

# PENAMBAHAN MAGNESIUM-FERROSILIKON PADA PROSES PEMBUATAN BESI COR GRAFIT BULAT: EVALUASI TERHADAP PENINGKATAN SIFAT MEKANIK DAN IMPAK

Athanasius P. Bayuseno

Program Magister Teknik Mesin, Pascasarjana Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Soedarto SH, Kampus Tembalang Semarang  
E-Mail:abayuseno@yahoo.com

## Abstrak

*Pembuatan besi cor agar memiliki struktur dengan grafit bulat merupakan salah satu cara memperbaiki sifat mekanik dan keuletan logam tersebut. Logam magnesium (Mg), kalsium (Ca) dan cerium (Ce) merupakan elemen yang banyak digunakan didalam industri pengecoran untuk pembentuk grafit bulat. Pada prinsipnya proses pembuatan besi cor bergrafit bulat, memerlukan bahan dasar besi dengan kandungan belerang yang rendah agar meningkatkan efisiensi proses perlakuan pada pembulatan grafit. Disamping itu proses peleburan besi cor dapat dilakukan dengan berbagai cara antara lain peleburan dengan tanur busur listrik, kopula basa dan kopula asam, dan tanur induksi, serta proses pembentukan besi cor ber-grafit bulat dengan sistim ladle terbuka, sistim penambahan permukaan, sistim penambahan dengan tekanan dan sistim pencemplungan (plugging). Didalam tulisan ini disajikan hasil penelitian tentang proses pembentukan besi cor bergrafit bulat dengan sistim ladle terbuka. Paduan magnesium-ferrosilikon (MgFeSi) dipilih sebagai bahan pembentuk grafit bulat yang diletakan di dasar ladle sebelum besi cair dituangkan kedalam ladle. Hasil penelitian yang dicapai menunjukkan bahwa dengan penambahan MgFeSi didalam leburan besi cor dengan kapasitas 15 kg terjadi peningkatan kekuatan tarik, kekerasan dan impak.*

*Kata kunci : Besi cor; Grafit bulat; MgFeSi dan Kadar belerang*

## 1. PENDAHULUAN

Besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) merupakan logam yang banyak digunakan didalam bidang otomotif dan perpipaan. Dibandingkan dengan besi cor kelabu, besi cor memiliki kekuatan dan keuletan yang lebih baik, mudah dibuat serta harganya yang murah. Besi cor bergrafit bulat juga memiliki keunggulan lain seperti sifat kekerasan dan kekuatan impak yang tinggi.

Salah satu metode pembuatan besi cor bergrafit bulat adalah dengan penambahan unsur magnesium (Mg) yang diambil dari magnesium-ferrosilikon (MgFeSi) ke dalam besi cor dengan metode ladle terbuka (*open ladle*), dimana paduan magnesium (Mg) diletakan di dasar ladle kemudian besi cair dituangkan ke dalamnya. Dengan demikian pembentukan struktur mikro besi cor nodular dapat ditentukan oleh sebagian proses yaitu pembekuan dan sebagian lain oleh pendinginan didaerah austenite maupun austenite ferrit.

Pada tulisan ini penulis menyajikan hasil penelitian tentang analisa seberapa besar pengaruh penambahan magnesium-ferrosilikon (MgFeSi) terhadap kekuatan tarik, kekerasan dan impak pada material besi cor yang dihasilkan serta membandingkannya dengan material besi cor tanpa penambahan magnesium-ferrosilikon (MgFeSi). Proses penambahan ini disesuaikan dengan prosentase berat dari besi cor. Proses pencampuran antara paduan magnesium dan besi cor menggunakan sistim ladle terbuka (*open-ladle*) karena lebih praktis dan ekonomis

Sementara tujuan penelitian ini adalah (i) membuat besi cor dengan grafit bulat sebagai hasil penambahan magnesium-ferrosilikon, (ii) membandingkan kekuatan tarik, kekerasan dan impak pada besi cor sebagai hasil dari perlakuan penambahan magnesium-ferrosilikon (MgFeSi) terhadap besi cor tanpa perlakuan penambahan magnesium-ferrosilikon (MgFeSi).

## 2. DASAR TEORI

### 2.1 Jenis besi cor

Besi cor adalah paduan besi-karbon disamping mengandung unsur tambahan antara lain silikon (Si), mangan (Mn), fosfor (P) dan belerang (S). Struktur mikro dari besi cor terdiri dari ferit atau perlit serta serpihan karbon bebas. Kadar karbon dan silikon didalam besi cor akan mempengaruhi struktur mikro, sementara ukuran serta bentuk dari karbon bebas dan keadaan struktur dasar akan berubah sesuai dengan mutu dan kuantitasnya. Disamping itu, ketebalan dan laju pendinginan mempengaruhi struktur mikronya.

Besi cor dapat digolongkan menjadi enam macam yaitu : besi cor kelabu, besi cor kelas tinggi, besi kelabu paduan, besi cor bergrafit bulat, besi cor yang dapat ditempa dan besi cor cil [1-2].

