknya CG akan semakin kecil dan akan memperbanyak persentase terbentuknya SG. Hal ini dipengaruhi oleh adanya laju pendinginan yang berbeda pada ketebalan sampel uji yang berbeda pula. Hubungan antara ketebalan sampel uji dengan laju pendinginan didukung dengan referensi dari Showman.R.E, dkk dengan judul penelitian “*Controlling Nodularity In Thin-Wall Compacted Graphite Iron Castings*” yang menyatakan bahwa “semakin tebal benda coran maka akan semakin lambat laju pendinginan dan semakin tipis benda coran maka semakin cepat laju pendinginan”[8]. Dengan demikian pada sampel uji yang tipis tidak memiliki waktu tunggu yang cukup untuk membentuk *Compacted Graphite* sehingga grafit yang dihasilkan lebih banyak membentuk *Spheroidal graphite*. pengaruh laju pendinginan terhadap pembentukan grafit didukung berdasarkan referensi “*ASM Speciality Handbook, Cast Iron*” yang menyatakan bahwa “laju pendinginan yang tinggi seharusnya dihindari karena akan cenderung terjadi *chilling* pada CGI dan akan memperbanyak jumlah grafit bulat (*spheroidal graphite*) pada bagian yang tipis”[9].

Kemudian berdasarkan tabel 6 dan 7 distribusi grafit yang dihasilkan adalah grafit tipe A, dimana Grafit tipe A merupakan grafit yang diharapkan karena memiliki bentuk yang seragam dengan distribusi tersebar secara acak. Grafit tipe ini terbentuk saat nukleasi pada *temperature* yang tinggi di besi cair, mendorong solidifikasi mendekati *equilibrium graphite eutectic* [5]. Jika dilihat dari ukuran grafit pada masing-masing sampel uji memiliki ukuran yang berbeda- beda. Jika dilihat dari ketebalannya semakin tebal sampel uji maka semakin besar ukuran grafit yang terbentuk Hal tersebut dikarenakan lebih lamanya waktu pembekuan pada sampel uji yang tebal sehingga memberi waktu lebih karbon berdifusi masuk kedalam grafit sehingga grafit lebih besar. Dimana berdasarkan referensi dari *Foseco Ferrous Foundryman’s Handbook* terdapat 8 *reference number* untuk ukuran grafit dimana semakin besar grafit maka *reference number*nya akan semakin kecil seperti yang terlihat pada tabel 7 bagian ukuran grafit.

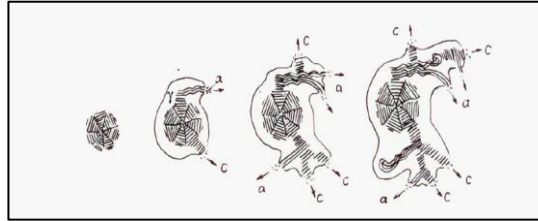
• **Analisis Mekanisme Pembentukan Grafit Yang Dihasilkan**

Berdasarkan hasil pengamatan berupa pengujian SEM didapatkan analisis berupa mekanisme pembentukan *Compacted Graphite* (CG) dimulai dari terbentuknya *Spheroidal Graphite* (SG) terlebih dahulu pada awal proses *Mg Treatment* kemudian dengan adanya *fading time* maka terjadi penurunan tekanan (penurunan energi permukaan) magnesium dan unsur paduan lainnya (RE) pada permukaan grafit yang semula berbentuk bola sehingga terjadi perubahan bentuk (perubahan arah pertumbuhan), yang mana juga disebabkan oleh adanya *actif surface* dan *antispherodizer* pada permukaan grafit sehingga pada grafit dapat bercabang. berikut adalah gambar-gambar hasil penelitian yang menunjukkan bahwa pembentukan *Compacted graphite* terbentuk berawal dari *spheroidal graphite*:



Gambar 10 Gambar yang menunjukkan bahwa pembentukan CG berawal dari SG

Analisis mekanisme pembentukan *Compacted graphite* yang berawal dari *spheroidal graphite* didukung dengan ada referensi dari jurnal oleh Marcin Gorny "Cast Iron: Compacted Graphite"[7], seperti gambar dan penjelasan berikut:

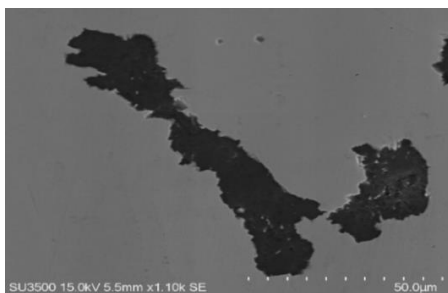


Gambar 11 Mekanisme transformasi perubahan bentuk dari *spheroidal* ke *compacted*[14]