#### A. Besi cor kelabu (*grey cast iron*)

Besi cor kelabu mempunyai kekuatan tarik kira-kira 100-300 N/mm<sup>2</sup>, dan sifatnya agak getas. Titik cairnya kira-kira 1200°C dan mempunyai mampu cor

yang sangat baik serta murah. Besi cor kelabu adalah besi cor dengan warna patahan kelabu. Besi cor kelabu sangat rendah keuletannya dan harganya murah. Rendahnya keuletan karena adanya serpihan karbon. Besi cor kelabu dapat mempunyai struktur mikro perlitik, feritik dan martensit serta bainit tergantung pada perlakuan panasnya. Pada besi cor kelabu dengan kadar silikon yang tinggi (>2 %), Fe<sub>3</sub>C tidak terbentuk karena kadar silikon yang tinggi mudah membentuk grafit [3].

#### B. Besi cor kelas tinggi

Besi cor kelas tinggi mengandung lebih sedikit karbon (C) dan silikon (Si), selain itu ukuran grafit bebasnya agak kecil dibandingkan dengan besi cor kelabu. Kekuatan tariknya umumnya lebih tinggi kira-kira 300-500 N/mm<sup>2</sup>. Pembuatan besi cor kelas tinggi agak susah dibanding pembuatan besi cor kelabu.

#### C. Besi cor kelabu paduan

Besi cor kelabu paduan mengandung unsur-unsur paduan dan grafit, serta mempunyai struktur mikro yang stabil sehingga sifat-sifatnya lebih baik. Unsur-unsur yang ditambahkan adalah krom, nikel, molibdenum, vanadium, titanium dan sebagainya, sehingga ketahanan panas, ketahanan aus, ketahanan korosi dan mampu mesin dari besi cor kelabu paduan baik sekali.

#### D. Besi cor mampu tempa (*malleable cast iron*)

Besi cor mampu tempa terbuat dari besi cor putih, yang dilunakkan di dalam sebuah tanur dalam waktu yang lama. Struktur sementit dari besi cor putih akan berubah menjadi perlit atau ferit dan karbon yang tertemper mengendap. Besi cor mampu tempa sangat baik keuletannya dan perpanjangannya dibandingkan dengan besi cor kelabu, tetapi harganya mahal karena proses pelunakan, lagi pula tidak cocok untuk coran yang tipis dan kecil karena sebelum proses pelunakan keuletannya kurang.

#### E. Besi cor grafit bulat (*ductile iron*)

Besi cor grafit bulat dibuat dengan jalan mencampurkan magnesium (Mg), kalsium (Ca) atau cerium (Ce) ke dalam cairan logam sehingga grafit akan mengendap. Besi cor bergrafit bulat ini mempunyai kekuatan, keuletan, ketahanan aus dan ketahanan panas yang baik sekali dibandingkan dengan besi cor kelabu.

#### F. Besi cor cil

Besi cor cil memiliki permukaan seperti besi cor putih dimana bagian dalamnya memiliki struktur mikro dengan endapan grafit. Besi cor jenis ini mempunyai ketahanan aus yang baik sementara bagian dalamnya mempunyai keuletan yang baik pula, sehingga dikembangkan sebagai bahan tahan aus.

## 2.2 Pembuatan besi cor

Besi cor merupakan salah satu logam yang banyak digunakan dalam industri pengecoran. Hal ini dikarenakan ketersediaannya dalam alam yang melimpah dibandingkan logam lainnya. Besi cor memiliki sifat mampu mesin yang baik dalam proses pembentukan maupun permesinan. Secara umum peleburan besi cor menggunakan kupola, karena mempunyai beberapa keuntungan, diantaranya [4] :

- Konstruksinya sederhana dan operasinya mudah.
- Memberikan kemungkinan peleburan kontinu.
- Memungkinkan untuk mendapatkan laju peleburan yang besar.
- Biaya yang rendah untuk alat-alat dan peleburan.

Kupola dibuat dari silinder baja yang tegak, dilapisi oleh bata tahan api. Bahan baku logam dan kokas diisikan dari pintu pengisi. Udara ditiupkan melalui tuyer, kokas terbakar dan logam mulai mencair. Logam cair dan terak dikeluarkan melalui lubang-lubang keluar pada dasar kupola. Jadi dalam kupola logam dipanaskan langsung oleh panas pembakaran dari kokas, oleh karena itu kupola mempunyai efisiensi yang tinggi [5].

## 2.3 Komposisi besi cor bergrafit bulat

Unsur utama pada besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) pada umumnya terdiri dari karbon (C), silikon (Si), sulfur (S), fosfor (P) dan mangan (Mn). Komposisi besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) umumnya terdiri 3,65 % C, 2,40 % Si, 0,01 % S, 0,02 % P dan 0,04 % Mn [6].

Ada beberapa faktor-faktor utama yang mengendalikan pembentukan struktur mikro maupun sifat-sifat dari besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) yaitu [6-7]:

- a. Proses peleburan logam (*molten metal*)
- b. Komposisi kimia
- c. Laju solidifikasi dan laju pendinginan.

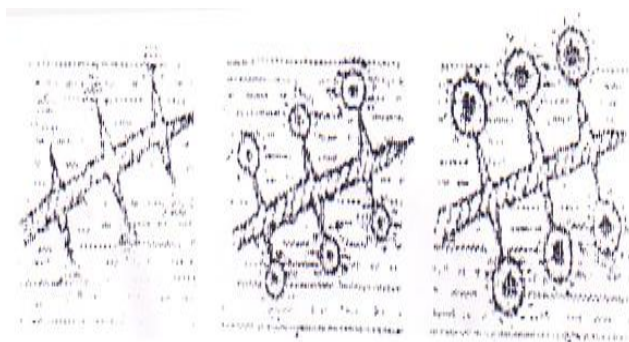
Keberadaan elemen-elemen kimia juga memiliki pengaruh yang khusus pada struktur-mikro hasil solidifikasi (*grafit morphology*) atau struktur mikro matrik logam. Elemen-elemen yang ditemukan didalam *ductile iron* umumnya dikelompokkan ke dalam kelas-kelas tertentu berdasarkan pengaruhnya terhadap struktur mikro. Elemen-elemen tersebut adalah [6]:

- Elemen primer : C, Si, Mn, S, P.
- Elemen speroidal : Mg, Cr, Ca.
- Elemen paduan : Cu, Ni, Mo.
- Elemen residu dan khusus : Al, Bi, Pb, Sb.
- Elemen pearlite dan karbida : As, B, Cr, Sn, V.
- Gas gas : H, N,

## 2.4 Pembentukan grafit bulat

Pembentukan grafit bulat umumnya berdasarkan pada proses keadaan padat (*solid state*), dimana grafit tumbuh pada pertama kali pada kulit austenit (*austenite*

shell) disertai dengan dekomposisi karbida besi (Morrogh, 1947) [8-9]. Dunphy (1952) dan Pellini (1992) menyatakan bahwa bentuk nodular terbentuk pada lingkungan dendrit yang serta merta terbentuk sebelum dimulainya reaksi eutektik (Gambar 2.1) [9]. Daerah setempat dari leburan super jenuh akan menutupi lengan dendrit pada daerah cairan setempat dimana nodular terbentuk. Lebih lanjut pertumbuhan dari nodular mengambil tempat dengan dekomposisi sementit, dan akan bertambah disekeliling nodul. Meskipun mekanisme tersebut memberi sumbangan pada pertumbuhan grafit bulat, namun pengaruh itu sangat terbatas. Hal ini ditunjukkan bahwa grafit bulat dapat dihasilkan dari larutan padat atau dari dekomposisi karbida. Menurut Loper dan Heine, pada besi hiper dan hipoeutektik, grafit bulat terbentuk pada temperatur 1320°C – 1350°C (2408 °F – 2462 °F) [9].



Gambar 2.1. Pembentukan nodul menurut Dunphy [3].

#### A. Teori pertumbuhan pada inti khusus

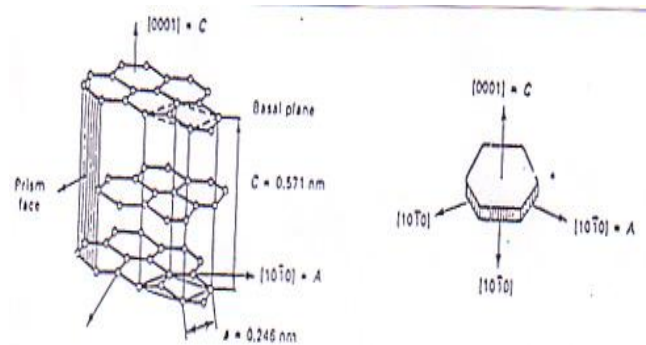
Menurut De Sy (1953) dan Vits (1953), grafit bulat tumbuh pada inti dengan bentuk khusus dalam struktur kristalografi [9]. Maka inklusi yang mempunyai kisi-kisi kubik seperti MgS, Mg<sub>2</sub>Si, dan MgO, mengembangkan pembentukan grafit bulat. Inklusi dengan bentuk heksagonal atau bentuk kisi yang lain seperti SiO<sub>2</sub>, SiO dan SiC, mengembangkan solidifikasi grafit serpih. Tentu saja terjadinya grafit bulat pada *vacuum-melted* paduan-paduan Fe-C-Si, tanpa perlakuan dengan Mg dan Ce, serta tidak adanya SiO<sub>2</sub> dalam leburan. Oleh karena itu, dapat ditafsirkan sebagai dukungan argumentasi bagi teori ini.

#### B. Teori pertumbuhan pada gelembung-gelembung gas

Beberapa peneliti mendalilkan bahwa, agar grafit bulat dapat tumbuh, harus ada pertama kali ruangan dengan permukaan bebas. Pengintian grafit dibagian luar ruangan ini dan pertumbuhan terjadi dibagian dalam. Ruangan gelembung-gelembung gas dihasilkan dari tekanan uap tinggi atau unsur-unsur seperti Mg dan Zn. Gas-gas lain seperti hidrogen dan oksigen kemungkinan juga sebagai tempat bagi pertumbuhan grafit bulat. Selanjutnya Karsay (1976) mengusulkan mekanisme berikut, (Gambar 2.2) dimana gas yang bertanggung jawab untuk pembentukan grafit

bulat adalah CO dengan beberapa persyaratan antara lain:

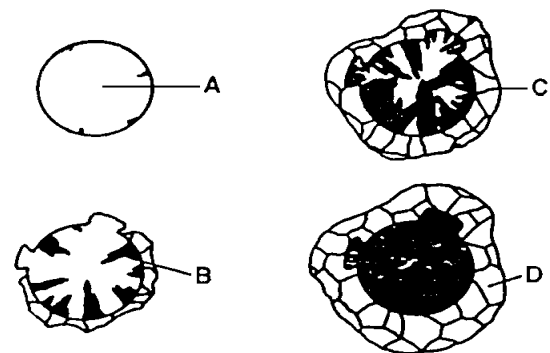
- Pada temperatur mendekati temperatur solidifikasi sebagian besar oksigen terlarut dalam presipitasi besi
- Beberapa reaksi inklusi tersebut dengan karbon ditunjukkan dengan reaksi :  
 $SiO_2 + 2C \longrightarrow Si + 2CO$
- Pengintian grafit pada permukaan gelembung-gelembung gas CO
- Kristalisasi individual tumbuh pada arah [0001] (arah C), sedangkan grafit serpih tumbuh pada arah [1010] (arah A)



Gambar 2.2 Arah pertumbuhan kristal [3]

- Pertumbuhan berlanjut sampai gelembung-gelembung dipenuhi dengan grafit.