Berdasarkan gambar 11 di atas dapat terlihat pembentukan *Compacted Graphite* berawal dari terbentuknya *spheroidal graphite*, yang mana pada dasarnya cairan yang bersih akan membeku menjadi *spheroidal graphite*[15], kemudian membentuk cabang karena adanya unsur aktif permukaan. Ketika pertumbuhan *Compacted Graphite* ada sejumlah cairan yang bersentuhan dengan tepi grafit, sisi cairan tersebut merupakan sisa dari banyak unsur aktif permukaan, yang mana hal tersebut mengubah arah pertumbuhan antara Axis A dan axis C [16]. Unsur utama aktif permukaan yang menyebabkan perubahan pada arah pertumbuhan adalah oksigen (O) dan sulfur (S), selain itu juga antispheroidizers seperti Ti, Bi, Zr, P, dan N, ciri-cirinya adalah memiliki efek segregasi yang kuat[14]. Menurunkan temperatur liquidus cairan juga menciptakan sisa cairan yang mengakibatkan terbentuknya CGI [17][18][15][19]. Jumlah unsur aktif permukaan yang dibutuhkan untuk mempromotkan pembentukan *lamellar graphite* sangat kecil, sehingga cara umum untuk membuat CGI dan SGI adalah dengan penambahan unsur paduan seperti Mg atau RE yang menetralkan unsur-unsur yang tidak bisa dihindari pada operasi casting pada umumnya[15].

Kemudian berdasarkan hasil pengamatan jumlah grafit yang terbentuk pada tabel 7 dapat dilihat jumlah total grafit yang terbentuk pada perbesaran 100X diketebalan sampel uji 5 mm lebih banyak dari pada ketebalan sampel uji 15 dan 30 mm, dengan kata lain semakin tebal sampel uji maka jumlah grafit yang terbentuk semakin sedikit.

Dengan demikian dilihat dalam perbesaran yang lebih besar menggunakan SEM, terlihat seperti ada penggabungan-penggabungan grafit pada pengamatan yang dilakukan, sehingga peneliti berasumsi bahwa terjadi penggabungan grafit yang saling berdekatan sehingga pada sampel uji yang tebal terdapat jumlah grafit yang lebih sedikit dari pada sampel uji yang tipis dikarenakan pada sampel uji yang tebal memiliki laju pendinginan yang lebih lama sehingga memberi waktu untuk grafit yang berdekatan saling menggabungkan diri dan jika sampel uji tipis otomatis laju pendinginan akan cepat terjadi, sehingga grafit-grafit yang terbentuk tidak memiliki waktu yang banyak untuk bergabung dengan grafit yang ada disekitarnya. Berikut adalah gambar asumsi penggabungan grafit yang berdekatan pada penelitian yang dilakukan:



Gambar 12 pengamatan SEM kemungkinan terjadi penggabungan grafit yang berdekatan

Kemungkinan terjadinya penggabungan grafit yang berdekatan didukung dengan referensi dari jurnal oleh Marcin Gorny "Cast Iron: Compacted Graphite" yang mengatakan bahwa ketika dilihat secara 2D atau 3D (setelah *deep etching*) menunjukkan sebuah "cacing (grafit vermicular)" dapat berhubungan dengan grafit-grafit yang dekat dengan *sel eutektik* karena interaksi partikel grafit dan *dendrit austenite*, beberapa *Graphite Compacted* mungkin tergabung dalam satu butir *austenite*[7].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data yang terkumpul dari hasil penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan untuk menjawab tujuan penelitian, yaitu:

- *Mg Treatment* sangat berpengaruh terhadap pembentukan *compacted graphite cast iron*, ditunjukkan dengan *Mg Rest* (Mg sisa) yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian ini nilai *Mg Rest*

yang terbaik untuk menghasilkan *compacted graphite* adalah pada kadar 0,017%, semakin tinggi kadar *Mg Rest* pembentukan *compacted graphite* semakin sedikit dengan kata lain meningkatkan terbentuknya *spheroidal graphite*. Sampel uji juga sangat berpengaruh terhadap terbentuknya *compacted graphite*. ketebalan sampel uji erat berhubungan dengan laju pendinginan (*cooling rate*), yang mana pada *Mg Rest* yang sama jika sampel uji semakin tipis maka persentase terbentuknya *compacted graphite* akan semakin sedikit dan memperbanyak terbentuknya *spheroidal graphite* dikarenakan pada bagian yang tipis memiliki laju pendinginan yang lebih besar sehingga pada sampel uji yang tipis tidak memiliki waktu tunggu yang cukup untuk membentuk *Compacted Graphite* sehingga graphite yang dihasilkan lebih banyak membentuk *Spheroidal graphite*. Berdasarkan hasil penelitian ini, yang memenuhi spesifikasi *Compacted graphite Iron (CGI)* (menghasilkan $CG \geq 80\%$ & $SG \leq 20\%$, tanpa ada flake graphite) adalah pada variasi *Mg Rest* 0,017 % di ketebalan sampel uji 30 mm.