Pada dasarnya teori ini berpendapat bahwa grafit bulat tumbuh pada gelembung-gelembung gas (Gambar 2.3). Apabila gelembung-gelembung gas gagal terbentuk, hasilnya adalah grafit serpih, sementara bila gelembung-gelembung gas yang terbentuk hasilnya berupa grafit bulat. Keterangan teori ini menyandarkan pada dua konsep yang tidak dapat diterima secara luas. Hal ini dikarenakan pertama, asumsi keberadaan gelembung-gelembung gas pada besi cair tidak berdasarkan bukti eksperimen. Kedua, teori pembentukan polikristal grafit yang secara umum diterima adalah paling sedikit grafit serpih tumbuh pada besi cor sebagai kristal tunggal.

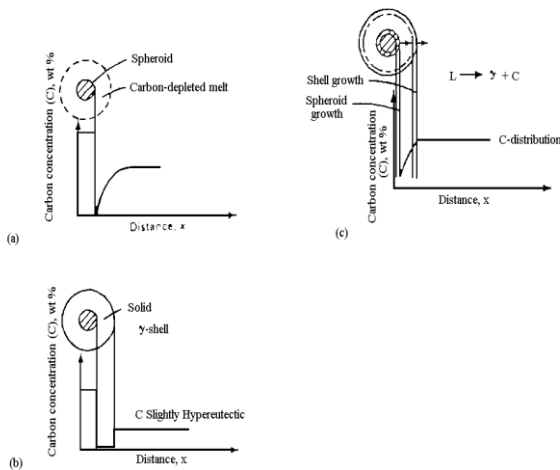


Gambar 2.3 Pertumbuhan grafit bulat berdasarkan teori gelembung gas (A) Gas, (B) grafit kristal tunggal (C) leburan (D) besi padat [3]

### C. Pertumbuhan grafit melalui kulit austenit

Mekanisme pertumbuhan grafit melalui kulit austenit dimulai dengan nukleasi dan grafit tumbuh pada cairan, dilanjutkan dengan pembungkusan (*encapsulation*) grafit bulat pada kulit austenit (sampul) seperti terlihat pada gambar 2.4.

Nukleasi grafit dan pertumbuhannya menghabiskan karbon leburan di sekitar grafit, ini menciptakan kondisi-kondisi untuk nukleasi austenit dan pertumbuhan di sekitar grafit bulat. Pertama kali kulit austenit dibentuk, selanjutnya pertumbuhan grafit dapat terjadi dengan difusi padat karbon dari cairan melalui austenit.



Gambar 2.4 Pertumbuhan isothermal grafit bulat pada kulit austenite (a) Pertumbuhan grafit bulat saat kontak dengan leburan, (b)Pembungkusan dengan austenite (c) Pertumbuhan grafit bulat dalam kulit austenite.

Berdasarkan penelitian, terlihat bahwa mekanisme solidifikasi besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) sangat rumit dan dendrit-dendrit austenit berperan penting pada solidifikasi eutektik. Rangkaian proses solidifikasi besi cor dapat diperlihatkan pada gambar 2.5. Pada temperatur eutektik, dendrit-dendrit austenit dan grafit bulat membentuk inti secara bebas pada cairan.



Gambar 2.5 Skematik pertumbuhan austenit-grafit bulat eutektik [3]

Batasan pertumbuhan grafit bulat terjadi pada kontak dengan cairan. Pembungkusan (*encapsulation*) grafit pada austenit dapat terjadi sebelum atau segera setelah terjadi kontak antara grafit dengan dendrit-dendrit

austenit. Selanjutnya pertumbuhan grafit terjadi dengan difusi karbon melalui kulit austenit.

## 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Bahan baku pengecoran

Proses peleburan logam yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan kupola. Komposisi besi cor nodular umumnya terdiri dari C : 3,65 %; Si : 2,40 %; S : 0,01 %; P : 0,02 %; Mn : 0,04 %. Sedangkan bahan baku yang digunakan terdiri dari : *pig iron*, sekrap baja, sekrap cor. Pada pengisian kupola komposisi muatan yang dipakai adalah :

- Sekrap baja : 50 Kg
- Sekrap cor : 50 Kg
- Besi kasar (*Pig iron*) : 40 Kg
- Kokas : 10 Kg
- Ferrosilikon : 0,5 Kg
- Gamping : 3 Kg

Selanjutnya bahan yang diperlukan dalam pembuatan besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) adalah leburan besi dari hasil peleburan dengan kupola kemudian ditambah dengan magnesium-ferrosilikon (MgFeSi) dimana komposisinya adalah : 9 % Mg, 45 % Si, 1,5 % Ca, balance Fe. Sedangkan variasi MgFeSi yang ditambahkan pada leburan besi dalam ladle berisi besi cor dengan besar 15 kg adalah (i) 0 gram MgFeSi atau 0 % dari berat besi cor dalam ladle, (ii) 100 gram MgFeSi atau 0,67 % dari berat besi cor dalam ladle (dalam 100 gram MgFeSi mengandung kadar Mg murni sebesar 0,06 %), (iii) 150 gram MgFeSi atau 1 % dari berat besi cor dalam ladle (dalam 150 gram MgFeSi mengandung kadar Mg murni sebesar 0,09 %).