4.2 Saran

- Dikarenakan pada penelitian ini nilai *Mg Rest* (*Mg sisa*) yang kecil dari 0,017% tidak didapatkan maka peneliti menyarankan untuk penelitian berikutnya mengetahui pengaruh *Mg Rest* (*Mg sisa*) kecil dari 0,017% pada pembentukan *compacted graphite* pada sampel uji yang bervariasi dapat diketahui.
- Untuk penelitian berikutnya disarankan sampel uji yang digunakan berbentuk kerucut sehingga dapat dilihat pengaruh modul di setiap jarak terhadap pembentukan *compacted graphite*, sehingga bisa menghasilkan grafik yang lebih detail dalam proses pengujian.
- Untuk penelitian selanjutnya disarankan bahan *Mg Treatment* yang digunakan adalah magnesium murni dengan metode ladle *Tundish cover*, sehingga tidak ada penambahan unsur lain pada komposisinya selain *Mg Rest* (*Mg sisa*) setelah proses *Mg Treatment*.
- Berdasarkan studi literatur yang didapatkan pengaturan *inoculant* dan laju pendinginan (*cooling rate*) dapat mengontrol terbentuknya grafit nodular ataupun grafit vermicular yang dihasilkan, dengan demikian disarankan untuk penelitian berikutnya dilakukan penelitian mengenai pengaruh *inoculant* dan laju pendinginan (*cooling rate*) terhadap pembentukan *Compacted Graphite Iron (CGI)*.

REFERENSI

- [1] *ASM Metal Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. ASM International Handbook Committee, 2005.
- [2] *ASM Metals Handbook. Vol. 15 "CASTING"*. ASM International Handbook Committee, 1988.
- [3] Competitiveproduction, "Why compacted graphite iron," Diakses dari <https://www.competitiveproduction.com/articles/why-compacted-graphite-iron/>. pada tanggal 11 November 2018.
- [4] Lekakh.S; King.J, "Graphite Nodule Size Distribution in Ductile Iron." University of Science and Technology, Rolla, Missouri, pp. 1–8, 2015.
- [5] J. R. Brown, *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [6] Hasse.Stephan, "Giesserei Lexicon. Schiele & Schön." 1966.
- [7] Górný.Marcin, "Cast Iron: Compacted Graphite," *Encycl. Iron, Steel, Their Alloy.*, pp. 718–734, 2016.
- [8] Showman.R.E.; Aufderheide.R.C, "Controlling Nodularity In Thin-Wall Compacted Graphite Iron Castings." AFS Trans, pp. 112, 823–830, 2004.
- [9] Davis.J.R.; Associates.Davis, Ed., *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*. .
- [10] Soekarjo.Irwan, *Design Eksperiment dengan Metoda Taguchi*, Edisi pert. Yogyakarta, 2009.
- [11] R. Wlodawer, *Directional Solidification of Steel Castings*. Oxford, London, Edinburgh, New York, 2016.
- [12] ISO 16112:2006, "Compacted (vermicular) graphite cast irons—Classification." Geneva, Switzerland, 2006.
- [13] Charoenvilaisiri. S; Stefanescu. D.M; Ruxanda. R; Piwonka. T.S, "Thin wall compacted graphite iron castings," pp. 1113–1130.
- [14] Den.X.; Zhu.P.; Liu.Q, "Structure and formation of vermicular graphite. In The Physical Metallurgy of Cast Iron." Frederiksson, H., Hillert, M., Eds.; Proc Mater Research Society, Stockholm, Sweden, pp. 141–150.
- [15] Double.D.D.; Hellowell.A, "The nucleation and growth of graphite: The modification of cast iron." Acta Metall. Mater, pp. 43(6), 2435–2442.
- [16] Lux.B.; Vendl.A.; Hahn.H., "Über die Ausbildung eutektischer Gefüge in grau erstarrten Gußeisen." Radex-Rundschau, p. (1/2), 30–50, 1980.
- [17] Subramanian.S.V.; Kay.D.A.R.; Purdy.G.R, "Compacted graphite morphology control." AFS Trans., pp. 90, 589–603, 1982.
- [18] Bazdar.M.; Abbasi.H.R.; Yaghtin.A.H.; Rassizadehghani.J, "Effect of sulphur on graphite aspect ratio and tensile properties in compacted graphite irons." J. Mater. Process. Technol, pp. 209(4), 1701–1705, 2009.
- [19] Hrusovsky.J.P.; Wallace.J.F, "Effect of composition on solidification of compacted graphite iron." AFS Trans, pp. 93, 55–86., 1985.