Hasil peleburan besi cor kemudian dilakukan pengujian komposisi kimia pada Unit Pelayanan Teknis (UPT) dan Laboratorium Logam Ceper Klaten, dengan alat uji Polivac E2000.

### 3.2 Pengamatan struktur mikro

Besi cor hasil peleburan selanjutnya dilakukan pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik. Untuk melakukan pengamatan, maka dilakukan proses pemotongan (*Sectioning*) untuk mengambil sejumlah kecil material dari material induk, dilanjutkan dengan coarse grinding yang bertujuan untuk menghilangkan kerusakan-kerusakan yang ditimbulkan pada proses *sectioning* dan menghasilkan permukaan yang rata. Tahap berikutnya yaitu mounting dengan membuat cetakan dari pipa PVC dengan memotong pipa dengan panjang secukupnya. Kemudian bagian bawah dari pipa dipasang lak ban. Tahap akhir adalah *Fine grinding* dengan *abrasive paper* : 400, 800, 1000 dan 1500; dan *polishing* dilakukan dengan autosol pada kain beludru yang diputar pada mesin polish, setelah itu dilanjutkan pada kain yang bersih.

### 3.3 Pengujian sifat mekanik

Sifat mekanik besi cor hasil peleburan tanpa dan penambahan magnesium-ferrosilikon dilakukan

dengan serangkaian pengujian antara lain kekuatan tarik dengan *Universal Tensile Testing*, kekerasan dengan *EMCO Hardness Tester*, dan kekuatan impak. Material uji untuk uji impak yaitu besi cor tanpa perlakuan dan penambahan MgFeSi sebesar 100 gram dan 150 gram, selanjutnya dilakukan pengefraisan sehingga didapatkan dimensi standar pengujian sesuai ASTM A 370.

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Komposisi kimia

Hasil pengujian komposisi dengan penambahan aditif disajikan dalam Tabel 4.1. Dengan penambahan MgFeSi sebesar 100 gram dengan kandungan Mg 0,06 % dan 150 gram dengan kandungan Mg 0,09 %, kandungan magnesium (Mg) setelah perlakuan terjadi penurunan sebesar 0,016 % dan 0,025 %. Hal ini dapat disebabkan oleh kandungan sulfur (S) dalam leburan besi cor, dimana magnesium (Mg) beraksi dengan sulfur (S) membentuk magnesium sulfida (MgS) yang terapung sebagai slag. Selain itu magnesium (Mg) yang memiliki titik didih 1107°C mudah menguap bila dimasukkan dalam leburan besi cor (1300°C), sehingga dapat mengurangi efektifitas magnesium (Mg) sebagai unsur pembulat grafit.

Tabel 4.1 Komposisi hasil peleburan besi cor

% berat	Penambahan berat MgFeSi ke dalam ladle berisi leburan besi cor 15 kg		
	0 gram (0 %)	100 gram (0,67 %)	150 gram (0,09 %)
Fe	93,84	93,91	93,02
C	3,10	3,23	3,56
Si	1,64	1,59	2,13
Mn	0,248	0,193	0,174
P	0,196	0,081	0,124
S	0,082	0,070	0,056
Cr	0,094	0,097	0,097
Mo	0,000	0,000	0,000
Ni	0,105	0,082	0,085
Al	0,006	0,006	0,010
B	0,000	0,000	0,000
Co	0,030	0,031	0,032
Cu	0,053	0,061	0,081
Mg	0,000	0,016	0,025
Nb	0,042	0,045	0,042
Pb	0,0086	0,0123	0,0119
Sn	0,023	0,021	0,021
Ti	0,109	0,113	0,115
V	0,149	0,156	0,149
W	0,076	0,082	0,073

Berdasarkan referensi (AFS, 1992) [9] dimana kadar magnesium (Mg) yang terdapat pada besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) adalah antara 0,020 % - 0,08 %. Dan berdasarkan hasil penelitian dengan penambahan 100 gram dan 150 gram MgFeSi

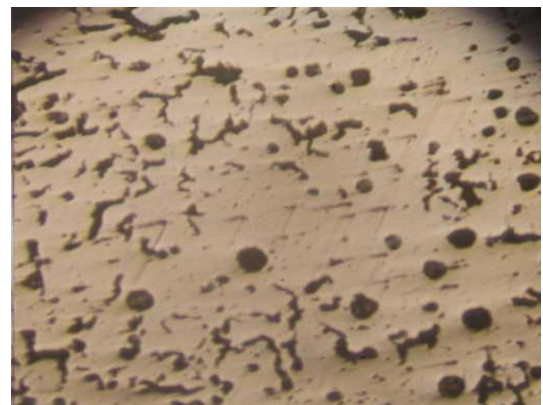
menghasilkan persentase sisa magnesium sebesar 0,016 % dan 0,025 % pada ladle dengan kapasitas 15 kg.

Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa persentase kadar magnesium (Mg) setelah perlakuan MgFeSi hasil penelitian untuk penambahan MgFeSi sebesar 100 gram tidak mencapai kadar kandungan yang dianjurkan untuk besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) menurut standar AFS. Kadar kandungan magnesium (Mg) setelah perlakuan yang tidak berada pada batasan kadar yang dianjurkan ini berpengaruh terhadap struktur grafit bulat yang dihasilkan, dimana dimungkinkan terbentuknya grafit *vermicular* (grafit bulat dengan grafit serpih disekitarnya) yang terbentuk akibat kurangnya unsur pembulat grafit, yang dalam penelitian ini adalah magnesium (Mg).

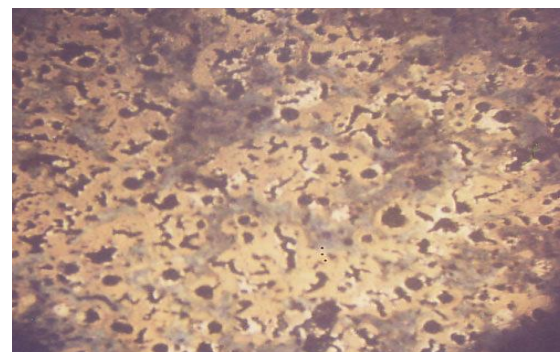
Sedangkan untuk penambahan MgFeSi sebesar 150 gram, kadar kandungan magnesium (Mg) setelah perlakuan berada pada kadar yang dianjurkan untuk kadar magnesium (Mg) yang terdapat dalam besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) menurut standar AFS. Dengan tercapainya kadar kandungan magnesium (Mg) setelah perlakuan, diharapkan terbentuknya grafit bulat (*nodular*).

### 4.2 Pengujian Mikrografi

Struktur mikro yang terbentuk selama peleburan dapat disajikan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Struktur mikro besi cor dengan penambahan 100 gram MgFeSi, perbesaran 100x tanpa etsa

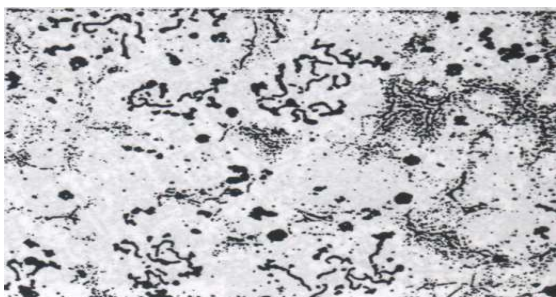


Gambar 4.2 Struktur mikro besi cor dengan penambahan MgFeSi 100 gram, perbesaran 100x, etsa nital.



Pada gambar 4.2, terlihat bahwa grafit yang terbentuk dengan penambahan MgFeSi 100 gram pada leburan dengan sistim ladle terbuka adalah campuran grafit serpih (*flake*) dengan grafit bulat (*spheroid*). Bentuk grafit ini digolongkan ke dalam bentuk III (standar ASTM) yaitu disebut grafit *vermicular*, dimana grafit yang terbentuk adalah gabungan grafit serpih dengan grafit bulat yang menunjukkan kekurangan unsur pembulat yaitu magnesium (Mg). Ukuran grafit maksimum 3 mm (pembesaran 100 kali) sehingga secara umum ukuran grafit termasuk kelas 7 (standar ASTM). Sedangkan jumlah grafit bulat (nodul) sesuai standar ASTM adalah 25 nodul/mm<sup>2</sup>.

Pada gambar 4.3 terlihat struktur ferit (yang terang) dan perlit (yang gelap), dengan ferit yang dominan. Bentuk struktur mikrografi pada gambar 4.2 mirip dengan grafit D-5S dengan kadar magnesium (Mg) 0,025 % dimana matrik struktur yang berada disekitar grafit bulat mempunyai matrik berbentuk perlit dengan orientasi sembarang.



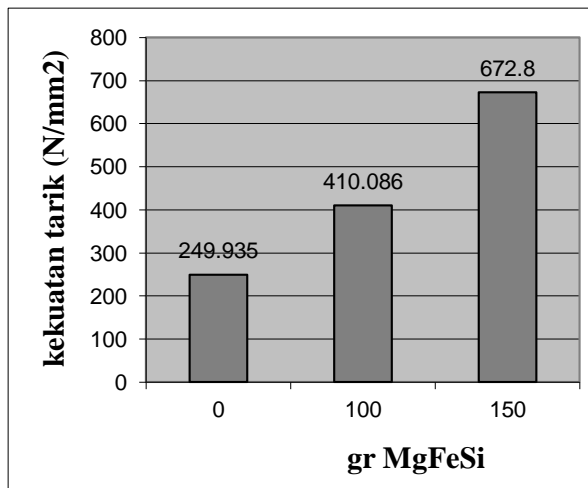
Gambar 4.3 Grafit D-5S dengan 0,025 % Mg [9].

Selanjutnya dengan penambahan 150 gram MgFeSi maka diperoleh grafit bulat (*spheroid*) penuh, sehingga dilihat dari struktur bulat yang dihasilkannya digolongkan ke dalam bentuk I (standar ASTM). Tampak distribusi grafit bulat yang seragam. Dengan ukuran relatif sama, walaupun ada beberapa ukurannya lebih besar atau kecil. Bulatan grafit yang lebih besar disebabkan pembekuannya lebih lambat, sehingga kesempatan untuk mengembangkan grafit lebih banyak. Sebaliknya untuk bulatan yang lebih kecil, terjadi karena pembekuannya yang lebih cepat, sehingga kesempatan untuk pengembangan grafit lebih sedikit. Bentuk grafit ini menunjukkan bahwa telah cukup unsur pembulat (Mg) yang diberikan. Ukuran grafit maksimal 5 mm (pembesaran 100 kali) dan termasuk kedalam kelas 5 (standar ASTM). Dan berdasarkan jumlah nodulnya, struktur mikro besi cor grafit bulat ini termasuk kelompok dengan jumlah nodul 100 nodul/mm<sup>2</sup> dengan pembesaran 100x, serta struktur mikronya memiliki kemiripan dengan struktur mikro *ductile iron tube*.

#### 4.3 Pengaruh Penambahan MgFeSi Terhadap Kekuatan Tarik Maksimum

Berdasarkan data yang didapat dari pengujian tarik maka diperoleh suatu hubungan antara

penambahan MgFeSi dengan kekuatan tarik maksimum, yang dapat dilihat pada gambar 4.4. Dengan penambahan MgFeSi sebesar 0 gram, 100 gram dan 150 gram terjadi peningkatan kekuatan tarik yang cukup signifikan yaitu secara berturut-turut sebesar 249,935 N/mm<sup>2</sup>, 410,086 N/mm<sup>2</sup> dan 672,800 N/mm<sup>2</sup> serta nilai perpanjangannya (*elongation*) adalah sebesar 5,044 %, 5,542 %, dan 8,946 %.



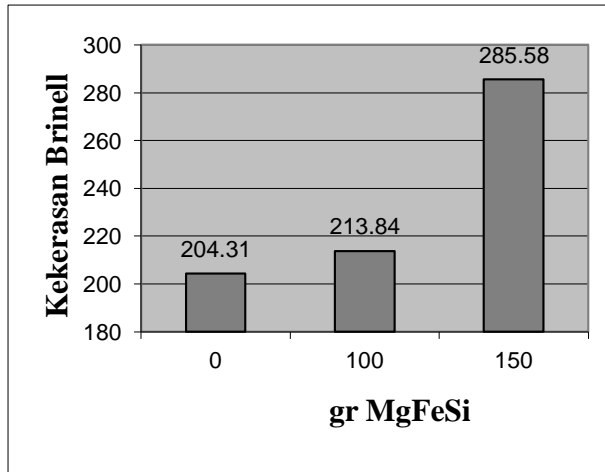
Gambar 4.4 Grafik hubungan antara penambahan MgFeSi dengan kekuatan tarik maksimum

Ini menunjukkan bahwa semakin meningkatnya berat kandungan magnesium (Mg) dalam leburan besi cor maka kekuatan tarik maksimumnya meningkat. Hal tersebut disebabkan pada grafit serpih (*flake*), serpih-serpih grafit akan mengalami pemusatan tegangan pada ujung-ujungnya bila mendapatkan gaya yang bekerja tegak lurus arah serpih, sedangkan pada grafit bulat tidak mengalami hal tersebut.

Faktor lain yang mendukung peningkatan kekuatan tarik besi cor bergrafit bulat adalah dengan bertambahnya persentase kadar silikon (Si), karena dengan bertambahnya persentase silikon (Si) menyebabkan pengintian (*nucleation*) berlangsung secara cepat. Akibat adanya *nucleation* ini maka pertumbuhan butir tidak sempat berkembang dengan bebas sehingga butir atau struktur mikro menjadi lebih kecil. Dan juga selain silikon (Si), unsur magnesium (Mg) merupakan menyebabkan kebulatan dari nodul.

#### 4.3 Pengaruh Penambahan MgFeSi Terhadap Kekerasan Brinell

Didalam gambar 4.5 terlihat bahwa dengan penambahan 0 gram, 100 gram dan 150 gram MgFeSi pada leburan besi cor akan meningkatkan kekerasan material yang dihasilkan, yaitu kekerasan Brinell sebesar 213,84 pada penambahan MgFeSi sebesar 100 gram atau terjadi peningkatan kekerasan sebesar 4,66 % dibandingkan dengan kekerasan material besi cor tanpa penambahan MgFeSi yang nilai kekerasannya sebesar 204,31.

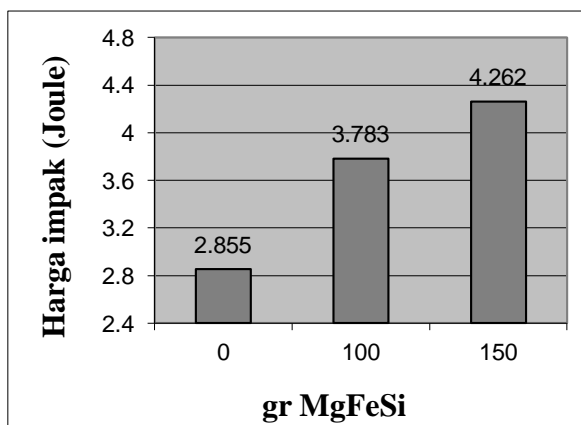


Gambar 4.5 Grafik hubungan penambahan MgFeSi dengan kekerasan Brinell

Dengan penambahan MgFeSi sebesar 150 nilai kekerasan Brinell-nya sebesar 285,58 atau terjadi peningkatan kekerasan sebesar 39,78 % dibandingkan dengan besi cor tanpa penambahan MgFeSi. Peningkatan kekerasan ini juga dimungkinkan dengan adanya penambahan kandungan silikon (Si), karena silikon menyebabkan terjadinya penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*) pada fase ferit.

#### 4.4 Pengaruh Penambahan MgFeSi dengan Harga Impak (HI)

Hasil pengujian impak dapat diperlihatkan dalam gambar 4.6; terlihat bahwa terjadi peningkatan harga impak (HI) seiring dengan meningkatnya penambahan MgFeSi ke dalam leburan besi cor. Dengan penambahan MgFeSi sebesar 0 gram, 100 gram dan 150 gram, harga impak yang terjadi berturut-turut yaitu sebesar 2,855 Joule, 3,783 Joule dan 4,262 Joule.



Gambar 4.6 Grafik hubungan antara penambahan MgFeSi dengan harga impak (HI)

Kemampuan impak besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) sangat dipengaruhi oleh matrik struktur mikro yang terjadi. Matrik ferit mempunyai kekuatan impak lebih tinggi dibandingkan dengan matrik perlit [4,9]

Kemampuan impak besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) juga dipengaruhi oleh kebulatan (*nodularity*) dan jumlah nodul. Dengan semakin bulatnya grafit yang terbentuk dan meningkatnya jumlah nodul, kemampuan impak akan lebih baik.

Komposisi kimia pun mempengaruhi kemampuan impak besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*). Unsur yang mempengaruhi kemampuan impak diantaranya karbon (C) dan silikon (Si). Indikator pada keuletan besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) meningkat dengan menurunnya kandungan karbon (C), normalnya dibutuhkan level kandungan karbon (C) sekitar 3,2 %. Silikon (Si) memiliki kemampuan pembentuk grafit, sehingga pada kandungan silikon (Si) yang rendah cenderung membentuk karbida, sehingga mengurangi kemampuan impak. Kadar silikon menentukan beberapa bagian dari karbon (C) terikat dengan besi dan beberapa bagian berbentuk grafit (atau karbon bebas) setelah tercapai keadaan seimbang. Kelebihan silikon (Si) membentuk ikatan yang keras dengan besi, sehingga dapat dikatakan bahwa silikon (Si) diatas 3,25 % akan meningkatkan kekerasan, yang berarti akan mengurangi kekuatan impak. Penambahan unsur silikon (Si) pada batas tertentu diharapkan dapat meningkatkan kemampuan impak, karena silikon (Si) dapat menaikkan jumlah dan kebulatan (*nodularity*). Dibutuhkan level kandungan silikon (Si) akhir sekitar 2 %.

## 5 KESIMPULAN

Dari hasil penelitian pengaruh penambahan magnesium-ferrosikon (MgFeSi) pada proses pembuatan besi cor bergrafit bulat (*ductile iron*) terhadap kekuatan tarik, kekerasan dan impak dihasilkan kesimpulan sebagai berikut:

- Penambahan 150 gram MgFeSi (0,09 % Mg) pada ladell terbuka dengan kapasitas 15 kg besi cor cair menghasilkan bentuk grafit bulat.
- Penambahan kadar magnesium paduan dalam leburan logam menurunkan kadar sulfur setelah perlakuan, dengan penurunan terbesar terjadi pada penambahan MgFeSi 150 gram (0,09 % Mg) yaitu sebesar 31,71 % dibandingkan dengan tanpa penambahan MgFeSi.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Ir. Sulistyio MT dkk dan Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin-FT-UNDIP yang telah membantu dalam pengumpulan data.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] \_\_\_\_\_ ASM Handbook, Vol. 1, Properties and Selection Iron, Steel and High Performance Alloys, USA.
- [2] Bawa, H.S. 1986, *Material and Metalurgy*, Mc Graw-Hill Publishing Co. Ltd, New Delhi.
- [3] van de Velde, C, 1999, *Development of Theories on Graphite Formation in Ductile Cast Iron*. [http://members.lyncos.nl/cvdv/partune.htm/15 Jan. 2004](http://members.lyncos.nl/cvdv/partune.htm/15%20Jan.%202004).
- [4] Chijjiwa, K, Tata Surdia, 1980, *Teknik Pengecoran Logam*, Pradnya Paramita, Jakarta.
- [5] Flinn, R.A, 1963, *Fundamental of Metal Casting*, Addison Wesley Publishing Co. Inc., USA.
- [6] Heine, R. W, Carl R. L, Phillip C. R, 1976, *Principles of Metal Casting*, Mc Graw-Hill Publishing Co.LTD, New Delhi.
- [7] Lyman T, *Metals Handbook: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, Vol. 7* 8<sup>th</sup> edition, ASM, Ohio.
- [8] Petty, E.R., 1970, *Physical Metallurgy of Engineering Materials*, George Allen and Unwin LTD, London.
- [9] Stefanescu, D. M. *Theory of Solidification and Graphite Growth in Ductile Iron*. In: Ductile Iron Handbook, AFS, 1992.